

N° ordre...../FHC/UMBB/2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M'hamed Bougara Boumerdes



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Thèse de Doctorat

Présentée par

Mme BENRAHOU Fatma Zohra

Filière : Génie des procédés

Option : Ergonomie des process et environnement

**Développement d'un outil d'aide à la décision pour la
logistique inverse : cas des huiles usagées en Algérie**

Devant le jury composé de :

M. HAMADA	Boudjema	Professeur	UMBB	Président
M. KERBACHI	Rabah	Professeur	ENP	Examineur
M. ABDESSEMED	Djamel	Professeur	USTHB	Examineur
M.BENDJEGHABA	Omar	MCA	UMBB	Examineur
M. DERRIDJ	Arezki	Professeur	UMMTO	Examineur
M. TAIRI	Abdelaziz	Professeur	UMBB	Directeur de thèse

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

J'adresse mes remerciements tout d'abord à mon directeur de thèse Mr Tairi Abdelaziz, Professeur à l'université M'Hamed Bougara. Je lui suis reconnaissante pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de la réalisation de ce travail, et j'ai particulièrement apprécié les discussions scientifiques enrichissantes avec lui. Je remercie également Mr *Simplice Dossou-Gbété*, Maître de conférences à l'Université de Pau et des pays de L'Adour (UPPA) pour sa participation à l'encadrement de cette thèse ainsi que Madame Alice Yalaoui, Professeur des universités à l'Université de Technologie de Troyes pour son appui et ses encouragements lors du démarrage des travaux de thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à l'ensemble de mon jury de thèse :

- M. HAMADA Boudjema, Président du jury
- M. KERBACHI Rabah, Examineur
- M. ABDESSEMED Djamel, Examineur
- M. *BENDJEGHABA* Omar, Examineur
- M DERRIDJ Arezki, Examineur
- M. TAIRI Abdelaziz, Directeur de thèse

Je remercie ma collègue Mme Younsi Ferroudja, Maître de conférences à l'université M'Hamed Bougara pour son aide précieuse et ses conseils, ainsi que Mme Briki Meryem, Maître de conférences à l'université M'Hamed Bougara pour son aide et sa générosité.

Mes remerciements à M. Ben Idir Salah enseignant à la faculté des Sciences Economiques, Commerciales et des Sciences de Gestion, sans son aide, je n'aurai jamais pu atteindre la totalité de mes objectifs.

Je tiens à remercier M. Younsi Karim, Maître de conférences à l'université M'Hamed Bougara. Ses conseils précieux m'ont permis d'avancer et de résoudre un nombre important de problèmes rencontrés.

Mes remerciements à Mme Ysbaa Saadia, vice doyenne chargée de la Poste Graduation, de la recherche scientifique

J'adresse aussi mes remerciements au professeur Boulif Menouar, Mr Bendjeghaba Omar et Mr Benhalla Abdelhay pour leurs orientations.

Je remercie Mr Saoud Abdesselam, chef de département génie des procédés chimiques et pharmaceutiques pour son soutien et ses encouragements.

Je souhaite remercier Mr Nait, chef de département lubrifiant pneumatiques de la direction NAFTAL et Mr Zaouani Zoubir enseignant à la faculté des sciences de l'ingénieur.

Je remercie mon mari pour son soutien moral, ses encouragements, sa patience et surtout pour sa disponibilité lors de mes déplacements.

Je tiens également à remercier mon frère Mohamed Ali pour sa disponibilité et son aide précieuse dans le domaine informatique, ainsi que ma sœur Lamia pour ses conseils et son soutien moral.

Je remercie ma collègue et amie Kihel Nafika pour son soutien et ses encouragements, ainsi que tous mes collègues de travail en particulier Merchichi Nassima, sans oublier les ingénieurs de laboratoire, les assistantes et les agents.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réussite et à l'aboutissement de cette thèse.

A la mémoire de mon père et de mes grands parents

A ma mère

Mon mari

Mes enfants

Ma sœur Lamia, son mari et sa petite fille

Mon frère Mohamed Ali, sa femme et ses enfants

Mes beaux parents

Meissoun son mari et ses enfants

Fouzia son mari et ses enfants

Ilhem son mari et ses enfants

Fethi sa femme et ses enfants

Amine sa femme et ses enfants

Morad sa femme et ses enfants

Farida son mari et ses enfants

Mon oncle Abdelkader, sa femme et ses enfants

Résumé

La problématique dont il était question dans cette étude portait sur un problème réel de tournées de véhicules avec contrainte de capacité des camions (CVRP) dans un contexte de logistique inverse, le but étant d'optimiser le processus de collecte des huiles de vidange usagées d'une grande entreprise de distribution et de commercialisation des hydrocarbures en Algérie (NAFTAL).

Dans un premier temps une formulation mathématique du problème à l'aide d'un modèle de programmation linéaire à variables binaires a été proposée.

Dans un second temps, un lissage exponentiel des quantités d'huiles cumulées au niveau des 25 points de collecte a été réalisé, les prévisions obtenues sous forme de calendrier prévisionnel serviront à la planification des tournées afin de réduire les kilomètres à vide et d'éviter le débordement du déchet au niveau des cuves de récupération des clients.

Finalement, la résolution de ce problème a été réalisée grâce aux méthodes heuristiques de type insertion, construction et amélioration. La meilleure solution permet de baisser la distance totale de 43%, ce qui peut limiter la pollution en réduisant la consommation du carburant.

Mots clés : *Logistique inverse, collecte, tournée de véhicules, optimisation, heuristique, programme linéaire*

Abstract

The issue raised in this study focused on a real-life capacitated vehicle routing problem (CVRP) in a context of reverse logistics, the aim is to optimize the collection process of used lubricant oil of an important company for petroleum marketing and distribution in Algeria (NAFTAL).

At first, a mathematical formulation of the problem using a linear programming model with binary variables was proposed.

In a second step, an exponential smoothing of amount of cumulative oil at the 25 collection points was realized, the forecasts obtained in the form of a provisional calendar will be used

for the tour planning in order to reduce the empty kilometers and to avoid the overflow of the waste in the recovery tanks of the customers.

Finally, the problem was solved using heuristic methods such as insertion, construction and local search in order to improve the current solution. We compare the solution effectiveness of the heuristics with the current method; the distance is reduced by 43%, which can limit pollution by reducing fuel consumption.

Key words: Reverse logistics, collection, vehicle routing, optimization, heuristics, linear programming

ملخص

ركزت القضية المثارة في هذه الدراسة على مشكلة توجيه مركبة ذات قدرة حمل محدودة (CVRP) في سياق الخدمات اللوجستية العكسية، والهدف من ذلك هو تحسين عملية جمع زيوت التشحيم المستعملة لشركة مهمة لتسويق النفط وتوزيعه في الجزائر (نפטال).

في البداية، تم اقتراح صياغة رياضية للمشكلة باستخدام نموذج البرمجة الخطية مع المتغيرات الثنائية. في الخطوة الثانية، تم تحقيق التجانس الأسي لكمية الزيت المتراكمة في 25 نقطة تجميع، وسيتم استخدام التوقعات التي تم الحصول عليها في شكل تقويم مؤقت لتخطيط الجولات من أجل تقليل الكيلومترات الفارغة وتجنب التدفق الزائد للنفايات في خزانات الاسترداد للزبائن.

أخيراً، تم حل المشكلة باستخدام الطرق التقاربية مثل الإدراج والبناء والبحث المحلي من أجل تحسين الحل الأولي. قارنا فعالية حل الاستدلال مع الطريقة الحالية؛ فلاحظنا أنه يتم تقليل المسافة بنسبة 43 ٪، والتي يمكن أن تحد من التلوث عن طريق الحد من استهلاك الوقود.

الكلمات الدالة: الخدمات اللوجستية العكسية، تجميع، مشكلة توجيه مركبة، الاستمثال، التجريبية، برمجة خطية

Table des matières

<i>Remerciements</i>	1
<i>Résumé</i>	3
<i>Table des matières</i>	5
<i>Glossaire</i>	8
<i>Liste des figures</i>	10
<i>Liste des tableaux</i>	12
<i>Introduction générale</i>	13
<i>Chapitre 1. Etat de l'art sur la logistique inverse</i>	17
1.1 Introduction.....	17
1.2 La logistique inverse	18
1.2.1 Définitions issues de la littérature scientifique	18
1.2.2 Principales motivations	22
1.2.3 Niveaux décisionnels	24
1.3 Sources et étapes de la logistique inverse	27
1.3.1 Sources de la logistique inverse	27
1.3.2 Etapes de la logistique inverse	28
1.4 Activités de la logistique inverse	34
1.4.1 La réparation	35
1.4.2 La réutilisation	35
1.4.3 La refabrication.....	35
1.4.4 Le recyclage	36
1.4.5 L'élimination.....	36
1.5 Logistique inverse et économie circulaire	36
1.6 Modèles quantitatifs pour la logistique inverse	38
1.6.1 Les problèmes de planification de la distribution	38
1.6.2 Les problèmes de gestion des stocks	39
1.6.3 Les problèmes de planification de la production	39
1.7 Conclusion	40
<i>Chapitre 2. Méthodes d'optimisation des problèmes de tournées de véhicules</i>	42
2.1 Introduction.....	43
2.2 Les problèmes de tournées de véhicules	43
2.2.1 Le problème de Voyageur de Commerce (PVC).....	43

2.2.2	Le problème de tournées de véhicules (VRP).....	45
2.2.3	Les variantes du problème de tournées de véhicules	48
2.3	Le problème VRP dans la collecte des huiles usagées	50
2.4	Les méthodes de résolution.....	51
2.4.1	Complexité algorithmique	51
2.4.2	Les méthodes exactes.....	51
2.4.2.1	Programmation linéaire	51
2.4.2.2	Méthodes de branchement (branch and bound)	54
2.4.2.3	La méthode de branchement et coupe (branch-and-cut)	56
2.4.3	Les méthodes approchées	56
2.4.3.1	Méthodes constructives	57
2.4.3.2	Méthode à deux phases	62
2.4.3.3	Heuristiques d'amélioration	62
2.5	Conclusion	67
Chapitre 3. Application à la planification de l'activité de collecte des huiles usagées		68
3.1	Introduction.....	69
3.2	Les huiles usagées en Algérie	69
3.3	Le problème de la collecte des huiles	70
3.4	Méthode actuelle de planification des tournées.	71
3.5	Caractérisation du problème	73
3.5.1	Sélection des clients par la méthode ABC.....	73
3.5.2	Géolocalisation des points de collecte et distancier.....	75
3.5.3	Flotte de véhicules	76
3.5.4	Les tournées	76
3.5.5	Quantités d'huile générées	77
3.6	Analyse statistique des données.....	77
3.6.1	Tests d'ajustements.....	81
3.6.2	Analyse graphique.....	82
3.6.3	Test de tendance.....	88
3.6.4	Lissage exponentiel simple	92
3.6.5	Lissage exponentiel de Holt.....	95
3.6.6	Prévisions pour l'année 2018.....	97
3.7	Modélisation du problème étudié.....	97
3.7.1	Hypothèses de travail.....	97
3.7.2	Formulation mathématique	98
3.7.3	Evaluation et amélioration du modèle	100
3.8	Conclusion	102
Chapitre 4. Résolution & Analyse		103

4.1	Méthode exacte	104
4.1.1	Environnement de résolution	104
4.1.2	Discussion	104
4.2	Résolution heuristique	105
4.2.1	Résolution à l'aide de l'heuristique de la plus proche insertion (NIA)	105
4.2.1.1	Préparation des données	106
4.2.1.2	Résultats numériques.....	108
4.2.1.3	Evaluation de la performance de l'heuristique NIA.....	110
4.2.2	Résolution à l'aide de méthodes constructive et de recherche locale.....	112
4.2.2.1	Génération d'une solution initiale à l'aide de l'heuristique de gain	112
4.2.2.2	Critère d'arrêt de la méthode	112
4.2.2.3	Résultats numériques.....	113
4.2.3	Recherche locale	114
4.2.3.1	Solution initiale améliorée par un Swap externe.....	115
4.2.3.2	Solution améliorée par un mouvement Or-Opt intra-route	117
4.2.3.3	Evaluation de la performance de l'heuristique de gain améliorée par une recherche locale	119
4.3	Synthèse des résultats	121
4.4	Conclusion	123
	Conclusion générale et perspectives	125
	Références bibliographiques	128
	Annexes	141
	Annexe A – Cadre législatif et règlementaire	141
	Annexe B – Résultats des tests statistiques.....	142
	Annexe C - Présentation graphique du remplissage des cuves des clients	144
	Annexe D – Fichier modèle et données.....	146
	Annexe E – Matrice de distance (distancier).....	150

Glossaire

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
API	Application Programming Interface
CLM	Council of Logistics Management
CMI	Collector Managed Inventory
CNTPP	Centre National des Technologies de Production plus Propre
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
CW	Clarke and Wright
DSS	Decision Support System
EC	Échange de Chaîne
EPA	Environmental Protection Agency
GD	Gestion Direct
GL	Gestion Libre
HVRP	Heterogeneous fleet Vehicle Routing Problem
ISO	International Standard Organisation
LP	Lubrifiant Pneumatique
MAE	Mean Absolute Error- erreur absolue moyenne
MAPE	Mean Absolute Percentage Error– Pourcentage d'erreur absolue moyen
MTZ	Miller, Tucker & Zemlin
MRP	Material Requirements Planning
NAFTAL	Naft Algérie
NIA	Nearest Insertion Algorithm
NP	Non-déterministes Polynomiaux
OPL	Optimization Programming Language
PDVRP	Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem)
PL	Programme Linéaire
PLNE	Programme Linéaire en Nombres Entiers
PLMNE	Programme Linéaire Mixte en Nombres Entiers
PNAE-DD	Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable

PTV	Problème de tournées de véhicules
PVA	Points de Vente Agréés
PVC	Problème de Voyageur de Commerce
PVRP	Pollution vehicle routing problem
RO	Revendeurs Ordinaires
SLG	Stations de Lavage et Graissage
TSP	Travelling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows

Liste des figures

Figure 0.1	Synoptique du manuscrit de thèse.....	16
Figure 1.1	Définitions de la logistique inverse avec ses interrelations.....	20
Figure 1.2	Représentation du flux de retour simplifiée.....	22
Figure 1.3	Cadre conceptuel du système de logistique inverse.....	28
Figure 1.4	Système de logistique inverse.....	29
Figure 1.5	Processus de tri.....	33
Figure 1.6	Choix de disposition (Giuntini et al. 1994).....	34
Figure 1.7	Le modèle de l'économie linéaire (Le Moigne,2014).....	37
Figure 1.8	Les cycles techniques de l'économie circulaire.....	38
Figure 1.9	La répartition annuelle des articles lus sur la logistique inverse.....	40
Figure 1.10	La répartition annuelle des publications selon (Alioune, 2016).....	40
Figure 2.1	Le problème de voyageur de commerce (PVC).....	44
Figure 2.2	Un exemple de problème de VRP à $n = 8$ clients résolu avec $m = 3$ véhicules	46
Figure 2.3	Les méthodes de recherche arborescente.....	55
Figure 2.4	Méthode de gain (Clarke and Wright).....	58
Figure 2.5	Solution de l'exemple (1).....	60
Figure 2.6	Méthode de la plus proche insertion (Nearest insertion algorithm).....	62
Figure 2.7	Schéma du mouvement 2-Opt.....	64
Figure 2.8	Schéma du mouvement Or-Opt intra-route.....	65
Figure 2.9	Schéma du mouvement 2-Opt inter-routes.....	65
Figure 2.10	Schéma du mouvement Swap externe.....	66
Figure 3.1	Taux de collecte des huiles usagées pour l'année 2016.....	70
Figure 3.2	Réseau de collecte et stockage des huiles usagées.....	73
Figure 3.3	Classement des clients selon la méthode ABC.....	74
Figure 3.4	Répartition géographique des points de collecte.....	75
Figure 3.5	Démarche de l'analyse statistique.....	78
Figure 3.6	Modélisation du remplissage de la cuve du client P0284.....	79
Figure 3.7	Modélisation du remplissage de la cuve du client K2667.....	79
Figure 3.8	Modélisation du remplissage de la cuve du client B3860.....	80
Figure 3.9	Modélisation du remplissage de la cuve du client P0291.....	80
Figure 3.10	Modélisation du remplissage de la cuve du client Y8286.....	81
Figure 3.11	Présentation graphique du remplissage des cuves des clients SLG.....	82
Figure 3.12(a)	Représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : Exemple de la série C0159.....	83
Figure 3.12(b)	Représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : Exemple de la série K2667.....	84
Figure 3.12(c)	Représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : Exemple de la série B5874.....	84
Figure 3.12(d)	Représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : Exemple de la série P0291.....	85
Figure 3.12(e)	Représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : Exemple de la série N373185.....	85
Figure 3.13	Régression linéaire de la série B5874.....	87
Figure 3.14(a)	Test de tendance du remplissage de la cuve du client P0284 (série stationnaire).....	89
Figure 3.14(b)	Courbe de tendance linéaire à la hausse du remplissage de la cuve du client P7332.....	89
Figure 3.15	Etapes de prise de décision pour le choix du modèle de prévision.....	92
Figure 3.16(a)	Lissage exponentiel simple de la série B5874 avec $\alpha=0,9$	94
Figure 3.16(b)	Résidus du lissage exponentiel simple de la série B5874.....	94

Figure 3.17(a)	Lissage exponentiel de Holt de la série K2667.....	96
Figure 3.17(b)	Résidus du lissage exponentiel de Holt de la série K2667.....	96
Figure 3.18	Types de problème VRP selon la nature des données.....	98
Figure 4.1	Coordonnées des clients selon l'échelle Matlab.....	107
Figure 4.2	Représentation graphique des routes pour un horizon de planification de 7 jours.....	109
Figure 4.3	Représentation graphique des routes pour un horizon de planification de 30 jours.....	110
Figure 4.4	Solution initiale de l'heuristique de Clark & Wright.....	113
Figure 4.5	Solution initiale obtenue par l'heuristique de gain.....	114
Figure 4.6	Solution initiale améliorée par un Swap externe.....	115
Figure 4.7	Meilleure permutation par un Swap externe.....	116
Figure 4.8	Solution améliorée par un mouvement Swap externe.....	117
Figure 4.9	Méthode d'amélioration inter-routes Or-opt 3.....	117
Figure 4.10	Solution améliorée par un mouvement Or-opt inter-routes.....	118
Figure 4.11	Solution finale améliorée par une recherche locale.....	119
Figure 4.12	Illustration d'une recherche locale.....	120
Figure 4.13	Démarche expérimentale.....	122

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Définition de la logistique inverse.....	18
Tableau 1.2	Décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles pour la logistique inverse.....	27
Tableau 1.3	Sources de la logistique inverse.....	28
Tableau 1.4	Littérature sur la collecte des déchets.....	30
Tableau 1.5	Classification des travaux par catégories de problèmes.....	31
Tableau 2.1	Le tableau initial du simplexe.....	53
Tableau 2.2	Localisation et demandes des clients de l'exemple (1)	59
Tableau 2.3	Matrice des distances de l'exemple (1)	59
Tableau 2.4	Matrice des économies de l'exemple (1)	60
Tableau 3.1	Les gisements d'huile en Algérie pour l'année 2016.....	69
Tableau 3.2	Les capacités de stockage intermédiaire d'huile usagée.....	72
Tableau 3.3	Les capacités de stockage des cuves des clients par catégorie.....	75
Tableau 3.4	Matrice de distance du réseau étudié.....	76
Tableau 3.5	Résultats des tests de régression.....	86
Tableau 3.6	Indicateur de performance.....	91
Tableau 3.7	Seuils des tests de tendance et de stationnarité des séries.....	91
Tableau 3.8	Prévision des quantités cumulées pour le mois de janvier 2018.....	97
Tableau 4.1	Coordonnées géographiques et quantités cumulées au niveau des points de collecte du district.....	107
Tableau 4.2	Résultats de l'heuristique de la plus proche insertion.....	108
Tableau 4.3	Calendrier des tournées du mois de Janvier de l'année 2017.....	111

*« Le livre de la nature est écrit
dans un langage mathématique »*

Galilée

Introduction générale

Le contexte

Les nouvelles réglementations et les enjeux environnementaux tels que le changement climatique et l'épuisement des ressources obligent les entreprises à revoir la gestion de leur supply chain pour faire place à la logistique inverse. Les différentes opérations et les processus de la logistique permettent d'apporter le produit vers le client, par contre la logistique inverse assure le retour de la ressource au moins une étape en arrière dans la chaîne d'approvisionnements. La logistique inverse se présente sous plusieurs formes à savoir le service après-vente, le retour des produits défectueux et les produits en fin de vie.

Dans un contexte de développement durable, il est intéressant de citer comme activité de la logistique inverse la récupération des huiles moteur usagées, il s'agit d'une logistique inversée visant à créer des réseaux de retour entre le détenteur du déchet et l'entreprise chargée de la collecte.

Le problème de récupération des huiles usagées en Algérie reste difficile, bien qu'une taxe de 18.750 DA par tonne de lubrifiant mise sur le marché ait été instaurée par décret (annexe A), en vigueur depuis 2018 (taxe versée au fonds de la dépollution et de la protection de l'environnement). Le comportement des détenteurs d'huile montre qu'il y a un déficit d'information sur les risques et les impacts en termes de gestion et de collecte.

A l'échelle nationale 82 908 tonnes d'huiles industrielles usagées sont mises sur le marché annuellement, mais seulement 10 à 11% de ce gisement sont récupérés selon NAFTAL

Ces quantités sont généralement stockées pour être exportées à l'état brut vers des pays européens où elles subissent des traitements dans des unités de régénération pour être remises sur les marchés de ces pays.

Selon un rapport publié par le centre national des technologies de production plus propre

(CNTPP), l'inexistence d'une unité de régénération en Algérie peut trouver son explication dans l'importance du montant d'investissement à engager pour créer ce type d'installations, notamment pour les particuliers, dont les taux de rentabilité sont trop faibles et des retours sur investissement trop lents (CDER, 2015).

Bien que la loi 01-19 relative à la gestion des déchets définit les huiles lubrifiantes usagées comme des déchets spéciaux nécessitant un traitement (annexe A), la loi 13-01 complétant et modifiant la loi 05-07 relative aux hydrocarbures (annexe A) considère le procédé de régénération comme une activité de raffinage réservée à la société nationale Sonatrach, ce qui entrave le développement de toute filière de traitement.

Positionnement et objectifs de la thèse

Ce travail de thèse se focalise sur la planification et l'optimisation de l'activité de collecte des huiles moteurs usagées d'une entreprise de transport et de commercialisation des hydrocarbures (NAFTAL).

L'activité de transport et les rejets des huiles usagées dans le milieu naturel sont des aspects significatifs qui peuvent avoir des impacts sur l'environnement selon la norme ISO 14001 (ISO, 2015). Et selon le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, le problème de ces déchets se pose avec acuité au regard des impératifs de santé publique et de protection de l'environnement (CDER, 2015).

Notre démarche consiste dans un premier temps à collecter les données nécessaires pour la formulation du modèle d'optimisation, dans un second temps, il s'agit de mettre en œuvre une méthodologie de résolution basée sur des heuristiques classiques tirées de la littérature.

Cette démarche est basée sur les modèles quantitatifs utilisés pour les problèmes de tournées de véhicules « classiques » dont l'objectif est de minimiser les coûts en termes de distance parcourue et donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'organisation de la thèse

Cette thèse est subdivisée en quatre chapitres, le synoptique sur la figure 0.1 présente l'organisation de la thèse.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur la logistique inverse qui présente en premier lieu les principales définitions de la logistique inverse recensées dans la littérature et les motivations qui poussent les entreprises à intégrer un réseau de distribution inverse. Nous décrivons les niveaux de décision associée au pilotage de la chaîne logistique inverse à savoir

les niveaux stratégique, tactique et opérationnel puis nous détaillons les étapes de la chaîne inverse.

En second lieu, une synthèse des travaux portant sur les modèles quantitatifs est réalisée.

Le deuxième chapitre offre un survol de la littérature sur les problèmes de tournées de véhicules dans le cadre de la logistique inverse et présente brièvement les différentes variantes du VRP rencontrées dans la littérature ainsi que les approches de résolution utilisées.

La collecte des données expérimentales et la préparation des intrants pour les modèles et les heuristiques sont présentées dans le chapitre 3 qui est dédié aux travaux d'application industrielle au niveau d'une grande entreprise de transport et de commercialisation des hydrocarbures NAFTAL sise à Chéraga, Alger.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats des différentes approches utilisées pour résoudre le CVRP, une analyse comparative est réalisée.

La conclusion présente une synthèse des travaux réalisés et propose des perspectives de recherches futures.

CHAPITRE 1

Etat de l'art sur la logistique inverse :

- Définition de la chaîne logistique inverse
- Principales motivations
- Niveaux décisionnels
- Sources, étapes et activités de la logistique inverse
- Logistique inverse et économie circulaire
- Modèles quantitatifs pour la logistique inverse

CHAPITRE 2

Méthodes d'optimisation des problèmes de tournées de véhicules

- Le problème de tournées de véhicules
- Le problème de tournées de véhicules dans la collecte des huiles usagée
- Les méthodes de résolution exactes
- Les méthodes approchées (heuristiques)

CHAPITRE 3

Etude expérimentale : application à la planification de la collecte des huiles moteur usagées

- Le problème de la collecte des huiles moteur usagées en Algérie
- Méthode actuelle de planification des tournées au niveau de l'entreprise NAFTAL
- Caractérisation du problème
- Analyse statistique des données et calendrier prévisionnel
- Modélisation du problème étudié

CHAPITRE 4

Résolution & analyse

- Méthodes exactes
- Heuristique d'insertion
- Heuristique de construction
- Recherche locale
- Evaluation de la performance des méthodes approchées
- Limites et perspectives

Figure 0.1 : Synoptique du manuscrit de thèse

Chapitre 1. Etat de l'art sur la logistique inverse

Sommaire

1.1	Introduction.....	17
1.2	La logistique inverse.....	18
1.2.1	Définitions issues de la littérature scientifique.....	18
1.2.2	Principales motivations.....	22
1.2.3	Niveaux décisionnels.....	24
1.3	Sources et étapes de la logistique inverse.....	27
1.3.1	Sources de la logistique inverse.....	27
1.3.2	Etapes de la logistique inverse.....	28
1.4	Activités de la logistique inverse.....	34
1.4.1	La réparation.....	35
1.4.2	La réutilisation.....	35
1.4.3	La refabrication.....	35
1.4.4	Le recyclage.....	36
1.4.5	L'élimination.....	36
1.5	Logistique inverse et économie circulaire.....	36
1.6	Modèles quantitatifs pour la logistique inverse.....	38
1.6.1	Les problèmes de planification de la distribution.....	38
1.6.2	Les problèmes de gestion des stocks.....	39
1.6.3	Les problèmes de planification de la production.....	39
1.7	Conclusion.....	40

1.1 Introduction

La réduction des déchets a connu une attention particulière dans le monde à cause de l'épuisement des sites d'enfouissement et des capacités d'incinération, et pour répondre aux exigences en matière d'environnement, les entreprises doivent transformer leurs façons de voir la protection de l'environnement pour faire place à la gestion des flux de retour induits

par les diverses formes de réutilisation de produits et des matériaux dans les processus de production industriels.

D'autre part et pour des raisons économiques, si la reprise d'un produit permet de générer des économies par rapport à la fabrication d'un produit neuf ou l'achat de matière première neuve, cela motive les entreprises à faire de la logistique inverse.

1.2 La logistique inverse

1.2.1 Définitions issues de la littérature scientifique

La gestion de flux de retour induits par les diverses formes de réutilisation de produits et des matériaux dans les processus de production industriels a reçu une grande attention pendant cette décennie.

Il existe une multitude de définitions de la logistique inverse, le tableau 1.1 récence quelques-unes des définitions rencontrées dans la littérature.

Tableau 1.1 : *Définition de la logistique inverse*

<i>Référence</i>	<i>Définition</i>
(Pohlen et al., 1992)	Le mouvement des produits du consommateur vers le producteur à travers une chaîne de distribution
(Kroon et al., 1995)	La logistique inverse fait référence aux talents de la gestion de la logistique et les activités requises pour réduire, gérer et disposer les déchets dangereux et non dangereux provenant du matériel d'emballage et des produits, de plus elle inclut la distribution inverse.
(Giuntini et al., 1995)	La gestion par l'organisation des ressources matérielles obtenues par le client.
(Fleishmann et al., 1997)	La logistique inverse contient les activités logistiques, jusqu'au bout, pour les produits usagés qui ne sont plus requis par les usagers jusqu'aux produits qui peuvent être réutilisables dans le marché.
(Eymery, 1997)	La logistique inverse répond à la nécessité de retirer du service les produits après usage et de les traiter en les détruisant, en les transformant ou en les recyclant, dans le but de réduire les couts en valorisant les produits récupérés et, de plus en plus, dans le but de répondre aux exigences du respect de l'environnement.
(Carter al., 1998)	C'est la distribution inverse accompagnée d'une réduction des ressources qui est la minimisation des déchets résultant en un processus de distribution en amont et inverse.

(Rogers et al., 1998)	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 bonne façon.
(Dowlatshahi et al., 2000)	Un processus dans lequel un manufacturier accepte systématiquement des produits ou des pièces précédemment expédiés du point de consommation pour possiblement les recycler, les remettre à neuf ou en disposer.
(Stock et al., 2001)	Le rôle de la logistique dans les retours de produits, la réduction de source, le recyclage, la substitution de matériaux, la réutilisation de matériaux, la disposition des déchets, le reconditionnement, la réparation et la remise à neuf.
(De Brito et al., 2002)	La logistique inverse est préoccupée par les activités associées à la manutention et à la gestion d'équipements, de produits, de composants, de matériaux ou même un système technique entier à être repris.
Pishvae et al., 2009	On considère la logistique inverse comme le retour de produits collectés dans des centres de collecte spécifiques. Après inspection, les produits récupérables sont expédiés au centre de récupération et les produits mis au rebut sont livrés au centre d'élimination.
Assavapokee et al., 2012	La logistique inverse se concentre sur le flux de retour en fin de vie des produits auprès des consommateurs.
(Roghalian Pazhoheshfar, 2014)	La logistique inverse est définie comme le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle de l'efficacité et de l'efficacité des flux de matières premières, de l'en-cours des stocks, des produits finis et des informations reliant le point de consommation au point d'origine dans le but de redonner une valeur aux produits ou bien de les éliminer.
(Alioune, 2016)	La logistique inverse est une chaîne de retour et un pilotage des flux de produits défectueux, usagés et récupérés auprès ou par des clients jusqu'aux usines, en passant par des activités telles que la collecte/tri et le désassemblage, le tout en minimisant les impacts sur l'environnement et à moindre coût.

La définition de la logistique inverse de (Rogers et al. 1998) semble être la référence de plusieurs auteurs car elle met le point sur un point précis qui est la source de la logistique inverse : le client. Mais elle contient une lacune au niveau de l'aspect de l'utilisation efficace et environnementale des ressources. En 2005, Lambert et al utilisent la même définition mais avec des ajouts : « 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 bonne façon tout en assurant une utilisation efficace et environnementale des ressources mises en œuvre. ».

Cette définition est illustrée par la figure 1.1 qui présente les interrelations entre les deux aspects complémentaires de la logistique inverse.

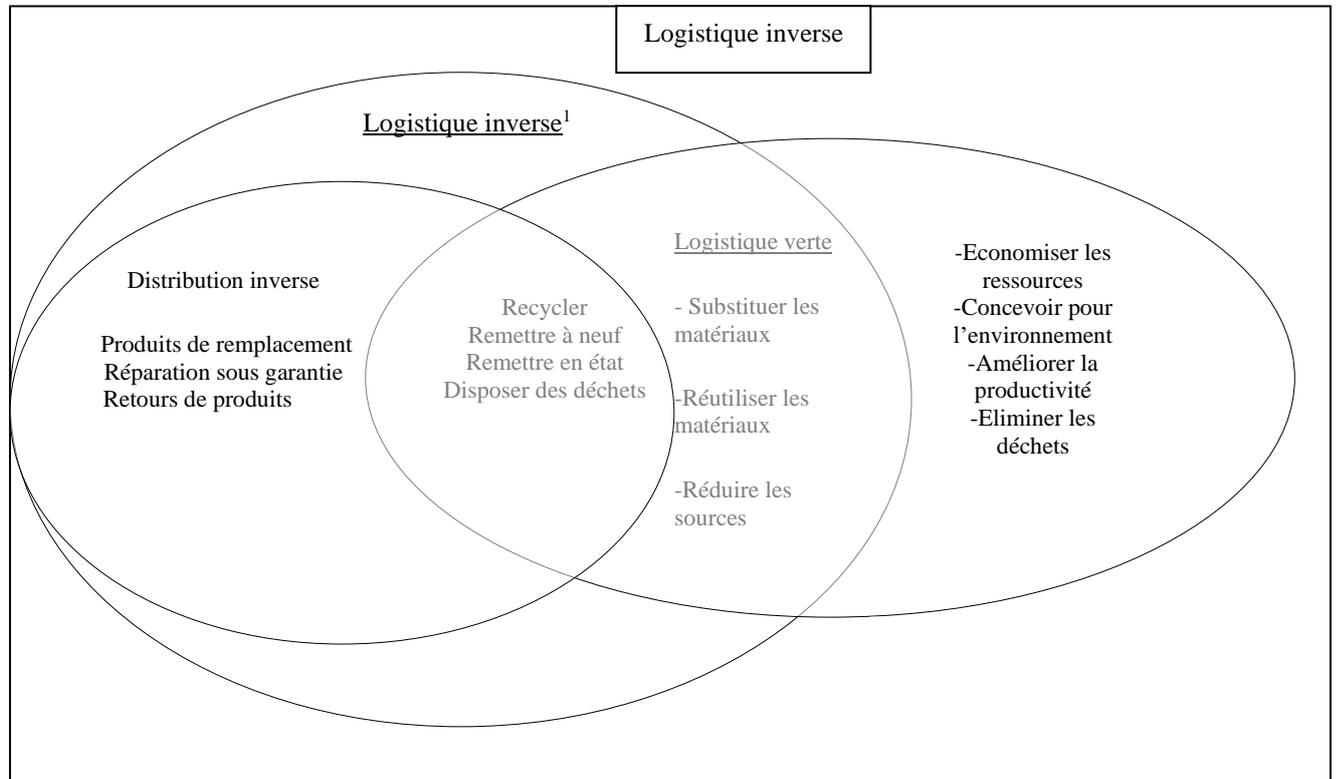


Figure 1.1: Définitions de la logistique inverse avec ses interrelations

La littérature sur la logistique inverse montre l'utilisation de termes différents pour représenter sensiblement le même concept, les expressions couramment rencontrées sont la logistique inverse, la distribution inverse et la logistique verte (Lambert et al. 2003).

- Distribution inverse

Une des premières descriptions du concept de logistique inverse est la distribution inverse (Reverse distribution) et fut donnée en 1981 par Lambert et Stock. Ils la décrivent comme aller dans la mauvaise direction sur une voie à sens unique étant donné que la grande majorité du flot des expéditions est dans une direction ». Ils mentionnent que les raisons des retours sont les réparations sous garantie, pour le remplacement ou pour le recyclage.

Carter et al. 1998, présentent la distribution inverse comme « le retour, mouvement à contre-courant d'un produit ou de matière découlant de la réutilisation, du recyclage ou de la disposition. Ce mouvement à contre-courant peut être associé aux problèmes

environnementaux tout comme à la qualité et l'usure (dégradation dans le temps) et qui sont souvent effectués par des nouveaux membres auxiliaires au système. »

- Logistique verte

Rodrigue et al. (2001) présentent la logistique verte (Green logistics) comme étant un système de distribution et de transport efficient ami de l'environnement. Wu et Dunn (1995) mentionnent que la logistique verte c'est plus que la logistique inverse car elle cherche à économiser les ressources, à éliminer des déchets et à améliorer la productivité. Hart (1997), va plus loin en ajoutant qu'elle doit avoir la plus petite empreinte sur l'environnement.

Rogers et Tibben-Lembke (2001), la définissent comme l'effort pour mesurer et minimiser l'impact environnemental des activités logistiques. Selon Murphy et Poist (2003), la logistique verte impacte les systèmes logistiques sur treize points : le transport, l'entreposage, la manipulation des matières, l'emballage, le contrôle des inventaires, le processus de commande et d'achat, la prévision des demandes, l'implantation des bâtiments, le service client, la planification de la production, la récupération et la destruction des déchets, la manipulation des retours produits et la logistique internationale. Et selon une enquête faite par ces deux auteurs auprès de sociétés américaines et non américaines inscrites au Council of Logistics Management (CLM), la logistique verte a un impact plus spécifique sur le transport, l'emballage, la récupération et la destruction des déchets.

Selon Rogers et Tibben-Lembke (2001), la logistique verte touche plus particulièrement : la conservation de l'énergie et de la matière ; l'usage efficient des terrains ; la réduction du trafic ; la réduction de la pollution de l'air, de l'eau, la réduction de l'odeur et du bruit ; le traitement des déchets solides et dangereux.

Donc si on suit la définition de Serge Lambert et Diane Riopel la logistique inverse englobe la distribution inverse et la majorité de la logistique verte (Lambert et al. 2003). La partie de la logistique verte qui n'est pas incluse dans la logistique inverse traite de la conception du produit.

Malgré cela, la logistique va tout de même être influencée. La figure 1.1 illustre la relation entre ces trois termes et englobe tous les éléments de la définition proposée. La figure est similaire à celle présentée par Rogers et Tibben-Lembke¹ (2001), sauf que la portion de la distribution inverse est incluse en plus de certaines fonctions de la logistique verte qu'ils ont exclues mais qui sont incluses dans la définition proposée ci-haut. Ces derniers les ont exclues pour la simple raison que ces activités n'impliquent aucun retour vers l'entreprise. Bien que vrai, il faut considérer l'impact global du système sur l'environnement.

La figure 1.2 présente une structure de la distribution inverse combinant le flux en amont du producteur à l'utilisateur et le flux inverse de l'utilisateur au producteur. Selon Fleishmann (1997) il existe six catégories d'intervenants à l'intérieur desquelles nous allons trouver différentes entités :

- Les producteurs : industriels ;
- Les distributeurs (chaîne directe) : industriels, vendeurs, entreprises spécialisées ;
- Les consommateurs : particuliers, entreprises, collectivités ;
- Les collecteurs : les mêmes que les distributeurs, entreprises spécialisées dans les retours, collectivités ;
- Les recycleurs : industriels producteurs et industriels spécialisés ;
- Les fournisseurs : industriels.

Dans cette structure, les méthodes de la recherche opérationnelle ont été appliquées pour étudier les réseaux de flux inverses.

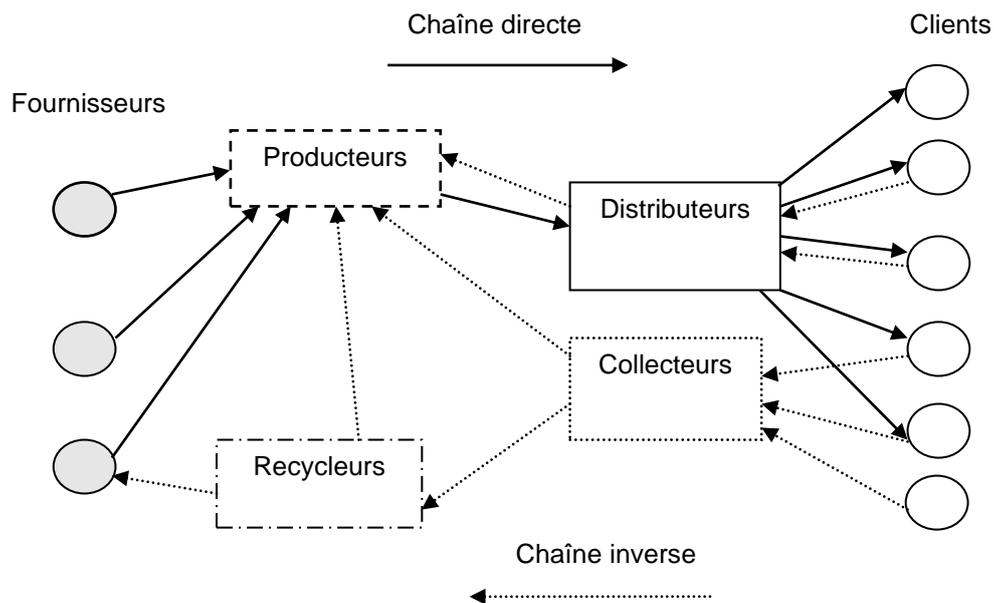


Figure 1.2: Représentation du flux de retour simplifiée (Fleishmann et al. 1997)

1.2.2 Principales motivations

La logistique inverse a longtemps été mise de côté et ne constitue pas la première priorité des entreprises, car elle représente une dépense supplémentaire pour elle. Cependant, en raison des avantages qu'elle peut apporter, elle est de plus en plus considérée par les entreprises.

Dans la littérature on retrouve comme principales motivations qui poussent l'entreprise à

faire de la logistique inverse : la législation, l'aspect marketing et l'intérêt des consommateurs désirant des produits sains pour l'environnement, l'aspect économique ainsi que l'aspect écologique et environnemental.

- Législations

La première raison de faire de la logistique inverse peut être de nature légale. En effet, plusieurs pays ont mis en place des lois pour diminuer la quantité de produits envoyés vers les sites d'enfouissement (Lee et al. 1998) et (Langnau, 2001). En Algérie, à partir de 2001, le gouvernement Algérien a défini une stratégie nationale en matière de protection de l'environnement qui s'est traduite par le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD), le renforcement de l'aspect réglementaire par la promulgation des lois relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, le renforcement institutionnel, par la création d'institutions dédiées aux thématiques environnementales et l'introduction de la fiscalité environnementale. Selon Zarei et al. (2010) la pénurie des ressources et les législations internationales sont à l'origine de l'importance grandissante du sujet environnemental dans les pays en développement.

- Aspect marketing

Initialement créé en Allemagne, le programme "Green Dot" permet à une entreprise membre d'apposer un rond vert sur l'emballage du produit. Ce symbole doit être bien visible et indique aux clients que la compagnie duale system deutschland reprendra le matériel d'emballage pour qu'il soit recyclé. L'initiative a été étendue au reste des pays membres de la communauté européenne. Un autre facteur qui influence les entreprises à faire de la logistique inverse est l'intérêt du grand public pour des produits sains pour l'environnement, selon Byrne et al, on mentionne que 80% des répondants étaient prêts à payer plus cher pour des produits qui ont un impact moindre sur l'environnement (Byrne, 1993).

- Aspect économique

L'aspect économique est aussi un facteur très important selon Govindan et al. (2013). Les législations viennent souvent obliger les secteurs où il est moins rentable pour l'entreprise à mettre en place un bon programme de logistique inverse. Mais si la reprise d'un produit permet de générer des économies par rapport à la fabrication d'un produit neuf ou l'achat de matière première neuve (Sarkis et al. 2010), cela motive les entreprises à faire de la logistique inverse. Pour répondre aux exigences en matière d'environnement les entreprises doivent

considérer la protection de l'environnement et la croissance économique comme des *buts mutuellement compatibles et atteignables* (principe de l'éco-efficacité), par exemple Dat et al. (2012) ont proposé un modèle de programmation mathématique qui minimise le coût total de traitement des déchets électriques et électronique.

- Aspect écologique et environnemental

Le dernier point concerne l'aspect écologique, environnemental et la venue de la norme ISO 14000 comme motivateur à la logistique inverse, la dernière révision de la norme ISO 14001 est plus adaptée aux PME, et leur permet ainsi de réfléchir sur l'analyse de cycle de vie de leurs produits (utilisations de matières moins polluantes, plus faciles à recycler, protection de l'environnement, etc.), de mieux gérer les risques et d'améliorer la performance environnementale tout en conservant un bon niveau de management environnemental.

Selon Susan Briggs, l'animatrice du groupe de travail chargé de la révision d'ISO 14001 :

« Cette norme a beaucoup évolué, mais d'un point de vue technique, les réels changements tiennent avant tout à la plus grande place accordée au développement durable, car il ne s'agit pas simplement de prévenir la pollution, mais de préserver l'environnement de tout préjudice et de toute dégradation ».

Les problèmes environnementaux les plus importants en matière de logistique inverse sont la consommation des ressources naturelles non renouvelables, les émissions atmosphériques, les tournées de véhicules, la pollution sonore et l'élimination des déchets dangereux et non dangereux (Kottala Sri Yogi, 2015). La gestion efficace et la sensibilisation des implications environnementales des activités de la logistique peuvent réduire de façon significative l'impact négatif selon (Wu et Dunn, 1995) et (Gonçalves et al, 2016).

Selon Fernandes et al. (2018) l'importance de la logistique inverse pour l'avenir des entreprises est évidente car, en raison de la concurrence féroce, de la législation environnementale et des exigences des parties prenantes et de sa sphère d'influence, les investissements dans ce domaine sont essentiels, recherchant un développement durable et divers avantages pour l'entreprise.

1.2.3 Niveaux décisionnels

La gestion d'une chaîne logistique inverse nécessite des prises de décisions à trois niveaux : stratégiques, tactiques et opérationnelles (Setaputra et al, 2010). On peut citer dans le tableau 1.2 des exemples de décisions pour chacun des niveaux.

a. Niveau stratégique

Le niveau stratégique correspond aux décisions à long terme qui de par leur nature sont difficiles à changer, Panigrahi et al (2018) ont démontré que la réussite d'une chaîne logistique inverse dépend fortement des décisions stratégiques de l'entreprise.

Les décisions à prendre sont de déterminer les politiques de retour, il faut commencer par décider si l'entreprise fera de la récupération et si oui, de quel type. Selon Lambert et al. (2005), le niveau stratégique de la logistique inverse se concentre principalement sur deux problèmes : la détermination des meilleures stratégies de récupération, et la conception du réseau logistique inverse global.

Une stratégie de récupération d'un produit tend à trouver la meilleure manière de récupérer ce produit, qui se trouve dans un état de fonctionnement indéterminé, avant qu'il n'apparaisse d'une manière effective dans les flux de retour.

Une des décisions les plus importantes de l'entreprise est de déterminer si elle fait du logistique inversé elle-même ou elle utilise l'impartition en partie ou en totalité. Pour cela elle doit considérer son expertise dans chacune des activités de retour et décider si elle est en mesure de bien les effectuer et ce à un coût compétitif.

Ensuite, l'entreprise doit choisir la localisation des sites. Fleishmann (2001) propose deux façons d'aborder la localisation. La première consiste à ajouter la logistique inverse à un réseau de logistique existant (logistique inversée) tandis que la seconde consiste à faire un nouveau réseau de logistique en tenant compte des flux aval et inverse. Lors de l'étude de localisation, il faut connaître ou du moins pouvoir estimer certains éléments tels la localisation des générateurs de retours (sources), la quantité de retours, la division géographique en territoire, les coûts de transport, les sites potentiels et les autres coûts. Ces autres coûts sont entre autres les coûts fixes de chaque installation et leurs frais variables en fonction du niveau d'activité. Ensuite, à l'aide de modèle mathématique le choix de ou des sites est obtenu.

A ce niveau l'entreprise doit définir les activités de traitement telles que la réparation, la remise à neuf, le recyclage, la mise au rebut, ...etc., associer un traitement à un site et déterminer la capacité des sites.

Une autre décision que l'entreprise doit prendre c'est la conception du produit car lorsqu'un produit a été conçu selon une approche environnementale ou pour le désassemblage, une fois retourné à l'entreprise son traitement est simplifié, ainsi l'entreprise qui le récupère peut le faire à faible coût et obtenir une grande valeur. Par contre si le produit contient des matières

dangereuses, son traitement est plus complexe et les risques sont plus grands pour l'entreprise.

Lambert propose qu'une analyse des données à propos des anciens produits permet de concevoir ultérieurement un produit qui répond mieux aux besoins des clients et à toutes les étapes de son cycle de vie (Lambert et al. 2004).

Sheriff et al. (2012) ont développé un cadre pour la classification des différents problèmes et paramètres affectant les décisions stratégiques d'une chaîne inverse.

b. Niveau tactique

Le niveau tactique traite plus particulièrement des aspects de distribution (inverse), la coordination, la planification des opérations, la gestion des stocks, le marketing et les technologies de l'information (De Brito et al. 2002).

La distribution inverse implique le mouvement des retours vers l'entreprise, à l'intérieur du système de logistique inverse jusqu'à la compensation du client. Au niveau stratégique la localisation du ou des sites a été faite. Donc, il faut maintenant élaborer un système pour planifier la collecte des produits au moindre coût pour l'entreprise.

La planification de la production sert à établir les horaires de production des différentes activités pour une période de planification donnée en se basant sur les prévisions de retours.

Étant donné la nature incertaine des retours, la prévision de ceux-ci est plus difficile à faire, mais ce problème peut être diminué grâce aux stocks.

La gestion des stocks est une étape importante au niveau tactique. L'utilisation de stocks permet à l'entreprise d'offrir un meilleur service et une plus grande stabilité en production. Par contre, une mauvaise gestion peut s'avérer dispendieuse.

La gestion des stocks dans les situations de récupération des produits est un domaine qui diffère des systèmes logistiques classiques principalement dans le cas des boucles fermées qui voient se rejoindre les flux avant et inverse. La gestion des stocks doit établir des niveaux de stocks pour les différentes activités en attente de traitement et aussi pour ceux qui sont traités dus aux contraintes d'espace d'entreposage et de coûts. A ce niveau-là, l'entreprise doit obtenir une bonne intégration de l'information afin de s'assurer que le fonctionnement du système de logistique inverse soit facile au niveau opérationnel.

c. Niveau opérationnel

Le dernier niveau de décision traite des décisions opérationnelles. Celles-ci sont principalement centrées sur les activités à court terme comme l'ordonnancement, le contrôle

des activités et la gestion de l'information.

La première décision à prendre concerne l'ordonnancement des activités. Il s'agit d'utiliser l'information concernant le niveau des stocks, la demande et la planification de la production afin d'établir les priorités des différentes activités à réaliser. Ensuite, l'étape de contrôle des activités, autant pour les stocks que pour la production, permet de vérifier que tout se déroule comme prévu et de faire des ajustements si c'est nécessaire.

La gestion de l'information, la dernière décision, sert à mettre à jour l'information sur les retours, les activités de production et les stocks. Celle-ci doit être faite régulièrement, de préférence en temps réel, car l'ordonnancement et le contrôle des activités dépendent de la qualité de l'information disponible. Le contrôle des stocks et l'élaboration de routes pour la collecte appartiennent au niveau opérationnel selon Krikke, H. R. (1998).

Tableau 1.2: *Décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles pour la logistique inverse*

Niveau	Décisions
Stratégique	Impartir en totalité ou en partie Localisation des sites Activités aux sites Capacité des sites Politique de retour Conception du produit
Tactique	Distribution inverse Coordination Planification de la production Gestion des stocks Marketing Technologie de l'information
Opérationnel	Ordonnancement et contrôle des activités Gestion de l'information Route de camions

1.3 Sources et étapes de la logistique inverse

1.3.1 Sources de la logistique inverse

Les raisons des retours sont très variées, dont voici quelques-unes très courantes : défaut, usure, défaillance normale, dommage induit par le client, produit en fin de vie, surplus (produit intact), campagne de rappel, mauvais produit reçu, produit ne répondant pas aux besoins (boîte ouverte), et plusieurs autres, ces retours peuvent être divisés en deux classes : les produits et les emballages (Rogers et Tibben-Lembke, 2001).

En 2003 Serge Lambert identifie trois sources de la logistique inverse : la production, le produit et l'emballage (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 : Sources de la logistique inverse (Lambert et al. 2003)

Classes	Sources
Production	Rebuts de production Rejets de production
Emballage	Retours
Produits	Retours sous garantie Retours en fin de vie Retours commerciaux Campagne de rappel

1.3.2 Etapes de la logistique inverse

Dans la littérature, les auteurs proposent quatre étapes principales de la logistique inverse (Marcoux et al. (1998), Rogers et al. (1998), Giuntini et al. (1995), Lambert et al. (2003)) : la barrière, la collecte, le tri et le choix de traitement comme illustré sur la figure 1.3. L'étape de traitement se décline en plusieurs choix de dispositions ou de traitement (voir section 1.4), un système d'information et un système d'expédition peuvent être ajoutés d'après Lambert et al. (2005).

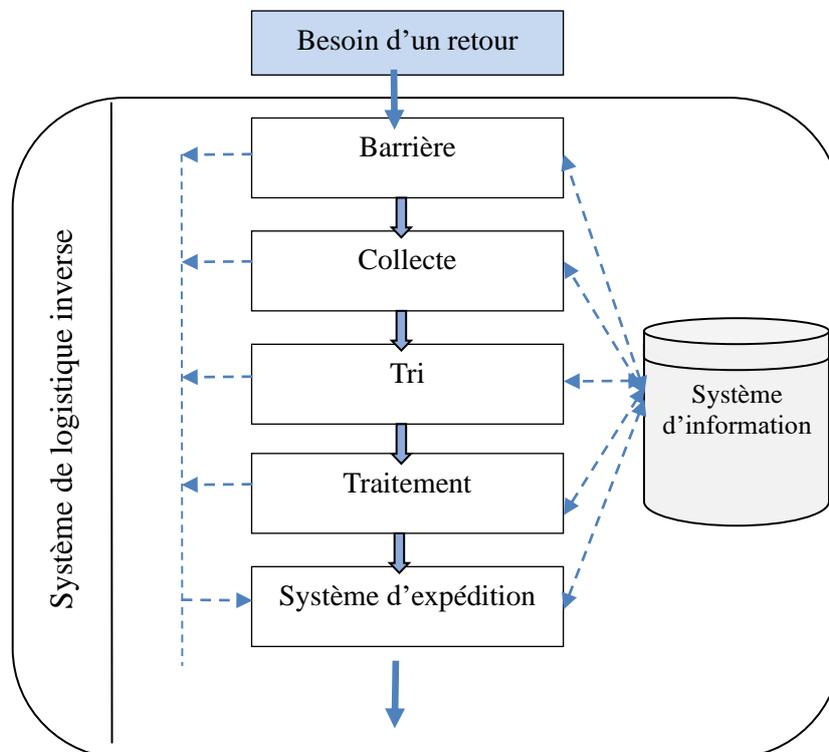


Figure 1.3 : Cadre conceptuel du système de logistique inverse (Lambert et al. 2005)

a. La barrière

La première étape est le point d'entrée dans le système de logistique inverse qui permet ou empêche l'entrée des produits dans le système. L'élément déclencheur de cette première étape du modèle est la reconnaissance du besoin d'un retour (Giuntini et al. 1995), ce dernier est l'intrant du système. L'étape de la barrière commence par une demande d'autorisation de retour, à ce niveau l'information sur le retour doit être fournie, ça peut être le numéro du produit, la quantité, le numéro de facture, le numéro de série, le modèle, la copie de la facture pour connaître la date d'achat afin de déterminer si le produit est toujours sous garantie. L'entreprise donne en retour un numéro d'autorisation au client et l'information recueillie est entrée dans le système. Mais dans certains cas, l'étape de la barrière peut ne pas être nécessaire et il est possible de passer directement à la collecte c'est le cas des produits recyclables (Lambert et al. 2004).

b. La collecte

Dans leur état de l'art, Shaligram et al. (2009) ont présenté les différentes étapes du système de la logistique inverse comme illustré sur la figure 1.4 ci-dessous. La collecte permet de récupérer le produit auprès du client qu'il soit interne ou externe. Le choix de la méthode de reprise dépend du niveau de service que l'entreprise désire donner, du produit, des coûts impliqués, etc.

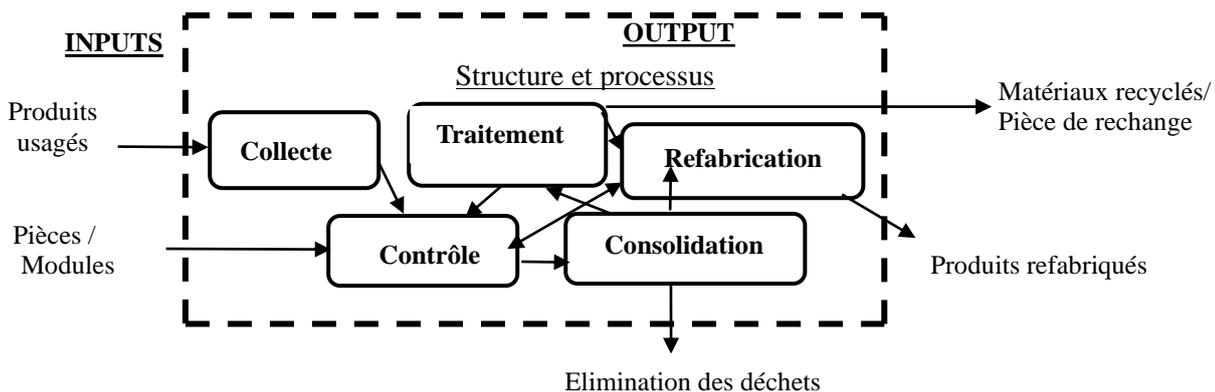


Figure 1.4 : Système de logistique inverse (Shaligram et al. 2009)

Une revue de littérature des travaux sur l'étape de la collecte est présentée sur le tableau 1.4 et 1.5 selon leurs objectifs, les études recensées peuvent appartenir à trois catégories de problèmes : (i) problèmes de localisation des points de collecte des produits de retour, (ii)

problèmes qui combinent les activités de distribution avec les activités de collecte, (iii) Problème de tournées de véhicules pour la collecte des déchets.

Tableau 1.4 : Littérature sur la collecte des déchets

<i>Références</i>	<i>Problèmes étudiés</i>
Zhou et al. (2008), Arun Vasantha et al. (2010), Tari et al. (2014), Benjamin et al. (2011), Kang et al. (2017),	Problèmes de localisation des points de collecte des produits de retour.
Alshamrania et al. (2007), Djikanovic et al. (2015), Wang et al. (2016),	Combiner les activités de distribution avec les activités de collecte.
Kim et al. (2006), Badran et al. (2006), Teixeira al. (2007), Srisawat et al. (2010), Buhrkal et al. (2012), Islam et al. (2012), Pereira Ramos et al. (2013), Zsigraiova et al. (2013), Otoo et al. (2014), Anagnostopoulos et al. (2014), Han et al. (2014), Beliën et al. (2014), Markov et al. (2014), Kinobe et al. (2015), Erdogan (2017).	Problème de tournées de véhicules pour la collecte des déchets.

Tableau 1.5 : Classification des travaux par catégories de problèmes

Article	Problème	Critère de décision			Approche utilisée
		Social	Environnemental	Économique	
Problèmes de localisation	Zhou et al. (2008)	Étude de la conception d'un réseau de distribution inverse avec prise en compte simultanée des activités de réparation et de remise à neuf. Minimisation du coût total du système.		✓	Modèle de programmation linéaire mixte en nombre entier (PLMNE)
	Arun Vasantha et al. (2010)	Minimisation du coût de transport en fonction de l'emplacement des centres de collecte.	✓	✓	Un modèle de prise de décision multi-critères.
	Benjamin et al. (2013)	Minimisation du coût de transport en fonction de l'emplacement des installations d'élimination des déchets.		✓	Métaheuristique
	Tari et al. (2014)	Détermination de l'emplacement et de la capacité de chaque centre de collecte.		✓	Programmation mathématique mixte en nombres entiers multi-objectif
	Kang et al. (2017)	Localisation des centres de collecte-distribution dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée pour l'industrie de la bière dans un environnement aléatoire.	✓	✓	Métaheuristique
VRP avec collecte et livraison simultanées	Alshamrania et al. (2007)	Problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison simultanées des boîtes de conditionnement du sang des centres de traitement vers les hôpitaux. (Intégration de la stratégie de récupération et de livraison)		✓	Nouvelle heuristique Or-opt
	Djikanovic et al. (2015)	Problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison simultanées		✓	Programmation linéaire mixte en nombre entier (PLMNE)
	Wang et al. (2016)	Problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps, collecte et livraison simultanées.		✓	Heuristique

Tableau 1.5 : Classification des travaux par catégories de problèmes (suite)

	Article	Problème	Critère de décision			Approche utilisée
			Social	Environnemental	Économique	
VRP pour la collecte des déchets	Kim et al. (2006)	VRP avec minimisation du nombre de véhicule, minimisation du temps total de trajet, compacité des tournées.			✓	La méthode d'insertion de Solomon
	Teixeira al. (2007)	Minimisation de la distance			✓	Heuristique
	Srisawat et al. (2010)	Minimisation de la distance			✓	Programme linéaire entier à variables bivalentes 0-1
	Buhrkal et al. (2012)	Minimisation du coût de transport			✓	Métaheuristique
	Islam et al. (2012)	VRP avec minimisation du nombre de véhicule, minimisation de la distance totale parcourue.			✓	Métaheuristique
	Pereira Ramos et al. (2013)	Problème de tournées de véhicules multi dépôts, avec fenêtres de temps.			✓	Programmation linéaire mixte en nombre entier (PLMNE)
	Zsigraiova et al. (2013)	Problème de tournées de véhicules avec minimisation du temps total de trajet et de la distance parcourue. Prise en compte de la vitesse et de la charge du véhicule dans le modèle pour la réduction de la consommation du carburant et des émissions atmosphériques.		✓	✓	GIS Heuristique
	Erdogan (2017)	Problème de tournées de véhicules varié.			✓	Heuristique de construction Heuristique d'insertion Recherche locale

c. Le tri

L'étape de tri consiste à décider vers où le produit ira pour la prochaine étape comme montré sur la figure 1.5. Cette étape demande que le produit ait été préalablement reçu. Tout d'abord, le produit doit être examiné ou testé pour déterminer son état.

La complexité de cette étape dépend de l'étendue du réseau de l'entreprise. Dans le cas d'un seul centre de traitement, l'étape sert après acceptation à trier, consolider et acheminer vers les traitements à l'intérieur du même site.

Si le réseau est complexe, la gestion des stocks en transit et le transport entre les différents sites deviennent alors des activités importantes à cette étape.

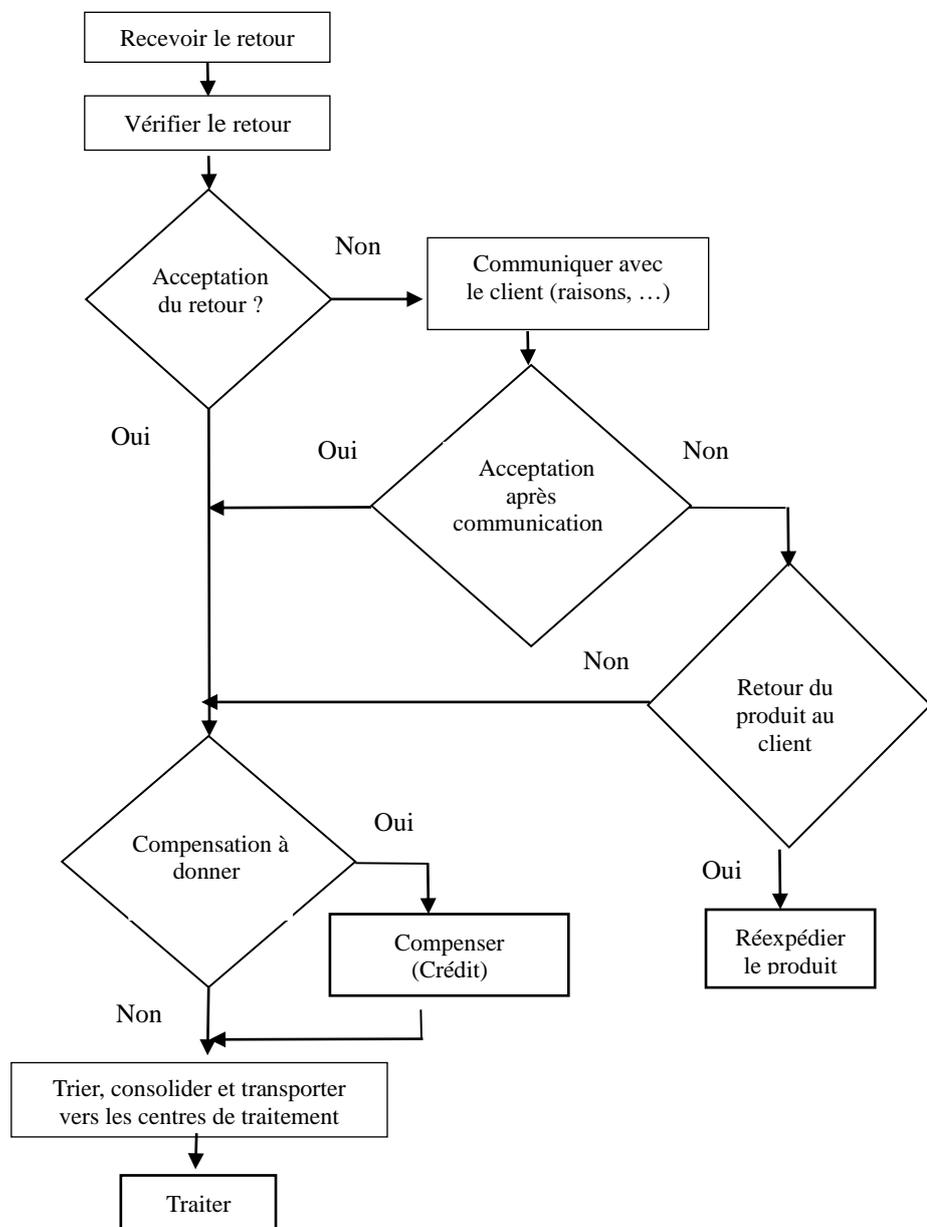


Figure 1.5 : Processus de tri (Lambert et al.2004)

d. Le traitement

La quatrième étape est la décision de disposition, c'est-à-dire l'envoi du produit vers la destination désirée. Donc, à cette étape, il faut décider du type de traitement. Deux choix de disposition sont présentés dans Giuntini et al. (1994) soit : le renouvellement ou le retrait. Pour le renouvellement, les deux options possibles sont l'extension de la durée de vie utile du produit ou celle de la matière. Dans le premier cas, l'entreprise peut remettre à neuf, réparer ou réutiliser le produit. Dans le deuxième cas, l'entreprise peut recycler des pièces du produit en matière première, réutiliser des pièces du produit ou encore reconfigurer le produit pour être utilisé dans une autre application (figure 1.6).

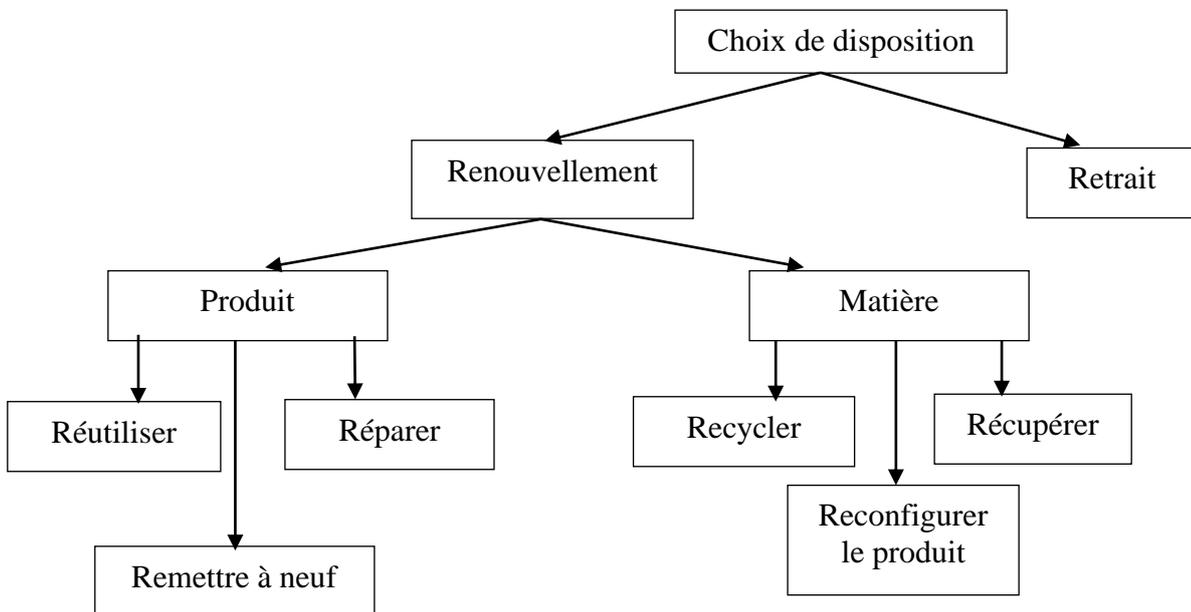


Figure 1.6 : Choix de disposition (Giuntini et al. 1994)

1.4 Activités de la logistique inverse

D'après (Agrawal et al.,2015), plusieurs alternatives de choix de traitement des produits retournés sont envisageables à savoir : la réparation, la réutilisation, la refabrication, le recyclage ou l'élimination. Dans la littérature, le même ensemble d'activités est souvent repris.

1.4.1 La réparation

Klausner et al. (1999) mentionnent que le but de la réparation est de ramener un produit à un état fonctionnel. Le but de ce traitement est de prendre le produit qui est endommagé ou non fonctionnel et de le remettre en état de marche.

La première étape consiste à faire un diagnostic avant de procéder à la réparation, il se peut que l'état du produit fasse en sorte qu'il ne soit pas réparable ou qu'il ne soit pas jugé économique de le faire. Dans ce cas, le produit est dirigé vers d'autres traitements. Lorsque la réparation est réussie, le produit est emballé, dirigé en stock ou alors retourné au client.

1.4.2 La réutilisation

Une autre activité importante de la logistique inverse est la réutilisation. Réutiliser un produit signifie que le produit est utilisé immédiatement dans le même contexte ou un autre, suite à une opération additionnelle mineure telle que le nettoyage ou la maintenance (Alioune, 2016).

Réutiliser un produit peut aussi signifier la réutilisation des pièces qui le composent comme pièces de rechange. L'objectif de ce traitement est de réduire les coûts et l'impact sur l'environnement.

Le produit est contrôlé si aucune action n'est requise alors il est remis en stock. Par contre, si le produit ne peut être réutilisé immédiatement, il doit être réparé ou remis en état. Les processus sont les mêmes que ceux décrits précédemment, si la réparation n'est pas possible le produit est recyclé. Inderfurth et al. (2001) indiquent trois réutilisations possibles dans le cas d'un photocopieur: 1) le nettoyer et le revendre tel quel dans un pays en voie de développement, 2) le nettoyer et lui faire une mise à jour de composants et de logiciels et le vendre sur le marché des biens usagés, ou 3) le mettre en pièces et réutiliser les pièces.

1.4.3 La refabrication

La refabrication est définie comme un procédé industriel dans lequel des produits utilisés peuvent être restaurés à l'état neuf (Kim, K et al., 2006).

(Guide et al., 2000) mentionnent que la refabrication est un processus de désassemblage des produits utilisés, d'inspection, de réparation / remplacement des composants et leur utilisation pour fabriquer un nouveau produit.

Le processus de refabrication ou de remise à neuf est similaire au processus de réparation sauf pour le point suivant : la remise à neuf change plus que les pièces ou les

composants défectueux du produit, elle change une série de pièces et de composants afin de remettre le produit à l'état neuf ou presque.

Selon (Alioune, 2016), un produit est considéré comme refabriqué si ses composants proviennent d'un produit usagé.

La refabrication est un outil environnemental et économique permettant d'atteindre plusieurs objectifs du développement durable. Plusieurs entreprises se sont engagées dans ce processus. Nous citons par exemple Kodak avec son programme de refabrication des appareils photos numériques ; IBM avec la refabrication des pièces d'ordinateurs et Siemens avec la refabrication des équipements médicaux.

1.4.4 Le recyclage

Le but du recyclage est de réutiliser les matières constituant le produit usé. Par ce procédé, l'entreprise réduit l'épuisement des ressources, crée des valeurs économique et environnementale. Ce processus permet de démonter les produits et de séparer les matériaux (métaux ferreux ou non ferreux, plastique, verre, papier, etc.). Chacun des matériaux séparés est mis dans des contenants appropriés pour la revente ou pour une réutilisation ultérieure. Plus la séparation des matériaux est fine plus la valeur augmentera. Les matériaux non recyclables sont rebutés (Lambert et al. 2004).

On parle de recyclage par revalorisation des matériaux lorsque les matières sont dirigées vers des procédés de broyage ou de fonte et de recyclage par revalorisation énergétique si les matières peuvent être transformées en énergie, par des processus d'incinération, par exemple (El Bounjimi, 2016).

1.4.5 L'élimination

C'est l'activité la moins désirable pour l'environnement (Lambert et al., 2003), rebuter c'est envoyer à l'enfouissement, ou à l'incinération les produits qui ne peuvent être ni réutilisés ni refabriqués, ni recyclés pour des raisons techniques ou pécuniaires.

1.5 Logistique inverse et économie circulaire

Selon (l'ADEME, 2014), l'économie circulaire peut se définir comme un « système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien-être des individus ».

Pour optimiser les flux d'énergie et de matières afin de rendre plus efficace l'utilisation des

ressources et diminuer les impacts environnementaux, la linéarité du modèle économique « Extraire, produire, consommer, jeter » illustré sur la figure 1.7 doit laisser la place à des modèles circulaires.

L'approche linéaire du cycle de vie peut être décrite comme une succession de cinq phases : extraction-transformation-distribution-utilisation et élimination. D'après (Grimaud, 2019), la nature est utilisée comme un fournisseur de ressource en début de chaîne de valeur. L'usage de l'énergie est nécessaire le long de la chaîne, de l'extraction jusqu'à la phase de consommation. Par la suite le produit devient un déchet, pour ensuite être remplacé (Lacy et al., 2014).

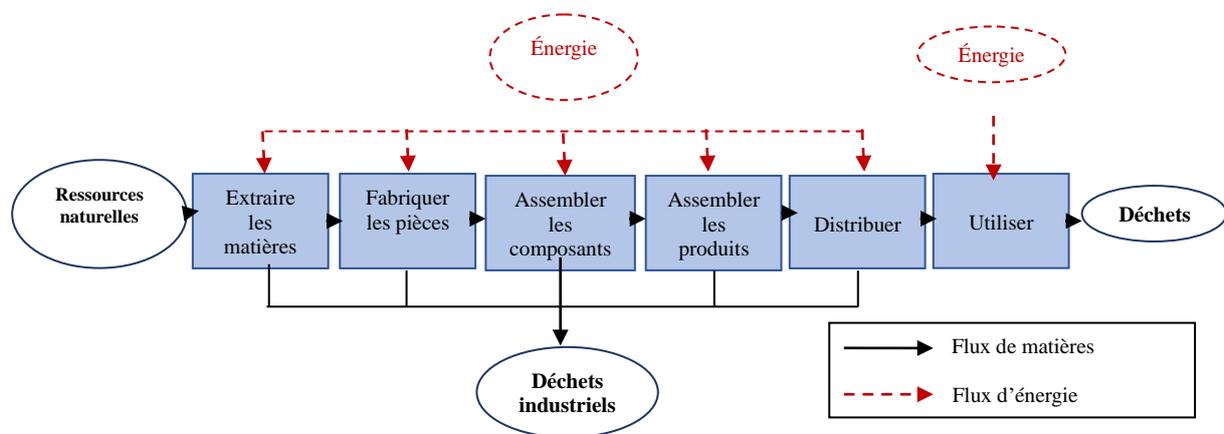


Figure 1.7 : Le modèle de l'économie linéaire (Le Moigne, 2014)

L'approche circulaire vise à changer de paradigme par rapport au modèle linéaire. L'objectif global de l'économie circulaire est de produire des biens et des services tout en minimisant la consommation et le gaspillage en matière premières et en limitant l'usage des énergies non renouvelables. Ce concept est basé sur la production de biens facilement réparables, et dont les composants peuvent être réutilisés ou recyclés. Ces activités sont également semblables à celles de la logistique inverse. En effet, la relation entre l'économie circulaire et la logistique inverse peut être vue à partir des activités similaires comme montré sur la figure 1.8 : réparation, réutilisation, refabrication et recyclage (Ellen MacArthur Foundation, 2013 ; Ripanti et al., 2015). Selon Le Moigne (2014), le cycle des produits techniques au sein de l'économie circulaire se base sur le concept de la reverse supply chain. Cependant, le concept de l'économie circulaire est plus large que celui de la logistique inverse. Si cette dernière vise la maîtrise des flux de retours, l'économie circulaire va plus loin en considérant le déchet comme une véritable ressource matière et énergie.

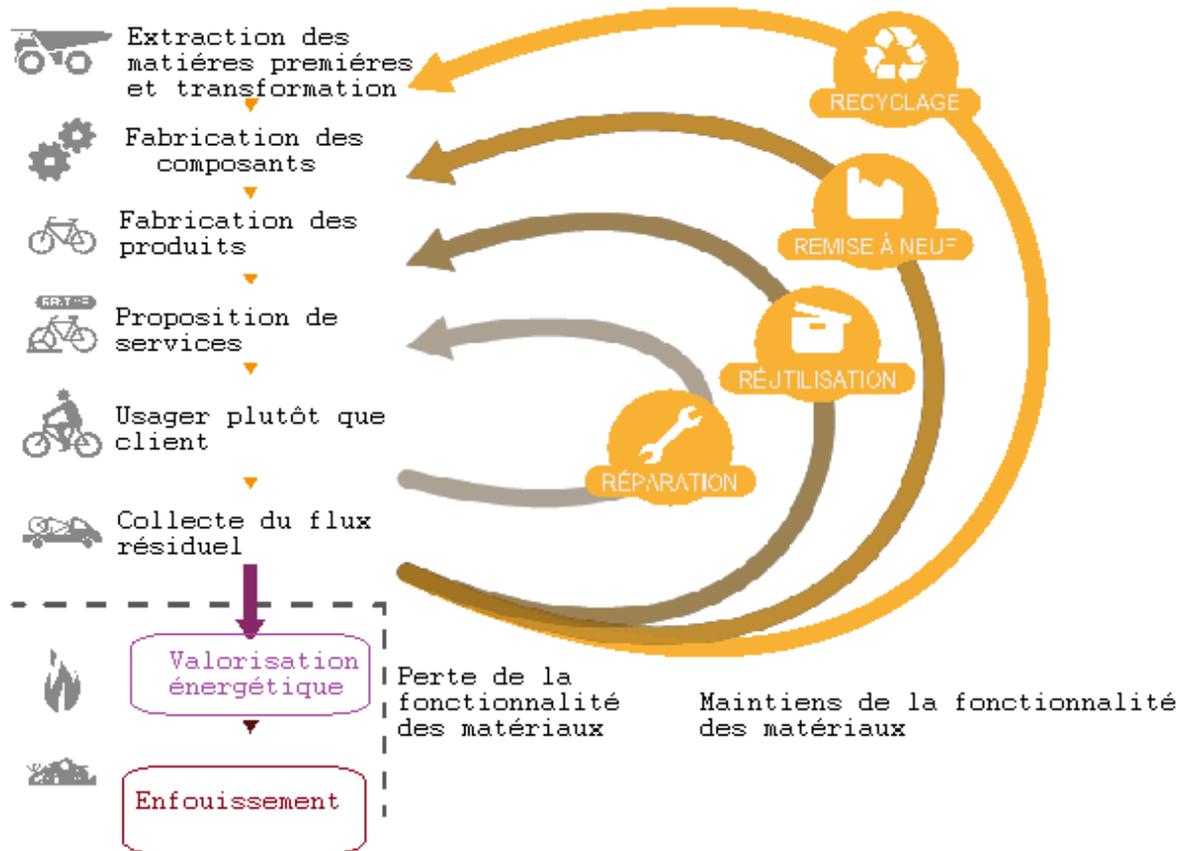


Figure 1.8 : Les cycles techniques de l'économie circulaire (inspiré de Ellen MacArthur Foundation, 2013)

1.6 Modèles quantitatifs pour la logistique inverse

La gestion de flux de retour induits par les diverses formes de réutilisation de produits et des matériaux dans les processus de production industriels a reçu une grande attention pendant cette décennie. Beaucoup d'auteurs ont proposé des modèles quantitatifs pour la logistique inverse. Une revue de littérature et une synthèse des articles faisant état de l'art sur les modèles quantitatifs pour la logistique inverse a été réalisée. Nous avons fini par classer les travaux portant sur la logistique inverse en trois grandes catégories à savoir (i) la planification de la distribution, (ii) le contrôle des stocks et (iii) la planification de la production.

1.6.1 Les problèmes de planification de la distribution

Ces problèmes incluent les problèmes de localisation (localisation des entrepôts pour le retour de pièces défectueuses ou de déchets, etc.). Nous pouvons citer les travaux de Caruso et al. (1993), Kroon et al. (1995), Barros et al. (1995), Spengler et al. (1997), Salema et al.

(2007), Zhou et al. (2008), Cansheng et al. (2010), Salema et al. (2010), Marian et al. (2011), Alumur et al. (2012), Ting et al. (2013), Demirel et al. (2014), Ashfari et al. (2014), Ardjmand et al. (2015) ainsi que les travaux portant sur la gestion de réseaux (problèmes de tournées de véhicules, problème de picking & delivery : optimisation des tournées en combinant des flux d'un dépôt/usine vers les clients et des flux clients vers un dépôt/usine) Salomon et al. (1997), Alshamranial et al. (2007), Kim et al. (2009), Das et al. (2013), Yesica Xiomara et al. (2015), Farrokhi-Asl et al. (2016), Son et al. (2016), Vecchi et al. (2016)

1.6.2 Les problèmes de gestion des stocks

Problèmes d'intégration des retours de pièces/produits défectueux ou invendus dans la gestion des stocks (modèles déterministes Schrady (1967), Mabini et al. (1992), Richter et al. (1996), Mabini et al. (1997), Grellier et al. (2006) et stochastiques Cohen et al. (1980), Kelle et al. (1989), Inderfurth et al. (2001), Qinglong et al. (2008), Cansheng et al. (2011), Mimouni et al. (2015)

1.6.3 Les problèmes de planification de la production

Ces problèmes incluent : (i) les problèmes d'optimisation de la planification de la production en intégrant les flux retournés (Réutilisation des pièces), nous pouvons citer les travaux de Krikke et al. (1998), Thierry et al. (1997), Christos et al. (2007).

(ii) les Problèmes d'optimisation du désassemblage des objets défectueux pour la récupération d'un maximum de composants (Gupta et al. (1994), Flapper (1994), Clegg et al. (1995), Lee et al. (2009), Kim et al. (2006), Hrouga (2016))

(iii) le problème de gestion d'un MRP dans un environnement de récupération (Das et al. 2012).

En analysant les articles lus par domaines de recherche, nous pouvons clairement constater une évolution de plus en plus grande des travaux portant sur la logistique inverse depuis 2014 (voir figure 1,9). C'est effectivement à ce moment que la logistique inverse suscite de plus en plus d'intérêt. La répartition annuelle des articles lus semble proche de celle de (Alioune, 2016) illustré à la figure 1.10.

De plus, dans leur revue de littérature, Gonçalves et al. (2016) ont réalisé une analyse bibliométrique des articles sur la logistique inverse en fonction de leurs années de publication. L'analyse a révélé une augmentation progressive des publications à partir de 2013, ce qui vient corroborer notre analyse bibliographique, cela s'explique par la prise en compte des préoccupations environnementales.

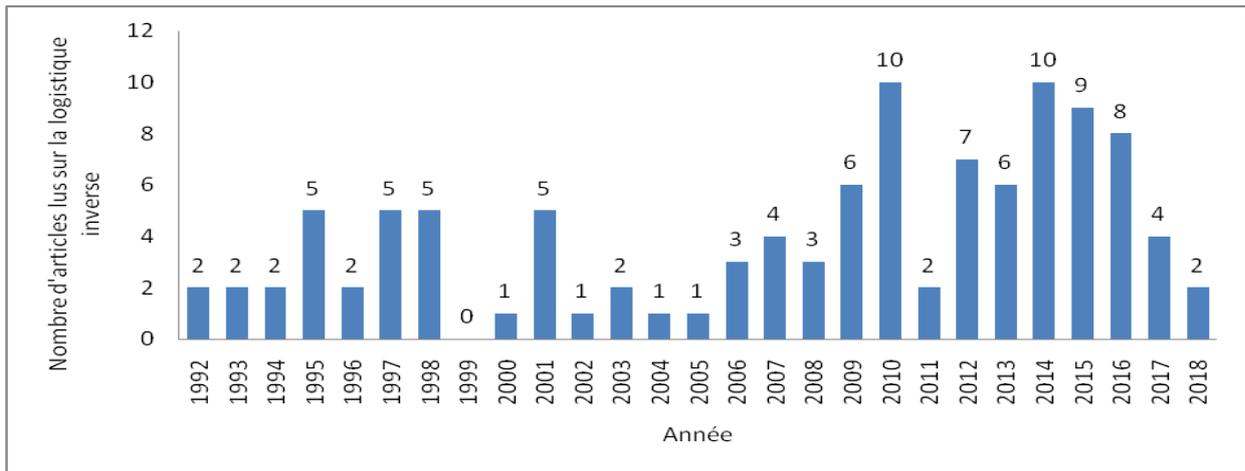


Figure 1.9 : La répartition annuelle des articles lus sur la logistique inverse selon la date de parution.

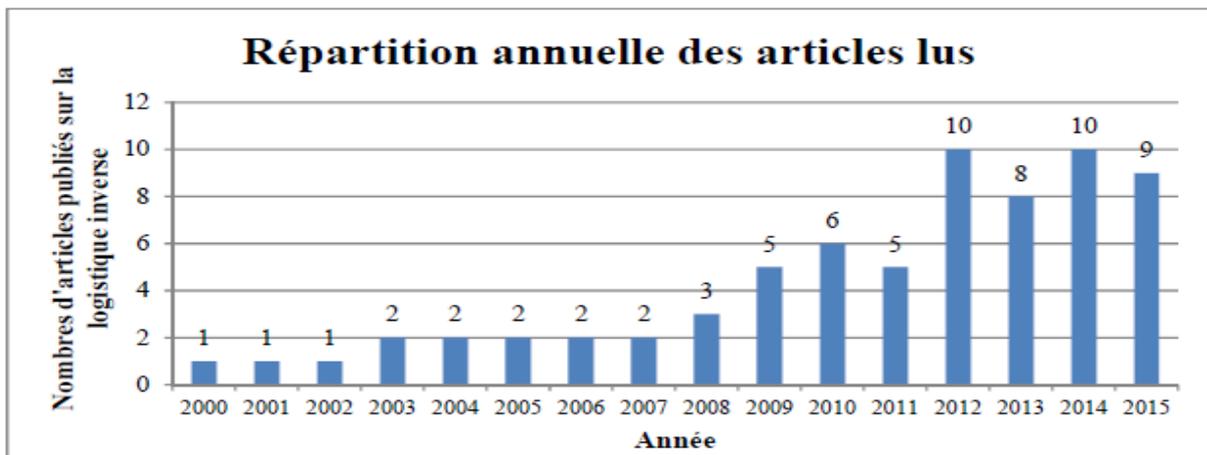


Figure 1.10 : La répartition annuelle des articles lus selon (Alioune, 2016)

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons présenté un état de l'art sur la logistique inverse, qui traite les flux de retours, plusieurs enjeux peuvent motiver les entreprises à mettre en place cette organisation, à savoir économique, législatif et écologique.

Nous avons recensé dans un premier temps plusieurs définitions de la logistique inverse tirées de la littérature et nous avons aussi évoqué les niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Nous pouvons classer le problème étudié dans le cadre de cette thèse au niveau opérationnel.

Nous avons également défini toutes les étapes de la chaîne inverse, en partant de la barrière, jusqu'aux choix de traitements, en passant par l'activité de collecte dans laquelle s'inscrit notre travail, et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous nous sommes focalisés sur cette étape.

Par la suite, nous avons abordé les différents modèles quantitatifs pour la logistique inverse. Une revue de littérature et une synthèse des articles faisant état de l'art sur les modèles quantitatifs pour la logistique inverse a été réalisée. Une fois passés en revue les différents problèmes qui touchent le réseau inverse, un classement des travaux portant sur la logistique inverse a été fait selon trois grandes catégories à savoir la planification de la distribution, le contrôle des stocks et la planification de la production.

Dans le chapitre suivant, nous aborderons les travaux qui correspondent à la base du problème étudié à savoir le problème de tournées de véhicules que nous allons appliquer dans un contexte de logistique inverse. Nous présenterons quelques méthodes de résolution qui ont été employées sur des problèmes en lien avec le problème étudié.

Chapitre 2. Méthodes d'optimisation des problèmes de tournées de véhicules

Sommaire

2.1 Introduction.....	43
2.2 Les problèmes de tournées de véhicules.....	43
2.2.1 Le problème de Voyageur de Commerce (PVC)	43
2.2.2 Le problème de tournées de véhicules (VRP)	45
2.2.3 Les variantes du problème de tournées de véhicules.....	48
2.3 VRP dans le contexte de la collecte des huiles usagées.....	50
2.4 Les méthodes de résolution.....	51
2.4.1 Complexité algorithmique.....	51
2.4.2 Les méthodes exactes.....	51
2.4.2.1 programmation linéaire.....	51
2.4.2.2 méthodes de branchement (branch & bound)	54
2.4.2.3 la méthode de Branch-and-cut.....	56
2.4.3 Les méthodes approchées (heuristiques)	56
2.4.3.1 Méthodes constructives.....	57
2.4.3.2 Méthode à deux phases (<i>route-first et cluster-second</i>)	62
2.4.3.3 Heuristiques d'amélioration.....	62
2.5. Conclusion.....	67

Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par un état de l'art sur le problème de tournées de véhicules et de ses variantes, puis nous présentons un survol des travaux sur le problème de transport des huiles moteur usagées, sujet principal de cette thèse. Nous rappelons ensuite certaines notions sur la complexité des modèles linéaires en nombres entiers PLNE, nous abordons également les méthodes de résolution qui peuvent être classées en deux catégories : Les méthodes exactes qui garantissent l'optimalité de la solution et les méthodes approchées (heuristiques) qui donnent des solutions approximatives.

2.1 Introduction

L'optimisation combinatoire constitue l'outil principal pour la résolution des problèmes décisionnels de la gestion des tournées de véhicules.

Résoudre un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver une solution $s^* \in S$ qui minimise la fonction objectif f , c'est-à-dire que $\forall s \in S, f(s^*) \leq f(s)$ où S est l'ensemble des solutions admissibles qui vérifie toutes les contraintes du problème. Dans cette partie, nous allons présenter les méthodes de résolution utilisées pour le problème étudié. Nous commençons par la présentation d'une approche exacte, nous nous focalisons ensuite sur les heuristiques de résolution du problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité.

2.2 Les problèmes de tournées de véhicules

Dans la partie précédente, nous avons défini toutes les étapes d'une chaîne de retour de produits : de la barrière aux différents traitements possibles. Par la suite, nous avons abordé les principales problématiques rencontrées en logistique inverse telles que les problèmes de conception de réseau, de localisation, de sélection et de transport, les problèmes de planification de la production et de gestion des stocks. A partir de ces éléments, nous pouvons dégager le centre d'intérêt de ces travaux de recherche à savoir la collecte et le transport des huiles de vidange usagées.

En effet, l'activité de collecte est l'étape la plus cruciale dans la mise en œuvre d'une chaîne logistique inverse. Une fois que les décisions stratégiques concernant le choix des produits à récupérer, la localisation des points de collecte et le choix de la topologie du réseau de collecte sont prises, des décisions à moyen terme seront prises quant à l'utilisation efficace des ressources nécessaires pour la mise en œuvre des plans stratégiques.

Dans ce chapitre, nous décrivons le problème de tournées de véhicules avec ses principales variantes, nous nous intéressons au problème de la planification opérationnelle de la collecte et plus particulièrement les tournées de véhicules pour la collecte des déchets dangereux. La plupart des articles que nous avons lus, concernent les décisions de niveaux opérationnels en logistique inverse, nous nous focalisons plus particulièrement sur le ramassage et la récupération des huiles de vidange usagées auprès des détenteurs.

2.2.1 Le problème de Voyageur de Commerce (PVC)

Le problème du voyageur de commerce (PVC) est l'un des problèmes les plus étudiés en recherche opérationnelle (Laporte et al., 1995).

L'objectif c'est de déterminer le parcours avec coût minimal (distance, temps, coût...) d'un seul véhicule partant d'une localité (dépôt) et visitant $n-1$ autres localités (clients) et revenir à son point de départ, c'est-à-dire trouver le chemin le plus court qui visite toutes les villes une et une seule fois, comme le montre la figure 2.1.

Le problème de voyageur de commerce est NP- difficile, c'est à dire qu'il n'existe pas d'algorithme en temps polynomial pour le résoudre.

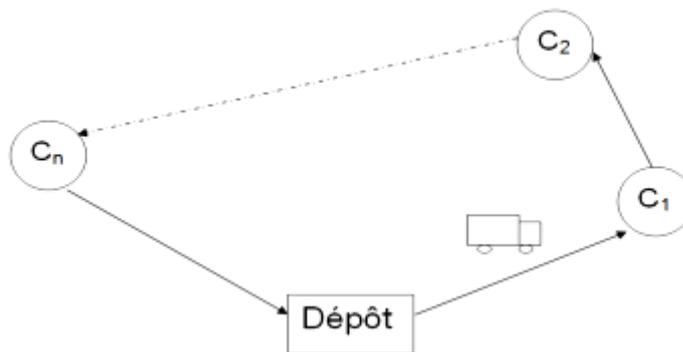


Figure 2.1 : Le problème de voyageur de commerce (PVC)

- Mathématiquement :

Soit $G = (N, A)$ un graphe où N représente l'ensemble de n sommets et A l'ensemble des arcs (si le graphe est orienté) ou arêtes reliant les nœuds.

d_{ij} : la distance entre les villes i et j ;

n : le nombre de villes ;

x_{ij} : la variable binaire qui prend la valeur 1 si l'arc (i, j) est utilisé dans le trajet ,0 sinon.

Le problème consiste à minimiser la longueur du cycle hamiltonien ou chaque nœud est visité exactement une fois.

La fonction objectif :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}^k \quad (1,1)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in (1, \dots, n) \quad (1,2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in (1, \dots, n) \quad (1,3)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij}^k \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N ; 2 \leq |S| \leq n-1 \quad (1,4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (1,5)$$

Ce modèle mathématique (1,1) consiste à trouver le chemin le plus court qui visite tous les clients une et une seule fois.

Les contraintes (1,2), (1,3) permettent d'assurer que le voyageur n'entre et ne sorte qu'une seule fois par sommet. La contrainte (1,4) élimine la formation de sous-tours au sein d'une tournée (tours qui ne passe pas par tous les clients à visiter), c'est la contrainte standard d'élimination des sous-tours introduite par Dantzig et al. (1954) pour le TSP. Cette contrainte spécifie qu'il ne doit y avoir qu'un seul circuit passant par tous les clients et non deux (2) circuits fermés par exemple. Et elle élimine tous les sous-tours contenus entre 2 et n-1 sommets (les cycles ne passant pas par un dépôt). La binarité des variables de décision est donnée par la contrainte (1,5).

La formulation du problème de TSP avec ce modèle ne permet pas sa résolution dans un délai raisonnable par un logiciel de programmation linéaire vu le nombre exponentiel ($2^n - 2$) de contraintes d'élimination des sous-tours (1,4).

Cela dit, dans la pratique, d'autres formulations sont utilisées pour réduire le nombre de contraintes.

2.2.2 Le problème de tournées de véhicules (VRP)

Comme le montre la figure 2.2, le problème de tournées de véhicules VRP est une extension du problème du voyageur de commerce TSP, avec plusieurs voyageurs qui seront appelés véhicules, au cas où on désire construire « m » circuits hamiltoniens. Il a été introduit pour la première fois par Dantzig et al. (1959).

L'objectif est d'organiser les tournées de véhicules (partant et revenant au dépôt) pour servir

un ensemble de clients dispersés dans un réseau, tout en minimisant le coût, c.-à-d. la somme des distances ou des temps de parcours des tournées, tout en respectant les contraintes du problème.

Nous pouvons ainsi définir le graphe $G = (V, A)$, où :

- $V = \{0, \dots, n\}$ correspond à l'ensemble des $n + 1$ sommets du graphe ;
- 0 représente le dépôt ;
- $\{1, \dots, n\}$ ensemble des clients ;
- $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ ensemble des arcs allant d'un point « i » à un point « j » et représentant le trajet entre deux sommets ;
- Chaque client i appartenant à $V \setminus \{0\}$, a une demande de produit d_i qui correspond à la quantité de produit qu'il faut lui livrer ou collecter ;
- Une flotte de K véhicules tous identiques de capacité Q est disponible.

Tous les sommets doivent être visités une seule fois tout en minimisant le coût total de transport (distance) et en respectant la capacité de stockage des véhicules.

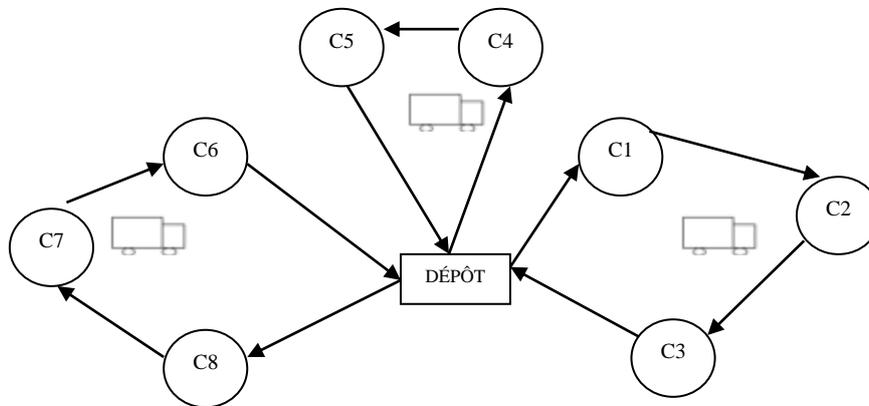


Figure 2.2 : Un exemple de problème de VRP à $n = 8$ clients résolu avec $K = 3$ véhicules.

- Formulation mathématique :

La formulation du VRP que nous présentons ici a été fournie par Fisher et Jaikumar (1978), elle correspond à la formulation mathématique utilisée en programmation linéaire en nombres entiers.

Voici la signification des notations utilisées dans la formulation du problème :

n : nombre de clients (ou sommets) ;

K : nombre de véhicules ;

Q : capacité des véhicules (véhicules homogènes) ;

d_i : demande du client i ;

c_{ij} : le coût de l'arête entre les sommets i et j (distance ou temps de parcours).

Les variables de décision utilisées dans cette formulation sont :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'arc } (i, j) \text{ est dans la tournée du véhicule } k, (i, j) \in V \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_i^k = \begin{cases} 1 & \text{si le nœud } i \text{ est visité par le véhicule } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonction objectif :

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k \quad i \neq j \quad (1)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k=1}^K y_i^k = 1 \quad " i \hat{=} (1, \dots, n) \quad (1.1)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{1k} = K \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^k = y_j^k \quad " j \hat{=} (1, \dots, n) \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = y_i^k \quad " i \hat{=} (1, \dots, n) \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.4)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i y_i^k \leq Q \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.5)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij}^k \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset V; 2 \leq |S| \leq n-1 \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V \quad i \neq j \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.7)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in V \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.8)$$

La formule (1) représente la fonction à optimiser ou la fonction objectif du VRP classique.

La contrainte (1.1) assure que chaque client doit être visité une et une seule fois, la contrainte (1.2) garantit que tous les véhicules se trouvent au dépôt (chaque tournée passe par le dépôt). Les contraintes (1.3) et (1.4) assurent que le véhicule quitte le client aussitôt que ce dernier ait été servi (le sommet visité doit impérativement être quitté), (1.5) vérifie que la capacité de chargement de chaque véhicule est bien respectée. On retrouve les contraintes d'élimination des sous-tours en (1.6) et enfin (1.7) et (1.8) sont des contraintes de binarité sur les variables de décision.

2.2.3 Les variantes du problème de tournées de véhicules

La littérature dénombre de nombreuses extensions du VRP classique que nous avons développé dans la section précédente. En effet, en fonction des contraintes à prendre en compte, plusieurs variantes du VRP ont été définies. La section suivante résume les différents paramètres que nous pouvons rencontrer dans la littérature.

a. VRP avec contrainte de capacité (CVRP)

La formulation la plus basique du VRP considère la contrainte de capacité des véhicules. Dans leurs travaux Hannan et al. (2018) proposent une étude pour gérer la collecte des déchets solides en tenant compte des coûts et des impacts environnementaux et formulent leur problème en tant que CVRP.

b. VRP avec fenêtres de temps (VRPTW)

Dans le VRPTW, un intervalle de temps $[a_i, b_i]$ est associée à chaque client, appelée une fenêtre de temps durant laquelle il peut être livré ou collecté (Son et Louati, 2016). Dans la formulation mathématique de la section 2.3, d'autres variables de décision sont définies :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_i^k x_{ij}^k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}^k x_{ij}^k \leq T^k \quad \forall k \in (1, \dots, K)$$

Avec :

t_i^k : Temps nécessaire au véhicule k pour charger ou décharger au sommet i ;

t_{ij}^k : Temps nécessaire au véhicule k pour voyager du sommet i au sommet j ;

T^k : Temps maximal de la tournée du véhicule k.

c. VRP avec collecte et livraison (PDVRP)

Le problème de collecte et de livraison (Pickup and Delivery Problem) est un problème d'optimisation de tournées de véhicules devant satisfaire des demandes de transport des biens entre fournisseurs et clients. Il s'agit de déterminer un circuit de plusieurs véhicules, de façon à servir à coût minimal un ensemble de clients répartis dans un réseau, satisfaisant certaines contraintes relatives aux véhicules, à leurs capacités et à des précédences entre les nœuds (Harbaoui et al. 2008).

d. Le problème de tournées de véhicules périodique

Chaque client doit être visité k fois au cours d'un horizon de planification à M périodes ($1 \leq k \leq M$) et les demandes des clients sont fixes (Lacomme et al. 2005).

e. VRP avec flotte hétérogène

Le problème de tournées de véhicules avec flotte hétérogène (*heterogeneous fleet vehicle routing problem* – HVRP) est une extension du VRP. Dans la fonction objectif, une variable de décision est introduite concernant le nombre de véhicules à utiliser pour chaque type.

L'objectif est d'optimiser les routes, débutant et se terminant à un dépôt, d'une flotte de véhicules hétérogènes (capacités variées) en prenant en considération les coûts fixes et variables des véhicules pour répondre aux demandes d'un ensemble de clients. Deux versions du problème se retrouvent dans la littérature : le HVRP avec flotte illimitée et celui avec flotte limitée (Bolduc, 2008).

f. PVRP (Pollution vehicle routing problem)

À la différence du VRP classique, le PVRP considère l'aspect environnemental avec l'objectif de minimiser les émissions de CO₂. Il a été abordé dans la littérature par différents

auteurs dont nous pouvons citer les travaux de Bektas et al. (2011), Demir et al. (2012) et Kramer et al. (2015).

Moutaoukil et al. (2014) ont comparé les résultats obtenus par la résolution d'une fonction objectif économique et d'une fonction environnementale dont le but était de démontrer l'importance du choix du type et du nombre de véhicules dans la minimisation des coûts économiques et la réduction des émissions de CO₂ le plus bas possible.

2.3 Le problème de tournées de véhicules dans la collecte des huiles moteur usagées

La gestion des déchets dangereux peut devenir un élément critique lors de l'évolution d'une entreprise. De nos jours, tous les secteurs industriels ou commerciaux laissent une empreinte sur l'environnement, du fait de l'utilisation de l'énergie, l'épuisement des ressources naturelles, la production de déchets et leurs rejets dans le milieu naturel.

Parmi ces déchets, on retrouve les huiles usagées qui sont classées dans la catégorie des déchets spéciaux dangereux (Hanhan, 2008). Leur rejet dans la nature est strictement interdit. Elles peuvent engendrer une détérioration importante du milieu naturel qui peut être traduit par une pollution de l'eau, du sol et de l'atmosphère.

Extrêmement toxique, car en service, l'huile de vidange est polluée par l'essence, les gaz de combustion qui apportent, entre autres, des dérivés de plomb.

Cette catégorie de déchet fait l'objet d'une réglementation très stricte (annexe A), la majorité des moteurs de véhicules sont alimentés par ces huiles, que seuls les collecteurs agréés ont le droit de ramasser.

La partie qui suit offre un survol de la littérature sur les problèmes de tournées de véhicules visant à résoudre le problème de ramassage des huiles usagées. L'objectif de l'article de Le Blanc et al. (2004) a été de proposer le concept du collector managed inventory (CMI) au niveau d'une chaîne logistique inverse. Les auteurs ont introduit une méthodologie de planification de la collecte des huiles de vidanges usagées qu'ils ont nommés must-order et can-order, la distance parcourue a été réduite de 26.3%.

Repoussis et al. (2009) ont développé un système de support à la décision (decision support system DSS) pour la gestion des opérations de collecte et de recyclage des huiles de vidange usagées au niveau d'une compagnie multinationale en Grèce. Ils résolvent un problème de tournées de véhicule avec contrainte de capacité et fenêtres de temps CVRPTW. Un gain de 30% a été fait grâce à la mise en place de ce modèle.

Fajardo et al. (2016) ont réalisé une étude comparative des résultats obtenus par l'utilisation de plusieurs heuristiques de résolution à partir d'indicateurs de performance en termes de

distance totale parcourue, la durée totale de la tournée et le coût associé.

L'objectif étant d'arriver à résoudre un CVRP d'une chaîne logistique inverse constituée d'un dépôt et de plusieurs points de collecte d'huiles usagées.

Castañeda et al. (2017) résolvent un problème de transport pour la collecte des huiles usagées dans la région de Pereira en Colombie par l'utilisation d'une méthode basée sur une décomposition du problème en une partition en sous-groupes de l'ensemble des clients. Ils ont résolu un TSP en relaxant la contrainte de capacité, puis à partir de la grande route, les auteurs ont construit des clusters (groupes de clients). Les deux algorithmes ont été programmés sur le solveur MATLAB.

2.4 Les méthodes de résolution

2.4.1 Complexité algorithmique

Les problèmes de tournées de véhicules sont plus complexes que le TSP qui est déjà NP-difficile (problème difficile), sachant que le VRP est une extension du TSP alors il possède la même difficulté de résolution (Harbaoui, 2010). D'après les travaux de Laporte (1992) et Golden et al. (1988), sa complexité est exponentielle, car lorsque le nombre de nœuds (n) double, le temps d'exécution est élevé à la puissance 2. La résolution par des méthodes exactes nécessite souvent, des durées de calcul qui augmentent exponentiellement avec la taille des problèmes qu'elles essayent de résoudre. La méthode doit donc être arrêtée prématurément lors de la résolution.

2.4.2 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes garantissent l'obtention d'une solution optimale au problème. Sur les problèmes NP, comme le VRP, ces méthodes ont une complexité exponentielle et elles ne peuvent résoudre en temps raisonnable que des instances de taille limitée (en fonction de la nature du problème). Selon Mais (2010), même sur des instances de petite taille, ces méthodes exactes peuvent nécessiter des temps de calcul importants.

Dans cette thèse, nous allons appliquer sur des instances réelles la programmation linéaire en nombre entier.

2.4.2.1 Programmation linéaire

La plupart des problèmes de transport peuvent être présentés sous forme d'un PLNE, dans le but de minimiser (ou maximiser) une fonction linéaire à variables entières en

respectant un ensemble de contraintes linéaires.

Un programme linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \min f(x) &= c^T x \\ \text{s.c.} \quad Ax &\geq b \\ x &\in \mathbb{R}^n \end{aligned}$$

Pour le problème d'optimisation linéaire binaire, la variable x est de type booléen $x \in \{0,1\}$.

La résolution de ce problème consiste à affecter des valeurs au vecteur $x = (x_1, \dots, x_n)$ de sorte que la fonction Z soit à son minimum, sans violation de la moindre contrainte.

- L'algorithme du Simplexe

L'algorithme du Simplexe est le plus souvent implémenté pour ces problèmes, dans les environnements logiciels de développement comme ILOG Cplex ou GUROBI.

On suppose un problème de programmation linéaire avec m contraintes et n variables sous forme standard.

Maximiser (ou minimiser) z

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

S.C

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &= b_m \end{aligned}$$

$$\forall i, x_i \geq 0$$

On définit :

La matrice des coefficients :
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Sachant que : $n \geq m$, et la matrice des variables et contraintes : $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ b_m \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \cdot \\ c_n \end{bmatrix}$

Étape 1 : On forme le tableau initial correspond à la forme standard et contenant le système d'équations avec variables d'écarts.

Tableau 2.1 : Le tableau initial du simplexe

B	x_1	$x_2 \dots$	x_n	x_{n+1}	x_{n+2}	\dots	x_{n+m}	
x_{n+1}	a_{11}	a_{12}	a_{1n}	1	0	\dots	0	b_1
x_{n+2}	a_{21}	a_{22}	a_{2n}	0	1	\dots	0	b_2
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot					
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot					
\cdot	\cdot	\cdot	\cdot					
x_{n+m}	a_{m1}	a_{m2}	a_{mn}	0	0	\dots	1	b_m
	c_1	c_2	c_n	0	0		0	

Étape 2 : On doit choisir la variable à introduire dans la base (la colonne de pivot)

Pour cela, on choisit l'indice j tel que :

$$c_j = \min\{c_i | c_i < 0\} \text{ Pour un problème de minimisation}$$

$$c_j = \max\{c_i | c_i > 0\} \text{ Pour un problème de maximisation}$$

Si aucun choix n'est possible, on a atteint la solution optimale et l'algorithme se termine.

Étape 3 : On doit choisir la variable à enlever de la base (la ligne de pivot).

Pour cela, on choisit l'indice i en utilisant le critère du quotient

$$\frac{b_i}{a_{ij}} = \min\left\{\frac{b_k}{a_{kj}} \mid a_{kj} > 0 \text{ } k = 1, 2, \dots, m\right\} \text{ Où } j \text{ est la colonne de pivot de l'étape 2}$$

a) On applique la procédure d'élimination de Gauss-Jordan autour du pivot situé à l'intersection de la ligne i et de la colonne j . Ensuite, on divise la ligne i par le pivot pour le mettre égal à 1.

b) Calculer la valeur des autres lignes

$$a_{ij}' = a_{ij} - \left(\frac{\text{élément de la ligne de pivot} * \text{élément de la colonne de pivot}}{\text{pivot}} \right)$$

Étape 4 : on vérifie les coefficients de la fonction objectif (le critère d'optimalité)

L'algorithme du simplexe s'arrête lorsque :

$$c_j \leq 0 \text{ Pour un problème de max}$$

$$c_j \geq 0 \text{ Pour un problème de min}$$

Sinon revenir à l'étape 2.

L'algorithme du Simplex trouve une solution réalisable (i.e. qui respecte l'ensemble des contraintes) et qui améliore pas à pas cette solution initiale vers la solution optimale. Cette méthode fonctionne bien dans la grande majorité des problèmes posés. Ceci étant, les pires cas rendent le Simplex exponentiel. Selon Deleplanque (2014), le VRP est considéré comme un problème facile à expliquer, mais difficile à résoudre, c'est la raison pour laquelle, le recours aux méthodes approchées est souvent nécessaire.

2.4.2.2 Méthodes de branchement (branch & bound)

- Algorithmes de séparation et évaluation (branch & bound)

Soit S un ensemble fini de solution réalisables de grande cardinalité, soit *coût* une fonction réelle qui pour toute solution réalisable x de S renvoi un coût (x), coût de la solution x . L'objectif est de trouver la solution réalisable x de coût minimal autrement dit la solution réalisable la moins coûteuse.

La solution optimale existe du fait que S est fini, et forcément un ensemble fini admet un minimum, mais il n'existe pas un algorithme simple pour énumérer les éléments de S , et le nombre de solutions réalisables est très grand (cardinalité grande), et même s'il existe un algorithme d'énumération, il va prendre beaucoup de temps à trouver la solution optimale.

Les algorithmes de séparation et évaluation appelés aussi Branch and Bound (B & B) permettent de résoudre de manière exacte le problème linéaire en nombre entier, et les problèmes binaires, la méthode a été proposée par Little et al en (1963) pour résoudre le TSP. L'algorithme construit une arborescence de toutes les possibilités de grande cardinalité comme illustré sur la figure 2.3. L'idée est de trouver la meilleure branche qui mène à optimiser la fonction objectif.

Les nœuds n'ayant pas de solution ne seront pas explorés (bound) et la recherche sera plus efficace.

Sachant qu'il existe deux parties dans l'espace de recherche, une partie explorée et une partie non encore explorée, ainsi à la frontière de ces parties, il y'a un ensemble des nœuds possiblement explorable et prêt à être analysés.

Le principe de la méthode consiste à choisir le prochain nœud à évaluer dans cet ensemble par une fonction heuristique de coût ou de profit.

La stratégie de développement de l'arborescence se fait soit en largeur d'abord sans backtracking, avec l'avantage de progresser sans oublier de solution. Soit en profondeur d'abord qui permet l'obtention rapide d'une solution admissible, sur laquelle on peut s'arrêter

dans le cas où la recherche d'optimalité est trop longue, et qui permet rapidement d'éliminer des branches de solutions sous-optimales, en économisant la mémoire.

Le branch (séparation) consiste à diviser récursivement le problème en un certain nombre de sous-problèmes qui ont chacun leur ensemble de solutions réalisables formant un recouvrement de l'ensemble S et permet d'obtenir une méthode générique pour énumérer toutes les solutions. Tandis que *le bound* représente la phase d'évaluation d'un nœud de l'arbre de décision, qui a pour but de déterminer que cet ensemble ne contient pas de solution intéressante pour la résolution du problème, et évite donc l'énumération systématique de toutes les solutions qui ne mènent pas forcément à la solution optimale.

Si par exemple le coût de la configuration actuelle coût (c) $>$ $\min(\text{coût}(S))$, donc pas de séparation (élagation) suivie de backtracking. Dans le cas contraire, si le coût est minimum que celui trouvé dans la zone explorée (minimum local), une procédure de branchement sera appliquée.

La phase d'évaluation permet donc de déterminer l'optimum de l'ensemble des solutions réalisables associé au nœud en question (résolution polynomiale) autrement dit le problème n'est plus divisible car sa taille n'est pas supérieure au seuil de subdivision, ou bien aboutir à un échec le cas échéant.

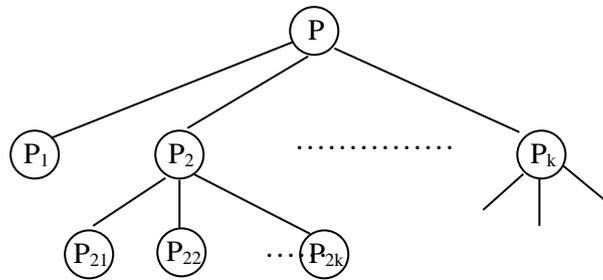


Figure 2.3 : Les méthodes de recherches arborescentes

Dans la résolution du TSP, le principe consiste à séparer (branch) l'ensemble des solutions en deux ou plusieurs sous-ensembles en fixant la valeurs d'une ou de plusieurs variables, lorsqu'un sous ensemble contient l'arc (i,j) la variable $x_{ij}=1$ et l'autre sous ensemble ne contient pas l'arc, $x_{ij}= 0$.

Le choix (le calcul) de la borne inférieure est fortement lié au problème lui-même (Weinberg, 2004), dans le cas d'un TSP, le calcul de la matrice réduite permet de fixer la borne minimum initiale U des solutions, cette matrice est définie de telle sorte à ce que chaque ligne de la

matrice des distances ou des coûts soit diminuée de son minimum : $L_i \leftarrow L_i - \min(L_i)$, ce qui mène à au moins une valeur de 0 dans chaque ligne.

Puis chaque colonne ne contenant pas la valeur 0 est aussi réduite : $C_i \leftarrow C_i - \min(C_i)$

Le calcul de $U_{\min} = \sum_i \min(L_i) + \sum_i \min(C_i)$, représente la distance minimale totale parcourue par la flotte de véhicules qui est une borne inférieure.

La recherche d'une solution de coût minimal, consiste à mémoriser la solution du plus petit coût, rencontré pendant l'exploration en commençant par le dépôt (0), puis à partir de ce nœud appelé racine, on fixe quel client sera visité à la i -ème place de la tournée ($i = 0$, puis $i = 1$, puis $i = 2$, ...).

À ce niveau-là, il faut décider si l'exploration d'une branche est utile avant d'énumérer toutes les solutions. Pour cela, on va procéder à une évaluation des solutions que peut porter une branche, c'est-à-dire donner une borne inférieure des coûts des solutions de la branche. Si cette évaluation est plus grande qu'une solution que l'on connaît déjà, on peut élaguer cette branche, c'est-à-dire, éviter de l'explorer, sachant que toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

2.4.2.3 La méthode de branchement et coupe (branch-and-cut)

La méthode de branch-and-cut est une combinaison de deux méthodes : la méthode des plans sécants (cutting-plane) et le branch-and-bound. Elle a été utilisée initialement par Chvatal (1973) pour la résolution du problème de voyageur de commerce, les nœuds de l'arbre sont évalués grâce à un algorithme de coupes qui réduit l'espace de recherche des solutions en excluant les variables qui ne sont pas entières, par ajout de contraintes appelées coupes. La difficulté réside du fait du nombre important de contraintes d'élimination des sous-tours.

2.4.3 Les méthodes approchées

Les méthodes heuristiques nous permettent de trouver des solutions réalisables de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation. Ces solutions ne sont pas forcément optimales mais peuvent être obtenues dans un temps relativement correct (Guibadj, 2013).

Nous allons, dans ce qui suit, présenter quelques heuristiques classiques pour le VRP que nous allons adapter à un cas réel. Les heuristiques classiques de résolution du VRP sont divisées en trois grandes familles : les heuristiques de construction, les heuristiques en deux-phases et les heuristiques d'amélioration (Laporte, 2002). Les heuristiques en deux phases se

divisent elles-mêmes en deux catégories : groupage en premier, routage en second et routage en premier, groupage en second.

2.4.3.1 Méthodes constructives

Ces heuristiques permettent de générer rapidement une première solution à un problème de tournées de véhicules. Deux heuristiques connues sont : les heuristiques de gains (savings) et les heuristiques d'insertion.

- L'algorithme de Clarke and Wright (1964)

L'heuristique constructive la plus connue est la méthode des économies (savings) de Clarke and Wright. Cet algorithme classique a été proposé en 1964 par Clarke et Wright pour résoudre le CVRP (Clarke et Wright, 1964).

La figure 2.4 illustre un exemple où 0 est le dépôt, i et j sont deux clients.

En retirant les liaisons $(i, 0)$ et $(0, j)$ et en ajoutant la liaison (i, j) le coût passe de $d_{0i}+d_{i0}+d_{0j}+d_{j0}$ à $d_{0i}+d_{j0}+d_{ij}$. Cette méthode permet cependant de construire rapidement de bonnes solutions (Caccetta et al., 2013), d'où leur utilisation en amont des méthodes d'amélioration.

Algorithm de Clarke and Wright (CW)

Étape 1 : Choisir un nœud comme point de départ et le considérer comme le nœud 1

Étape 2 : Construire n routes initiales. Ainsi, chacune des expéditions est présumée être collectée par un camion distinct, qui partira du dépôt, effectuera la collecte et retournera au dépôt.

Un camion peut faire plusieurs tournées, selon le temps de service.

Étape 3 : Calculer la matrice des économies, obtenue par la formule $S_{ij}=d_{i1}+d_{1j}-d_{ij}$ pour toute paire de sommets (i, j) , $(i=2\dots n; j=2\dots n; i\neq j)$.

Étape 4 : Trier en ordre décroissant les gains dans un tableau.

Étape 5 : Trouver la meilleure économie

La fusion de la route $(0, \dots, i, 0)$ avec la route $(0, j, \dots, 0)$ en une plus grande route $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ procure le gain S_{ij} , à condition qu'aucune contrainte ne soit violée (Contrainte de capacité).

Étape 6 : Retour à l'étape 5 tant que des économies réalisables sont possibles, c'est-à-dire aussi longtemps qu'il existe un $S_{ij}\neq 0$

d_{ij} : Distance ou coût entre le nœud i et le nœud j

s_{ij} : Économie réalisée en circulant directement du nœud i au nœud j sans passer par le dépôt (économie en terme de distance ou bien de coût).

L'Algorithme de CW trouve une plus proche solution à la solution optimale et si on utilise les méthodes d'amélioration K-Opt ou Or-Opt, on peut avoir meilleure solution (Faulina et al. 2011).

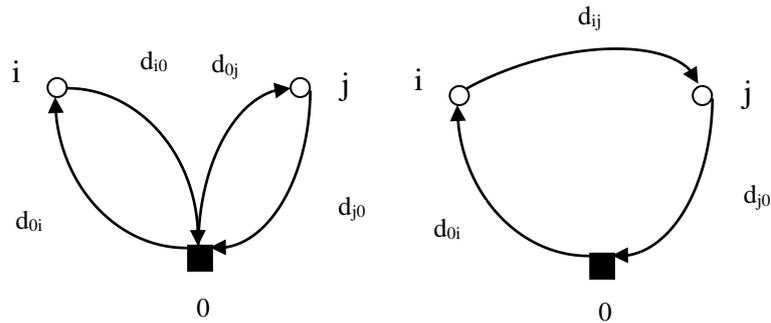


Figure 2.4 : Méthode de gain (Clarke and Wright)

Cette méthode a été utilisée par plusieurs chercheurs, nous pourrions citer par exemple les travaux de Faulina et al (2011). Les auteurs proposent une heuristique de Clark and Wright améliorée pour résoudre un CVRP sur un cas réel dans le secteur agro-alimentaire en Navarre (Espagne). Ils intègrent le coût environnemental dans la fonction objectif.

Dans les travaux de Caccetta et al. (2013), un CVRP a été résolu par une méthode hybride composée d'une heuristique de gain et d'une procédure de réduction de domaine sur des instances de 20 à 200 clients.

Un nouvel algorithme basé sur l'heuristique de Clark et Wright appelé Green Clark et Wright (GCW) a été appliqué pour résoudre un problème de tournées de véhicules (Alinaghian et al. 2015), la fonction objectif tend à minimiser les coûts de carburant, le coût du conducteur et le nombre de véhicules.

Une autre version robuste de l'heuristique de Clark and Wright a été appliquée sur un grand nombre d'instances bien connues de la littérature par Doyuran et al. (2011), pour résoudre un CVRP. Les résultats montrent une réduction considérable de la distance parcourue par les véhicules par rapport aux résultats de l'heuristique classique.

Islam et al. (2015), ont proposé une étude comparative des résultats de trois heuristiques classiques pour résoudre un CVRP. La meilleure solution a été obtenue par l'heuristique de Clark and Wright.

Exemple didactique 1

A titre d'illustration, dans l'exemple 1 présenté à la Figure 2.5, supposant un réseau de collecte des déchets composé de 6 points de collecte et d'un dépôt représenté par 0, le tableau (2.2) montre le numéro du nœud, sa localisation et la quantité de produits à collecter. Deux camions, d'une capacité de 2400 litres chacun, sont disponibles.

Tableau 2.2 : Localisation et demandes des clients de l'exemple 1

Client	Localisation	Quantité
0	(40,40)	
1	(22,22)	600
2	(36,26)	650
3	(21,45)	900
4	(45,35)	700
5	(55,20)	750
6	(55,45)	800

Pour appliquer la méthode de Clarke et Wright, il faut d'abord calculer la matrice des économies présentée sur le tableau 2.4 et obtenue par la formule : $S_{ij}=d_{0i}+ d_{0j}-d_{ij}$ pour toute paire de sommets (i, j) avec $d_{ij}=d_{ji}$. Le tableau 2.3 représente la matrice de distance entre les différents nœuds.

Tableau 2.3 : Matrice des distances de l'exemple 1

c_{ij}	0	1	2	3	4	5	6
0	-	28	12	26	15	11	12
1		-	25	32	21	32	20
2			-	11	25	8	22
3				-	31	16	8
4					-	23	25
5						-	6

$$s_{12} = 15 = 28 + 12 - 25 \quad (d_{10} + d_{02} - d_{12} = d_{01} + d_{02} - d_{12})$$

$$s_{13} = 22 = 28 + 26 - 32 \quad (d_{10} + d_{03} - d_{13} = d_{01} + d_{03} - d_{13})$$

$$s_{14} = 22 = 28 + 15 - 21 \quad (d_{10} + d_{04} - d_{14} = d_{01} + d_{04} - d_{14})$$

$$s_{15} = 7 = 28 + 11 - 32 \quad (d_{10} + d_{05} - d_{15} = d_{01} + d_{05} - d_{15})$$

$$s_{16} = 20 = 28 + 12 - 20 \quad (d_{10} + d_{06} - d_{16} = d_{01} + d_{06} - d_{16})$$

etc...

Etape 2

On crée ensuite une liste triée des économies qu'on parcourt ensuite en essayant de regrouper les clients qui peuvent faire partie d'une même tournée, c'est-à-dire ceux pour lesquels aucune contrainte n'est violée.

Tableau 2.4 : Matrice des économies

	1	2	3	4	5	6
1		15	22	22	7	20
2			27	2	15	2
3				10	21	30
4					3	2
5						17
6						

$S(3,6)$	30	On place les clients 3 et 6 dans une même tournée.
$S(2,3)$	27	On ajoute le client 2 à la tournée qui contient déjà 3 et 6.
$S(1,3)$	22	On ne peut plus rien fusionner avec le client 3, car il n'est pas adjacent au dépôt.
$S(1,4)$	22	On place les clients 1 et 4 dans une même tournée.
$S(3,5)$	21	On ne peut plus rien fusionner avec le client 3, car il n'est pas adjacent au dépôt.
$S(1,6)$	20	On ne peut fusionner les tournées des clients 1 et 6, à cause des contraintes de capacité.
$S(5,6)$	17	On ne peut pas fusionner les tournées des clients 5 et 6, à cause des contraintes de capacité.
$S(1,2)$	15	On ne peut fusionner les tournées des clients 1 et 2, à cause des contraintes de capacité.
$S(2,5)$	15	On ne peut fusionner les tournées des clients 2 et 5, à cause des contraintes de capacité.
$S(3,4)$	10	Idem
$S(1,5)$	7	On ajoute le client 5 à la tournée qui contient déjà 1 et 4.

On a obtenu deux tournées qui ne peuvent pas être combinées.

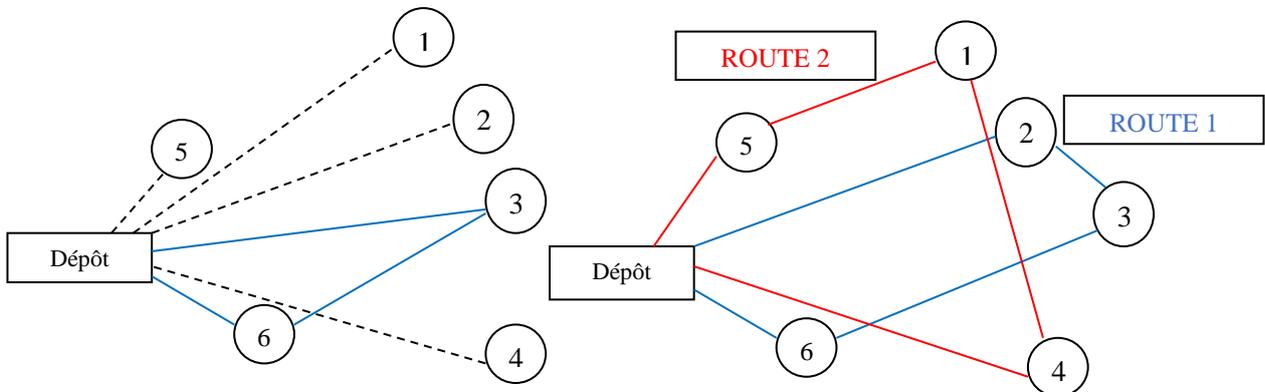


Figure 2.5 : Solution de l'exemple (1)

- **Méthode d'insertion (Nearest insertion algorithm)**

La plus proche insertion est l'heuristique d'insertion la plus connue dans la littérature, l'algorithme choisit séquentiellement et de façon répétitive l'arc le plus court qui n'a pas encore été sélectionné pour étendre le cycle (i.e. route) courant, sans violation de contraintes (i.e. capacité du camion, sous-tours).

Lorsque l'un des critères d'arrêts est atteint, on passe à la tournée suivante jusqu'à l'insertion de tous les clients de la base de données.

Selon Loyola et al. (2016), la solution de l'heuristique de la plus proche insertion combinée à un opérateur 2-Opt se trouve à 3,08% de la solution optimale.

Le principe de la méthode est simple, il faut commencer d'abord par choisir un camion de la liste des camions disponibles, ensuite commencer la tournée à partir du sommet (1,1) correspondant au dépôt, trouver le sommet le plus proche du dernier sommet de la tournée et l'ajouter à celle-ci en vérifiant la contrainte de capacité du camion, jusqu'à ce que aucune liaison ne soit possible (voir figure 2.6).

Si la liste des clients non visités n'est pas vide et si la liste des camions n'est pas épuisée alors retourner à la première étape.

Algorithme de la plus proche insertion (Nearest insertion algorithm)

Début

Etape1 : Commencer la tournée à partir du sommet 1 et commencer une nouvelle route [1 1], 1 c'est le dépôt

Répéter

Etape 2 : Trouver le sommet le plus proche du dernier sommet de la tournée et l'ajouter à celle-ci en vérifiant la contrainte de capacité du véhicule.

Exemple si le client 2 est le plus proche, alors [1 2 1]

Jusqu'à

ce que aucune liaison ne soit possible

Si Etape 3 : La liste des clients non visités n'est pas vide **alors**

Aller à l'étape 1 pour créer une nouvelle route [1 1]

Sinon Fin

Fin

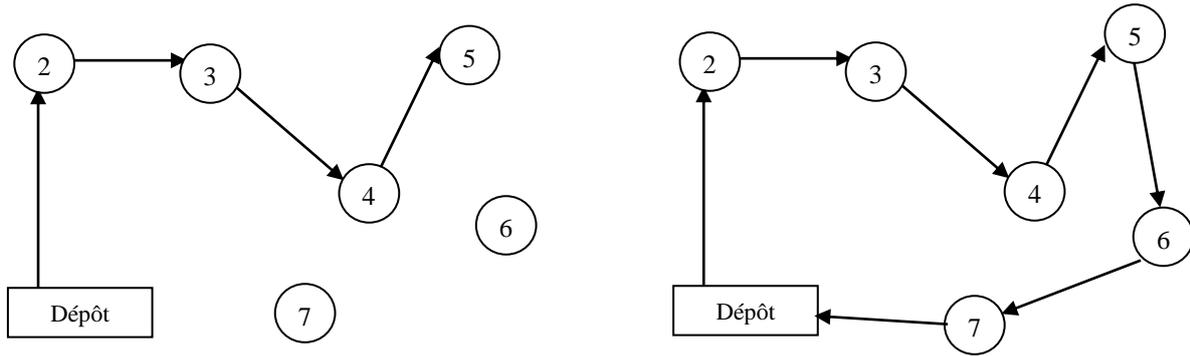


Figure 2.6: Méthode de la plus proche insertion (*Nearest insertion algorithm*)

2.4.3.2 Méthode à deux phases

Cette méthode a été initialement proposée par Beasley en 1983, qui consiste à décomposer le problème en deux phases. La décomposition procède suivant l'approche route-first, cluster-second, cette heuristique construit une tournée hamiltonienne globale appelée tour géant en relaxant la contrainte de capacité (problème du Voyageur de Commerce). Le tour passe par tous les nœuds du réseau puis la méthode découpe ce tour en tournées selon le nombre de véhicules nécessaires (Beasley, 1983). Dans leur rapport sur le TSP, Ben Ismail et al. (2011) nomment cette méthode *parcours d'abord - partition ensuite*.

2.4.3.3 Heuristiques d'amélioration

Selon Ben Ismail et al. (2011), les méthodes d'amélioration tentent d'améliorer une solution du VRP en lui appliquant des opérateurs heuristiques d'échange de clients au sein des tournées, avec l'objectif de corriger les défauts générés lors de la construction de la solution initiale et de se rapprocher, autant que possible, de la solution optimale.

Ces méthodes se basent sur le principe de la recherche locale, il s'agit d'échanger des arcs (clients) d'une même tournée ou de plusieurs tournées différentes.

– Heuristique k – Opt

Ces heuristiques sont des transformations locales car elles ne perturbent pas globalement la structure de la solution qu'elles changent, mais la modifient que localement.

Selon Subramanian (2012), les méthodes amélioratives peuvent être divisées en deux catégories, les méthodes inter et intra-routes.

Les recherches locales les plus connues sont de la famille des k – Opt (2 – Opt, 3 – Opt, n – Opt) proposées par Lin (1965), il s'agit d'enlever k arcs pour remettre les chaînes associées dans la meilleure combinaison possible en termes de distance ou de coût. À la fin de la procédure, aucune autre amélioration n'est possible en échangeant n éléments. La figure (2.7) donne un exemple de 2-Opt, la méthode permet d'inverser le segment à l'intérieur de la tournée.

Selon Lin (1965), pour limiter le temps de calcul, la valeur de k est généralement limitée à 2 ou 3. Un tour est considéré 2-optimal (3-optimal) s'il a épuisé toutes les possibilités d'amélioration par 2-Opt.

La méthode k -Opt est généralement utilisée dans des problèmes de planification de trajectoire, comme les problèmes de tournées de véhicules (Gardeux, 2011). La procédure générale de la méthode consiste à tester tous les échanges possibles (λ arcs) dans la tournée et évaluer l'impact de ces échanges (calculer la distance de la tournée après chaque itération). Appliquer l'échange ayant le meilleur impact (en termes de distance). Puis retourner à la première étape tant que des améliorations sont possibles, sinon arrêter la procédure lorsqu'il n'y a plus d'amélioration.

Heuristique 2 – Opt (Lin, 1965)

DEBUT

Etape 1 : Trouver une tournée initiale (solution initiale).

Etape 2 : Modifier la tournée en substituant à un ensemble de deux arcs c-à-d supprimer deux arcs (i,j) et (k,l) non adjacents d'une tournée, puis reconnecter les deux chaînes obtenues par les deux nouveaux arcs (i,l) et (j,k) .

Etape 3 : Calculer la distance et enregistrer cet échange.

$$\text{DISTANCE} = d_{il} + d_{jk} - d_{ij} - d_{kl}.$$

Etape 4 : Répéter cette procédure pour tous les arcs.

Etape 5 : Choisir l'échange qui améliore le mieux la tournée, et l'exécuter.

Etape 6 : Chercher d'autres échanges qui peuvent améliorer la longueur de la tournée, jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne soit possible.

FIN

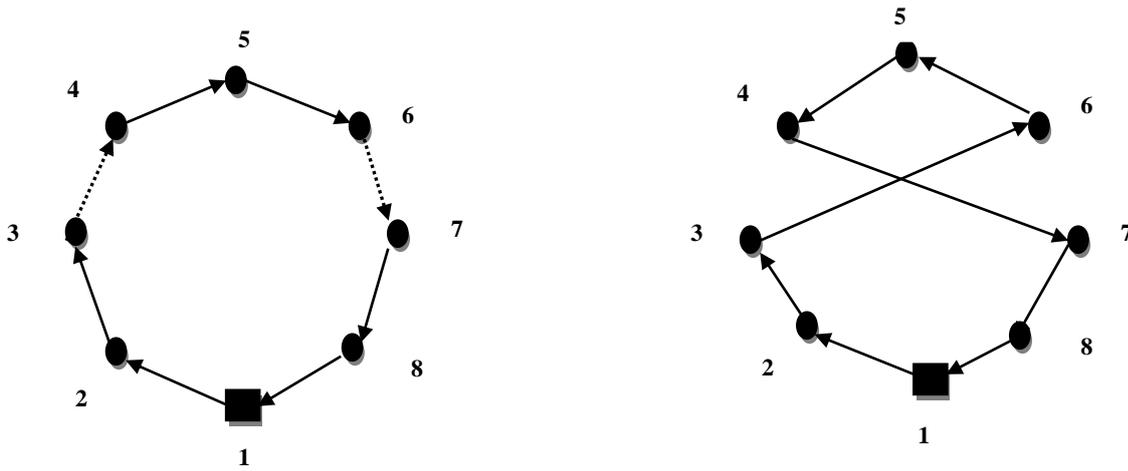


Figure 2.7: Schéma du mouvement 2-Opt (Lin, 1965)

– Heuristique Or– Opt

Cette heuristique est basée sur le principe d'échange de chaîne (EC), proposée par Or (Or, 1976) et a été nommée Or-Opt par Golden et Stewart (1985).

La méthode consiste à déplacer une séquence de 3, 2 ou 1 nœud consécutif au sein d'une tournée comme illustré sur la figure (2.8) sans inverser le segment à l'intérieur de la tournée. Cet algorithme a été adapté afin de tenir compte de l'aspect asymétrique de la matrice des distances $d_{ij} \neq d_{ji}$. Pour notre étude, nous avons choisi d'appliquer l'ensemble de ces séquences.

Heuristique Or-opt intra-route (Or, 1976)

DEBUT

Etape 1 : Considérer une tournée initiale et mettre $\text{dépôt} = 0$ choisir $t=1$ et $s = 3$.

Etape 2 : Enlever s sommets consécutifs à partir du nœud $t=1$ et essayer d'insérer ces sommets entre toutes les paires de sommets consécutifs restant dans la tournée en considérant les deux sens possibles d'insertion de la chaîne. Dans les deux cas la distance de la tournée doit être évaluée dans les deux sens. Si l'échange diminue le coût de la tournée, changer immédiatement la séquence de visite de la tournée. Mettre $t=1$ et répéter l'étape 2. Si aucune tentative d'insertion ne diminue le coût de la tournée, mettre $t=t+1$. Si $t = n+1$ alors passer à l'étape 3, autrement répéter l'étape 2.

Etape 3 : Mettre $t=1$ et $s = s - 1$. Si $s = 0$, alors l'algorithme est terminé, autrement retourner à l'étape 2.

FIN

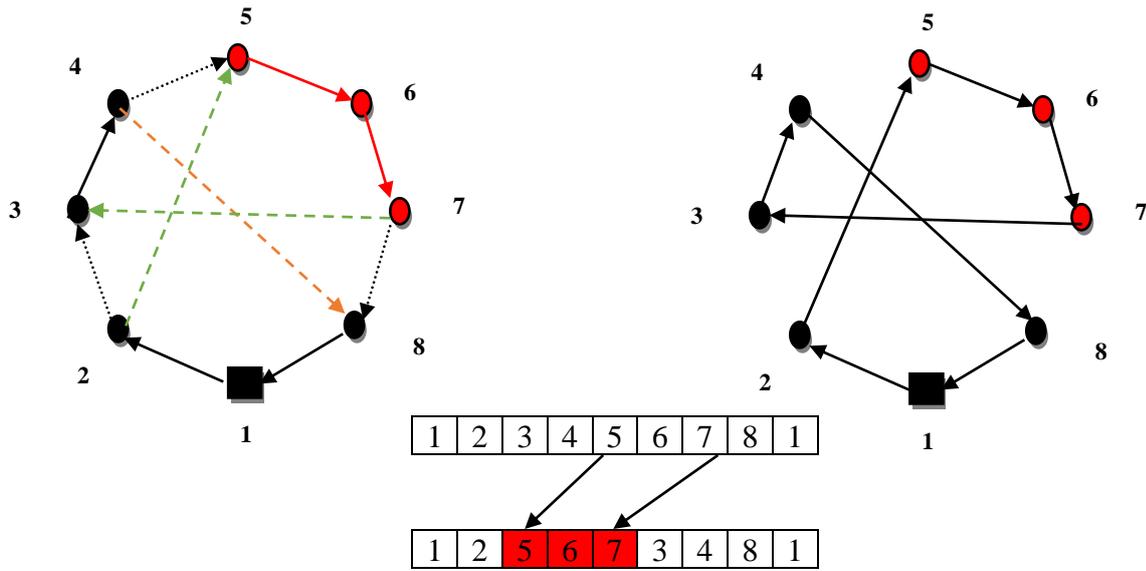


Figure 2.8: Schéma du mouvement Or-opt intra-route

Le mouvement Or-opt représenté par la figure (2.9) permet de déplacer un nœud d'une tournée vers une autre.

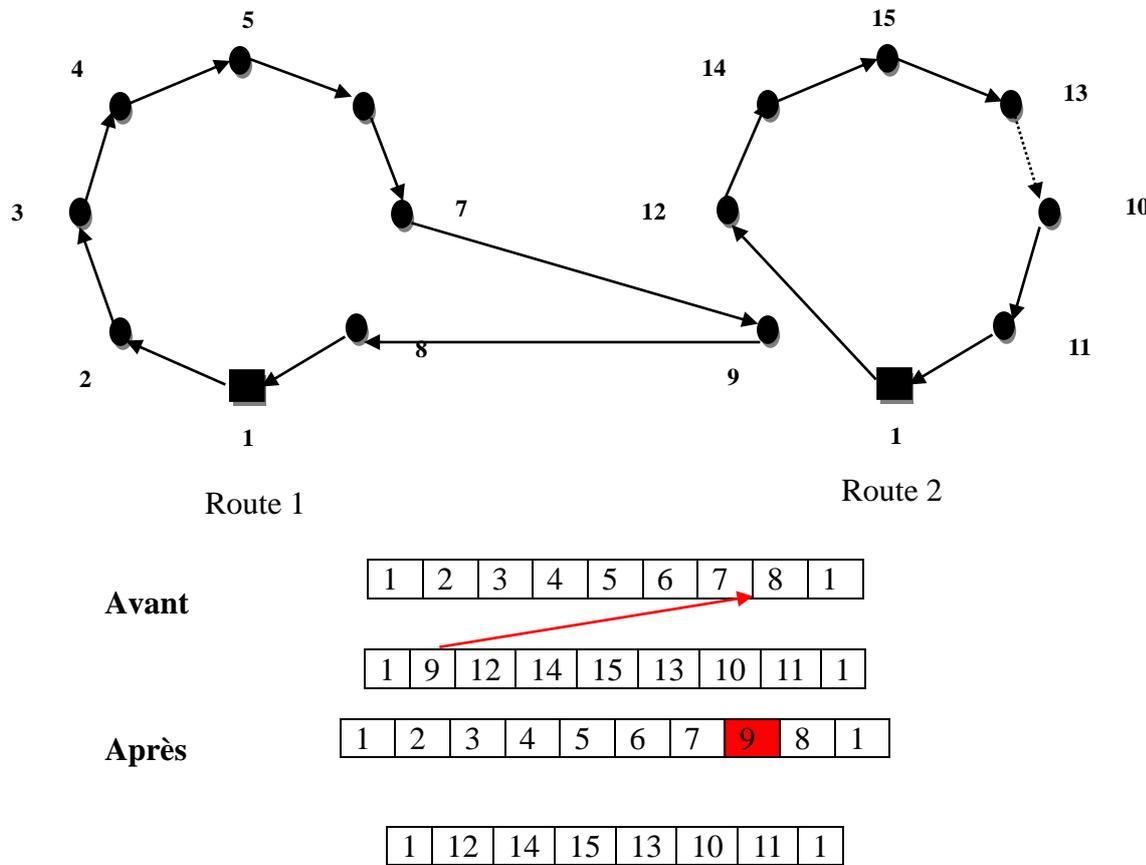


Figure 2.9: Schéma du mouvement Or-Opt inter-routes

– **Heuristique Swap**

Le Swap Interne consiste à échanger dans la tournée, la position de 2 clients dans une même tournée, par contre le mouvement du Swap externe (figure 2.10) consiste à échanger deux clients de tournées différentes, l'algorithme de Osman (Osman, 1993) recherche la meilleure permutation pour l'amélioration de la solution initiale.

Heuristique swap (λ -interchange) (Osman, 1993)

DEBUT

Étape 1 : Considérer une solution réalisable initiale $S = \{R_1, \dots, R_p, \dots, R_q, \dots, R_v\}$. ou R_p l'ensemble des clients desservis par la route P.

Soit l'ordre des indices des véhicules dans la solution $S \sigma(P) = P, \forall P \in V. \lambda = 1 \text{ ou } 2$

Étape 2 : Procédure λ -interchange (Swap)

Remplacer un sous ensemble $S_1 \subset R_p$ de taille $|S_1| \leq \lambda$ par un autre sous ensemble $S_2 \subset R_q$ de taille $|S_2| \leq \lambda$ pour obtenir 2 nouvelles routes $\hat{R}_p = (R_p - S_1) \cup S_2$ et $\hat{R}_q = (R_q - S_2) \cup S_1$

Génération d'une nouvelle solution voisine $S' = \{R_1, \dots, \hat{R}_p, \dots, \hat{R}_q, \dots, R_v\}$

Étape 3 : Sélectionner toutes les combinaisons possibles de paires (R_p, R_q) sans répétition :

$(R_{\sigma(1)}, R_{\sigma(2)}), \dots, (R_{\sigma(1)}, R_{\sigma(v)}), (R_{\sigma(2)}, R_{\sigma(3)}), \dots, (R_{\sigma(v-1)}, R_{\sigma(v)})$

FIN

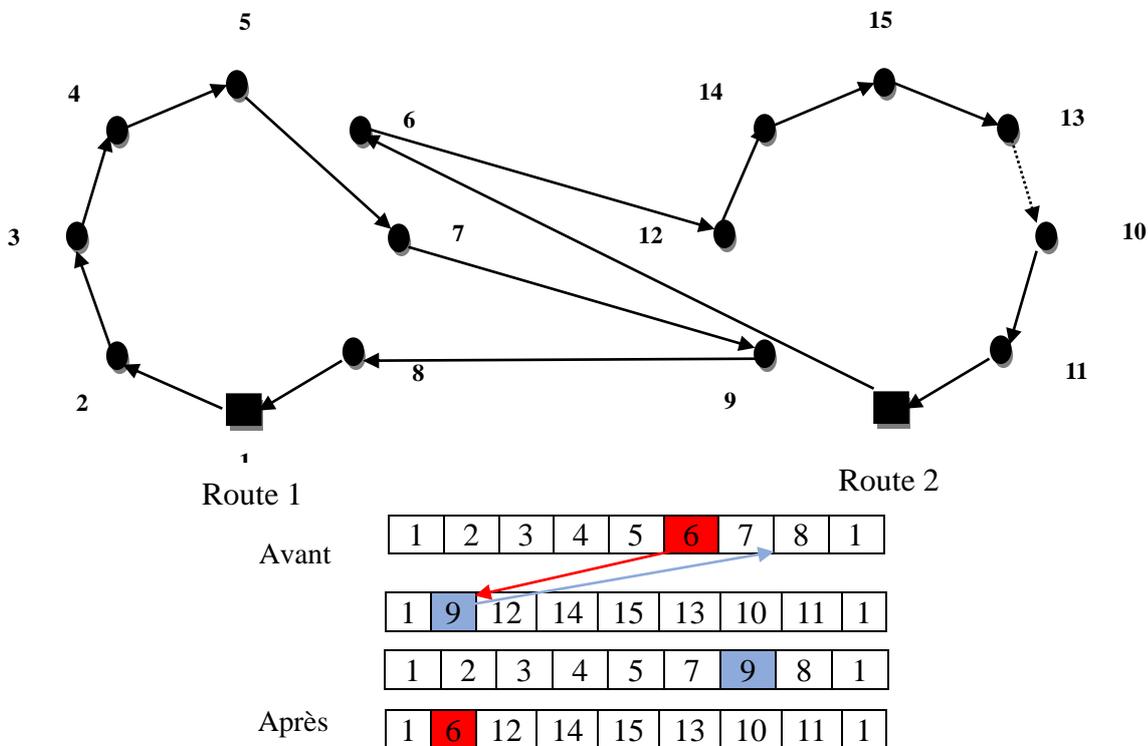


Figure 2.10: Schéma du mouvement Swap externe

2.5 Conclusion

Ce chapitre dédié à l'état de l'art des problèmes de tournées de véhicules est structuré en trois parties. La première partie a permis de décrire les problèmes de tournées en partant de leurs origines jusqu'à leurs variantes.

Dans la deuxième partie, nous avons restreint notre champ d'action à la collecte des déchets d'huile de vidange, parmi les différents niveaux évoqués dans le chapitre précédent, nos travaux se situent clairement au niveau de la planification opérationnelle de l'activité de transport, ceci s'apparente à un problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité (CVRP) pour la collecte des déchets. Nous avons décrit les différentes extensions de ce problème ainsi qu'une analyse des travaux existants visant à résoudre le problème de ramassage des huiles moteur usagées.

Pour cela nous avons poussé la synthèse bibliographique un peu plus en intégrant des aspects plus techniques : les hypothèses, les modélisations mathématiques, la manière dont les auteurs traduisent mathématiquement les contraintes, les fonctions mathématiques utilisées pour le calcul des coûts dans les fonctions objectifs et les méthodes développées. Il ressort de cette analyse que très peu de travaux ont été recensés sur le sujet.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de résolution du problème de tournée de véhicules avec contrainte de capacité, appartenant aux problèmes difficiles, car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre en un temps optimal. Pour trouver une solution de bonne qualité et dans un temps relativement optimal, on devra faire appel aux méthodes heuristiques.

Nous allons par la suite résoudre notre problème grâce à des méthodes classiques de construction et d'amélioration sur lesquelles nous allons appliquer des données réelles issues d'une chaîne de logistique inverse pour la collecte des huiles de vidange usagées en Algérie.

Chapitre 3. Application à la planification de l'activité de collecte des huiles moteur usagées

Sommaire

3.1	Introduction.....	69
3.2	Les huiles usagées en Algérie	69
3.3	Le problème de la collecte des huiles	70
3.4	Méthode actuelle de planification des tournées.....	71
3.5	Caractérisation du problème	73
3.5.1	Sélection des clients par la méthode ABC.....	73
3.5.2	Géolocalisation des points de collecte et distancier.....	75
3.5.3	Flotte de véhicules	76
3.5.4	Les tournées	76
3.5.5	Quantités d'huile générées.....	77
3.6	Analyse statistique des données.....	77
3.6.1	Tests d'ajustements.....	81
3.6.2	Analyse graphique	82
3.6.3	Test de tendance.....	88
3.6.4	Lissage exponentiel simple.....	92
3.6.5	Lissage exponentiel de Holt.....	95
3.6.6	Prévisions pour l'année 2018.....	97
3.7	Modélisation du problème étudié.....	97
3.7.1	Hypothèses de travail.....	97
3.7.2	Formulation mathématique	98
3.7.3	Evaluation et amélioration du modèle	100
3.8	Conclusion.....	102

3.1 Introduction

Dans cette étude, le problème évoqué a trait à la logistique inverse d'une entreprise de transport et de commercialisation de carburant (NAFTAL) et plus particulièrement la collecte et le transport des déchets d'huile moteur usagée. L'objectif est de développer une méthode permettant d'optimiser la collecte d'huile usagée. Pour modéliser ce problème d'optimisation, nous sommes partis d'une modélisation « classique » des problèmes de tournées de véhicules (Dantzig et al. 1959), que nous allons adapter à notre cas.

Dans un premier temps nous avons étudié les besoins de la société afin de cerner la problématique. Pour cela nous avons fait un état des lieux par la réalisation d'un inventaire de l'ensemble des données du problème (contraintes temporelles, quantité collectée, points de collecte, réseau routier, flotte, capacité de la cuve du client, capacité des camions, ...)

Par la suite, nous avons réalisé un état de l'art sur les études portant sur la gestion et l'optimisation de la collecte des huiles moteur usagées. La littérature dénombre peu de travaux (voir section 2.3).

3.2 Les huiles usagées en Algérie

Avec l'accroissement du parc automobile, le volume des huiles moteur usagées est en constante augmentation. Selon l'entreprise de distribution et de commercialisation des hydrocarbures, 169 200 tonnes de lubrifiants sont utilisées annuellement dans les deux secteurs des transports et de l'industrie. Cette quantité génère près de 82 908 tonnes d'huiles usagées, soit 46% du volume global des lubrifiants.

Le tableau (3.1) donne les quantités d'huile neuve consommées et le gisement national d'huile usagée.

Tableau 3.1 : Les gisements d'huile en Algérie pour l'année 2016

Consommation nationale		Gisement huiles usagées		Collecte
169 200 T		82 908 T		
H. Moteurs	H. Industrielles	H. Moteurs Usagées	H. Indus. Usagées	
135 000 T	34 200 T	66 150 T	16 758 T	8 290 T (10%)

Sur la figure 3.1 on remarque que sur 82 908 tonnes d'huiles usagées, un volume de 66 150 tonnes représente des huiles de moteurs (huiles noires) alors que les 16 758 tonnes restantes

sont des huiles industrielles (huiles claires), mais seule une faible quantité est récupérée 8290 tonnes soit 10% du gisement d'huile usagée, 74 618 T sont déversées dans la nature.

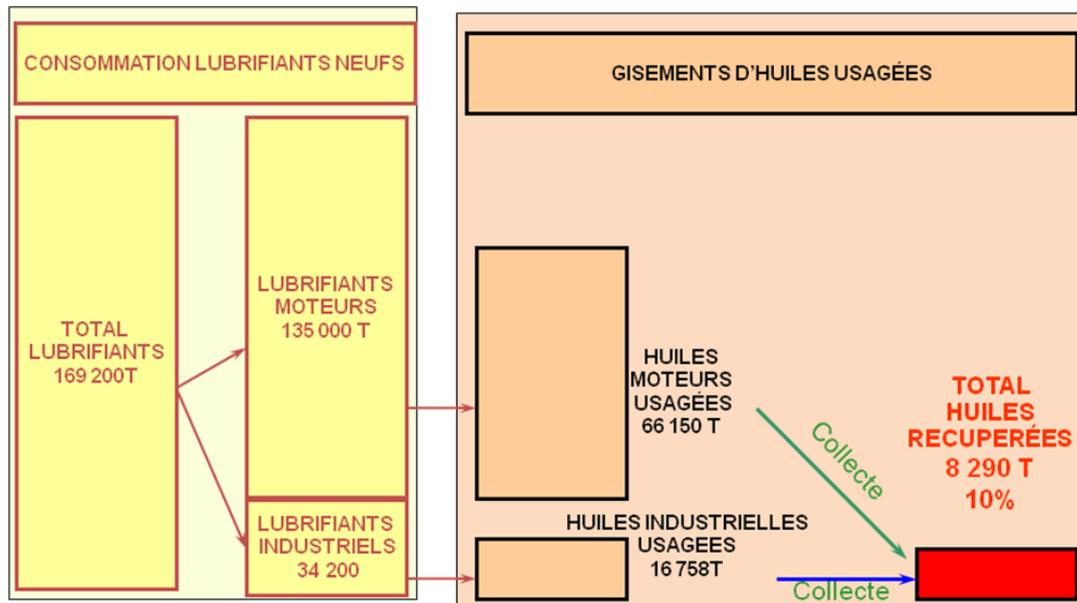


Figure 3.1 : Taux de collecte des huiles usagées pour l'année 2016

3.3 Le problème de la collecte des huiles

Le problème auquel est confrontée cette société, est de visiter chaque point de collecte avec une flotte de camions citernes, entre l'instant où la quantité d'huile au niveau du client (i) est suffisante et nécessite un déplacement et celui où sa cuve atteint un niveau maximal afin d'éviter tout débordement. Ces opérateurs qui génèrent ces huiles se plaignent de problèmes de collecte et ces derniers possèdent toujours des stocks d'huiles usagées dans des fûts ou dans des fosses de récupération. La présente étude porte sur un problème réel de tournées de véhicules dans un contexte de logistique inverse, autrement dit la gestion des flux de retours.

Selon la société de collecte, l'importance de la consommation d'huile de vidange en Algérie s'explique par le comportement des consommateurs qui pratiquent des espacements de vidange courts ainsi que la vétusté du parc automobiles. Vu que ces huiles usagées peuvent engendrer une détérioration importante du milieu naturel, pouvant se traduire par une pollution de l'eau, du sol et de l'atmosphère, ne sont pas biodégradables et classées dans la catégorie des déchets spéciaux dangereux (Hanhan Tikin, 2008), leur rejet dans la nature est strictement interdit par la réglementation algérienne (voir annexe A).

Dans leurs travaux (Danane et al. 2014), les auteurs ont réalisé des essais à l'échelle du laboratoire en vue de mettre au point un procédé de re-raffinage adéquat. L'analyse d'un échantillon d'huile moteur collectée par la société NAFTAL, stockée au port d'Alger a révélé la présence de soufre, d'azote et de métaux lourds (fer, chrome, plomb, cuivre).

Nous pouvons citer aussi les travaux de (Mazouzi et al. 2014), les auteurs ont proposé une méthode de régénération des huiles moteur usées, selon eux ces déchets sont des produits pétroliers qui se dégradent après un certain temps d'utilisation, par contamination avec des éléments polluants, tels que les métaux lourds, les PCB (polychlorobiphényles) et autres composés halogénés.

Selon le rapport de l'agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), 1 litre d'huile usagée peut contaminer 1000 m³ d'eau, cela s'explique par leur faible densité par rapport à l'eau. En Algérie, ces huiles industrielles font l'objet d'une réglementation interdisant leur rejet et rendant obligatoire leur récupération (Voir annexe A).

Un autre problème particulier auquel est confrontée la société, c'est que la majorité des camions sortent et reviennent avec une quantité d'huile ne dépassant pas la moitié de leurs capacités, ce qui nécessite une optimisation des tournées et une planification des calendriers prévisionnels des quantités à collecter chez les clients de la société afin de résoudre ce problème.

3.4 Méthode actuelle de planification des tournées.

L'entreprise de distribution de carburants, NAFTAL, a institué un système de collecte des huiles de vidange, mais seule une faible quantité est récupérée pour être envoyée dans des pays où les huiles usagées sont recyclées. Qu'il s'agisse des stations indépendantes ou des réseaux d'agents distributeurs des différents concessionnaires, il reste difficile d'établir un bilan, même exhaustif, des huiles usagées récupérées.

Il faut maintenant étudier le fonctionnement de l'entreprise. Elle possède une flotte de camions homogènes d'une capacité de 6 m³, basée dans un dépôt opérant dans une région spécifique allant de Zéralda jusqu'à la commune de Rouïba, mais seulement trois (3) camions citernes sont opérationnels. La société possède aussi une base de clients (garages, stations de service, concessionnaire automobile...etc.).

Pour planifier la collecte, l'entreprise fixe un objectif mensuel à atteindre, cet objectif dépend d'une part de la quantité stockée au niveau du dépôt primaire (stockage intermédiaire), d'autre part, de la quantité stockée au dépôt portuaire (stockage terminal) comme on peut le

voir sur le tableau (3.2).

Tableau 3.2 : Les capacités de stockage intermédiaire d'huile usagée

Dépôts portuaires (m ³)			Dépôts primaires (m ³)
Oran	Alger	Annaba	
3 500	3 750	3 300	3 476
TOTAL : 14 026 m³			

Chaque 10 jours, la direction lubrifiant pneumatique (LP) contacte les différents clients et centre LP (stockage intermédiaire), pour faire le point sur leur niveau de stock, de là, les répartiteurs organisent les routes en fonction des camions disponibles et des quantités stockées au niveau des points de collectes (clients).

Les chauffeurs ont ensuite la responsabilité de visiter les clients qui figurent sur les bons qu'on leur a fourni. Lors de l'arrivée chez un client, ils effectuent les opérations de mise en place puis ils pompent l'huile. Cette opération a une durée variable selon la quantité d'huile. Une fois l'opération de pompage terminée, le chauffeur mesure la quantité d'huile en plus dans la citerne de son camion et détermine ainsi la quantité réelle d'huile qu'avait le client. Il renseigne le bon de collecte avec cette valeur, en remet une copie au client, retire son matériel de pompage et peut aller visiter le client suivant.

En cas de débordement, le client téléphone pour demander une visite en urgence, qui désorganise la planification courante.

A la fin du mois, la quantité attendue doit être atteinte pour être transférée vers le port.

Une fois la quantité atteint le niveau demandé par le client externe, l'huile est expédiée par navire.

La figure (3.2) présente les opérations de collecte, de transport et de stockage des huiles usagées du réseau de logistique inverse de la société.

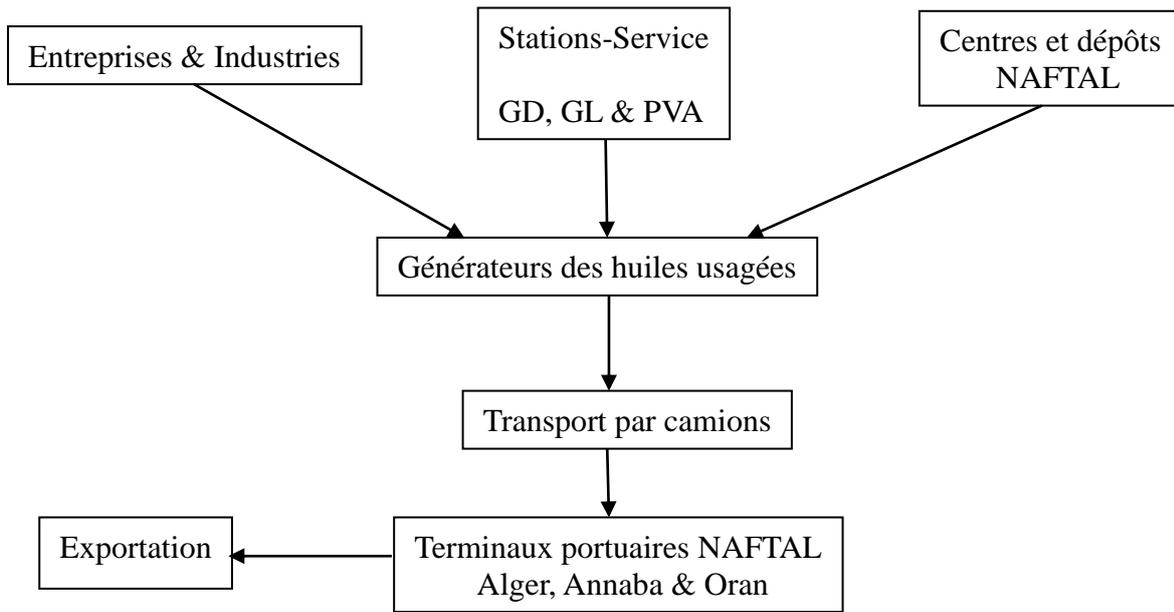


Figure 3.2 : Réseau de collecte et stockage des huiles usagées

3.5 Caractérisation du problème

Dans cette section du chapitre, nous présentons les paramètres nécessaires pour valider la modélisation mathématique. Nous commençons par étudier l'historique des données de la société afin de déterminer les paramètres de calcul et les prévisions de collecte. Par la suite, et en fonction de ces paramètres et de certaines exigences de la société, nous présentons la formulation mathématique et nous introduisons les indices, les variables de décision et les contraintes du modèle.

3.5.1 Sélection des clients par la méthode ABC

Après analyse des 98 clients de la base de données de la société, nous avons constaté que 73 d'entre eux n'ont pas reçu de visite pendant plus d'une année parfois même deux années consécutives, alors que d'autres n'ont été collectés qu'une seule fois sur une période d'une année. Nous avons donc été emmenés à les exclure de la base de données car aucune analyse statistique n'est possible avec une seule valeur sur un historique de 5 ans.

Après ces exclusions, seulement 25 clients restent analysables (25% des clients). Ces clients représentent plus de 75% du volume d'huile total annuel collecté par l'entreprise comme on

peut le voir à la Figure (3.3). Les quantités collectées suivent une distribution de Pareto (80-20), le tableau B.1 de l'analyse Pareto se trouve en annexe (B).

Ces 25 clients méritent une analyse approfondie pour modéliser le remplissage de leurs cuves.

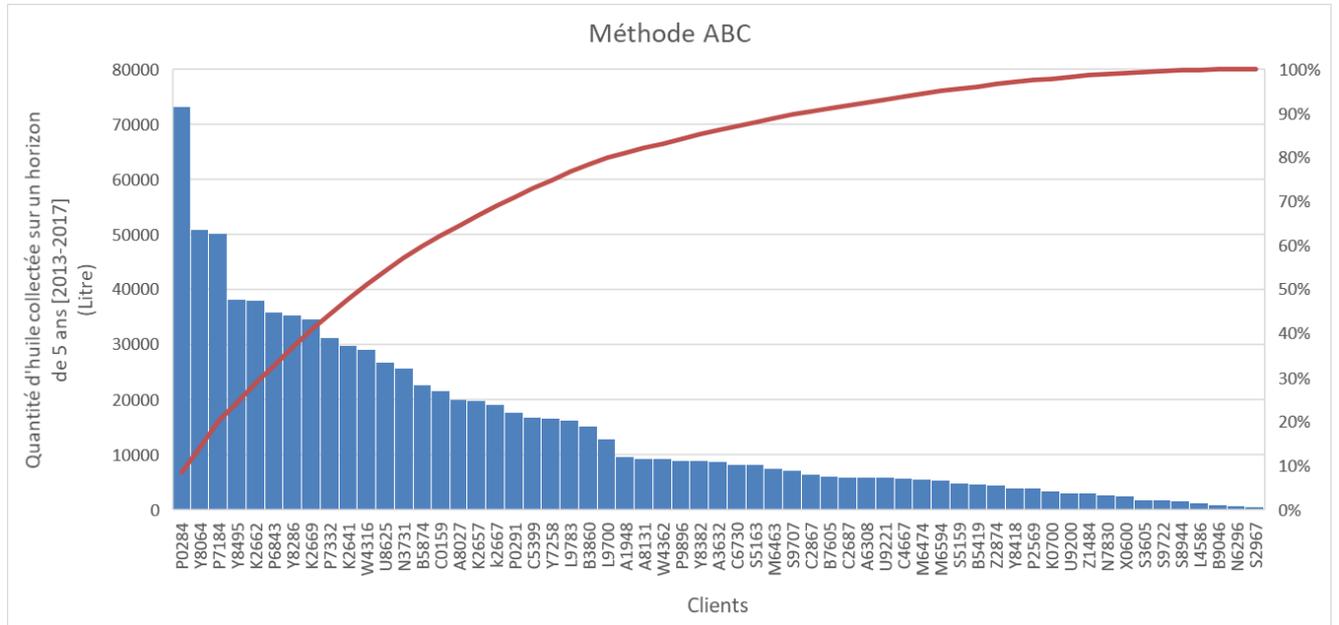


Figure 3.3 : Classement des clients selon la méthode ABC

Une fois la liste des clients établie, il faut procéder à la géolocalisation de ces derniers. La figure (3.4) présente la carte clients que nous avons développé grâce à l'application Google Maps version 2017 et une clé API (Application Programming Interface).

Chaque client est identifié grâce à un code alphanumérique tiré de la base de données de la société.

Les clients sont répartis en cinq catégories (voir tableau 3.3) :

- Les stations de service GD (gestion direct) qui sont pris en charge par l'entreprise NAFTAL
- Les stations de service GL (gestion libre) en partenariat avec l'entreprise NAFTAL
- Les points de vente agréés (PVA)
- Les stations de lavage et graissage (SLG)
- Les entreprises possédant un parc automobile (concessionnaires automobiles, entreprise du BTP, etc.)

Tableau 3.3 : Les capacités de stockage des cuves des clients par catégorie

Catégories des clients	GD	GL	PVA	SLG	Entreprise
Nombre	5	7	1	3	9

3.5.2 Géolocalisation des points de collecte et distancier

L'objectif principal de ce travail, est de minimiser la distance totale parcourue dans une tournée. Il est donc nécessaire de calculer la distance entre tous les points de collecte du réseau.

Pour cela, l'application en ligne API (Application Programming Interface) de Google Maps a été nécessaire pour la conception de la carte de répartition des clients de la société illustrée sur la figure 3.4, et c'est donc via le logiciel Excel que nous allons nous connecter à Google Maps pour obtenir un trajet en mode driving (voiture).

L'unité de la distance d_{ij} est exprimée en kilomètres (Km), la matrice de distance contient les valeurs des distances qui doivent être parcourues pour aller du point i au point j . Il est à noter que dans la plupart des cas la distance parcourue pour aller de i à j est différente de celle parcourue pour aller de j à i , il s'agit donc d'un réseau asymétrique (Benrahou et Tairi, 2019).



Figure 3.4: Répartition géographique des points de collecte (Benrahou et Tairi, 2019)

L'utilisation du fichier proposé est simple, il suffit tout d'abord d'activer la macro du distancier et de saisir les adresses de départ et d'arrivée en colonne A et B pour obtenir la distance et la durée du trajet. Le deuxième paramètre ne sera pas pris en considération, car aucune fenêtre de temps n'est imposée, nous n'allons donc pas intégrer les contraintes de temps dans notre modèle. Le tableau 3.4 ci-dessous illustre un extrait du distancier du réseau étudié (voir annexe E).

Tableau 3.4 : Matrice de distance du réseau étudié

Origin				Destination				Output	Output
Street	City	State	Country	Street	City	State	Country	Distance	Time
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	ider construct	dar el beida	alger	algerie	15.4 km	16 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	lgerie SPA ou	oued smar	alger	algerie	8.9 km	14 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	Peugeot algerie	oued smar	Alger	algerie	12.3 km	16 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	USE, Route N	el harrach	Alger	algerie	3.2 km	13 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	bach djerrah	el harrach	Alger	algerie	3.9 km	14 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	ute nationale	mohamadia	Alger	algerie	4.5 km	14 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	ijenane el ma	el harrach	Alger	algerie	3.5 km	12 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie		ain benian	Alger	algerie	26.6 km	39 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	avenue ali kh	el biar	Alger	algerie	16.4 km	25 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	es abdselami	kouba	Alger	algerie	8.0 km	17 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	TUSA ex RST	bouzareah	Alger	algerie	16.5 km	26 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	venue de l'AL	Hussein dey	Alger	algerie	8.2 km	20 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	n de service si	rouiba	Alger	algerie	20.2 km	23 mins
Rue Mustapha	el harrach	alger	algerie	naftal SPA	baraki	Alger	algerie	5.1 km	12 mins

3.5.3 Flotte de véhicules

L'entreprise possède une flotte homogène de (03) camions d'une capacité de 6 m³, aucun critère n'est pris en considération lors de l'affectation d'un véhicule à une tournée, car il s'agit d'un seul produit, il n'y a pas donc de compartimentage. Les camions de la société sont localisés au niveau du dépôt primaire district El Harrach.

3.5.4 Les tournées

Le centre de collecte district El Harrach est le seul dépôt à considérer sur la région étudiée. Tous les véhicules y sont attachés et il est le seul point de départ et d'arrivée des véhicules. Les tournées s'effectuent sur un réseau routier asymétrique à cause de la présence de sens uniques dans le réseau routier réel.

La durée des routes et les contraintes des fenêtres de temps ne sont pas prises en considération dans cette étude.

3.5.5 Quantités d'huile générées

Pour pouvoir construire le modèle d'optimisation, nous avons dans un premier temps, observé et collecté les données disponibles concernant les quantités d'huile usagée collectées chez les clients de la société, afin d'en tirer le maximum d'informations et établir des prévisions précises concernant le remplissage de la cuve de chaque client et pouvoir établir un calendrier prévisionnel pour l'année 2018.

Pour cela, une enquête a été menée auprès des 25 clients potentiels de la société que nous avons sélectionnés auparavant. Pour chaque point de collecte, il fallait analyser les données issues de l'historique de l'entreprise concernant les quantités collectées par date de collecte. Le schéma de la figure 3.5 illustre les étapes de l'analyse statistique des données.

3.6 Analyse statistique des données

Au début des travaux de thèse, la société possédait un historique de données sur 3 années (2013,2014 et 2015), et pour chaque client, il y avait moins de 30 observations étendues sur 3 années, par ailleurs, avec peu de données, il est peu probable que l'on puisse tirer des conclusions fiables au plan statistique.

Pour la fiabilité des résultats, il fallait attendre encore deux années supplémentaires pour arriver à réunir un nombre suffisant d'observations et pouvoir effectuer une analyse statistique complète.

Pour avoir une meilleure compréhension de l'évolution du remplissage de la cuve de chaque point de collecte en fonction du temps et pourvoir faire des propositions plus consistantes, il a fallu analyser graphiquement les variations des quantités collectées en fonction du temps.

Les graphes des figures (3.6), (3.7) (3.8), (3.9) et (3.10) représentent le remplissage de la cuve des clients P0284, K2667, B3860, P0291 et Y8286 appartenant aux catégories entreprise, GD, GL, PVA et SLG respectivement. En analysant les différents débits, on peut remarquer que la quantité d'huile est très variable d'un mois à l'autre pour l'ensemble des clients. Nous avons constaté des fluctuations plus ou moins importantes que l'on appelle irrégularités.

Sur le graphe de la figure 3.7 les évolutions significatives détectées sont une tendance à la hausse du remplissage de la cuve du client K2667.

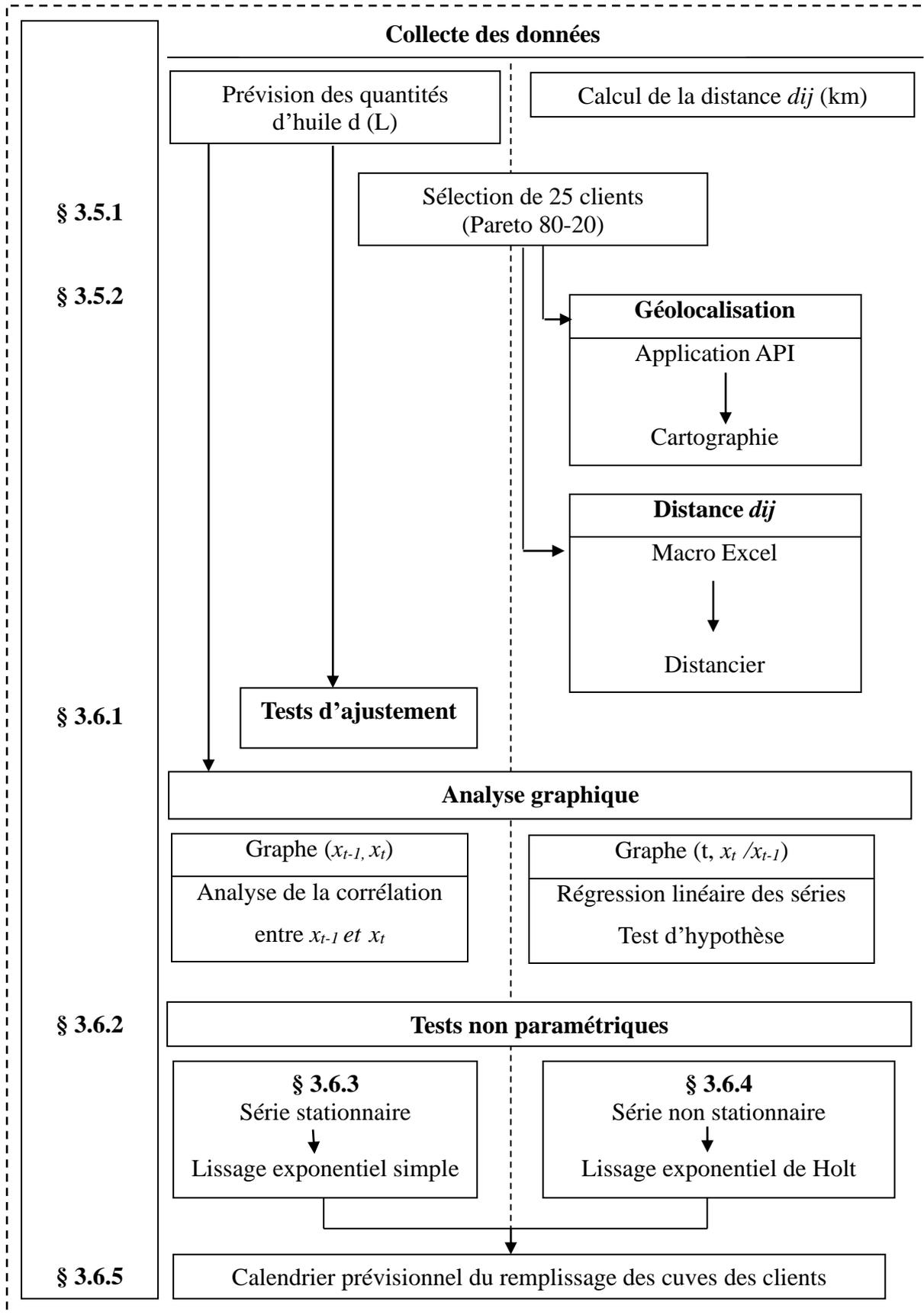


Figure 3.5 : Démarche de l'analyse statistique

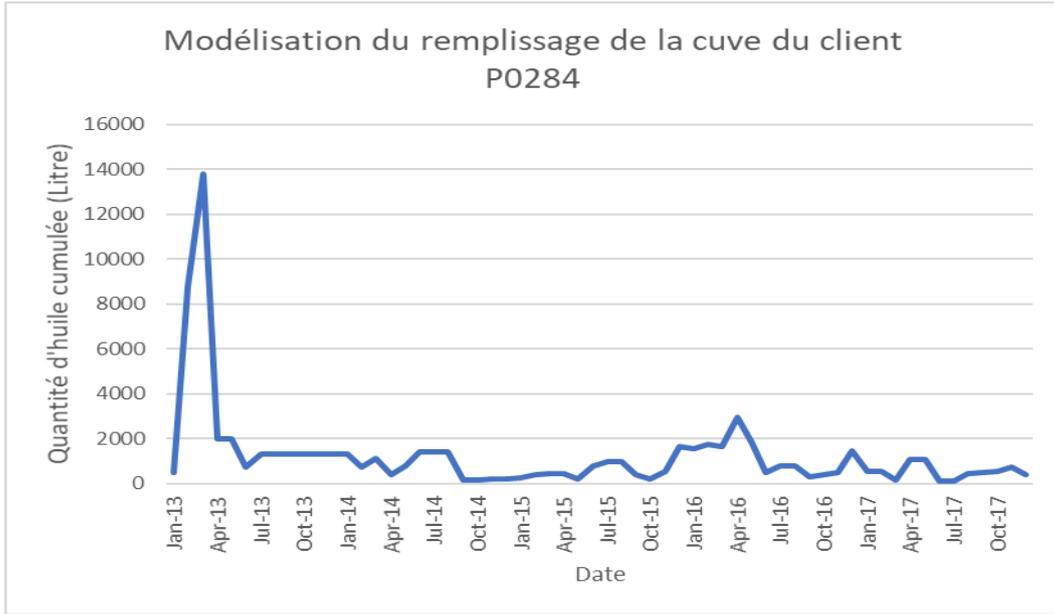


Figure 3.6 : Modélisation du remplissage de la cuve du client P0284

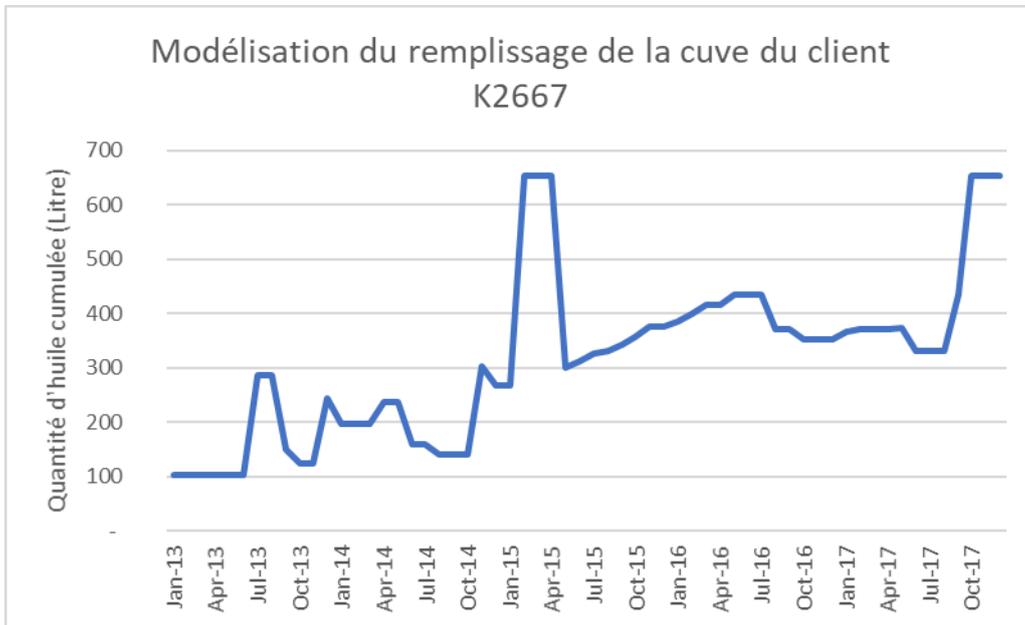


Figure 3.7 : Modélisation du remplissage de la cuve du client K2667

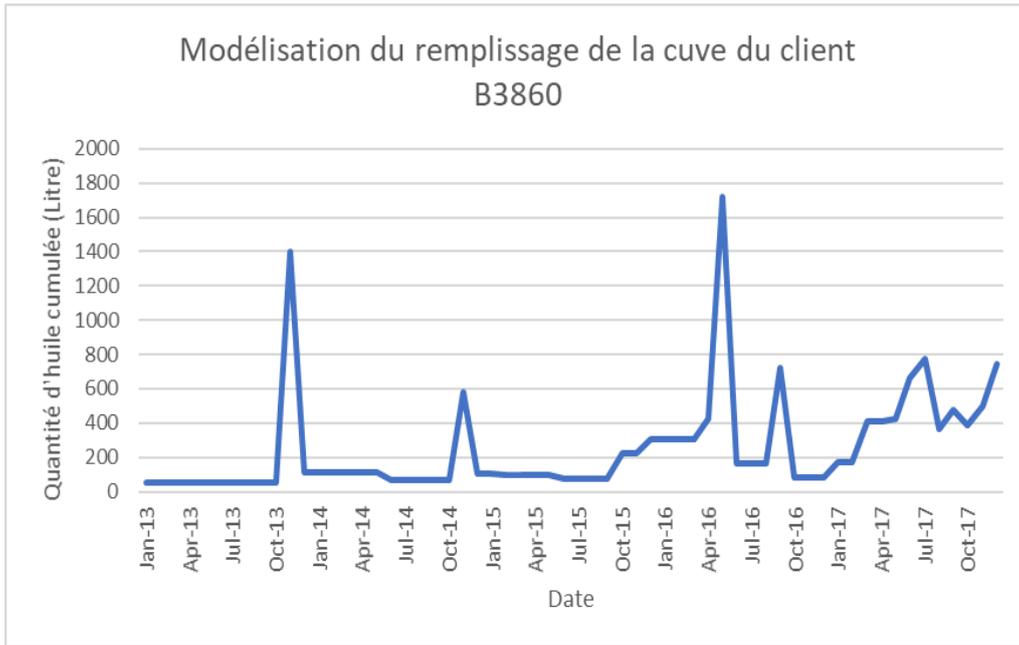


Figure 3.8 : Modélisation du remplissage de la cuve du client B3860

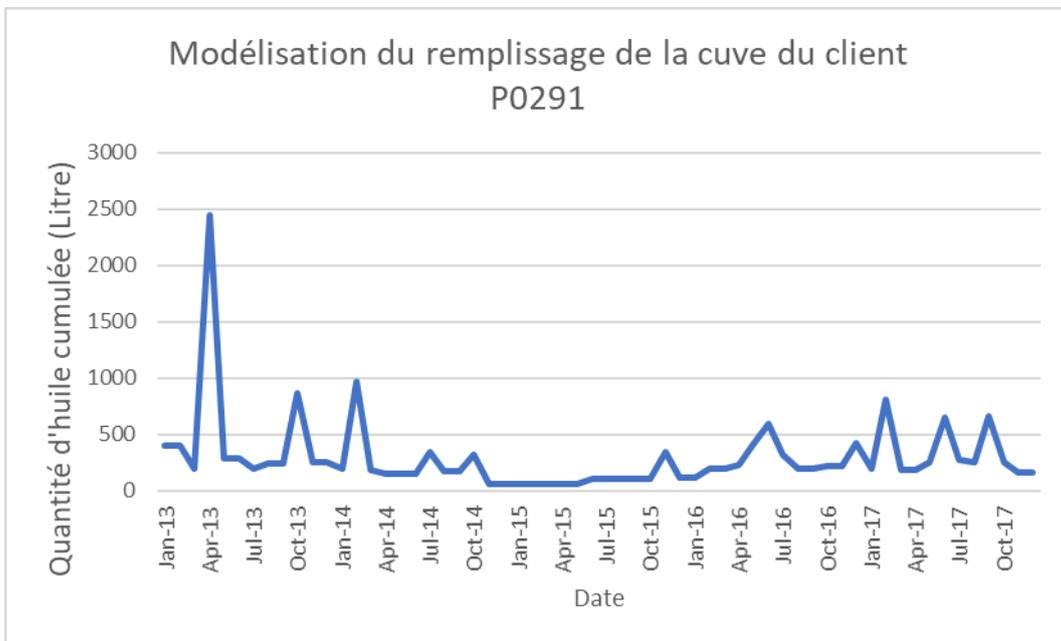


Figure 3.9 : Modélisation du remplissage de la cuve du client P0291

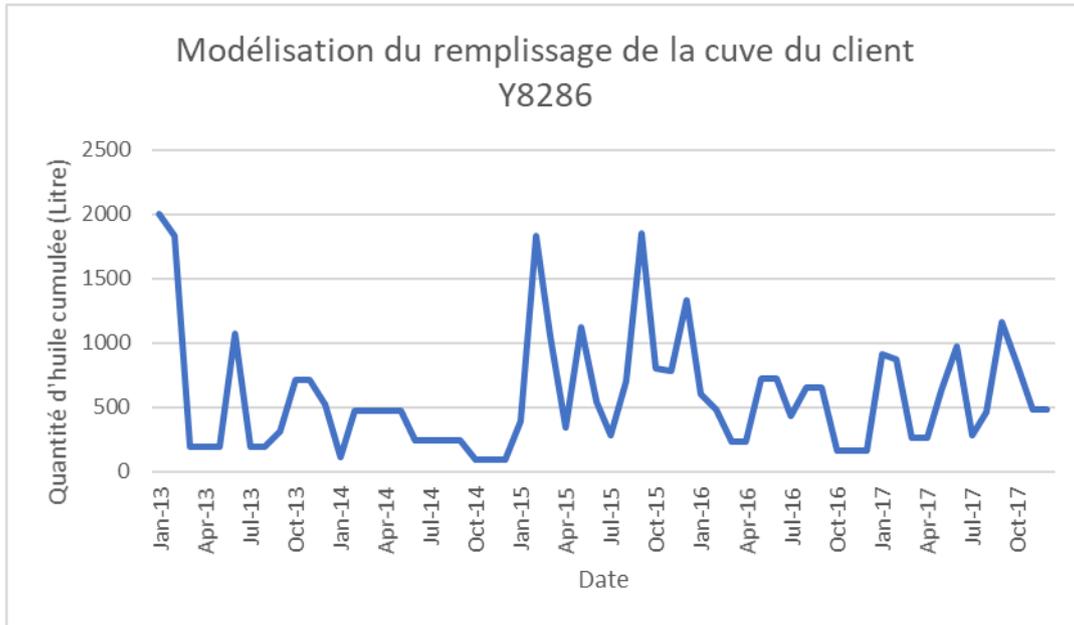


Figure 3.10 : Modélisation du remplissage de la cuve du client Y8286

Sur la majorité des séries, il apparaît clairement qu'il n'existe pas de saisonnalité, mais on observe des valeurs extrêmes qui correspondent à des évènements exceptionnels.

3.6.1 Tests d'ajustement

Dans une optique prédictive, il est souvent souhaitable de comprendre la forme sous-jacente de la distribution étudiée, pour cela, des tests d'ajustement sont appliqués.

Dans cette étude, plusieurs tests d'ajustement ont été appliqués sur les 25 clients de la base de données, nous pouvons citer le test de χ^2 et Kolmogorov-Smirnov.

Ces tests vont permettre de comparer la distribution des données vis à vis d'une loi théorique F choisie au préalable (normale, Fisher, poisson...). On va donc, à partir des données observées, construire un modèle qui suit une loi connue. Pour cela, il faut calculer la probabilité que les données appartiennent à l'intervalle de classe selon la loi choisie et décider à partir du résultat obtenu et avec un niveau de confiance $1 - \alpha \in]0, 1[$, si on retient ou on rejette l'hypothèse nulle (H_0), le nombre α est la probabilité d'accepter l'hypothèse alors qu'elle est fautive ; c'est le risque d'erreur. Un exemple du test de χ^2 appliqué au client P0284 obtenus à partir de l'outil XLSTAT est présenté en annexe B, où l'on peut remarquer qu'on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a pour tous les tests.

Pour tester l'hypothèse nulle H_0 : l'échantillon suit une loi normale au seuil de 5%, les règles de décision sont les suivantes :

- Si la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H_0 , et retenir l'hypothèse alternative H_a
- Si la p-value calculée est supérieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, alors l'hypothèse nulle H_0 est acceptée, l'échantillon suit une loi Normale.

3.6.2 Analyse graphique

En outre, l'évolution de la quantité d'huile usagée est une suite temporelle vu que les quantités sont prises mensuellement, donc il s'agit de séries chronologiques, alors il serait plus judicieux d'utiliser les données historiques pour construire un modèle qui servira à faire les prévisions pour l'année 2018.

On constate sur les graphes précédents des fluctuations plus ou moins importantes que l'on appelle irrégularités, ces mouvements sont dus au fait que les consommateurs d'huile neuve effectuent eux même la vidange de leurs véhicules ou bien au niveau des garages de lavage et graissage qui ne font pas parties des clients de la société.

Afin de pouvoir analyser le comportement de ces variations (irrégularités), il a fallu tout d'abord procéder par groupe d'appartenance des clients de la société, l'objectif étant de programmer la collecte en fonction du type de client, pour ce faire, les graphes des clients du même groupe ont été présenté sur un seul graphe, un exemple est illustré sur la figure (3.11).

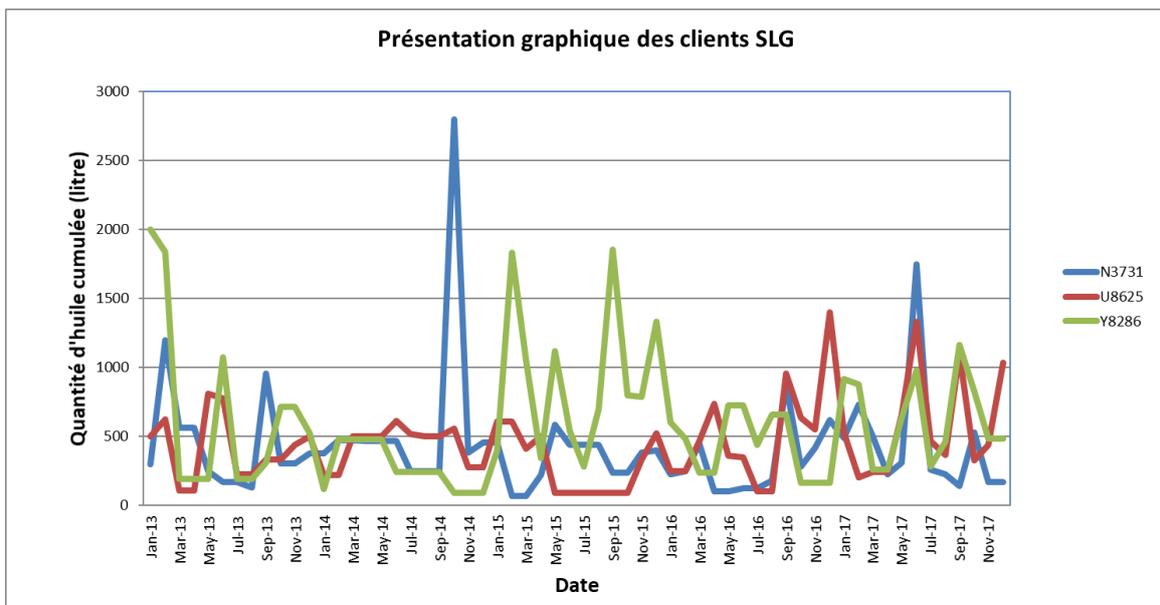


Figure 3.11 : Présentation graphique du remplissage des cuves des clients SLG

L'examen visuel du graphe ne montre aucune similitude quant au comportement des irrégularités observées sur chacune des séries du même groupe, les quantités stockées ne sont pas au même niveau, mais la simple visualisation des données sur une période de 5 années amène à constater une tendance sur certains graphes. Les graphiques des autres catégories ont été présenté en annexe (C).

La question centrale qui se pose ici est de savoir s'il existe une forte corrélation entre les mois, statistiquement cela se traduit par un premier graphe (x_{t-1}, x_t) , l'analyse de ce dernier permet de vérifier l'existence d'une corrélation entre une donnée (x_{t-1}) et celle qui la suit (x_t) . x_t étant la quantité cumulée dans la cuve à l'instant t et x_{t-1} représente la quantité cumulée à l'instant t-1.

Un deuxième graphe $(x_t, \frac{x_t}{x_{t-1}})$ permet de vérifier l'existence d'une corrélation entre (x_t) et (x_{t-1}) .

Pour une analyse détaillée, il a fallu analyser conjointement le graphique (x_{t-1}, x_t) et le graphique $(\frac{x_t}{x_{t-1}}, x_t)$ pour chaque point de récupération d'huile usée.

Pour les graphiques $(\frac{x_t}{x_{t-1}}, x_t)$, on observe que le nuage de point est organisé autour d'une droite horizontale pour toutes les séries de données, à titre d'exemple, les séries de la figure (3.12) appartenant aux catégories entreprise, GD, GL, PVA et SLG respectivement, montrent que les données sont localement constantes.

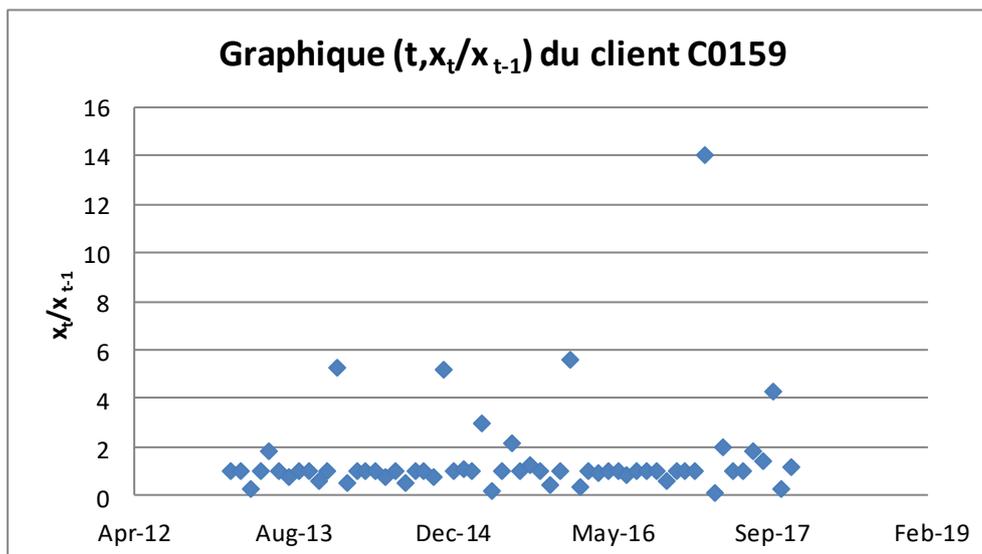


Figure 3.12(a) : représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : exemple de la série C0159

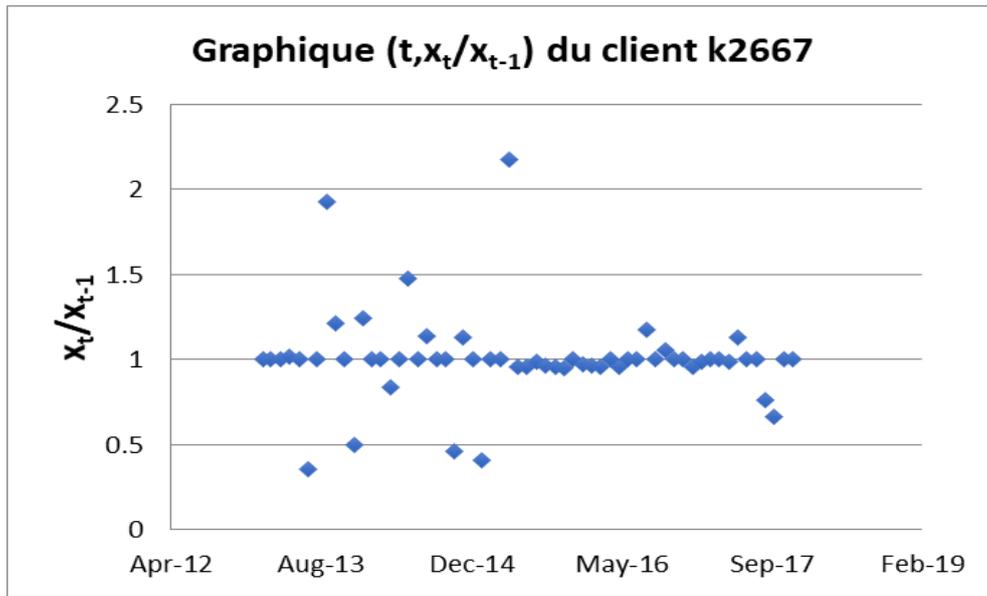


Figure 3.12(b) : représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : exemple de la série K2667

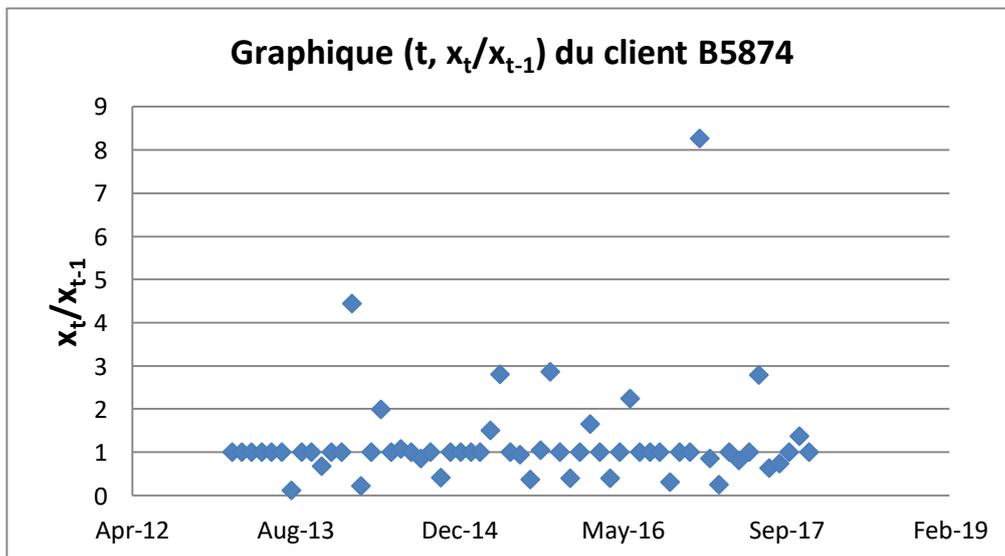


Figure 3.12(c) : représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : exemple de la série B5874

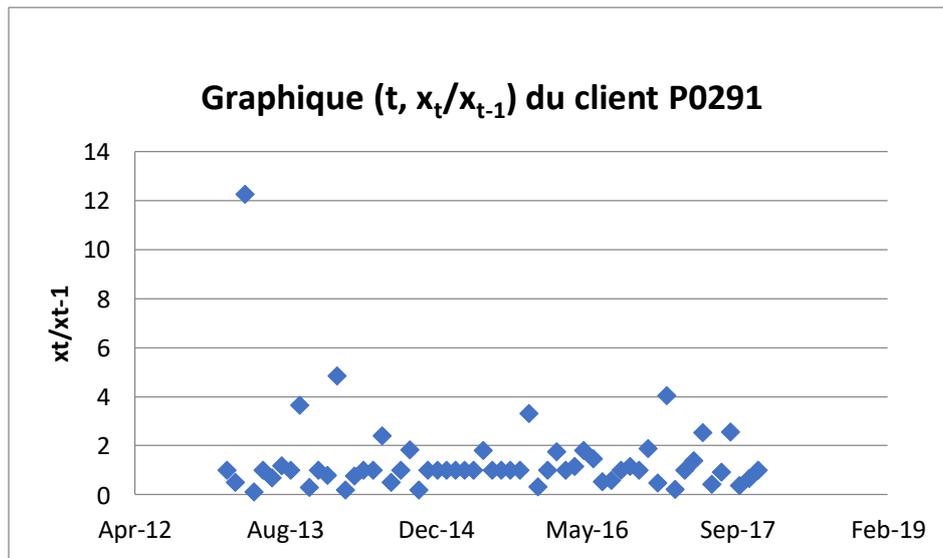


Figure 3.12(d) : représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : exemple de la série P0291

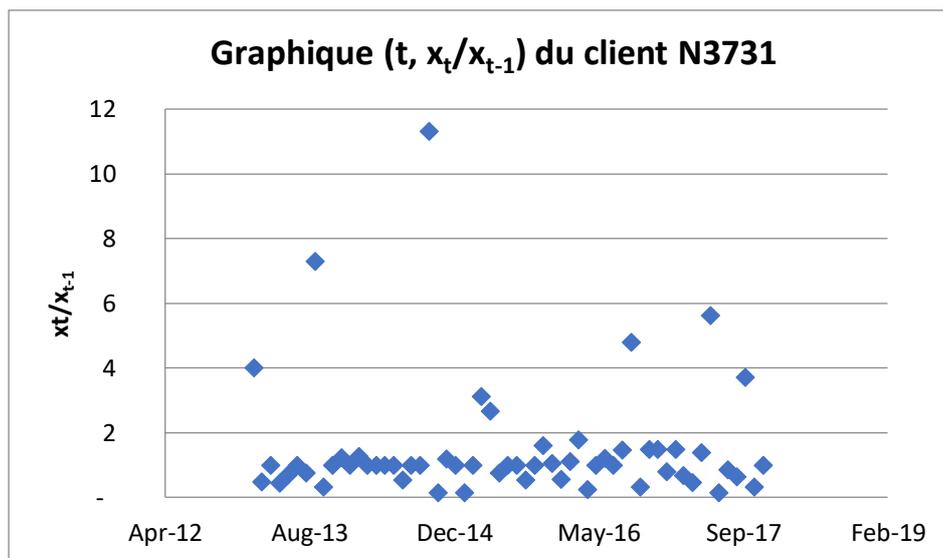


Figure 3.12(e) : représentation graphique de la corrélation entre les données en fonction du temps : exemple de la série N3731

Pour ce qui concerne les graphiques (x_{t-1}, x_t) , on observe en général que le nuage des points est organisé autour d'une droite qui passe parfois par l'origine des axes de coordonnées ; on validera cette hypothèse en faisant une régression linéaire sur l'ensemble des séries, et tester l'hypothèse que l'ordonnée à l'origine (b) n'est pas significativement différente de 0.

On définit le t de Student calculé du coefficient b :

- $t_c < t_t$; on ne rejette pas H_0 ; la statistique n'est pas significative et n'a pas d'influence sur Y , il y a une relation qui dépend uniquement de la pente a et qui passe par l'origine ;
- $t_c > t_t$; on rejette H_0 : la statistique est significative et a une influence sur Y .

Le tableau 3.5 présente les résultats obtenus par l'analyse de la variance et le test de Student. Notons que la présence d'une régression non significative au seuil de 5% est indiquée en jaune, pour le reste des séries on doit donc rejeter H_0 au niveau 5% et conclure que la régression est significative. Cela voudrait dire que les séries chronologiques observées sont localement constantes, en conséquence le lissage exponentiel est la méthode la plus adaptée pour la prévision.

Tableau 3.5 : Résultats des *tests de régression*

Série	Test de la variance P-Value	Test de student P-Value
2	0.9	<0.0001
3	0.003	<0.0001
4	<0.0001	0.008
5	0.012	<0.0001
6	0.502	<0.0001
7	0.012	<0.0001
8	0.042	<0.0001
9	<0.0001	0,0006
10	0.150	0.000
11	<0.0001	0.2
12	0.036	0.036
13	<0.0001	0.038
14	0.000	0.001
15	0.000	0.001
16	<0.0001	0.038
17	0.442	<0.0001
18	0.001	0.001
19	0.8	<0.0001
20	<0.0001	0.026
21	0.876	<0.0001
22	0.07	<0.0001
23	0.088	<0.0001
24	0.879	<0.0001
25	0.091	<0.0001
26	0.0001	0.005

L'hypothèse de nullité de la constante b est significative pour toutes les séries, autrement dit l'ordonnée à l'origine (b) est différente de 0.

Pour la série 11 et avec un niveau de confiance de 95% ; la table de la loi de Student en test bilatéral donne pour un ddl de 57, $t_{\alpha/2,57} = 2.00$. La valeur de Student calculée $t = 1.26$ est inférieure à t de la table, on en déduit donc que l'on accepte l'hypothèse nulle, autrement dit il y a une relation qui dépend uniquement de la pente a et qui passe par l'origine (figure 3.13).

De plus, la valeur de $t_c = 1.26$ se trouve dans la zone d'acceptation de H_0 ; on ne peut rejeter H_0 ; l'hypothèse d'une ordonnée à l'origine nulle. On dira que la statistique est non significative. Cette conclusion est cohérente avec l'intervalle de confiance à 95% ; à savoir $[-22.88 ; 122.57]$,

D'autre part, étant donné que la p-value calculée (0.2) est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha = 0.05$, on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 , cela s'explique par une relation qui dépend uniquement de la pente (a) et qui passe par l'origine (0,0). Nous pouvons conclure, que pour la série (11) un lissage exponentiel simple sera la meilleure méthode de prévision.

Pour les autres séries, le choix de la méthode de prévision va dépendre de l'analyse de la tendance et de la saisonnalité. Pour cela, des tests non paramétriques ont été réalisés sur les 25 clients de la société.

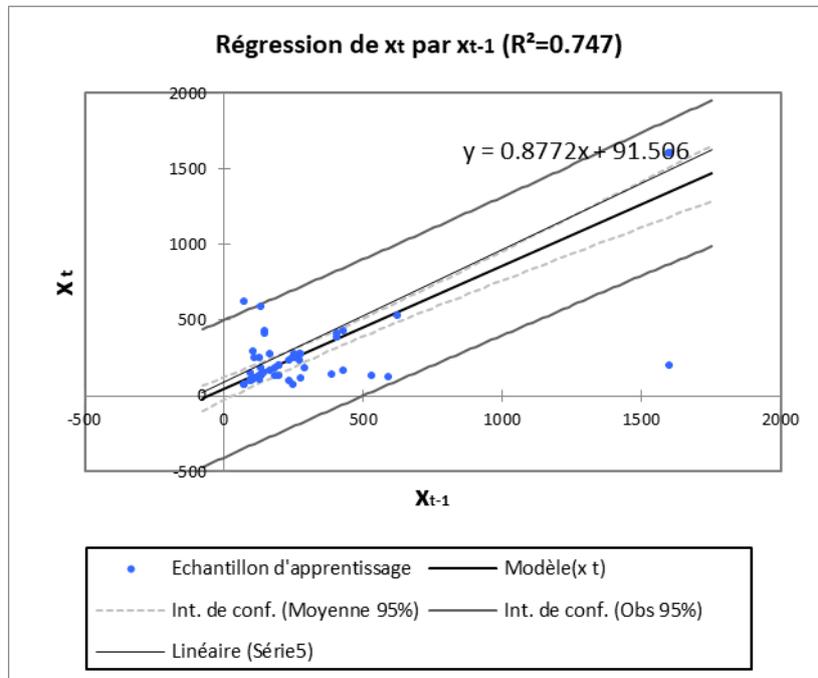


Figure 3.13 : Régression linéaire de la série B5874

3.6.3 Test de tendance

Pour modéliser le comportement d'une série chronologique, il faut tout d'abord tester la stationnarité des séries en niveau. Si le test de stationnarité montre l'existence d'une racine unitaire, il faut soustraire la tendance.

Dans cette étude, deux tests ont été réalisés sur les séries chronologiques étudiées, un test de racine unitaire pour vérifier si les séries chronologiques sont des variables non stationnaires, et un test de tendance de Mann-Kendall.

3.6.3.1 Tests de tendance de Mann-Kendall

Le test non paramétrique¹ de Mann-Kendall appliqué aux séries de données sur les quantités d'huiles usagées confirme le caractère stationnaire ou non-stationnaire des séries. Ce test proposé par Mann (1945) et Kendall (1975), permet à priori de détecter des tendances non nécessairement linéaires.

L'hypothèse nulle H_0 d'absence de tendance est rejetée au seuil nominal $\alpha = 5\%$ et l'hypothèse alternative correspond à l'existence d'une tendance.

La figure 3.14 (a) ci-dessous reprend l'illustration présentée à la figure (3.6) de la section 3.6 pour illustrer le caractère stationnaire de la série chronologique, les résultats du test de Mann-Kendall confirme l'absence de la tendance, étant donné que la p-value calculée (0.056) est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Sur la série chronologique P7332 de la figure 3.14 (b). Les évolutions significatives détectées sont une tendance à la hausse, la ligne tracée sur la courbe représente une tendance linéaire ajustée sur les données, les résultats du test de Mann-Kendall sont présentés sur le tableau 3.7.

Sur l'ensemble des séries étudiées, les évolutions significatives détectées sont soit une tendance à la hausse des quantités d'huile au seuil $\alpha = 5\%$, cela s'explique par une augmentation de la quantité d'huile depuis 2013 au niveau des points de récupération, soit une stationnarité des données, mais aucune tendance significative à la baisse n'est observée.

¹ Aucune hypothèse sur la distribution sous-jacente des données n'a été établie, ils sont donc adaptés aux données irrégulières.

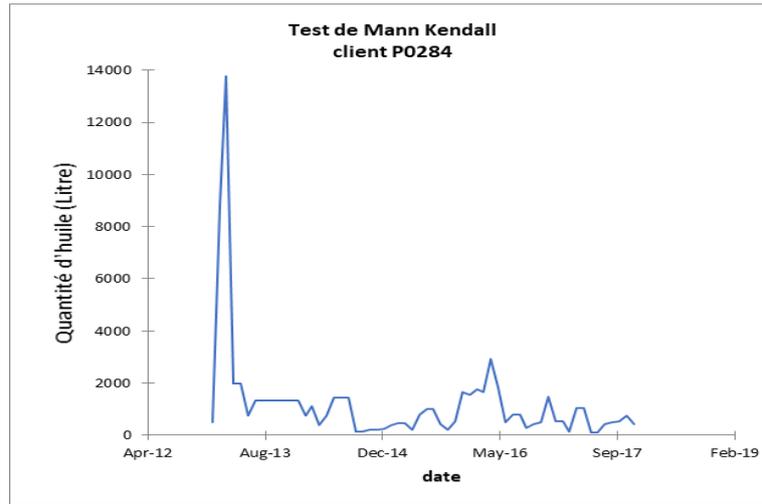


Figure 3.14(a) : Test de tendance du remplissage de la cuve du client P0284 (série stationnaire)

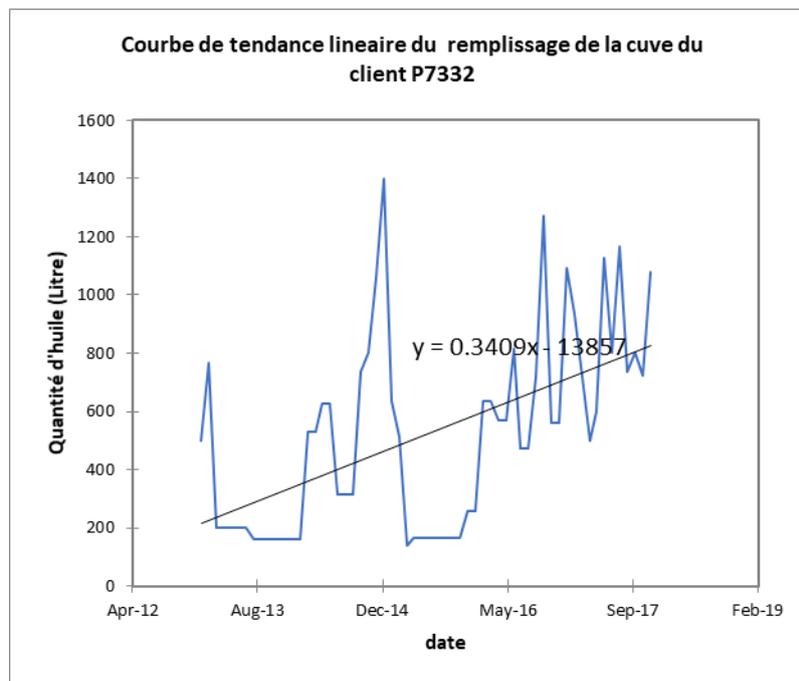


Figure 3.14 (b) : Courbe de tendance linéaire à la hausse du remplissage de la cuve du client P7332

3.6.3.2 Test de stationnarité

Une série $\{y_t\}$ pour $t = 1 \dots T$ est dite stationnaire si :

- (i) L'Esperance $E(y_t) = \mu \quad \forall t$ (constante, ne dépend pas de t) ;
- (ii) La variance $\text{Var}(y_t) = \sigma^2 \quad \forall t$ (constante, ne dépend pas de t) ;
- (ii) La covariance $\text{COV}(y_t, y_{t+k}) = E[(y_t - \mu)(y_{t+k} - \mu)] = \gamma_k$ (ne dépend pas de t).

Une série stationnaire ne doit comporter ni tendance ni saisonnalité, par contre une série non stationnaire dépend du temps.

Pour détecter la tendance, nous allons utiliser deux tests de racine unitaire : (i) le test de Dickey-Fuller augmenté (ADF) et (ii) le test de Phillips-Perron (PP), l'analyse de la non stationnarité a été réalisée avec l'hypothèse nulle de la présence de racine unitaire, soit la non stationnarité.

Une analyse confirmatoire de la stationnarité a été réalisée par un troisième test de KPSS, avec l'hypothèse nulle selon laquelle la série est stationnaire.

L'ensemble des résultats obtenus est synthétisé dans le Tableau 3.7. Nous commentons ici les résultats les plus significatifs.

Nous avons identifié en jaune les cas où l'hypothèse nulle d'absence de tendance est rejetée au seuil nominal $\alpha = 5\%$ pour les deux tests de Mann-Kendall et KPSS, pour les tests de racine unitaire ADF et PP les valeurs en jaune correspondent à l'existence d'une tendance.

Nous dirons qu'une tendance est significative lorsque au moins trois tests implantés sur quatre conduisent à cette conclusion.

Pour les séries 2,3,11 et 12 les tests de tendance MK et de stationnarité type KPSS indiquent un rejet de l'hypothèse de stationnarité, et les deux tests de racine unitaire vérifient l'hypothèse alternative d'absence de racine unitaire.

Nous rappelons que dans la section précédente, nous avons démontré par le test de Student (tableau 3.5) qu'un lissage exponentiel simple sera la meilleure méthode de prévision pour la série 11.

Pour les séries 2, 3 et 12, un lissage exponentiel simple et un lissage de Holt ont été appliqués, le choix de la méthode se porte sur celle qui donne la prévision la moins variable par le calcul d'un indicateur de performance IP comme montré ci-dessous :

$$IP = \frac{x_{observée} - \hat{x}_{prédite}}{x_{observée}}$$

Le Tableau 3.6 nous donne les résultats de calcul de l'indicateur de performance (IP) où l'on constate que le lissage exponentiel simple est la méthode la plus adaptée pour les deux séries 3 et 12, pour la série 2 un lissage de Holt sera la méthode de prévision la plus adaptée.

Tableau 3.6 : Indicateur de performance

Client	Code client	Indicateur de performance	
		Lissage exponentiel simple	Lissage de Holt
2	P6843	30.4742755	28.931868
3	P7184	31.3983413	31.7806004
12	C0159	35.0909064	47.162527

Tableau 3.7 : Seuils des tests de tendance et de stationnarité des séries

Série	Mann-Kendall P-Value	Dickey-Fuller P-Value	Phillips-Perron P-Value	KPSS P-Value
2	0.002	0.056	<0.0001	0.337
3	0.001	0.001	0.0001	0.025
4	<0.0001	0.190	0.04	<0.0001
5	0.278	<0.0001	<0.0001	0.271
6	0.002	0.167	<0.0001	0.002
7	0.077	0.012	0.011	0.284
8	0.104	<0.0001	<0.0001	0.209
9	0.006	0.403	0.202	0.05
10	<0.0001	0.106	<0.0001	0.004
11	0.008	0.041	0.047	<0.0001
12	0.002	<0.0001	<0.0001	0.006
13	0.002	0.214	0.077	0.007
14	0.005	0.911	0.444	0.003
15	0.019	<0.0001	0.0001	0.176
16	<0.0001	0.109	0.316	<0.0001
17	0.664	0.003	<0.0001	0.851
18	0.863	0.035	0.0001	0.374
19	0.245	0.011	<0.0001	0.726
20	0.056	0.010	0.010	0.067
21	1.00	0.000	<0.0001	0.112
22	0.322	0.009	<0.0001	0.08
23	0.010	0.055	<0.0001	0.027
24	0.124	0.002	<0.0001	0.159
25	0.579	<0.0001	<0.0001	0.530
26	0.015	0.013	0.016	0.117

Le choix de la méthode de prévision dépend en premier lieu des paramètres de la distribution, Disney and Lambrecht (2008) ont adopté le lissage exponentiel simple pour prédire les demandes des clients, le lissage exponentiel simple ne s'applique qu'aux séries sans tendance ni saisonnalité. Les extensions de la méthode - méthodes de Holt et de Holt-Winters – permettent de tenir compte de la présence d'une tendance et/ou d'une saisonnalité.

Afin d'illustrer le processus de prévision, la figure (3.15) présente les étapes de prise de décision pour le choix du modèle utilisé, l'erreur de prévision est suivie par des indicateurs classiques. Dans cette analyse les indicateurs utilisés sont le MAPE et le MAE.

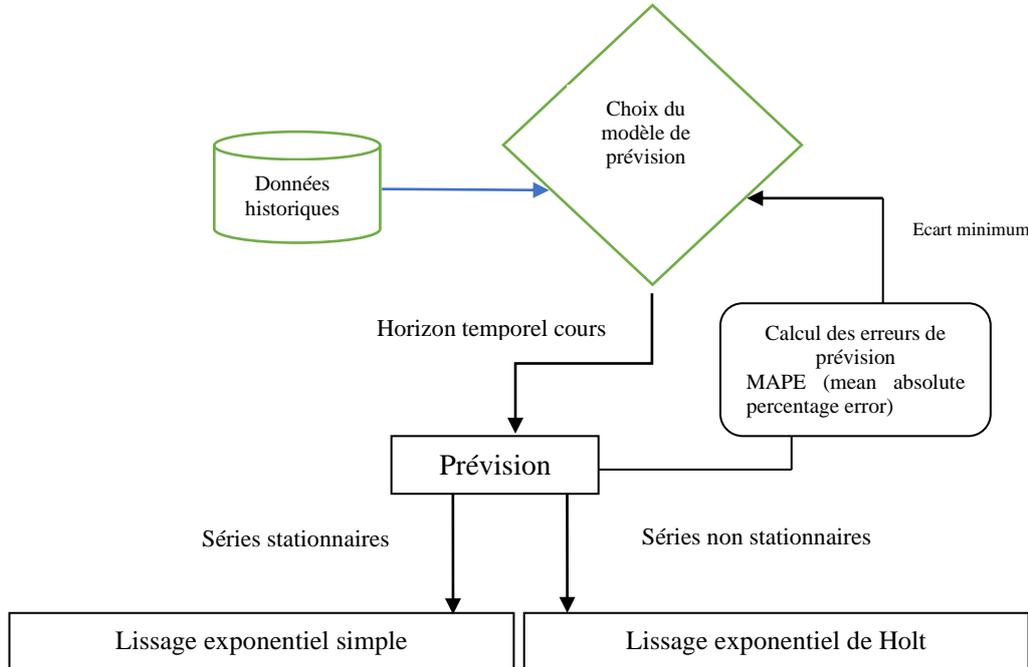


Figure 3.15 : Etapes de prise de décision pour le choix du modèle de prévision

3.6.4 Lissage exponentiel simple

Le lissage exponentiel simple permet de prédire une valeur en fonction des données passées, en donnant aux données un poids d'autant plus faible qu'elles correspondent à un passé éloigné. La pondération évolue de façon exponentielle, d'où le nom du modèle, car la méthode utilise toutes les observations passées mais en leur donnant un poids décroissant avec leur ancienneté. Le lissage exponentiel simple résulte de l'algorithme suivant :

$$\hat{x}_1(0) = x_0$$

$$" t > 1, \hat{x}_t(t-1, a) = \hat{x}_{t-1}(t-2, a) + a(x_{t-1} - \hat{x}_{t-1}(t-2, a))$$

Où :

- x_0 est un choix judicieux pour initialiser l'algorithme ci-dessus ;
- $\alpha \in]0,1[$ est le paramètre de lissage.

La valeur observée la plus récente x_t a un poids de α , la valeur observée x_{t-1} a un poids de $\alpha(1-\alpha)$, la valeur observée x_{t-2} possède un poids de $\alpha(1-\alpha)^2$ et ainsi de suite.

Lorsque α est proche de 1 les valeurs récentes influent sur la valeur de la prévision, alors on peut recommander de choisir :

- α grand (proche de 1) : si le niveau change rapidement, le nombre de dates de changement de niveau est élevé, autrement dit le délai entre deux changements de niveau est court ;
- α petit (proche de 0) : si le niveau change lentement, le nombre de dates de changement de niveau est faible, autrement dit le délai entre deux changements de niveau est long.

Dans tous les cas, la valeur optimale α_{opt} de la constante de lissage sera celle qui minimise un critère de bonne prévision, par exemple :

$$a_{opt} = \arg \min_a \sum_t \frac{(|x_t - \hat{x}_{t-1}(t, a)|)}{|x_t|}, a \in]0, 1[$$

Pour les séries stationnaires, dont la tendance est constante et sans saisonnalité, un lissage exponentiel simple sera appliqué, le choix de la constante de lissage (α) se fait en fonction de type de prévision, en minimisant l'erreur de prévision sur la dernière période connue.

En pratique, si on souhaite faire une prévision rigide, on choisira $\alpha = [0.7; 0.99]$ et si au contraire on souhaite une prévision souple, on choisira $\alpha = [0.01; 0.3]$.

La figure 3.16 (a) montre la prévision de la quantité d'huile cumulée chez le client B5874, le logiciel effectue par défaut (α optimisée) un lissage exponentiel simple avec une constante de lissage égale à 0.903 qui minimise le MAPE, ici la série ne présente pas de tendance évidente ni de saisonnalité. Le graphe des résidus de la figure 3.16 (b) montre une bonne extrapolation des deux graphes durant cette période avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.70$, pour la prédiction du mois d'août 2013 on constate une surestimation de la quantité d'huile dans le réservoir du client B5874.

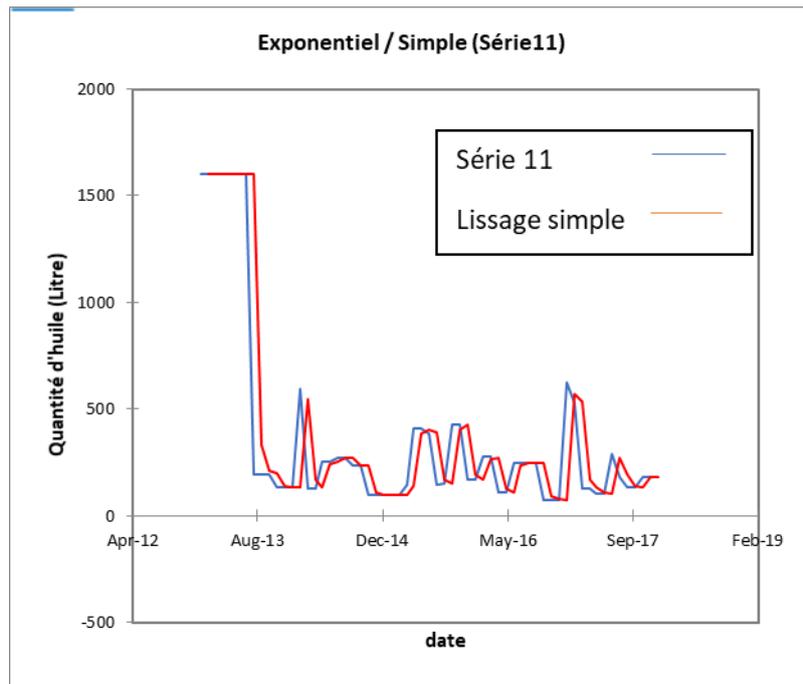


Figure 3.16 (a) : Lissage exponentiel simple de la série B5874 avec $\alpha=0,9$

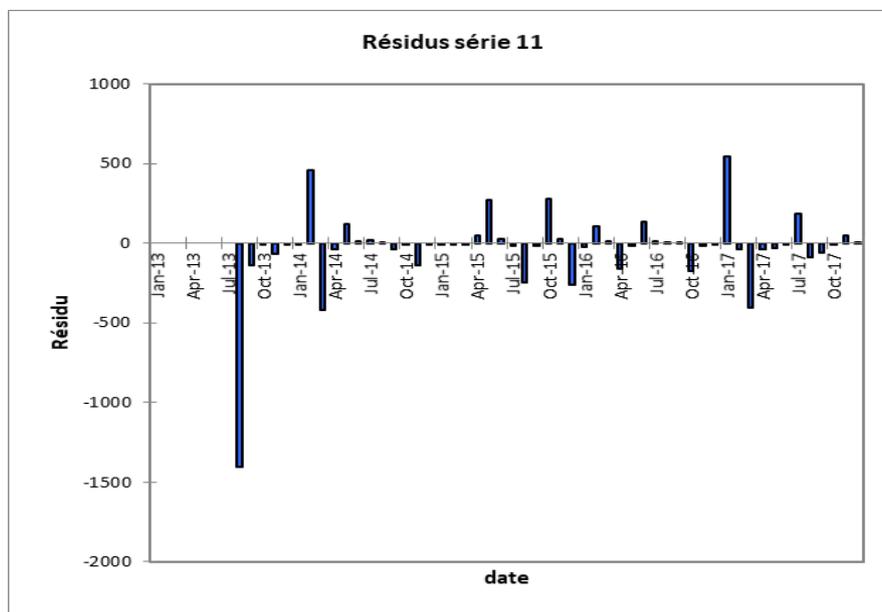


Figure 3.16 (b) : Résidus du lissage exponentiel simple de la série B5874

3.6.5 Lissage exponentiel de Holt

C'est une adaptation du lissage exponentiel simple aux séries présentant une tendance mais sans saisonnalité évidente, lorsque le niveau moyen de la demande change en croissance ou en décroissance, il est alors nécessaire d'effectuer une correction de tendance.

Le modèle est caractérisé par un coefficient de lissage de la tendance β et un niveau α , ce qui permet d'ajuster la tendance et de lisser l'aléa.

Le lissage de Holt permet d'établir une fonction de prévision linéaire. Nous allons donc retenir l'hypothèse que la tendance est localement linéaire et définie à chaque date (t) par son ordonnée appelée niveau. Elle est utilisée pour lisser les variations aléatoires dans la quantité d'huile au temps t , la pente qui définit la direction de la droite de prévision est utilisée pour lisser les variations dans l'estimé de la pente.

Donc pour un horizon h , une prévision établie à l'instant t s'écrit :

$$\hat{x}_t(h) = a(t)h + b(t)$$

- Le niveau $b(t)$: on détermine un coefficient alpha (α) compris entre 0 et 1, puis on applique cette pondération à la dernière observation (x_t), il nous reste $(1 - \alpha)$ de pondération à appliquer à la dernière prévision x_{t-1} .

$$b(t) = \alpha x_t + (1 - \alpha)[b(t-1) + a(t-1)] = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{x}_{t-1}$$

- La pente $a(t)$: on détermine un coefficient beta (β) compris entre 0 et 1, puis on applique cette pondération à la dernière estimation de la pente, autrement dit la différence entre $b(t)$ et $b(t-1)$, il nous reste $(1 - \alpha)$ de pondération à appliquer à la précédente estimation de la pente $a(t-1)$.

$$a(t) = \beta [b(t) - b(t-1)] + (1 - \beta)a(t-1)$$

La prévision à la date t pour l'horizon h c'est à dire $t + h$:

$$\hat{x}_t(h) = a(t)h + b(t)$$

La figure 3.17 (a) présente les résultats du lissage de Holt appliqué aux données de la série 16 sur les quantités d'huile du client K2667.

Une simple visualisation du graphe montre que les prévisions sont moyennement ajustées aux données, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.65$, un bon ajustement est constaté entre

2015 et 2017. La figure 3.17 (b) présente le graphe des résidus, qui confirme une bonne extrapolation des deux graphes durant cette période. Seulement à huit reprises, le modèle surestime ou sous-estime la réalité (erreurs de prévision jusqu'à 60%). Le lissage de Holt a un MAPE de 12.7%.

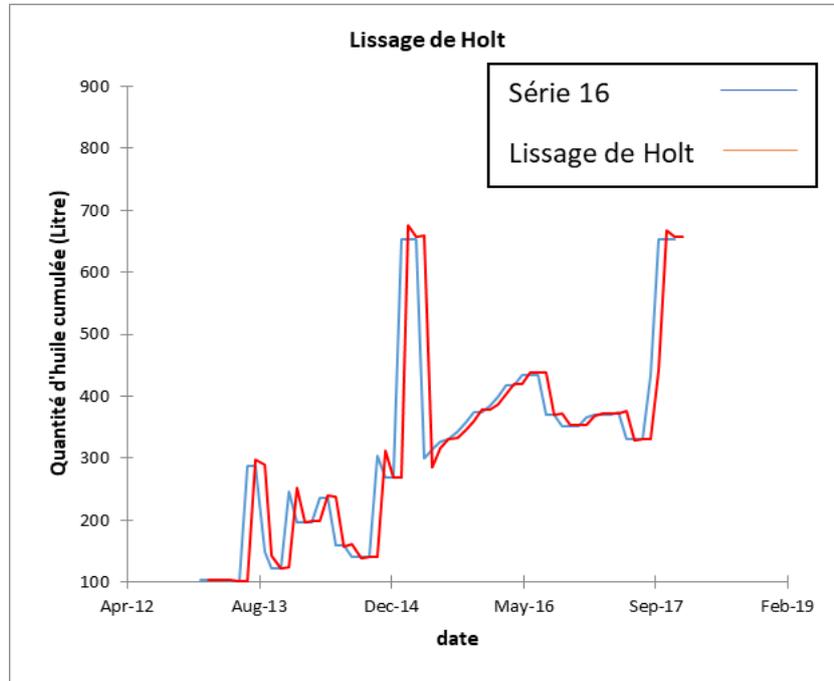


Figure 3.17 (a) : Lissage exponentiel de Holt de la série K2667

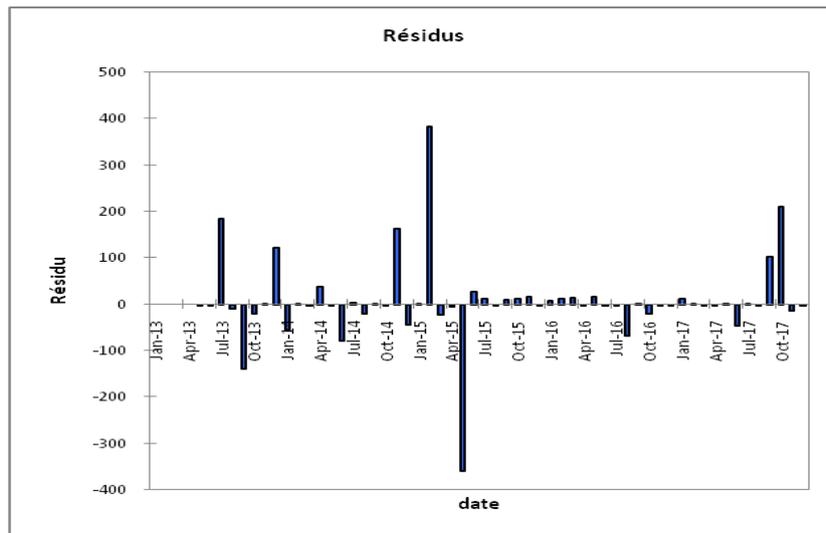


Figure 3.17 (b) : Résidus du lissage exponentiel de Holt de la série K2667

3.6.6 Prévisions pour l'année 2018

Une fois les prévisions du mois sont réalisées pour l'ensemble des clients, ces données sont utilisées dans la partie contrainte pour la validation du modèle mathématique.

Les résultats du lissage sont présentés sur le tableau 3.8. Pour chaque client une prévision sur la quantité d cumulée sur un horizon de planification de 1 mois a été fixée à partir de la vitesse de remplissage de la cuve en litres d'huile par semaine.

Tableau 3.8 – Prévision des quantités cumulées pour le mois de janvier 2018

Client	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prévision d (L)	2800	4000	3600	2000	2400	800	800	800	1600

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
735	4000	4000	3600	4000	2400	2400	683	1600	2000

21	22	23	24	25	26
1200	1200	1600	1200	4000	2800

3.7 Modélisation du problème étudié

3.7.1 Hypothèses de travail

Un modèle mathématique représente une approximation de la réalité. Pour cela l'introduction d'hypothèses simplificatrices (Benrahou et Tairi, 2019) est nécessaire.

- On admet que toute information concernant la planification des routes est supposée connue par le planificateur avant la collecte, et que cette information ne change pas après que les routes aient été construites, donc on écarte le problème dynamique.
- La stochasticité de la quantité d'huile sera supprimée par les résultats prévisionnels des tests statistiques non paramétriques de la section (3.6).
- On considère le dépôt non contraint.
- Les véhicules sont homogènes et de même capacité

La figure 3.18 présente le problème étudié, à savoir VRP statique déterministe.

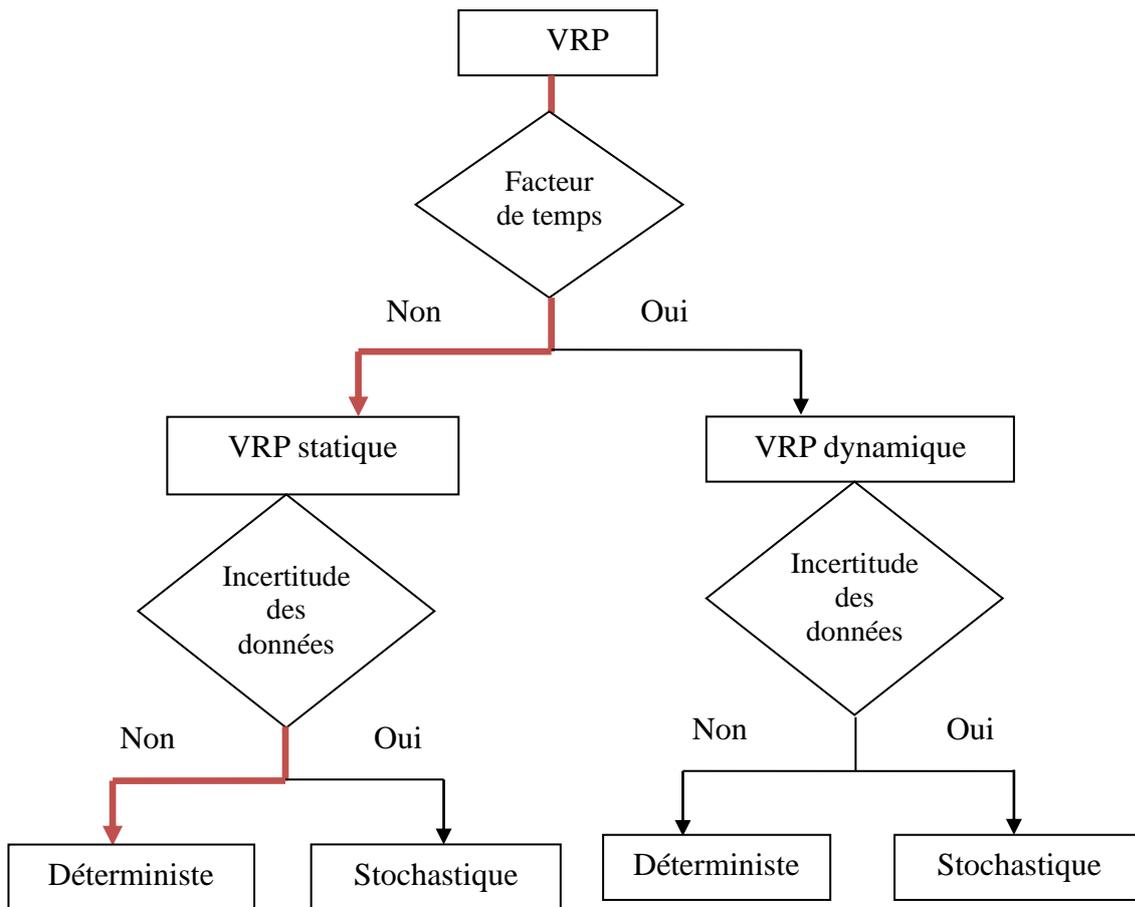


Figure 3.18 : Types de problème VRP selon la nature des données (Fisher et al.1978)

3.7.2 Formulation mathématique

Nous présentons dans cette section la formulation mathématique du problème réel de tournée de véhicules avec contrainte de capacité CVRP à l'aide d'un modèle de programmation linéaire à variables binaires, c'est-à-dire des problèmes dont la fonction à optimiser est linéaire, et où les variables sont entières.

Nous décrivons dans un premier temps le problème de manière formelle en introduisant les paramètres utilisés, puis nous présentons en détail la fonction objectif et les contraintes du modèle. Le réseau de collecte des huiles de vidange usagées est considéré comme une variante du VRP, car en plus d'avoir un ensemble de clients répartis dans une zone géographique, où chaque point possède une certaine quantité d'huile usagée, une flotte de K véhicules de capacité homogène doit effectuer une tournée pour former une route, commençant et se terminant au dépôt qui correspond au nœud $i=1$.

Nous considérons un graphe orienté $G = (N, A)$ dans lequel N représente l'ensemble des nœuds du réseau et A l'ensemble des arcs reliant les nœuds.

Chaque client est visité une seule fois par un seul camion, la somme des quantités collectées par le même véhicule ne doit pas dépasser sa capacité (Q).

L'objectif du problème consiste à trouver un ensemble de routes de distance minimale, sans violation de la capacité du camion.

Paramètres

n : nombre de clients avec $\{1\}$ le dépôt ($n=26$)

K : nombre de véhicules ($K=3$)

Q : capacité des véhicules (véhicules homogènes) ($Q= 6 m^3$)

d_i : demande du client i (quantité à collecter)

d_{ij} : la distance entre les sommets i et j ($d_{ij} \neq d_{ji}$)

Variables

Les variables de décision utilisées dans cette formulation sont associées à l'itinéraire qu'emprunte chaque véhicule dans sa tournée.

$x_{ij}^k=1$ si l'arc (i, j) est dans la tournée du véhicule k et 0 sinon.

$y_i^k=1$ si le nœud i est visité par le véhicule k et 0 sinon.

Fonction objectif

La fonction objectif exprimée par l'équation (1) cherche à minimiser la distance totale parcourue par les véhicules de collecte.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

Contraintes

Nous présentons ci-dessous l'ensemble des contraintes du problème CVRP

$$\sum_{k=1}^K y_i^k = 1 \quad \forall i \in (2, \dots, n) \quad (1.1)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{1k} = k \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^k = y_j^k \quad \forall j \in (2, \dots, n) \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k = y_i^k \quad \forall i \in (2, \dots, n) \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.4)$$

$$\sum_{i=2}^n d_i y_i^k \leq Q \quad " k \hat{=} (1, \dots, K) \quad (1.5)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij}^k \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N ; 2 \leq |S| \leq n-1 \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad i \neq j \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.7)$$

$$y_i^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in N \quad \forall k \in (1, \dots, K) \quad (1.8)$$

L'équation (1) représente la fonction objectif qui minimise la distance parcourue. La contrainte (1.1) assure que chaque client doit être visité une et une seule fois, la contrainte (1.2) garantit que tous les véhicules se trouvent au dépôt (chaque tournée passe par le dépôt). Les contraintes (1.3) et (1.4) assurent que le véhicule quitte le client aussitôt que ce dernier ait été servi (le sommet visité doit impérativement être quitté), (1.5) vérifie que la capacité de chargement de chaque véhicule est bien respectée. On retrouve les contraintes d'élimination des sous-tours en (1.6) qui élimine les sous-tours au sein d'un tour qui doit commencer et se terminer au dépôt ; $|S|$ représente le nombre de sommets faisant partie d'un sous-tour potentiel composé des clients de l'ensemble S . Enfin (1.7) et (1.8) sont des contraintes de binarité sur les variables de décision.

3.7.3 Evaluation et amélioration du modèle

Nombre de variables

- $K(n^2)$ variables binaires de type x_{ij}^k
- $K(n)$ variables binaires de type y_i^k

Nombre de contraintes

- $(n-1)$ contraintes de type (1.1)
- 1 contrainte de type (1.2)
- $(n-1)$ contraintes de type (1.3)
- $(n-1)$ contraintes de type (1.4)

- K contrainte de type (1.5)
- 2^n contraintes de type (1.6)

Nous obtenons donc avec nos instances un programme avec :

- 6760 variables binaires de type x_{ij}^k
- 260 variables binaires de type y_i^k ;
- 335544616 de contraintes.

La contrainte d'élimination des sous-tours (1.6) est une énumération exponentielle, car elle comporte 2^n contraintes. Cela signifie que le nombre de contraintes augmente de façon exponentielle en fonction de n.

Pour S=2 : $x_{ij}^k + x_{ji}^k \leq 1$ pour toutes les combinaisons possibles de S contenant 2 nœuds

S= {2,3}, S= {2,4}, S= {2,5}, S= {3,4}, S= {3,5} pour n=5.

Pour S=3 : $x_{ij}^k + x_{jl}^k + x_{li}^k \leq 2$ ou bien $x_{il}^k + x_{lj}^k + x_{ji}^k \leq 2$ pour toutes les combinaisons possibles de S contenant 3 nœuds, S= {2,3,4}, S= {2,3,5}, S= {2,4,5}, S= {3,4,5}, ...etc jusqu'à S= n-1 nœuds.

Une autre contrainte d'élimination des sous-tours a été proposée par Miller, Tucker & Zemlin (MTZ). Cette reformulation présentée en (1.9) et (1.10) a permis de réduire considérablement le nombre de contraintes de sous-tours possibles (Miller et al. 1960), qui est de l'ordre de n^2-3n+2 et dans notre cas, on a 600 contraintes.

Soit u_i l'ordre de passage du véhicule k au sommet i :

$$u_i - u_j + nx_{ij} \in n - 1 \quad 2 \in i \neq j \in n \quad (1.9)$$

$$1 \in u_i \in n \quad (1.10)$$

Exemple didactique 2

On considère une tournée composée de 3 clients (2,4,5), le camion démarre du dépôt pour visiter le client 2 puis le client 4 et enfin le client 5 puis revient au dépôt. L'ordre de passage du camion est le suivant :

$u_2=1$ (visiter le client 2 en premier)

$u_4=2$ (visiter le client 4 en 2^{ème} position)

$u_5=3$ (visiter le client 5 en 3^{ème} position)

Afin d'éliminer les sous-tours on applique la contrainte (1.9) :

$$u_2 - u_4 + nx_{24} \in 25 - 1$$

$1-2+25*1 \leq 24$ l'équation est juste.

$2-1+25*1 \leq 24$ l'équation est incorrecte, ce qui va empêcher la formation de sous-tour 2-4-

2, donc le camion ne retourne pas vers le client 2 mais il termine son voyage vers le client 5.

$$u_4 - u_5 + nx_{45} \leq 25 - 1$$

$2-3+25*1 \leq 24$ l'équation est juste.

$3-2+25*1 \leq 24$ l'équation est incorrecte, ce qui va empêcher la formation de sous-tour 4-5-4, le camion ne retourne pas vers le client 4, il retourne vers le dépôt 1.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en relief le contexte de notre travail en présentant le problème de la collecte des huiles de vidange usagées en Algérie. Puis nous avons restreint notre champ d'étude au réseau de collecte de la région centre, de Zéralda jusqu'à la commune de Rouïba appartenant au district El Harrach où se situe le dépôt primaire des huiles collectées. Pour une meilleure compréhension de l'évolution des collectes en fonction du temps, une analyse statistique des données collectées a été réalisée, les résultats du lissage exponentiel ont été utilisés pour la réalisation d'un calendrier prévisionnel des quantités d'huile cumulées pour le mois de janvier 2018. Ces données seront utilisées pour valider le modèle étudié. Par la suite une modélisation mathématique du problème sous la forme d'un PLNE a été formulée sur la base d'un certain nombre d'hypothèses. Notre modèle cherche à minimiser la distance totale parcourue par la flotte de véhicules qui apparait clairement dans la fonction objectif. Le chapitre suivant est consacré à la résolution du problème CVRP mono-dépôt avec flotte homogène.

Chapitre 4. Résolution & Analyse

Sommaire

4.1	Méthode exacte	104
4.1.1	Environnement de résolution	104
4.1.2	Discussion	104
4.2	Résolution heuristique	105
4.2.1	Résolution à l'aide de l'heuristique de la plus proche insertion (NIA).....	105
4.2.1.1	Préparation des données	106
4.2.1.2	Résultats numériques.....	108
4.2.1.3	Evaluation de la performance de l'heuristique NIA.....	110
4.2.2	Résolution à l'aide de méthodes constructive et de recherche locale.....	112
4.2.2.1	Génération d'une solution initiale à l'aide de l'heuristique de gain	112
4.2.2.2	Critère d'arrêt de la méthode	112
4.2.2.3	Résultats numériques.....	113
4.2.3	Recherche locale	114
4.2.3.1	Solution initiale améliorée par un Swap externe.....	115
4.2.3.2	Solution améliorée par un mouvement Or-Opt intra-route	117
4.2.3.3	Evaluation de la performance de l'heuristique de gain améliorée par une recherche locale	119
4.3	Synthèse des résultats	121
4.4	Conclusion	123

Dans le but de résoudre un problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité, diverses méthodes de résolution ont déjà été présentées dans le chapitre 2. Dans le présent chapitre nous allons expliquer comment nous avons résolu notre problème par le biais de méthodes approchées.

4.1 Méthode exacte

4.1.1 Environnement de résolution

Afin de pouvoir résoudre ce modèle mathématique, l'outil informatique d'optimisation et d'aide à la décision IBM ILOG CPLEX a été utilisé. Le modeleur est composé d'un solveur linéaire, d'un langage de programmation et d'un environnement de développement. Pour ce faire, un mode OPL (Optimization Programming Language) studio sera utilisé et un projet OPL est créé, il est composé de :

- Un fichier modèle (.mod) : incluant la fonction objectif, les variables et les contraintes définies par le modèle mathématique (Voir annexe D) ;
- Un fichier de données (.dat) : contenant toutes les données spécifiques au modèle comme le nombre de véhicules disponibles et leurs capacités, la matrice de distance, la quantité (d_i) chez le client (i). (Voir annexe D)
- Un fichier de configuration d'exécution (oplproject).

Pour la résolution du modèle, nous avons utilisé un PC Sony doté d'un processeur AMD E-350 1.60GHz et de 4.00 GB de RAM tournant sur Windows 10 (Benrahou et Tairi, 2019).

Le modèle mathématique a été programmé en langage de programmation C, le fichier modèle est donné en annexe D. La première partie du programme a été consacrée à la déclaration des paramètres et des variables de décision, deux variables sont utilisées, une variable binaire à trois indices x_{ij}^k qui prend la valeur de 1 si l'arc (i,j) est emprunté par le véhicule k , 0 sinon, et une variable binaire d'affectation y_i^k .

Nous avons amélioré le modèle en remplaçant la contrainte d'élimination des sous-tours de (Dantzig et al. 1959) par celle de (Miller et al. 1960), leur nombre est passé d'une énumération exponentielle à une énumération quadratique.

4.1.2 Discussion

Dans un premier temps, nous avons testé le modèle en utilisant les données réelles avec intégration des contraintes de Miller, Tucker & Zemlin (section 3.7.3) qui assurent d'éliminer tous les cycles du graphe qui ne passent pas par le dépôt.

Lors de l'exécution du modèle, nous avons rencontré des problèmes de mémoire, et de temps de calcul (Benrahou et Tairi, 2019), le solveur n'arrivait pas à trouver une solution optimale en un temps raisonnable, d'après Cadet David Joseph (2013), les temps de calculs requis pour la résolution exacte de la plupart des problèmes de VRP de taille réelle sont dans le pire des cas exponentiels en fonction de la taille du problème ($e^n, 2^n$).

Un autre modèle a été testé sur les mêmes données réelles, mais en supprimant les contraintes d'élimination des sous-tours avec l'objectif de réduire le nombre de contraintes, après exécution du programme, une solution est affichée mais elle est loin d'être la solution optimale, car le solveur affiche (feasible relaxed sum of infeasibilities) cela veut dire que la solution est infaisable et nécessite une relaxation, autrement dit trouver une solution qui constitue une borne inférieure du problème, avec violation de quelques contraintes, le logiciel précise l'ensemble des contraintes qui nécessitent la relaxation.

Mais au niveau industriel, un décideur peut avoir besoin d'une solution offrant un bon ratio qualité-temps d'exécution, notamment dans le cas où le CVRP est vu comme un problème de niveau opérationnel.

Lorsqu'aucune solution réalisable ne peut être fournie dans un temps raisonnable, il devient nécessaire d'aborder des méthodes approchées, qui trouvent, en général, des solutions de bonne qualité mais ne fournissent aucune garantie quant à leur optimalité.

4.2 Résolution heuristique

Cette partie s'intéresse à l'exploitation de méthodes heuristiques pour la résolution du problème de collecte des huiles de vidange usagées.

L'application des heuristiques aux instances réelles permet de trouver des solutions plus ou moins proches de l'optimum, l'objectif principale de ce travail étant la réduction de la distance parcourue par la flotte de la société pour arriver à collecter tous les clients et éviter tout débordement du déchet. Dans notre cas d'étude, le choix et l'utilisation de ces heuristiques est justifié par les points suivants : (i) Méthodes exactes existantes mais voraces en temps de calcul et espace mémoire, (ii) le problème étudié nécessite d'être résolu fréquemment car les décisions prises sont de niveau opérationnel, et enfin (iii) la solution heuristique est acceptable pour l'entreprise.

4.2.1 Résolution à l'aide de l'heuristique de la plus proche insertion (NIA)

L'heuristique de la plus proche insertion est une méthode constructive, qui consiste à insérer des clients dans une tournée tout en réduisant la distance parcourue. Dans la littérature, il existe deux versions de cette heuristique, une version parallèle qui réalise plusieurs insertions dans différentes tournées en construction, et une version séquentielle qui démarre une nouvelle tournée quand les insertions ne sont possibles dans la tournée courante

et c'est cette dernière version qui a été utilisée pour construire les routes des camions du réseau étudié.

4.2.1.1 Préparation des données

Les données nécessaires à l'implémentation de l'heuristique de la plus proche insertion sont présentées sur le tableau 4.1, chaque point de collecte possède un code alphanumérique tiré de la base de données de la société, des coordonnées décimales réelles (x) et (y) obtenues à partir de l'outil Google Maps, et les coordonnées (x) et (y) suivant l'échelle Matlab, que nous avons obtenus à partir d'une image en utilisant les fonctions :

- `a=imread('clients.jpg');`
- `imshow(a);`

Ces deux fonctions permettent de lire et d'afficher l'image au format (jpg) de la répartition géographique des clients à partir de l'application Google Maps, l'insertion de deux axes X et Y à l'image permet de déterminer les coordonnées Matlab (x) et (y) de chaque point de collecte (Figure 4.1). L'exécution de l'algorithme de la plus proche insertion nécessite un fichier de données composé de quatre colonnes, la première contient le numéro du client, sur la deuxième et la troisième colonne sont mentionnées les coordonnées (x) et (y) respectivement des 26 points du réseau, et la dernière contient les quantités prévisionnelles d'huile pour un horizon de 7 jours, puis une seconde optimisation sur une période de temps étendu à 1 mois (Annexe D)

Tableau 4.1 : Coordonnées géographiques et quantités cumulées au niveau des points de collecte du district (Benrahou et Tairi, 2019)

Node		Real co-ordinates		Co-ordinates according to the MATLAB® scale		Amount (L) 7-days	Amount (L) 30-days
N	Code	Latitude (Y)	Longitude (X)	Latitude (Y)	Longitude (X)		
1	Depot	36.7081173	3.1327692	68	58	0	0
2	P6843	36.7163154	3.2401715	63	76	700	2800
3	P7184	36.6968217	3.1881652	73	67	1000	4000
4	P7332	36.7098166	3.2053484	66	70	900	3600
5	Y8286	36.7283743	3.1662002	58	62	500	2000
6	A8027	36.7157083	3.1008281	59	58	600	2400
7	C5399	36.7283743	3.1662002	59	64	200	800
8	L9783	36.7221339	3.1203803	58	58	200	800
9	A1948	36.7891282	2.9025384	19	26	200	800
10	B3860	36.768884	3.0228233	35	41	400	1600
11	B5874	36.7292922	3.0799726	55	50	184	735
12	C0159	36.7719164	3.0045938	32	38	1000	4000
13	K2641	36.7409862	3.1090665	49	55	1000	4000
14	K2657	36.7305343	3.267164	61	81	900	3600
15	K2662	36.6828274	3.1250799	81	57	1000	4000
16	K2667	36.7283743	3.1662002	56	64	600	2400
17	K2669	36.7690512	2.9610748	53	31	600	2400
18	L9700	36.7890042	3.0614113	23	47	171	683
19	N3731	36.7499531	2.9143122	44	23	400	1600
20	P0284	36.7810129	3.0504212	26	46	500	2000
21	P0291	36.7264128	3.0387223	57	43	300	1200
22	U8625	36.7708609	3.0218592	31	40	300	1200
23	W4316	36.7310535	3.1638697	39	29	400	1600
24	Y7258	36.740936	3.089246	49	52	300	1200
25	Y8064	36.6919808	3.0578429	75	46	1000	4000
26	Y8495	36.752887	3.042048	43	44	700	2800



Figure 4.1 : Coordonnées des clients selon l'échelle Matlab (Benrahou et Tairi, 2019)

4.2.1.2 Résultats numériques

La table 4.2 donne les résultats de l’heuristique NIA obtenus sur les 26 points du réseau de collecte appartenant au district Alger. Pour chaque période de planification, on peut voir à partir de cette table le nombre de routes, les clients qui composent chaque route (cluster), la distance de chaque route et la distance totale parcourue par l’ensemble des véhicules de la société. Pour calculer la distance réelle approximativement, nous devons convertir la distance euclidienne fournie par Matlab (scale of Matlab), en distance réelle (Benrahou et Tairi, 2019). Pour cela, nous devons calculer la distance euclidienne entre deux points de la carte en utilisant l’échelle Matlab, puis calculer la même distance euclidienne réelle en utilisant l’application google Maps, trouver le facteur de calibration et calculer la distance totale réelle. Mais dans notre cas, sachant que la distance des trajets utilisée est en mode driving, donc pour passer de la distance à l’échelle de Matlab à la distance réelle, il suffit d’utiliser les valeurs obtenues directement du distancier.

Tableau 4.2: Résultats de l’heuristique de la plus proche insertion (Benrahou et Tairi, 2019)

<i>Période de planification (Jours)</i>	<i>Nombre de routes</i>	<i>Routes (cluster)</i>	<i>Distance des routes (km)</i>	<i>Distance totale (km)</i>	<i>CPU(s)</i>
		(1 6 8 5 7 16 4 3 15 25 1)	55,4		
7 jours	3	(1 11 21 24 13 26 10 22 12 23 17 19 18 9 1)	124,4	250,6	2
		(1 2 14 20 1)	70,8		
30 jours	11	(1 6 8 5 7 1)	14,9		
		(1 3 11 1)	29,8		
		(1 4 16 1)	34,1		
		(1 15 1)	10,2		
		(1 25 21 18 1)	50,4		
		(1 2 24 10 1)	63	461	2
		(1 13 22 1)	33,6		
		(1 14 17 1)	78,6		
		(1 26 23 19 1)	57,2		
		(1 12 9 1)	52,4		
		(1 20 1)	36,8		

Comme illustré sur la Figure (4.2), pour une période de 7 jours, l’algorithme génère une solution optimale composée de 3 routes, avec une distance totale de 260 km. Chaque route respecte la contrainte de capacité imposée par le modèle :

- La première route $\sum_{i=2}^n d_i y_i^k = 6000 \leq 6000$;
- La deuxième route $\sum_{i=2}^n d_i y_i^k = 5955 \leq 6000$;
- La troisième route $\sum_{i=2}^n d_i y_i^k = 2100 \leq 6000$.

La deuxième partie du tableau (4.2) résume les résultats de la seconde optimisation qui montre une meilleure solution en termes de distance parcourue par rapport aux quantités collectées.

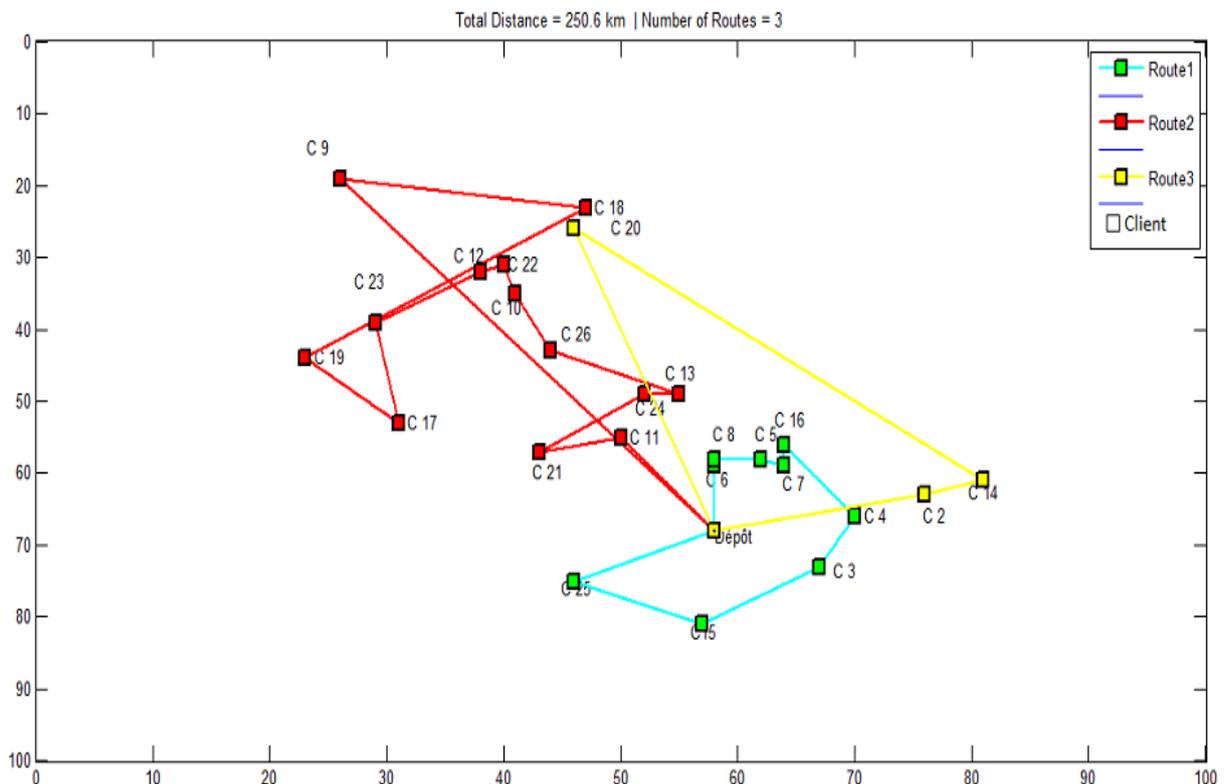


Figure 4.2 : Représentation graphique des routes pour un horizon de planification de 7 jours (Janvier 2018) (Benrahou et Tairi, 2019)

Dans cette seconde optimisation, nous avons étendu l’horizon de planification sur une période de 30 jours. Les quantités d’huile correspondent aux résultats prévisionnels des tests non paramétriques pour le mois de janvier de l’année 2018.

Sur la figure (4.3), une représentation graphique des routes parcourues par les véhicules est illustrée. L'algorithme NIA génère une solution composée de 11 routes, avec une distance totale de 461 km, tous les clients sont collectés avec un taux de remplissage entre 16% et 30% pour des capacités de 10000 L et 13% à 80% pour des capacités de 5000 L (Benrahou et Tairi, 2019).

En essayant d'étendre l'horizon de planification des collectes sur une plus grande période, le camion ne pourra collecter qu'un nombre réduit de clients possédant un réservoir de capacité égale à 5000L. Pour les capacités de 10000 L, la collecte d'un seul client en une seule route sera impossible, car la quantité d'huile cumulée dépasse largement la capacité du camion.

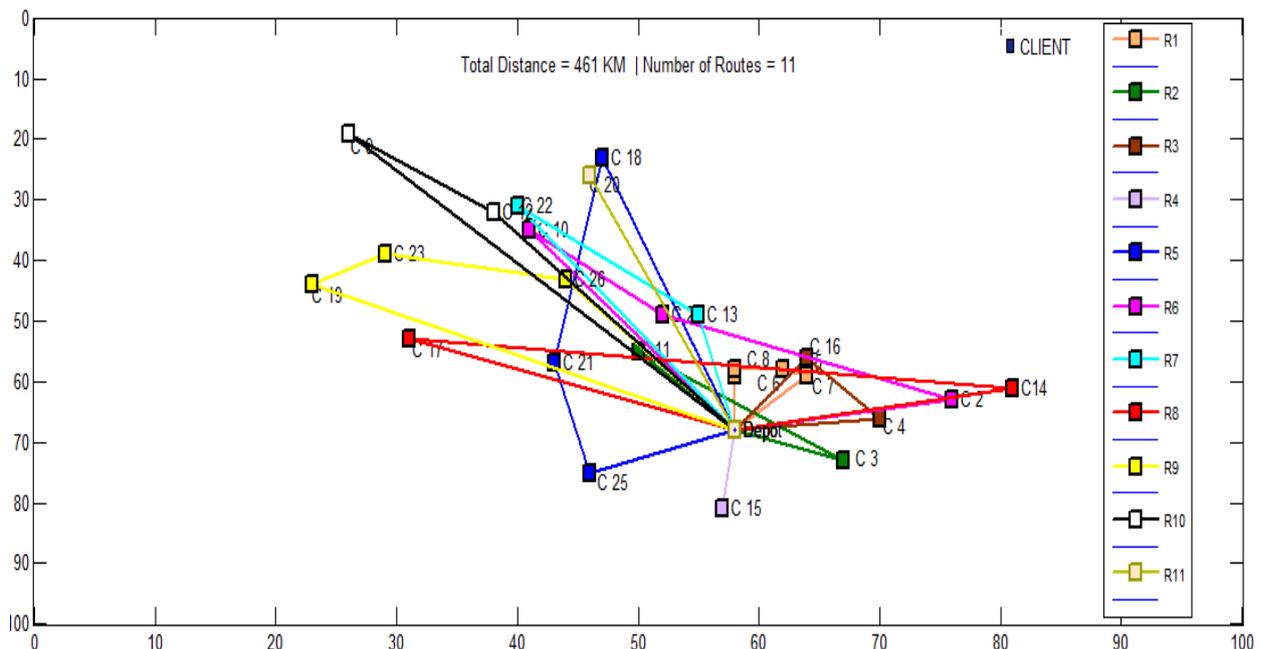


Figure 4.3 : Représentation graphique des routes pour un horizon de planification de 30 jours (Janvier 2018) (Benrahou et Tairi, 2019)

4.2.1.3 Evaluation de la performance de l'heuristique NIA

Afin de mesurer les gains apportés par cette méthode par rapport à la méthode actuelle de la société, nous allons dans un premier temps déterminer le nombre de clients et la distance parcourue par la flotte à partir des données historiques de l'entreprise.

L'analyse des tournées du mois de janvier de l'année 2017 indique que la société a effectué 11 tournées pendant ce mois et à chaque tournée correspond une date de collecte, le calendrier des tournées est présenté sur le tableau 4.3.

En analysant ce tableau, nous pouvons conclure que pendant le mois de janvier de l'année 2017, la société a collecté 14 clients sur 25, pendant 10 jours.

Sur les 11 tournées, 9 sont composées d'un seul client (nœud), une tournée est composée de 2 clients et une tournée de 3 clients. La distance totale parcourue est de 372 km et la quantité totale collectée est de 30800 L.

L'écart entre la solution obtenue (*DistNIA*) et la distance totale cumulée et parcourue par les camions de la société Naftal (*DistNaftal*) lors des tournées du mois de janvier 2017 est calculé comme suit :

$$GAIN = \frac{DistNaftal - DistNIA}{DistNIA} \cdot 100\%$$

On constate dans un premier temps que la méthode NIA permet de baisser la distance totale par rapport à la stratégie actuelle de l'entreprise de 17 %, ce qui représente tout de même 80 km supplémentaires que doivent parcourir les camions pour collecter le déchet des 11 clients restants tout en considérant la contrainte de capacité imposée par le modèle mathématique.

Donc pour collecter tous les clients de la société, le camion doit parcourir au total une distance de 541 km composée de 15 clusters, alors que la solution générée par l'heuristique NIA propose une distance totale de 461 km, répartie en 11 routes individuelles, de plus tous les clients sont visités et la quantité totale collectée est de 52618 L.

Tableau 4.3 : Calendrier des tournées du mois de Janvier de l'année 2017

Date de collecte	Nombre de routes	Routes (cluster)	Distance des routes (km)	Quantité collectée (L)
05/01/2017	1	1-16-1	30,8	2500
11/01/2017	1	1-19-1	52,8	3000
12/01/2017	1	1-14-1	40,4	2600
13/01/2017	1	1-12-1	33	1800
14/01/2017	1	1-10-1	32,8	800
15/01/2017	1	1-2-1	30,8	2500
22/01/2017	1	1-8-17-6-1	48,3	5200
26/01/2017	2	1-15-1/1-4-1	10,2/24,6	7000
28/01/2017	1	1-5-1	6,4	2500
29/01/2017	1	1-13-9-1	62	2900
Total	11		372	30800

4.2.2 Résolution à l'aide de méthodes constructive et de recherche locale

4.2.2.1 Génération d'une solution initiale à l'aide de l'heuristique de gain

Dans cette étude, une autre méthode constructive a été appliquée, c'est l'heuristique de gain, et plus précisément une version de la méthode de Clarke et Wright (1964) combinée avec une recherche locale. Cette dernière est constituée en une série de méthodes d'amélioration de type 2-opt, Or-opt avec sélection du meilleur mouvement implanté par Laporte et Semet (1998), et la méthode Swap.

Pour appliquer une méthode de recherche locale, il faut commencer d'abord par la génération d'une solution réalisable initiale. Nous utilisons pour cela l'algorithme de Clark et Wright, étant originalement conçue pour des problèmes de CVRP.

Pour résoudre cet algorithme, nous avons utilisé le logiciel VRPSOLVER, un solveur libre et open source, développé par le professeur Larry Snyder (Snyder et al. 2011), et mis en ligne sur le site web de l'université de Lehigh en Pennsylvanie.

L'exécution de l'algorithme de gain de Clark & Wright nécessite un fichier de données composé de quatre colonnes, la première contient le numéro du client, sur la deuxième et la troisième colonne sont mentionnées les coordonnées (x) et (y) respectivement des 26 points du réseau, et la dernière contient les quantités prévisionnelles d'huile pour le mois de janvier 2018. Pour plus de précision, nous avons préféré intégrer directement la matrice de distance illustrée en annexe E, car le logiciel possède deux fonctionnalités pour le calcul de la distance entre les points du réseau, la première utilise les coordonnées des clients pour le calcul de la distance euclidienne, et la deuxième utilise directement les distances réelles en mode driving, en plus de la distance, le solveur impose une restriction de la capacité des véhicules.

4.2.2.2 Critère d'arrêt de la méthode

Il est important de fixer un critère d'arrêt de la recherche de solution. Pour cela, le logiciel permet de fixer un nombre maximum d'itérations, le programme s'arrête lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint. Nous avons choisi de limiter le nombre d'itérations à 500.

4.2.2.3 Résultats numériques

Nous présentons à la figure (4.4) les résultats de l'heuristique de gain que nous allons considérer comme solution initiale.

Figure 4.4 : Solution initiale de l'heuristique de Clark & Wright

ROUTE 1			ROUTE 2			ROUTE 3		
Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance
1	0	15.40	1	0	8.90	1	0	12.30
2	2800	16.60	3	4000	8.90	4	3600	12.30
6	2400	3.90	Total: 4000.00 17.80			Total: 3600.00 24.60		
Total: 5200.00 35.90								
ROUTE 4			ROUTE 5			ROUTE 6		
Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance
1	0	3.50	1	0	26.40	1	0	8.00
8	800	8.80	19	1600	5.20	11	735	3.80
16	2400	3.50	23	1600	6.00	24	1200	6.60
5	2000	1.50	9	800	11.40	22	1200	4.00
7	800	4.50	10	1600	16.40	20	2000	2.40
Total: 6000.00 21.80			Total: 5600.00 65.40			Total: 5818.00 42.60		
ROUTE 7			ROUTE 8			ROUTE 9		
Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance
1	0	16.50	1	0	8.20	1	0	20.20
12	4000	16.50	13	4000	8.20	14	3600	20.20
Total: 4000.00 33.00			Total: 4000.00 16.40			Total : 3600.00 40.40		
ROUTE 10			ROUTE 11			ROUTE 12		
Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance	Stop	Quantité	Distance
1	0	5.10	1	0	20.50	1	0	10.50
15	4000	5.10	17	2400	9.40	21	1200	5.00
Total : 4000.00 10.20			Total: 5200.00 44.10			Total: 5200.00 30.00		

La figure (4.4) montre que la solution initiale obtenue par l'exécution de l'heuristique de gain est composée de 12 routes (clusters), la distance totale parcourue par les camions pour collecter l'ensemble des clients est de l'ordre de 382,20 km. Une représentation graphique des routes est illustrée sur la figure (4.5).

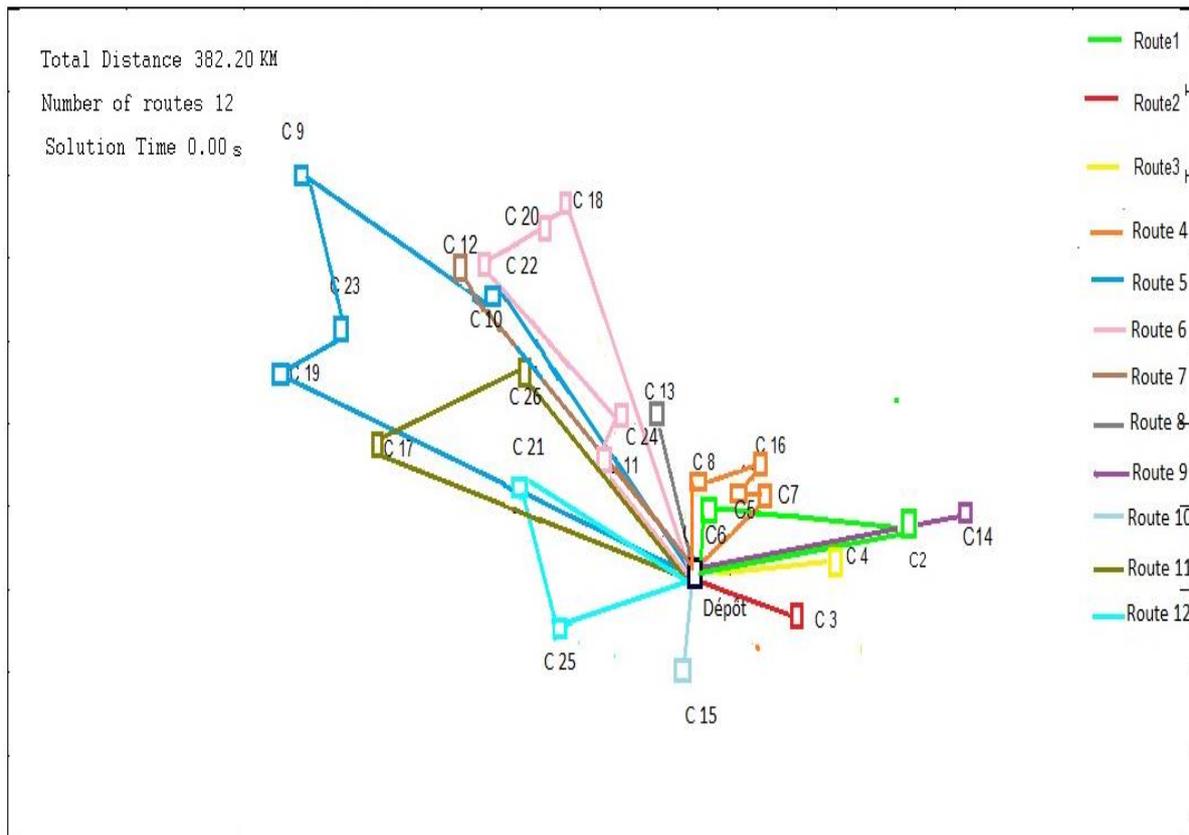


Figure 4.5: Solution initiale obtenue par l'heuristique de gain

4.2.3 Recherche locale

La solution obtenue à la fin de la construction des routes par la méthode de Clark & Wright n'est pas forcément optimale, elle peut être souvent améliorée par une recherche locale en vue de trouver la meilleure solution dans le voisinage de la solution initiale. Dans notre cas il s'agit de trouver une solution constituée d'une ou plusieurs routes qui minimise la distance parmi un ensemble de solutions S , de ce fait, l'application des algorithmes de recherche locale permet d'explorer l'espace de recherche de manière à trouver une meilleure solution en se déplaçant dans son voisinage $N(S)$.

Dans le problème de tournées de véhicules, une solution est composée d'un ensemble de séquences de clients à visiter, et une meilleure solution peut être obtenue en déplaçant ou en permutant les arcs (liaison entre deux clients consécutifs dans une tournée).

4.2.3.1 Solution initiale améliorée par un Swap externe

La figure (4.6) présente les résultats de l’algorithme Swap, le mouvement Swap est indiqué en rouge sur la table de la route 1 et celle de la route 4, les autres routes demeurent exactement les mêmes.

Figure 4.6 : Solution initiale améliorée par un Swap externe

ROUTE 1
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	15.40
2	2800	7.60
16	2400	15.40
Total: 5200.00		38.40

ROUTE 2
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	8.90
3	4000	8.90
Total: 4000.00		17.80

ROUTE 3
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	12.30
4	3600	12.30
Total: 3600.00		24.60

ROUTE 4
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	3.90
6	2400	1.20
8	800	3.80
5	2000	1.50
7	800	4.50
Total: 6000.00		14.90

ROUTE 5
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	26.40
19	1600	5.20
23	1600	6.00
9	800	11.40
10	1600	16.40
Total: 5600.00		65.40

ROUTE 6
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	8.00
11	735	3.80
24	1200	6.60
22	1200	4.00
20	2000	2.40
18	683	17.80
Total: 5818.00		42.60

ROUTE 7
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	16.50
12	4000	16.50
Total: 4000.00		33.00

ROUTE 8
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	8.20
13	4000	8.20
Total: 4000.00		16.40

ROUTE 9
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	20.20
14	3600	20.20
Total : 3600.00		40.40

ROUTE 10
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	5.10
15	4000	5.10
Total : 4000.00		10.20

ROUTE 11
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	20.50
17	2400	9.40
26	2800	14.20
Total: 5200.00		44.10

ROUTE 12
=====

Stop	Weight	Distance
1	0	10.50
21	1200	5.00
25	4000	14.50
Total: 5200.00		30.00

meilleure recherche de solutions d'amélioration, nous avons fixé un nombre maximal de 500 itérations comme critère d'arrêt de la recherche.

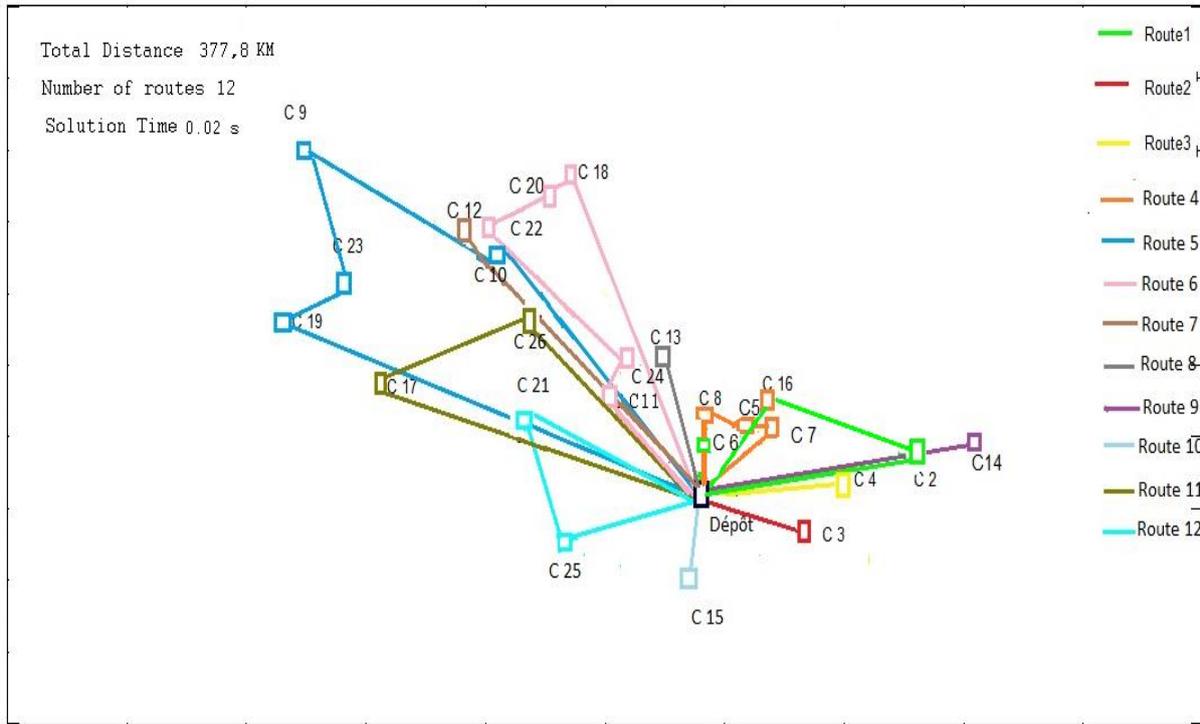
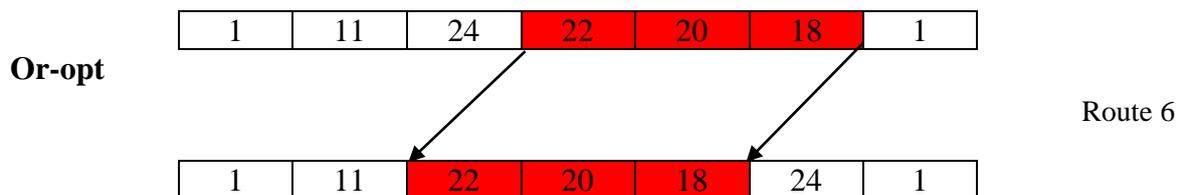


Figure 4.8 : Solution améliorée avec 1 mouvement Swap externe

4.2.3.2 Solution améliorée par un mouvement Or-Opt intra-route

Une autre solution est générée en utilisant un opérateur de voisinage classique. L'amélioration a été apportée par l'heuristique Or-opt 3 en déplaçant le segment à 3 nœuds (22 20 18) à l'intérieure de la route 6 comme montré sur la figure (4.9). Cette transformation permet de réduire la distance parcourue de 1,7 km par rapport à la solution précédente.

Figure 4.9 : Méthode d'amélioration inter-routes Or-opt 3



Les routes finales pour lesquelles plus aucune amélioration n'est possible sont présentées à la figure (4.10), la solution finale du problème étudié est composée de 12 clusters. La contrainte de capacité des véhicules est vérifiée (la somme des quantités délivrées le long de ces douze routes n'excède pas la capacité des véhicules).

Figure 4.10 : Solution améliorée par un mouvement Or-Opt intra-route

ROUTE 1		
Stop	Weight	Distance
1	0	15.40
2	2800	7.60
16	2400	15.40
Total:		5200.00 38.40

ROUTE 2		
Stop	Weight	Distance
1	0	8.90
3	4000	8.90
Total:		4000.00 17.80

ROUTE 3		
Stop	Weight	Distance
1	0	12.30
4	3600	12.30
Total:		3600.00 24.60

ROUTE 4		
Stop	Weight	Distance
1	0	3.90
6	2400	1.20
8	800	3.80
5	2000	1.50
7	800	4.50
Total:		6000.00 14.90

ROUTE 5		
Stop	Weight	Distance
1	0	26.40
19	1600	5.20
23	1600	6.00
9	800	11.40
10	1600	16.40
Total:		5600.00 65.40

ROUTE 6		
Stop	Weight	Distance
1	0	8.00
11	735	7.20
22	1200	4.00
20	2000	2.40
18	683	7.60
24	1200	11.70
Total:		5818.00 40.90

ROUTE 7		
Stop	Weight	Distance
1	0	16.50
12	4000	16.50
Total:		4000.00 33.00

ROUTE 8		
Stop	Weight	Distance
1	0	8.20
13	4000	8.20
Total:		4000.00 16.40

ROUTE 9		
Stop	Weight	Distance
1	0	20.20
14	3600	20.20
Total:		3600.00 40.40

ROUTE 10		
Stop	Weight	Distance
1	0	5.10
15	4000	5.10
Total :		4000.00 10.20

ROUTE 11		
Stop	Weight	Distance
1	0	20.50
17	2400	9.40
26	2800	14.20
Total:		5200.00 44.10

ROUTE 12		
Stop	Weight	Distance
1	0	10.50
21	1200	5.00
25	4000	14.50
Total:		5200.00 30.00

Nous avons également obtenu la carte de la figure (4.11) après exécution de l'algorithme Or-opt. La solution améliorée par ce mouvement intra-route est composée de 12 routes d'une distance totale de 376.10 km.

De plus, tous les clients sont visités et la quantité totale collectée à cette date est de l'ordre de

56218L.

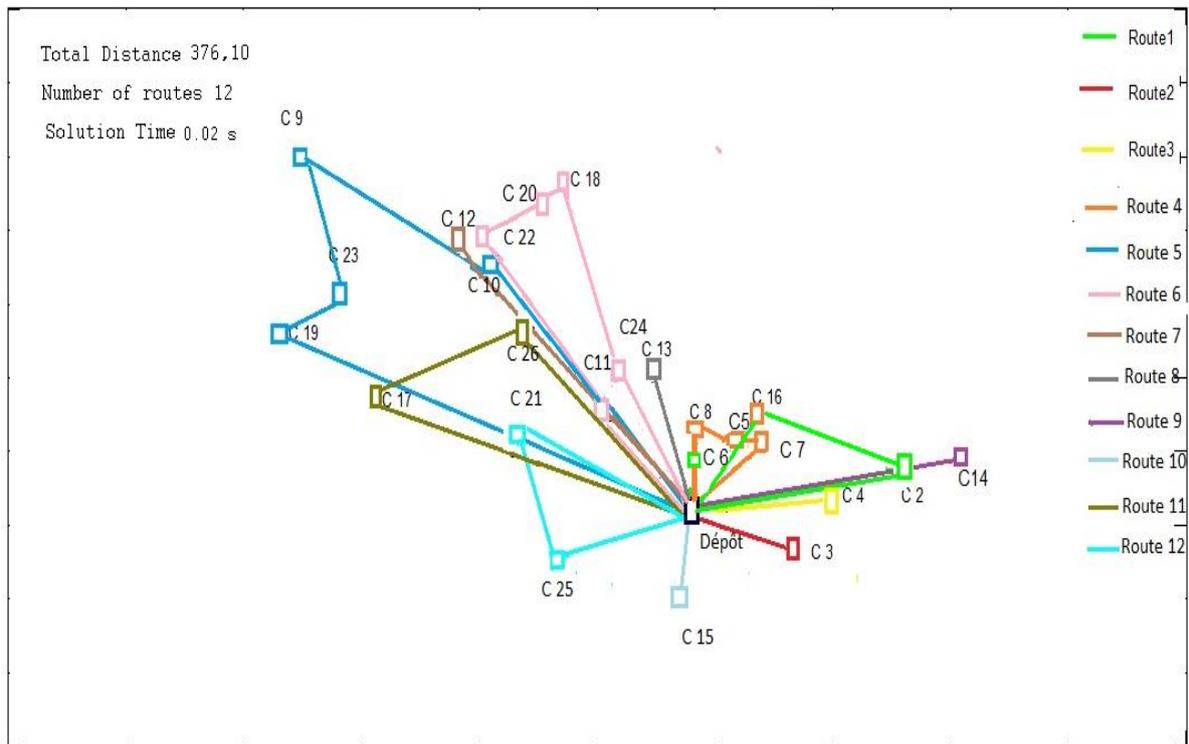


Figure 4.11 : Solution finale améliorée par une recherche locale

4.2.3.3 Evaluation de la performance de l'heuristique de gain améliorée par une recherche locale

Afin de mesurer les gains apportés par cette méthode par rapport à la méthode actuelle de la société, nous utilisons un indice de gain pour décrire le niveau d'amélioration des résultats qui est défini comme suit :

$$GAIN = \frac{DistNaftal - DistCW}{DistCW} \cdot 100\%$$

DistCW : la solution obtenue par l'heuristique de gain combinée avec une recherche locale

DistNaftal : la distance totale parcourue par les camions de la société Naftal lors des tournées du mois de janvier 2017.

La méthode de Clark & Wright améliorée par une recherche locale permet de baisser la distance totale par rapport à la stratégie actuelle de l'entreprise de 43%, ce qui représente tout de même 165 km supplémentaires que doivent parcourir les camions, en considérant la contrainte de capacité imposée par le modèle mathématique.

Donc pour collecter tous les clients de la société, le camion doit parcourir au total une distance de 536 km composée de 15 clusters, alors que la solution générée par l'heuristique de gain combinée avec une recherche locale propose une distance totale de 376.1 km, répartie en 12 routes individuelles.

L'avantage de la recherche locale, c'est de permettre l'obtention de meilleurs résultats qu'avec les heuristiques de construction de gain, tout en explorant l'espace des solutions proches de la solution initiale.

Mais l'inconvénient réside du fait que la recherche de solutions risque de s'arrêter à un optimum local, alors qu'on est loin de l'optimum global comme le montre la figure (4.12).



Figure 4.12 : illustration d'une recherche locale

Pour cette raison, nous avons modifié l'ordre d'application des méthodes d'amélioration, afin de changer systématiquement le voisinage de la solution initiale. Après arrêt de la recherche de solutions, le logiciel affiche le même résultat, la solution obtenue n'est pas meilleure que la solution courante.

Selon Alinaghian (2014), l'erreur de calcul du logiciel VRPSOLVER en terme d'écart en pourcentage par rapport aux meilleures solutions trouvées dans la littérature sur les instances d'Augerat et al.(1995) ne dépasse pas 2%.

L'équation pour le calcul de l'erreur est la suivante :

$$erreur = \frac{solutionVRP - BestSolution}{BestSolution} \cdot 100\%$$

SolutionVRP : solution obtenue à l'aide du logiciel VRPSOLVER sur les instances d'Augerat.

BestSolution : meilleure solution trouvée dans la littérature sur les instances d'Augerat (Augerat et al.1995)

En dépit du gain non négligeable ayant permis de réduire la distance de 17 %, il apparaît clairement que la résolution basée sur l'heuristique de gain donne de meilleurs résultats que la solution générée par l'heuristique de la plus proche insertion (NIA).

Pour évaluer la performance de l'heuristique de gain et décrire le niveau d'amélioration des résultats par rapport à l'heuristique NIA, nous utilisons un indice de gain qui est défini comme suit :

$$GAIN = \frac{DistNIA - DistCW}{DistCW} \cdot 100\%$$

La méthode de Clark &Wright améliorée par une recherche locale permet de baisser la distance totale par rapport à la l'heuristique NIA de 22.5%, ce qui représente tout de même 84.9 km supplémentaires que doivent parcourir les camions pour collecter l'ensemble des clients pour les mêmes quantités d'huile usagée.

4.3 Synthèse des résultats

Pour résoudre le problème CVRP mono-dépôt avec flotte homogène, diverses méthodes ont été utilisées. Le schéma de la figure 4.13 résume les étapes de la démarche expérimentale qui vise à planifier et optimiser l'activité de collecte des huiles de vidange usagées.

Dans un premier temps, une méthode exacte a été appliquée. La résolution du PL par le solveur IBM CPLEX conduit à des temps de calcul très long, en raison d'un grand nombre de contraintes et de variables binaires. De ce fait, l'utilisation de méthodes approchées est indispensable.

Dans un second temps, une version séquentielle de l'heuristique de la plus proche insertion a été appliquée. Les résultats obtenus sur les quantités prévisionnelles du mois de janvier 2018, démontrent une réduction de la distance de l'ordre de 80 km par rapport à la tournée du mois de janvier de l'année précédente. Cette dernière est composée de 15 routes. Le camion doit parcourir une distance de 541 km pour arriver à collecter tous les clients.

La solution générée par l'heuristique NIA propose une distance totale de 461 km, répartie en 11 routes individuelles, de plus tous les clients sont visités et la quantité d'huile usagée collectée est de 52618 L. Ces résultats démontrent clairement les avantages de la méthode NIA au niveau opérationnel, d'un côté l'heuristique apporte un gain de 17 % en termes de distance parcourue, de plus tous les clients sont collectés.

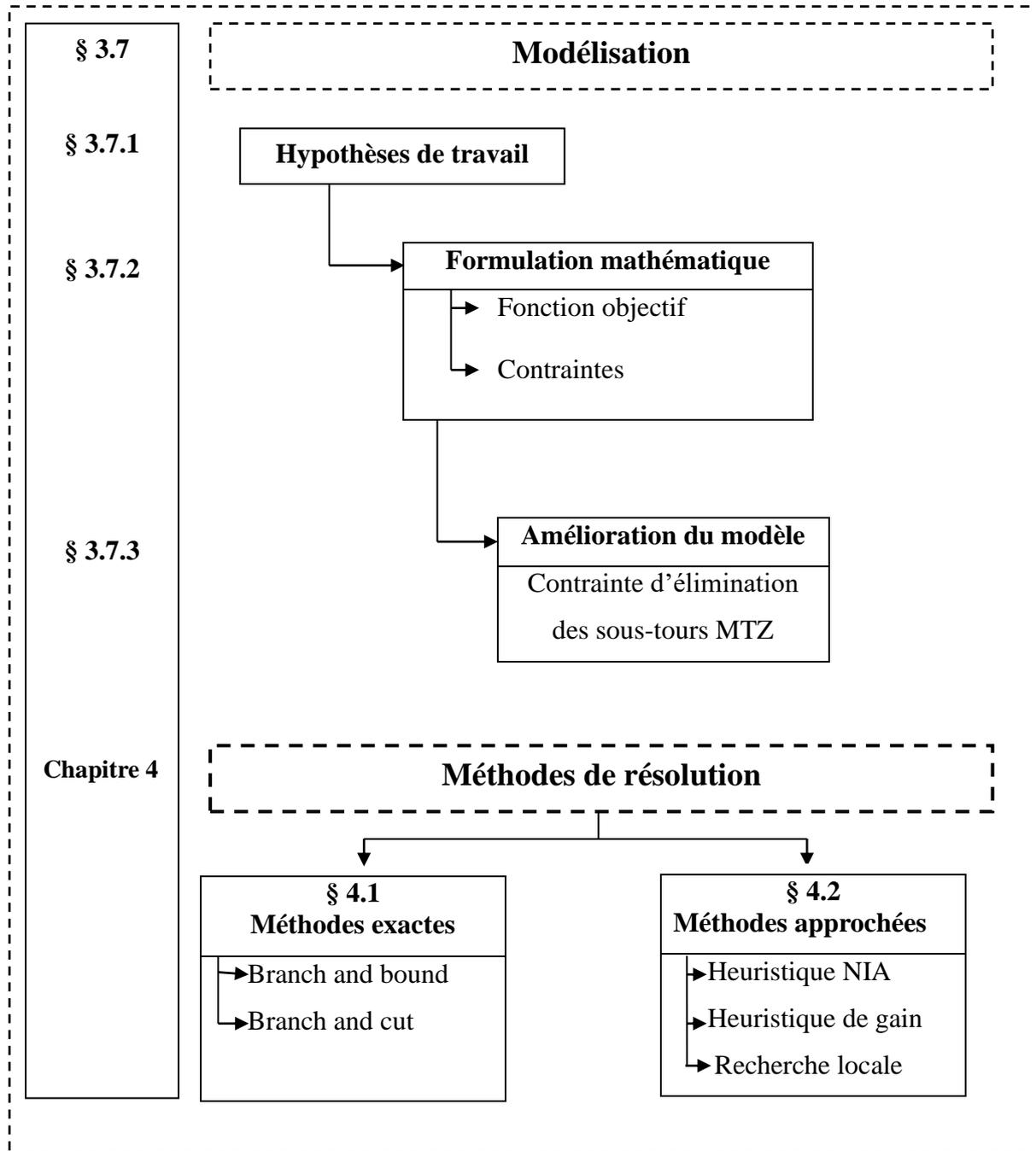


Figure 4.13 : Démarche expérimentale

Par la suite, une autre heuristique basée sur le principe des économies (saving) a été appliquée suivie d'une recherche locale. Ces méthodes de résolution occupent une place importante de par leur simplicité, et leur capacité à tenir compte de contraintes complexe. Dans notre cas, il s'agit de la contrainte d'élimination des sous-tours dont le nombre est

exponentiel.

Pour appliquer cette procédure, il faut commencer d'abord par la génération d'une solution réalisable initiale. Nous utilisons pour cela la méthode de Clark et Wright, étant originalement conçue pour des problèmes de CVRP. L'algorithme est très rapide et permet d'obtenir une solution initiale intéressante. Cette dernière est composée de 12 routes individuelles d'une distance totale de 382,20 km.

Une fois la solution initiale est obtenue, une approche d'amélioration a été appliquée. Il s'agit de recherche locale composée d'un mouvement Swap externe et d'un autre mouvement Or-opt 3 intra-route. Ces deux modes d'exploration de voisinage améliorent la solution initiale en réduisant la distance initiale de 6 km supplémentaires.

La solution finale générée par l'heuristique de gain combinée avec une recherche locale propose une distance totale de 376.1 km, répartie en 12 routes individuelles. Le gain apporté par cette procédure est de 43%, ce qui représente tout de même 165 km supplémentaires que doivent parcourir les camions.

La comparaison des solutions trouvées par ces deux approches montre que les résultats de l'heuristique NIA sont nettement moins bons que ceux de la méthode de Clark et Wright améliorée par une recherche locale. Le calcul de l'indice de gain montre une réduction de la distance de 22.5 % par rapport de l'heuristique NIA, ce qui représente tout de même 84.9 km.

4.4 Conclusion

La première modélisation de Dantzig et al. 1959 s'est caractérisée par un espace de recherche particulièrement vaste qui rendait son exploitation par une méthode exacte non envisageable car sa résolution est coûteuse en temps, de ce fait nous avons réduit le nombre de contrainte d'élimination des sous-tours.

Le modèle amélioré a permis de réduire considérablement le nombre de contraintes de sous-tours possibles en insérant celles proposées par Miller, Tucker & Zemlin (MTZ), mais sa résolution par le solveur demeure impossible car trop coûteuse en temps et en espace mémoire.

Pour résoudre ce problème industriel de tournées de véhicules avec contraintes de capacités, deux méthodes approchées ont été utilisées. Dans un premier temps, nous avons choisi d'utiliser comme première méthode l'heuristique de la plus proche insertion (Nearest insertion algorithm) qui consiste à insérer des clients tout en s'assurant d'une augmentation minimale de la distance. L'algorithme permet de baisser la distance totale par rapport à la stratégie actuelle de l'entreprise de 17 %.

Dans un second temps, nous avons opté pour une méthode de construction d'une solution initiale (l'heuristique de gain de Clarke and Wright) combinée à des méthodes d'améliorations mono et multi- tournés. Notons qu'une solution initiale de bonne qualité ne conduit pas forcément à la solution optimale. Les expériences numériques réalisées par Laporte et Semet (2002) sur des problèmes test de Christo et al. (2007) montrent que les solutions de l'algorithme de Clarke and Wright suivies d'une recherche locale 3-opt sur chaque tournée se situent en moyenne à 6.71% des meilleures solutions connues. Ils concluent que sans recherche locale, on est à plus de 10%, ce qui n'est déjà pas mal selon eux. Les résultats des travaux de Darbouche, M. (2009) montrent que l'utilisation des heuristiques classiques les plus anciennes (méthodes de gain) conduisent à l'obtention de solutions dont le coût total (en termes de distance par exemple) est en moyenne à environ 7 % de la meilleure valeur (optimale) connue. A partir de ces résultats tirés de la littérature, nous pouvons conclure que la méthodologie suivie dans cette étude nous a généré une bonne solution qui se situe entre 7% et 10% de la solution optimale.

Conclusion générale et perspectives

La gestion des déchets dangereux peut devenir un élément critique lors de l'évolution d'une entreprise qui doit reconsidérer la gestion de ses flux de retours pour faire place à la logistique inverse. Cette thèse qui s'inscrit dans ce contexte vise une problématique qui se pose avec acuité en Algérie et créer d'énormes problèmes environnementaux, c'est le problème de la gestion des huiles de vidange usagées. En effet le taux de collecte de ces déchets demeure insuffisant et les activités de recyclage et valorisation pratiquement inexistantes.

Ainsi la contribution principale de ce travail a été de mettre en place une méthode d'aide à la décision qui puisse assister un décideur du transport dans la gestion d'une flotte de véhicules afin d'assurer la planification des tournées de ramassage de ces huiles usagées.

L'objectif principal de cette thèse est d'apporter une modélisation et une résolution d'un problème réel de transport des flux inverse d'une grande entreprise de commercialisation des hydrocarbures en Algérie (NAFTAL).

Ce type de problème s'apparente à un problème de tournées de véhicules avec contrainte de capacité sur les chargements, que nous avons formulé à l'aide d'un modèle générique en programmation linéaire.

Pour démontrer cette contribution, la thèse a été organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur une synthèse bibliographique sur la logistique inverse, ses enjeux, ses étapes et ses niveaux décisionnels.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à une synthèse des articles faisant état de l'état de l'art sur les modèles quantitatifs pour la logistique inverse, nos travaux se situent clairement au niveau de la planification opérationnelle de l'activité de transport d'un réseau de logistique inverse. L'état de l'art réalisé dans le deuxième chapitre s'est focalisé sur les problèmes de tournées de véhicules VRP et ses variantes, en particulier dans la collecte des déchets. Le chapitre a également présenté les différentes méthodes de résolution utilisées pour résoudre ce cas réel, il en est ressorti que peu de travaux sur la collecte des huiles de vidange usagée sont abordés dans la littérature. Bien évidemment rien ne garantit l'exhaustivité de la recherche que nous avons effectuée, néanmoins nous avons survolé les bases de données de références les plus pertinentes.

Dans le troisième chapitre nous avons, dans un premier temps, étudié les besoins de la société

afin de cerner la problématique. Par la suite toutes les informations nécessaires à la planification des tournées et à la validation du modèle ont été identifiées. Un lissage exponentiel des quantités d'huile cumulées au niveau de chaque point de collecte a été réalisé. Les prévisions obtenues serviront à la planification des tournées de véhicules.

Dans un second temps et sur la base d'un certain nombre d'hypothèses, une modélisation mathématique du problème réel a été formulée à l'aide d'un modèle de programmation linéaire à variables binaires. Le critère d'optimisation retenu est la minimisation de la distance totale parcourue.

Les expérimentations menées avec le logiciel d'optimisation et d'aide à la décision IBM ILOG CPLEX montrent malheureusement l'incapacité d'une méthode exacte à résoudre ce problème dans un temps de calcul raisonnable vu le nombre important de contraintes et de variables de décisions, donc le recours aux méthodes exactes n'est pas envisageable dans ce contexte opérationnel.

Le choix d'une autre méthode de résolution approchée a été guidé par la simplicité de sa mise en œuvre et la rapidité de l'obtention d'une solution de bonne qualité, ce qui la rend particulièrement intéressante pour un usage industriel.

Nous avons opté pour deux heuristiques : i) la première est une version séquentielle de l'heuristique de la plus proche insertion (NIA) qui consiste à insérer des clients dans une tournée tout en s'assurant d'une augmentation minimale de la distance parcourue pour collecter l'ensemble des clients du réseau étudié. La solution obtenue à ce stade est composée de 11 routes, avec une distance totale de 461 km. Tous les clients sont collectés avec un taux de remplissage entre 16% et 30% pour des capacités de 10000 L et 13% à 80% pour des capacités de 5000 L. Afin de mesurer les gains apportés par cette méthode par rapport à la méthode actuelle de la société, un indice de gain a été calculé pour décrire le niveau d'amélioration des résultats. Il en ressort que la méthode NIA permet de baisser la distance totale par rapport à la stratégie de l'entreprise de 17 %, ce qui représente tout de même une réduction de la distance de l'ordre de 80 km.

ii) la seconde méthode proposée nécessite la construction de solution de départ par une heuristique de gain, et plus précisément une version de la méthode de Clarke et Wright qui sera par la suite améliorée par une recherche locale composée d'un mouvement Swap externe et d'un autre mouvement Or-opt 3 intra-route.

Ces transformations améliorent la solution initiale en réduisant la distance initiale de 6 km supplémentaires. La solution finale générée par l'heuristique de gain combinée avec une recherche locale propose une distance totale de 376.1 km, répartie en 12 routes individuelles.

En dépit du gain non négligeable apporté par la méthode de la plus proche insertion (NIA) et ayant permis de réduire la distance de 17 %, il apparaît clairement que la résolution basée sur l'heuristique de gain donne de meilleurs résultats, car pour assurer la collecte d'une même quantité d'huile usagée (56218L), la méthode de Clark & Wright améliorée par une recherche locale permet de baisser la distance totale par rapport à la l'heuristique NIA de 84.9 km, ce qui représente tout de même un gain de 22.5 %.

Il ressort de cette expérience un certain nombre de conclusions. Tout d'abord, la réduction de la distance permet d'un coté de réduire le temps de parcours du camion qui sera de retour plus rapidement au dépôt et pourra effectuer d'autres tournées. Pour l'entreprise cela se traduit par une plus grande disponibilité des ressources, de plus en réduisant le kilométrage, l'entreprise pourra réduire la consommation du carburant, considérée comme impact environnemental significatif pour une entreprise de transport (surconsommation des ressources naturelles).

Un autre aspect environnemental sera pris en compte dans cette optimisation, c'est la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui est directement liée au critère d'optimisation de cette étude à savoir la distance. Il faut cependant mentionner que la solution retenue nécessite 3 tournées de moins que la stratégie actuelle de l'entreprise, ce qui peut représenter une économie importante pour l'entreprise.

Les résultats obtenus dans cette thèse ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Nous pouvons citer quelques pistes qui nous semblent intéressantes pour la logistique inverse il s'agit de :

- Prendre en compte l'incertitude sur les quantités d'huile usagées à collecter pour se rapprocher du cas réel et proposer un modèle d'optimisation stochastique au moyen de scénarios ou d'intervalle,
- Résoudre le CVRP à l'aide de méta-heuristiques dans l'espoir d'éviter le piégeage dans un minimum local considéré comme inconvénient principal des méthodes approchées qui explorent surtout l'espace des solutions proches de la solution initiale,
- Proposer un modèle de conception d'un réseau de logistique inverse pour le traitement de ces huiles usagées en Algérie. Les décisions traitent à la fois une composante stratégique (localisation et ouverture des sites de traitement, la quantité de retours, les coûts de transport, les coûts fixes de chaque installation et leurs frais variables en fonction du niveau d'activité) et des décisions tactiques (la coordination, la planification des opérations et la gestion des stocks).

Références bibliographiques

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME. Economie circulaire : Notions. Disponible sur : www.ademe.fr [consulté le 2 Avril 2018]
- Agrawal, S., Singh, R., Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspective in reverse logistics. (Elsevier, Éd.) *Resources, Conservation and recycling*, 97: 76-92.
- Alinaghian, M. (2014). A Navel Heuristic Algorithm for the Periodic Vehicle Routing Problem. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 25(2).
- Alinaghian, M., Kaviania, Z., Khaledanb, S. (2015). A novel heuristic algorithm based on Clark and Wright Algorithm for Green Vehicle Routing Problem. *International Journal of Supply and Operations Management*, 2: 784-497.
- Fall, Alioune. Planification des activités en logistique inverse : modélisation et optimisation des performances par une approche stochastique en programmation linéaire, Thèse de doctorat : science physique et productique. Université de Bordeaux, 2016, 163 p.
- Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-gama, F. and Verter, V. (2012). Multi-Period Reverse Logistics Network Design. *European Journal of Operational Research*, 220: 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.045>
- Alshamrania, A., Mathurb, K., Ronald, H. Balloub. (2007). Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes and returns strategies. *Computers & Operations Research*, 34: 595–619.
- Anagnostopoulos, T.V., Zaslavsky, A. (2014). Effective waste collection with shortest path semi-static and dynamic routing, *Proceedings of the 7th International Conference ruSMART, Internet of Things, Smart Spaces and Next Generation Networks and Systems, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 8638: 95–105.
- Ardjmand, E., Weckman, Z., Park, N., Taherkhani, P., Singh, M. (2015). Applying genetic algorithm to a new location and routing model of hazardous materials. *International Journal of Production Research*, 53(3):916–28.
- ArunVasantha Geethan, K., Jose, S., Godwin Barnabas, S. (2010). Life period-based collection and location of collection centre in reverse supply chain management. *Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change (RSTS & CC-2010)*, DOI: 10.1109/RSTSCC.2010.5712886.
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., Peng, Q. (2014). Facility location decisions within integrated forward/reverse logistics under uncertainty. (Elsevier, Éd.) *Procedia CIRP*, 17: 606-610.

- Assavapokee, T., Wongthatsanekorn, W. (2012). Reverse production system infrastructure design for electronic products in the state of Texas. (Elsevier, Éd.) *Computers & Industrial Engineering*, 62: 129-140.
- Augerat. P., Belenguer. J.M., Benavent. E., Corberán. A., Naddef. D., Rinaldi. G. (1995). Computational Results with a Branch and Cut Code for the Capacitated Vehicle Routing Problem. Research Report, 949-M, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Barros, A.I., Dekker, R., Scholten, V. (1996). A two-level network for recycling sand: A case study. *Econometric Institute Report Series 9673/A*. Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.
- Beasley, J.E. (1983). Route-first cluster-second methods for vehicle routing. *Omega*, 11(4): 403-408.
- Bektas, T., Laporte, G. (2011). The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B*, 45(8): 1232–1250.
- Beliën, J., De Boeck, L., Van Ackere, J. (2014). Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review, *Transportation Science*, 48: 78–102.
- Ben Ismail, S., Legras, F., Coppin, G. (2011). Synthèse du problème de routage de véhicules, *Collection des rapports de recherche de Télécom Bretagne*. RR-03-LUSSI, ISSN: 1255-2275.
- Benjamin, A. M., Beasley, J. E. (2013). Metaheuristics with disposal facility positioning for the waste collection VRP with time windows. *Optimisation Letters*, 7(7) : 1433-1449.
- Benrahou, F., Tairi, A. (2019). Capacitated vehicle routing problem for collection waste lube oil in Algiers. *FEB- Fresenius Environmental Bulletin*, 28 (6) :4500 -4505.
- Bolduc, Marie-Claude. Heuristiques pour la résolution de problèmes complexes de distribution. Thèse de Doctorat : Sciences de l'Administration. Université de Laval, 2008, 142 p.
- Buhrkal, K., Larsen, A., Ropke, S. (2012). The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 39: 241–254.
- Byrne, P.M., Deeb, A. (1993). Logistics must meet the green challenge. *Transportation and Distribution* 34 (2): 33 -37.
- Caccetta, L., Alameen, V., Abdul-Niby, M. (2013) An Improved Clarke and Wright Algorithm to Solve the Capacitated Vehicle routing problem, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 3: 413-415.

- Cadet, David JOSEPH. Optimisation des flux : application aux problèmes de distribution en nutrition animale. Thèse de doctorat : Optimisation et sûreté des systèmes. Université de Technologie de Troyes, 2013, 136 p.
- Cansheng, W., Yongjian, L., Xiaoqiang, C. (2011). Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand. *International Journal of Production Economics*, 134(2):357-367.
- Cansheng, W., Yongjian, L., Xiaoqiang, C. (2010). A two-stage stochastic and robust programming approach to strategic planning of a reverse supply network: The case of paper recycling. *Journal: Expert Systems with Applications*, 10.1016/2010.02.116.
- Carter, C.R., Ellram, L.M. (1998). Reverse logistics: A review of the literature and framework for future investigation. *Journal of Business Logistics- Council of Logistics Management* 198(1): 85-102.
- Caruso, C., Colorni, A., Paruccini, M. (1993). The regional urban solid waste management system: A modelling approach. *European Journal of Operational Research* 70: 16-30.
- Castañeda, J., Cardona, A., Jaime, A. (2017). Diseño de una Red de logística Inversa para recolectar Aceite Vehicular Usado en la ciudad de Pereira implementando CVRP. *Scientia et Technica*. 22 : 150-160.
- CDER (2015). Le recyclage des huiles industrielles usagées : Une activité inexploitée en Algérie. Extrait du Portail Algérien des Energies Renouvelables <http://portail.cder.dz/spip.php?article4633>
- Christos, Z., George, T. (2007). Impact of uncertainty in the quality of returns on the profitability of a single period refurbishing operation. *European Journal of Operational Research* 182: 205–225.
- Chvatal, V. (1973). Edmonds polytopes and a hierarchy of combinatorial problems. *Discrete mathematics*. 4(4): 305–337.
- Clarke, G., Wright, J.W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, *Operations Research* 12: 93-100.
- Clegg, A.J., Williams, D.J., Uzsoy, R., (1995). Production planning for companies with remanufacturing capability. *Proceedings of the IEEE Symposium on Electronics and the Environment*. Orlando, Florida, 186-191.
- Cohen, M.A., Nahmias, S., Pierskalla, W.P. (1980). A dynamic inventory system with recycling. *Naval Research Logistics Quarterly* 27 (2): 289-296.
- Danane, F., Ahmia, A., Bakiri, A., Lalaoui, N. (2014). Experimental regeneration process of used motor oils, *Revue des Energies Renouvelables*, 17(2): 345 – 351.
- Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. Solution of a large-scale traveling salesman problem. (1954). *Journal of the Operations Research Society of America*, 2 (4): 393-

410.

- Dantzig, G.B, Ramser, R. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6.
- Darbouche, M. (2009). L'utilisation des heuristiques pour la résolution des problèmes de tournées de véhicules. *Revue sciences humaines*, vol b : 53-66.
- Das, K., Chowdhury, A.H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. (Elsevier, Éd.) *Int. J. Production Economics*, 135: 209-221.
- Das, S., Bhattacharyya, B. K. (2015). Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes, *Waste Management*, 43: 9–18.
- Dat, L.Q., Linh, D.T., Chou, S.Y., Yu, V. F. (2012). Optimizing reverse logistic costs for recycling end-of-life electrical and electronic products. (Elsevier, Éd.) *Expert Systems with Applications*, 39: 6380-6387.
- De Brito, M.P., Dekker, R. (2002). Reverse logistics – A framework. *Econometric institute report*, Erasmus university Rotterdam, Netherlands 38: 1-19.
- Deleplanque, Samuel. Modélisation et résolution de problèmes difficiles de transport à la demande et de Lot-Sizing. Thèse de doctorat : Informatique. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2014, 228 p.
- Demir, E., Bektas, T., Laporte, G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223: 346–359.
- Demirel, E., Demirel, N., Gökc, H. (2014). A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. *J Clean Prod.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.079>.
- Disney, S., Lambrecht, M. (2008). On replenishment rules, forecasting, and the bullwhip effect in supply chains. *Foundations and Trends in Technology, Information and Operations Management*, 2(1): 1-80.
- Djikanovic, J., Joksimovic, D., Vujosevic, M. (2015). Application of Variable Neighbourhood Search Method for Vehicle-Routing Problems in an Integrated Forward and Reverse Logistic Chain. *Acta Polytechnica Hungarica* Vol. 12, No. 5.
- Dowlatshahi, S. (2000). Developing a theory of reverse logistics. *Interface*, 30(3): 143-155
- Doyuran, T., Çatay, B. (2011). A robust enhancement to the Clarke–Wright savings algorithm. *The Journal of the Operational Research Society*, 62: 223-231.

- El Bounjimi, Mbarek. Contribution à la conception de la chaîne logistique verte en boucle fermée. Thèse de doctorat : Génie industriel. Université du Québec, 2016, 211 p.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy vol 1: Economic and business rationale for an Accelerated Transition. Disponible sur : <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/business/reports/ce2012> [consulté le 2 Avril 2018]
- Erdogan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*, 84: 62–72.
- Eymery, P. (1997). La logistique de l'entreprise- supply chain management. Hermès Éditions, Paris.
- Fajardo, D., Ortiz, S., Herrera, O., Santis, A. (2016) A Comparative analysis of heuristics applied to collecting used lubricant oils generated in the city of Pereira, Colombia. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* .10, No12,
- Farrokhi-Asl, H., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). Solving a Bi-Objective Transportation Vehicle Routing Problem for Waste Collection by a New Hybrid Algorithm. *International Journal of Research in Industrial Engineering IJRIE*, 5(1-4): 16-42
- Faulina, J., Juanb, A., Leraa, F., Grasmanc, S. (2011). Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem with Environmental Criteria Based on Real Estimations in Road Transportation: A Case Study, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20: 323–334.
- Fernandes, S.M., Rodrigues, C.M.T., Bornia, A.C., Trierweiller, A.C. (2018). Systematic literature review on the ways of measuring the of reverse logistics performance. *Gest. Prod., São Carlos*, 25(1): 175-190. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X3177-16>
- Fisher. M.L., Jaikumar, R. (1978). A decomposition algorithm for large-scale vehicle routing problems with branch and price. Technical Report, 78: 11-05, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania.
- Flapper, S.D.P. (1994). On the logistic aspects of integrating procurement, production and recycling by lean and agilewise manufacturing companies. *Proceedings of the 27th ISATA International Dedicated Conference on Lean/Agile Manufacturing in the Automotive Industries*. Aachen, Germany, pp. 749 756.
- Fleishmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R.V.D.L.E., Van Nunen, J., Van Wassenhove, A.E.E. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103 (1): 1- 17.
- Fleishmann, M. (2001). *Quantitative models for reverse logistics*, Springer Verlag,

New York, USA (Lecture notes in economics and mathematical system: 501) DOI: 10/1007/978-3-642-56691-2

- Gardeux, Vincent. Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse de données de puces à ADN. Thèse de doctorat : Informatique. Université de paris-est Créteil, 2011, 147 p.
- Giuntini, R., Andel, T. (1995). Advance with reverse logistics - part 1. *Transportation and Distribution*, 73 -77.
- Golden, B.L., W.R. Stewart (1985). Empirical analysis of heuristics: the travelling salesman problem. *A guided tour of combinatorial optimization*, Wiley, Chichester: 207-249.
- Golden, B.L., Assad, A.A. (1988). *Vehicle routing: Methods and studies*. Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland.
- Gonçalves, M., Silva, A. (2016) Reverse Logistics: Systematic Literature Review vs Companies Perspective, *International Journal of Engineering and Industrial Management* 6: 67-86.
- Govindan, K., Popiuc, M.N., Diabat, A. (2013). Overview of coordination contracts within forward and reverse supply chains. *Journal of cleaner production*, 47: 319-334.
- Grellier, E., Dejax, P., Jussien, N., Lu, Z. (2006). A multiperiodic vehicle routing problem in the context of reverse logistics: A modeling framework. *Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF)*.
- Grimaud, Guilhem. Conception des scénarios de recyclage pilotée par l'évaluation des performances des procédés. Thèse de doctorat : Génie industriel. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – ENSAM, 2019, 308 p.
- Gupta, S.M., Taleb, K.N. (1994). Scheduling disassembly. *International Journal of Production Research* 32 (8): 1857-1866.
- Guibadj, Rym Nesrine. Problèmes de tournées de véhicules et application industrielle pour la réduction de l'empreinte écologique. Thèse de doctorat : Technologies de l'Information et des Systèmes. Université de technologie Compiègne : 2013, 115 p.
- Guide, J., Jayraman, V. (2000). Product acquisition management: current industry practice and proposed framework. *International journal of production research*, 38(16): 3779- 3800.
- Han, H., Ponce-cueto, E. (2015). Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review, *Promet - Traffic Transp.*, 27: 345–358.
- Hanhan Tikin, O. (2008) Waste management practices in the automotive industry of turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 17: 1881-1885.

- Hannan, M.A., Akhtar, M., Begum, R.A., Basri, H., Hussain, A., Edgar Scavino. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm, *Waste Management* 71: 31–41.
- Harbaoui Dridi, I., Kammarti, R., Borne, P., Ksouri, M. (2008). Un Algorithme génétique pour le problème de ramassage et de livraison avec fenêtres de temps à plusieurs véhicules. CIFA, Roumanie. pp. Proc. Article 176.
- Harbaoui Imène Dridi. Optimisation heuristique pour la résolution du m-PDPTW statique et dynamique. Thèse de doctorat : Automatique, Génie Informatique et Traitement de Signal. Université de Tunis, 2010, 223 p.
- Hart, S. L. (1997). Beyond Greening: Strategies for a Sustainable World, *Harvard Business Review* 75: 67-76.
- Hrouga, Mustapha. Optimisation de la logistique inverse et planification du désassemblage. Thèse de doctorat : Optimisation et sûreté des systèmes. Université de technologie de Troyes, 2016, 130 p.
- Inderfurth, K., De Kok, A. G., Flapper, S.D.P. (2001). Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options. *European journal of Operational Research*, 133(1): 130-152.
- International Organization for Standardization (ISO), (2015). Environmental management systems- Requirements with guidance for use, ISO 14001.
- Islam, R., Rahman, M. S. (2012). An ant colony optimization algorithm for waste collection vehicle routing with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities, *Int. Conf. Informatics, Electron. Vision*, 774–779.
- Islam, M., Ghosh, S., Rahman, M. (2015). Solving Capacitated Vehicle Routing Problem by Using Heuristic Approaches: A Case Study. *Journal of Modern Science and Technology*, 3: 135-146.
- Kang, K., Wang, X., Yanfang, M. (2017). A Collection-Distribution Center Location and Allocation Optimization Model in Closed-Loop Supply Chain for Chinese Beer Industry, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID 7863202, 15 pages.
- Kelle, P., Silver, E.A. (1989). Purchasing policy of new containers considering the random returns of previously issued containers, *Int. Transactions* 21 (4): 349-354.
- Kendall, M.G. (1975). Rank correlation methods. 4th Edition, Charles Griffin, London.
- Kim, B.I., Kim, S., Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows *Computers & Operations Research*, 33: 3624–3642.

- Kim, H., Yang, J., Lee, K.D. (2009). Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea. *Transportation Research Part D* 14: 291–299
- Kim, K., Song, I., Kim, J., Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. *Computers & Industrial Engineering* 51: 279–287.
- Kinobe, J. R., Bosona, T., Gebresenbet, G., Niwagaba, C. B., Vinner, B. (2015). Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. *Habitat Int*, 49: 126–137.
- Klausner, M., Grimm, W. M., Horvath, A. (1999) Integrating product takeback and technical service. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 48-53.
- Kottala Sri Yogi. (2015). Performance evaluation of reverse logistics: A case of LPG agency, *Cogent Business & Management*, 2:1-17.
- Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T., Cabral, L.A.F. (2015). A matheuristic approach for the Pollution-Routing Problem. *European journal of operational research*, 243: 523–539.
- Krikke, H.R., Van Harten, A., Schuur, P.C. (1998). On a medium-term product recovery and disposal strategy for durable assembly products. *International Journal of Production Research*, 36(1): 111-139.
- Krikke, H. R. (1998). Recovery strategies and reverse logistic network design, These, University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- Kroon, L., Vrijens, G. (1995). Returnable containers: An example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25 (2): 56-68.
- Lacomme, P., Prins, C., Ramdane-Chérif, W. (2005). Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems. *European Journal of Operational Research*, 165 (2): 535-553.
- Lacy, P., Keeble, J., McNamara, R. (2014). Circular Advantage: Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth. https://www.accenture.com/t20150523T053139__w__/usen/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DocCom/Documents/Global/PDF/Strategy_6/Accenture-Circular-AdvantageInnovative-Business-Models-Technologies-Value-Growth.pdf.
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms, *European Journal of Operational Research*, 59: 345–358.
- Laporte, G., Osman, I.H. (1995). Routing problem: A bibliography. *Annals of Operations Research*, 61(1): 227-262.

- Laporte, G., Semet, F. (2002). Classical heuristics for the capacitated VRP, Dans The Vehicle Routing Problem, P. Toth et D. Vigo, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia: 109-128.
- Lambert, S., Riopel, D. (2003). Logistique inverse : revue de littérature. Les cahiers du GERAD, Montréal, Canada.
- Lambert, S., Riopel, D. (2004). Modél intégrateur de la logistique inverse. Les cahiers du GERAD G – 69-38, Montréal, Canada.
- Lambert, S., Riopel, D. (2005). Cadre conceptuel pour un système de logistique inverse. 6^{ème} congrès international de génie industriel, 7 - 10 juin, Besançon, Paris.
- Langnau, L. (2001). A new shade of green for reverse logistics. Material Handling Management 56(3), MHS2.
- Le Blanc, H. M., Van Krieken, M. G. C., Fleuren, H. A., Krikke, H. R. (2004) Collector managed inventory, a proactive planning approach to the collection of liquids coming from end-of-life vehicles. Operations research. 2004-22.
- Lee, C.H., Chang, C.T., Tsai, V. (1998). Development and implementation of producer responsibility recycling system. Resources, Conservation and Recycling, 24(2): 121-153.
- Le Moigne, R. (2014). L'économie circulaire. Comment la mettre en œuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supply chain ? Paris, Dunod, 215 p., Collection Fonctions de l'entreprise - Performance industrielle.
- Lin, S. (1965). Computer solutions of the traveling salesman problem. Bell System Technical Journal, 44: 2245-2269.
- Lee, J.E., Gen, M., Rhee, K.G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. Computers & Industrial Engineering, 56: 951–964.
- Little, J. D., Murty, K. G., Sweeney, D. W., Karel, C. (1963). An algorithm for the traveling salesman problem. Operations research, 11(6): 972-989.
- Loyola, C., Sepulveda, M., Solar, M., Lopez, P., Parada, V. (2016). Automatic design of algorithms for the traveling salesman problem *Cogent Engineering*, 3: 1255165.
- Mabini, M.C., Pintelon, L.M., Gelders, L.F. (1992). EOQ type formulations for controlling repairable inventories. International Journal of Production Economics, 28 : 21- 33.
- Mais, Haj Rachid. Les problèmes de tournées de véhicules en planification industrielle : classification et comparaison d'opérateurs évolutionnaires. Thèse de doctorat : Informatique. Université de Franche-Comté, 2010, 259 p.
- Mann H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13: 245-259.

- Marcoux, N., Riopel, D., Langevin, A. (1998). A Reverse logistics and electronic commerce. 5th International Conference on Engineering Design and Automation. Las Vegas, USA, 54-59.
- Marian, R. M., Lee H.S., Son Duy Dao. (2011). Modeling and Optimisation of Distribution Networks Using Hybrid Genetic Algorithms: A Comparative Study. Proceedings of the International Multi-conference of Engineers and Computer Scientists, vol 1.
- Markov, I., Varone, S., Bierlaire, M. (2014). Vehicle Routing for a Complex Waste Collection Problem, 14th Swiss Transportation. Reseach. Conf., no. April: 1–25.
- Mazouzi, R., Khelidj, B., Karas, A., Kellaci, A. (2014). Régénération des huiles lubrifiantes usagées par processus de traitement à l'acide. Revue des Energie Renouvelables, 17 (4) : 631 – 637.
- Miller, C.E., Tucker, A.W., Zemlin, R.A. (1960). Integer programming formulations and traveling salesman problems, Journal of Association for Computing Machinery, 7: 326–329.
- Mimouni, F., Abouabdellah, A., Mharzi, H. (2015). Study of the reverse logistics break-even in a direct supply chain. International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 8(2). ISSN: 1974-9821.
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., Neubert, G. (2014). Minimisation des émissions de CO₂ dans les circuits de distribution avec flotte hétérogène. MOSIM, 10^{ème} Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nancy, France.
- Murphy, P., Poirt, R. (2003). Green perspectives and practices: a “comparative logistics” study, supply chain management: An International Journal, 8: 122-131.
- Or, I. (1976). Travelling salesman type combinatorial problems and their relation to the logistics of blood banking. PhD Dissertation Department of industrial Engineering and Management Science. Northwestern University Evanston IL.
- Osman, I.H. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. Annals of operations research, 41: 421-451.
- Otoo, D., Amponsah, S. K., Sebil, C. (2014). Capacitated clustering and collection of solid waste in kwadaso estate, Kumasi,” J. Asian Sci. Res. J., 4(8): 460–472.
- Panigrahi, S.K., Weng Kar, F., Fen, T.A., Hoe, L.K., Wong, M. (2018). A Strategic Initiative for Successful Reverse Logistics Management in Retail Industry, Global Business Review, 19(3): S151 - S175.
- Pereira Ramos, T., Gomes, M. I., Barbosa-Póvoa, A. P. (2013). Planning waste cooking oil collection systems. Waste Management, 33: 1691–1703.

- Pishvaei, M. S., Jolai, F., Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. (Elsevier, Éd.) *Journal of Manufacturing systems*, 28: 107-114.
- Pohlen, T.L., Farris, T. (1992). Reverse logistics in plastic recycling. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 22(7): 35-47.
- Qinglong, G., Liang, L., Zhimin, H., Chuanyong, X. (2008). A joint inventory model for an open-loop reverse supply chain *Journal: Production Economics*, 116: 28–42.
- Repoussis, P. P., Paraskevopoulos, D. C., Zobolas, G., Tarantilis, C. D., Ioannou, G. (2009). A web-based decision support system for waste lube oils collection and recycling. *European Journal of Operational Research*, 195(3): 676–700.
- Richter, K. (1996). The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers. *European Journal of Operational Research*, 95: 313-324.
- Ripanti, E.F., Benny, T., Ip-shing, F. (2015). Circular economy in reverse logistics: relationships and potential applications in product remanufacturing. *Proceedings of the 20th Annual Conference of the Chartered Institute of Logistics & Transport, Logistics Research Network (LRN)*, 9 - 11 September Derby, UK I.S.
- Rodrigue, J.P., Slack, B., Comtois, C. (2001). The paradoxes of green logistics. *Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, Seoul, Korea.
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S. (1998). *Going backwards: Reverse logistics trends and practices*. Reverse Logistics Executive Council, Reno, NV, USA.
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22 (2): 129-147.
- Roghanian, E., Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistic network under stochastic environment by using genetic algorithm. (Elsevier, Éd.) *Journal of Manufacturing Systems*, 33: 348-356.
- Salema, M.I.G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179: 1063–1077.
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2): 336–349.
- Salomon, M., Thierry, M., van Hillegersberg, J., Van Nunen, J., Van Wassenhove, L. (1996). *Distribution logistics and return flow optimization*. Management Report Series 254.

- Sarkis, J., Helms, M.M., Hervani, A.A. (2010). Reverse logistics and social sustainability, *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17 (6): 337–354.
- Schrady, D.A. (1967). A deterministic inventory model for repairable items. *Naval Research Logistics Quarterly*, 14: 391- 398.
- Setaputra, R., Mukhopadhyay, S. K. (2010). A framework for research in reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 7(1): 19–55.
- Shaligram, P., Ashkay, M. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, conservation and recycling*, 53: 175-182.
- Sheriff, K.M., Gunasekaran, A., Nachiappan, S. (2012). Reverse logistics network design: a review on strategic perspective, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 12(2): 171-194.
- Snyder, L., Zuo-Jun M.S. (2011). *Fundamentals of Supply Chain Theory: VRP Solver*, Available: <http://coral.ie.lehigh.edu/~larry/software/vrp-solver/>
- Son, L.H., Louati, A. (2016). Modeling municipal solid waste collection: A generalized vehicle routing model with multiple transfer stations, gather sites and inhomogeneous vehicles in time windows. *Waste Management*, 52: 34-49.
- Spengler, T., Pfickert, H., Penkuhn, T., Rentz, O. (1997). Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research* 97: 308-326.
- Srisawat Supsomboon. (2010). A mathematical model for vehicle routing of used-oil collection in bio-diesel production using visual basic interface: village Bank and bio-diesel project. *KKU Engineering Journal*, 37(2): 151 – 159.
- Stock, J.R. (2001). The 7 deadly sins of reverse logistics. *Material handling management* 56(3): MHS5-MHS11.
- Subramanian, A. (2012). Heuristic, exact and hybrid approaches for VRP. PhD Thesis. Universidade Federal Fluminense. Niteroi.
- Tari, I., Alumur, S.A. (2014). Collection Center Location with Equity Considerations in Reverse Logistics. *Information system and operational research*, 52: 157-173.
- Teixeira, T., Antunes, A. P., de Sousa, J.P. (2004). Recyclable waste collection planning—a case study *European Journal of Operational Research*, 158: 543–554.
- Thierry, M.C. (1997). An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.

- Ting, C. J., Chen, C. H. (2013). A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *Int. J. Production Economics*, 141: 34-44.
- Vecchi, T. P. B., Surco, D. F., Constantino, A.A., Steiner, M. T. A., Jorge, L. M. M., Ravagnani, M., Paraíso, P. R. (2016). A sequential approach for the optimization of truck routes for solid waste collection. *Process Safety and Environmental Protection*, 102: 238–250.
- Wang, J., Zhou, Y., Wang, Y., Zhang, J., Chen, C.L.P., Zheng, Z. (2016). Multiobjective Vehicle Routing Problems with Simultaneous Delivery and Pickup and Time Windows: formulation, instances, and algorithms. *IEEE Transactions on cybernetics*, 46(3).
- Weinberg, B. Analyse et résolution approchée de problèmes d'optimisation combinatoire : application au problème de coloration des graphes, Thèse de doctorat : Informatique. Université des Sciences et Technologie de Lille, 2004, 156 p.
- Wu, H., Dunn, S. C. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(2): 20-38.
- Yesica Xiomara, P. C., Cruz, D., Andrea, J., Santana, E. R. (2015). A mixed integer optimization model to design a selective collection routing problem for domestic solid waste, *Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*.
- Zarei, M., Mansour, S., Husseinzadeh Kashan, A., Karimi, B. (2010). Designing a reverse logistics network for end-of-life vehicles recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-16.
- Zhou, Y., Wang, S. (2008). Generic model of reverse logistics network design. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3): 71-78.
- Zsigraiova, Z., Semiao, V., Beijoco, F. (2013). Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste Management*, 33: 793–806.

Annexes

Annexe A – Cadre législatif et réglementaire

- **Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003** relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- **Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001** relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- **Décret exécutif n° 93-161 du 10 juillet 1993** réglementant le déversement des huiles et lubrifiants dans le milieu naturel
- **Décret exécutif n° 93-162 du 10 juillet 1993** relatif aux conditions et modalités de récupération et de traitement des huiles usagées.
- **L'article 66 de la loi n° 17-11 du 8 rabie ethani 1439 correspondant au 27 décembre 2017 portant loi de finances pour 2018, modifiant et complétant l'article 61 de la loi n° 05-16 du 29 Dhou El Kaada 1426 correspondant au 31 décembre 2005. Section 6 : dispositions fiscales diverses (taxe sur les huiles, lubrifiants et préparations lubrifiantes)**
- **Loi n° 13-01 du 19 Rabie Ethani 1434 correspondant au 20 février 2013 modifiant et complétant la loi n° 05-07 du 19 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 28 avril 2005** relative aux hydrocarbures.

Annexe B – Résultats des tests statistiques

1. Résultats de la méthode Pareto

Tableau B.1 : Résultats de la méthode ABC

ELEMENT	QUANTITÉ	%	CUMUL	CUMUL%
P0284	73131.812	8	73131.812	8
Y8064	50860.62	6	123992.43	14
P7184	50050.181	6	174042.61	20
Y8495	38186.275	4	212228.89	24
K2662	37954.077	4	250182.97	29
P6843	35923.852	4	286106.82	33
Y8286	35359.561	4	321466.38	37
K2669	34629.249	4	356095.63	41
P7332	31174.414	4	387270.04	44
K2641	29683.541	3	416953.58	48
W4316	29119.271	3	446072.85	51
U8625	26801.13	3	472873.98	54
N3731	25628.625	3	498502.61	57
B5874	22602.272	3	521104.88	60
C0159	21483.182	2	542588.06	62
A8027	19995.998	2	562584.06	64
K2657	19830.676	2	582414.74	67
k2667	19103.795	2	601518.53	69
P0291	17692.532	2	619211.06	71
C5399	16802.367	2	636013.43	73
Y7258	16501.036	2	652514.47	75
L9783	16259.882	2	668774.35	77
B3860	15197.607	2	683971.96	78
L9700	12881.229	1	696853.18	80
A1948	9605.7272	1	706458.91	81
A8131	9200	1	715658.91	82
W4362	9200	1	724858.91	83
P9896	8900	1	733758.91	84
Y8382	8900	1	742658.91	85
A3632	8700	1	751358.91	86
C6730	8200	1	759558.91	87
S5163	8100	1	767658.91	88
M6463	7500	1	775158.91	89
S9707	7000	1	782158.91	90
C2867	6400	1	788558.91	90
B7605	6000	1	794558.91	91
A6308	5900	1	800458.91	92
C2687	5900	1	806358.91	92
U9221	5800	1	812158.91	93
C4667	5700	1	817858.91	94
M6474	5500	1	823358.91	94
M6594	5237	1	828595.91	95
S5159	4800	1	833395.91	96
B5419	4500	1	837895.91	96
Z2874	4400	1	842295.91	97
Y8418	3950	0	846245.91	97
P2569	3840	0	850085.91	97
K0700	3400	0	853485.91	98
U9200	3000	0	856485.91	98
Z1484	3000	0	859485.91	98
N7830	2665	0	862150.91	99
X0600	2440	0	864590.91	99
S3605	1740	0	866330.91	99
S9722	1660	0	867990.91	99
S8944	1600	0	869590.91	100
L4586	1200	0	870790.91	100
B9046	800	0	871590.91	100
N6296	600	0	872190.91	100
S2967	400	0	872590.91	100

2. Résultats des tests d'ajustement

Tableau B.2 : Test du khi² appliqué au client P0284 : ajustement d'une loi normale

Khi ² (Valeur observée)	1577318.342
Khi ² (Valeur critique)	14.067
DDL	7
p-value	< 0.0001
Alpha	0.05

Tableau B.3 : Test du khi² appliqué au client P0284 : ajustement d'une loi Log-normale

Khi ² (Valeur observée)	41.437
Khi ² (Valeur critique)	14.067
p-value	<0,0001
Alpha	0.05

Tableau B.4 : Test du khi² appliqué au client P0284 : ajustement d'une loi exponentielle

Khi ² (Valeur observée)	778.559
Khi ² (Valeur critique)	15.507
DDL	8
p-value	< 0.0001
alpha	0.05

Tableau B.4 : Test du khi² appliqué au client P0284 : ajustement d'une loi Gamma

Khi ² (Valeur observée)	5727312.333
Khi ² (Valeur critique)	
p-value	< 0.0001
alpha	0.05

Tableau B.5 : Test du khi² appliqué au client P0284 : ajustement d'une loi de poisson

Khi ² (Valeur observée)	11528822.106
Khi ² (Valeur critique)	
p-value	< 0.0001
Alpha	0.05

Annexe C - Présentation graphique du remplissage des cuves des clients

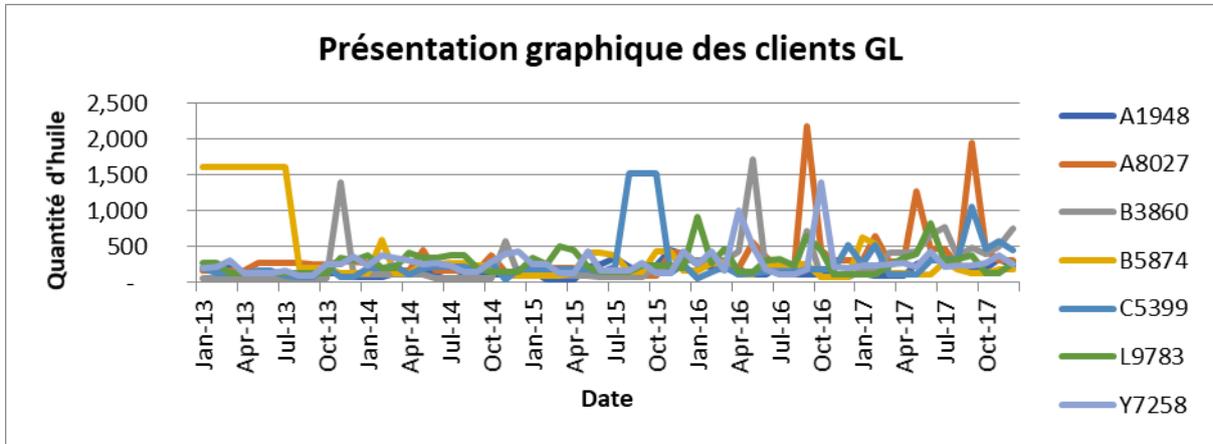


Figure C.1 : Présentation graphique du remplissage des cuves des clients GL

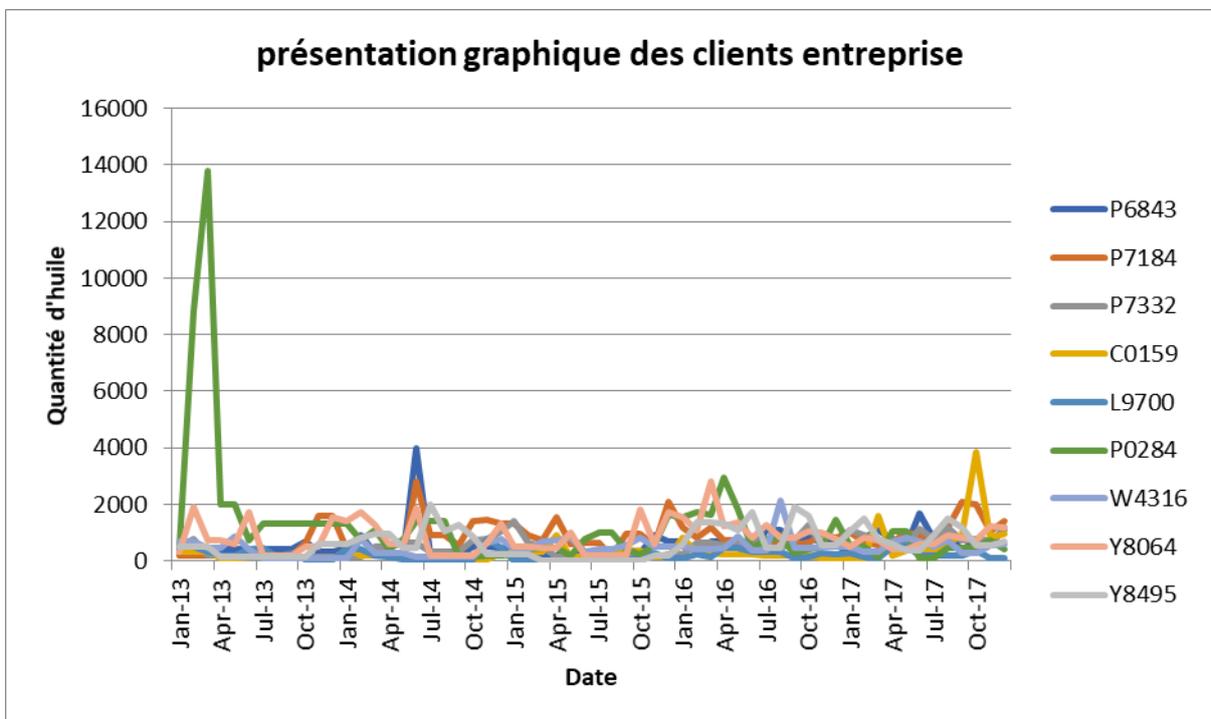


Figure C.2 : Présentation graphique du remplissage des cuves des clients entreprise

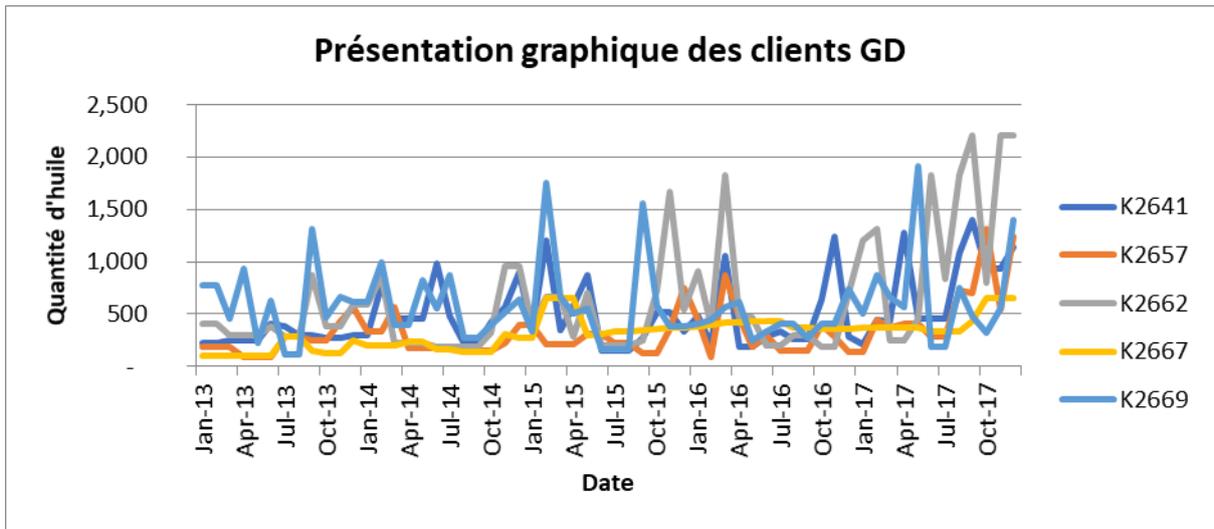


Figure C.3 : Présentation graphique du remplissage des cuves des clients GD

Annexe D – Fichier modèle et données

1. Formulation du problème CVRP avec OPL

— Fichier CVRP.dat

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Data
* Author: Sony
* Creation Date: 2018-02-10 at 7:07:45 AM
*****/
n=26;
nc=25;
v=10;
N= {"0", "1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", "10", "11", "12", "13", "14", "15",
    "16", "17", "18", "19", "20", "21", "22", "23", "24", "25"};
NC= {"1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", "10", "11", "12", "13", "14", "15",
    "16", "17", "18", "19", "20", "21", "22", "23", "24", "25"};

V= {"1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", "10"};
d=[ [0,      15.4, 8.9,  12.3,      3.2,  3.9,  4.5,  3.5,  26.6, 16.4, 8,
    16.5, 8.2,  20.2, 5.1,  15.4, 20.5, 17.8, 26.4, 18.4, 10.5, 17.8,
    22.8, 11.7, 14.5, 14.2],
  [15.4,    0,    5.6, 6.2,  10,    16.6, 9.5,  14.7, 36.7, 23.1, 17.5,
    26.6, 18.9, 15.6, 14.1, 7.6,  30.6, 21.4, 36.4, 21.9, 20.6, 21.3,
    32.8, 16.3, 25.5, 21.2],
  [8.9,    7.1, 0,    5.3, 9.7,  11.4, 6.5,  11.9, 31.5, 21.2, 12.9, 21.3,
    18.9, 18.2, 8.8, 8.5,  25.3, 22.7, 31.2, 23.2, 15.3, 22.6, 27.6,
    16.5, 20.3, 16.5],
  [12.3,    5,    2.4, 0,    7.5, 13.7, 6.5,  14.2, 33.8, 23.5, 15.2,
    23.6, 14.1, 11.8, 11.1, 6.4,  27.6, 20.2, 33.5, 20.7, 17.6, 20.1,
    29.9, 15.1, 22.6, 20],
  [3.2,    12.5, 8.3, 5.9, 0,    9.6, 1.5,  3.8,  31.4, 16.6, 10.9, 21.3, 9.1,
    17.3, 10.7, 3.5, 25.3, 14.8, 31.2, 15.4, 15.3, 14.8, 27.6, 9.8,
    19.3, 14.7],
  [3.9,    20.6, 14.1, 13.3, 4.9, 0,    6.4, 1.2,  25.5, 15.2, 5.5,  15.4, 7.9,
    25.4, 8.8,  10.1, 19.4, 14.2, 25.3, 14.7, 9.4,  14.1, 21.6, 4,
    13.4, 10.6],
  [4.5,    11,   9.4, 7,    4.2, 11.1, 0,    9.3,  31.7, 17.8, 12.1, 21.6,
    13.5, 17.9, 18.1, 3.4, 25.6, 16,    31.5, 16.5, 14.6, 15.9, 27.9,
    10.9, 19.6, 15.8],
  [3.5,    17.7, 14.3, 11.9, 3.6, 1.2, 5.1, 0,    27.6, 17.3, 8.9,  17.5, 6.5,
    22.5, 9,    8.8,  21.5, 12.8, 27.4, 13.4, 11.5, 12.8, 23.8, 7.8,
    15.5, 12.7],
  [26.6,    46,   39.5, 41.2, 36.6, 32.1, 37.6, 34.4, 0,    11.4, 27.3,
    10.7, 31.3, 50.8, 34.2, 38.1, 15.2, 16.2, 9.8,  16,    23.4, 14,    6,
    28.9, 28.4, 13.6],
  [16.4,    29.5, 23,    20.8, 14.6, 15.5, 16.2, 17.9, 10.9, 0,    10.7, 2.5,
    10.3, 34.2, 17.7, 17.7, 9.8,  6.8,  15.6, 4.2,  6.9,  3.2,  8.2,
    12.9, 12.4, 2.7],
  [8,     21.9, 17.2, 16.1, 11,   9.7, 12.5, 9.6,  20.7, 10.5, 0,    10.6, 6.2,
    26.7, 11.9, 13,   14.6, 10.4, 20.5, 10.9, 4.6,  7.2,  16.9, 3.8,  8.6,
    6.5],

```

Annexes

[16.5, 30, 23.4, 25.2, 16.6, 16, 21.5, 18.4, 9.3, 2.4, 11.2, 0,
12.1, 34.7, 18.1, 22, 8.2, 7.2, 10.8, 7, 7.4, 5, 6,
12.9, 12.4, 4.7],
[8.2, 17.3, 15.8, 11.5, 4.5, 4.5, 5.9, 3.2, 27.2, 16.9, 8.5, 17.1, 0,
22.1, 10.5, 8.3, 21.1, 12.4, 26.9, 12.9, 11.1, 12.3, 23.3, 7.3,
15.1, 12.3],
[20.2, 7.5, 13.2, 13.8, 17.5, 24.2, 17.1, 22.2, 44.3, 30.7, 25,
34.1, 26.4, 0, 21.6, 15.1, 38.1, 28.9, 44, 29.5, 28.1, 28.9,
40.4, 23.9, 33.1, 28.8],
[5.1, 16.9, 10.4, 13.8, 11.7, 8.7, 9.3, 9.2, 28.7, 18.5, 10.1, 18.6,
16.2, 21.7, 0, 16.9, 26.6, 20, 28.5, 20.5, 12.6, 19.9, 24.9,
13.8, 14.8, 13.8],
[15.4, 14, 10.6, 8.2, 2.4, 9, 3.9, 7.1, 29.6, 15.6, 9.9,
19.4, 11.3, 18.8, 14.1, 0, 23.4, 13.8, 29.3, 14.4, 13.4, 13.8,
25.7, 8.7, 17.4, 13.7],
[20.5, 33.1, 26.6, 28.3, 23.7, 19.2, 24.7, 21.5, 15.3, 8.3, 14.4, 7.6,
18.4, 37.9, 21.3, 25.2, 0, 13, 9.7, 12.9, 10.5, 9.8, 7.6, 16,
15.5, 9.4],
[17.8, 24.9, 21.5, 19.1, 13.1, 13.1, 14.5, 11.8, 16.1, 6, 9.6, 7.2,
8.6, 29.7, 19.6, 16, 13.8, 0, 19.7, 2.4, 13.1, 7.5, 16.1, 7.6,
17.1, 7.5],
[26.4, 37.6, 31, 32.8, 28.2, 23.6, 29.1, 26, 9.3, 12.8, 18.8, 12,
22.8, 42.3, 25.7, 29.6, 6.8, 17.5, 0, 17.3, 15, 14.2, 5.2,
20.4, 19.9, 13.9],
[18.4, 27.1, 23.7, 21.3, 15.2, 15.3, 16.7, 13.9, 15.9, 3.9, 11.7, 7,
10.7, 31.8, 21.8, 18.1, 13.6, 2.1, 19.5, 0, 10.8, 4, 15.9, 9.8,
15.8, 4.8],
[10.5, 25.3, 18.8, 20.5, 15.9, 11.3, 16.9, 13.7, 17.1, 6.8, 6.5, 7,
10.5, 30, 14.6, 17.3, 11, 14.8, 16.8, 14.9, 0, 7.6, 13.2, 8.2,
5, 4.7],
[17.8, 23.9, 20.5, 18.1, 12, 12.1, 13.5, 10.7, 14.6, 3.7, 8.6, 5.7,
7.6, 28.7, 18.6, 14.9, 11.5, 6.4, 17.4, 3.8, 5.1, 0, 13.8, 6.6,
9.1, 1.5],
[22.8, 35.1, 28.6, 30.3, 25.7, 21.2, 26.7, 23.5, 6.1, 10.3, 16.4, 9.6,
20.4, 39.9, 23.3, 27.2, 8, 15, 7.2, 14.9, 12.5, 11.8, 0, 18,
17.5, 11.4],
[11.7, 19.4, 15.9, 13.5, 7.5, 7.5, 8.9, 6.2, 22, 11.8, 2.4,
11.9, 3, 24.1, 13.1, 10.4, 15.9, 7, 21.8, 7.6, 5.9, 7,
18.2, 0, 9.9, 7.3],
[14.5, 23.6, 17.1, 20.5, 18.9, 14.4, 19.9, 16.7, 23.1, 12.8, 9.6,
12.9, 13.6, 28.4, 9.7, 23.6, 21.4, 17.8, 22.8, 12.7, 6.7, 9.9,
19.2, 11.2, 0, 8.4],
[11.7, 24.5, 22, 25.3, 16.8, 12.2, 17.7, 14.6, 18, 7.7, 7.4, 7.9,
11.4, 33.3, 14.5, 18.2, 11.9, 15.7, 17.7, 15.8, 0.9, 8.4, 14.1, 9,
4.9, 0]];

Q=[6000, 6000, 6000, 6000, 6000, 6000, 6000, 6000, 6000, 6000];

d=[0, 2800, 4000, 3600, 2000, 2400, 800, 800, 800, 1600, 735, 4000, 4000, 3600, 4000, 2400,
, 2400, 683, 1600, 2000, 1200, 1200, 1600, 1200, 4000, 2800];

– Fichier CVRP.mod : modèle avec ajout de contraintes d'élimination des sous-tours de Miller, Tucker & Zemlin.

```

int n=...; // set of nodes
int v=...; // set of vehicle
int nc=...; // set of customer node only
{string} N=...;

{string} V=...;
{string} NC=...;
int Q [V]=...;
float d [N][N]=...; //Distance between node i and node j
float q [N]=...; //picup quantity from node
//decision variables:
dvar boolean y [N][V]; //if vehicle k visit node
dvar boolean X [N][N][V]; // if vehicle k travels from node i to j
dvar int u[NC][V]; // subtour

minimize sum (i in N,j in N,k in V:i!=j) ( X [i][j][k]*d [i][j]);
subject to
{
    constraints1:
    sum (k in V) y["1"][k] <=v ;

    forall (i in NC) constraints2:
    sum (k in V)y [i][k]==1;

    forall (j in NC,k in V)
    constraints3: sum(i in N) X[i][j][k]==y[j][k];
    forall (i in NC,k in V)
    constraints4:sum(j in N) X[i][j][k]==y[i][k];

    forall (k in V)constraints5:
    sum (i in NC) q [i]*y [i][k] <= Q [k] ;

    forall(i in NC,j in NC,k in V) constraints6:
    u[i][k]-u[j][k]+ n * X[i][j][k]<= n-1;
}

```

2. Fichier de données (Matlab)

```
function [Problem]=Problem25()  
%Column 1 = outlet number, no.1 is depot  
%Column 2 is coordinate x of outlets  
%Column 3 is coordinate y of outlets  
%Column 4 is demands of outlets, depo=0  
Problem=...  
  [1  58   68    0  
  2   76   63  2800  
  3   67   73  4000  
  4   70   66  3600  
  5   62   58  2000  
  6   58   59  2400  
  7   64   59   800  
  8   58   58   800  
  9   26   19   800  
 10   41   35  1600  
 11   50   55   735  
 12   38   32  4000  
 13   55   49  4000  
 14   81   61  3600  
 15   57   81  4000  
 16   64   56  2400  
 17   31   53  2400  
 18   47   23   683  
 19   23   44  1600  
 20   46   26  2000  
 21   43   57  1200  
 22   40   31  1200  
 23   29   39  1600  
 24   52   49  1200  
 25   46   75  4000  
 26   44   43  2800];
```

Annexe E – Matrice de distance (distancier)

code D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26		
P0843	0	15.4	8.9	12.3	15.4	3.9	4.5	3.5	26.6	16.4	8	16.5	8.2	20.2	5.1	15.4	20.5	17.8	26.4	18.4	10.5	17.8	22.8	11.7	14.5	14.2		
P7184	0	5.6	6.2	10	16.6	9.5	14.7	36.7	23.1	17.5	26.6	18.9	15.6	14.1	7.6	30.6	21.4	36.4	21.9	20.6	21.3	32.8	16.3	25.5	21.2			
Y8286	8.9	7.1	0	5.3	9.7	11.4	6.5	11.9	31.5	21.2	12.9	21.3	18.9	18.2	8.8	8.5	25.3	22.7	31.2	23.2	15.3	22.6	27.6	16.5	20.3	16.5		
P7332	12.3	5	2.4	0	7.5	13.7	6.5	14.2	33.8	23.5	15.2	23.6	14.1	11.8	11.1	6.4	27.6	20.2	33.5	20.7	17.6	20.1	29.9	15.1	22.6	20		
Y8286	3.2	12.5	8.3	5.9	0	9.6	1.5	3.8	31.4	16.6	10.9	21.3	9.1	17.3	10.7	3.5	25.3	14.8	31.2	15.4	15.3	14.8	27.6	9.8	19.3	14.7		
A8027	3.9	20.6	14.1	13.3	4.9	0	6.4	1.2	25.5	15.2	5.5	15.4	7.9	25.4	8.8	10.1	19.4	14.2	25.3	14.7	9.4	14.1	21.6	4	13.4	10.6		
C5399	4.5	11	9.4	7	4.2	11.1	0	9.3	31.7	17.8	12.1	21.6	13.5	17.9	18.1	3.4	25.6	16	31.5	16.5	14.6	15.9	27.9	10.9	19.6	15.8		
L9783	3.5	17.7	14.3	11.9	3.6	1.2	5.1	0	27.6	17.3	8.9	17.5	6.5	22.5	9	8.8	21.5	12.8	27.4	13.4	11.5	12.8	23.8	7.8	15.5	12.7		
A1948	26.6	46	39.5	41.2	36.6	32.1	37.6	34.4	0	11.4	27.3	10.7	31.3	50.8	34.2	38.1	15.2	16.2	9.8	16	23.4	14	6	28.9	28.4	13.6		
B3860	16.4	29.5	23	20.8	14.6	15.5	16.2	17.9	10.9	0	10.7	2.5	10.3	34.2	17.7	17.7	9.8	6.8	15.6	4.2	6.9	3.2	8.2	12.9	12.4	2.7		
B5874	8	21.9	17.2	16.1	11	9.7	12.5	9.6	20.7	10.5	0	10.6	6.2	26.7	11.9	13	14.6	10.4	20.5	10.9	4.6	7.2	16.9	3.8	8.6	6.5		
C0159	16.5	30	23.4	25.2	16.6	16	21.5	18.4	9.3	2.4	11.2	0	12.1	34.7	18.1	22	8.2	7.2	10.8	7	7.4	5	6	12.9	12.4	4.7		
K2641	8.2	17.3	15.8	11.5	4.5	4.5	5.9	3.2	27.2	16.9	8.5	17.1	0	22.1	10.5	8.3	21.1	12.4	26.9	12.9	11.1	12.3	23.3	7.3	15.1	12.3		
K2657	20.2	7.5	13.2	13.8	17.5	24.2	17.1	22.2	44.3	30.7	25	34.1	26.4	0	21.6	15.1	38.1	28.9	44	29.5	28.1	28.9	40.4	23.9	33.1	28.8		
K2662	5.1	16.9	10.4	13.8	11.7	8.7	9.3	9.2	28.7	18.5	10.1	18.6	16.2	21.7	0	16.9	26.6	20	28.5	20.5	12.6	19.9	24.9	13.8	14.8	13.8		
K2667	15.4	14	10.6	8.2	2.4	9	3.9	7.1	29.6	15.6	9.9	19.4	11.3	18.8	14.1	0	23.4	13.8	29.3	14.4	13.4	13.8	25.7	8.7	17.4	13.7		
K2669	20.5	33.1	26.6	28.3	23.7	19.2	24.7	21.5	15.3	8.3	14.4	7.6	18.4	37.9	21.3	25.2	0	13	9.7	12.9	10.5	9.8	7.6	16	15.5	9.4		
L9700	17.8	24.9	21.5	19.1	13.1	13.1	14.5	11.8	16.1	6	9.6	7.2	8.6	29.7	19.6	16	13.8	0	19.7	2.4	13.1	7.5	16.1	7.6	17.1	7.5		
N3731	26.4	37.6	31	32.8	28.2	23.6	29.1	26	9.3	12.8	18.8	12	22.8	42.3	25.7	29.6	6.8	17.5	0	17.3	15	14.2	5.2	20.4	19.9	13.9		
P0284	18.4	27.1	23.7	21.3	15.2	15.3	16.7	13.9	15.9	3.9	11.7	7	10.7	31.8	21.8	18.1	13.6	2.1	19.5	0	10.8	4	15.9	9.8	15.8	4.8		
P0291	10.5	25.3	18.8	20.5	15.9	11.3	16.9	13.7	17.1	6.8	6.5	7	10.5	30	14.6	17.3	11	14.8	16.8	14.9	0	7.6	13.2	8.2	5	4.7		
U8625	17.8	23.9	20.5	18.1	12	12.1	13.5	10.7	14.6	3.7	8.6	5.7	7.6	28.7	18.6	14.9	11.5	6.4	17.4	3.8	5.1	0	13.8	6.6	9.1	1.5		
W4316	22.8	35.1	28.6	30.3	25.7	21.2	26.7	23.5	6.1	10.3	16.4	9.6	20.4	39.9	23.3	27.2	8	15	7.2	14.9	12.5	11.8	0	18	17.5	11.4		
Y7258	11.7	19.4	15.9	13.5	7.5	7.5	8.9	6.2	22	11.8	2.4	11.9	3	24.1	13.1	10.4	15.9	7	21.8	7.6	5.9	7	18.2	0	9.9	7.3		
Y8064	14.5	23.6	17.1	20.5	18.9	14.4	19.9	16.7	23.1	12.8	9.6	12.9	13.6	28.4	9.7	23.6	21.4	17.8	22.8	12.7	6.7	9.9	19.2	11.2	0	8.4		
Y8495	11.7	24.5	22	25.3	16.8	12.2	17.7	14.6	18	7.7	7.4	7.9	11.4	33.3	14.5	18.2	11.9	15.7	17.7	15.8	0.9	8.4	14.1	9	4.9	0		