

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par : Oumaima BOUCHAKOUR
Imane NIGRO

Thème

Le problème de localisation-routage pour la
récupération des batteries usées de véhicule
électrique dans le cadre d'une économie
circulaire

Soutenu publiquement, le 03/07/2024, devant le jury composé de :

M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
M. Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. Abessamed AIT EL CADI	Professeur	Université de Valenciennes	Co- Directeur de mémoire
M. Mehdi SOUIER	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur 1
M. Tarik CHARGUI	Maître de conférence	Université de Valenciennes	Examineur 2
Melle Chaima ZORMATI	Doctorante	Université de Valenciennes	Invité

Année universitaire : 2023 /2024

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, M. Mohammed BENNEKROUF. Ses conseils avisés, son soutien constant et sa disponibilité tout au long de ce projet ont été essentiels à notre réussite. Grâce à sa grande expertise et à ses compétences pédagogiques, nous avons pu surmonter de nombreux défis et approfondir notre compréhension du sujet. Son engagement envers notre travail et sa capacité à nous orienter efficacement ont grandement contribué à l'avancement de nos recherches.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers le groupe de l'École Polytechnique de Valenciennes en France M.Abdessamad AIT EL CADI et M.Abdelghani BEKRAR. Leur collaboration, leurs échanges enrichissants et leur esprit d'équipe ont été d'une grande valeur pour notre projet. Leur soutien et leur expertise ont contribué de manière significative à notre travail et nous les en remercions profondément.

Nous remercions également nos parents pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur encouragement indéfectible. Leur soutien moral a été une source inépuisable de motivation et de réconfort durant les moments difficiles. Leur confiance en nos capacités et leurs encouragements constants nous ont permis de rester déterminés et concentrés tout au long de cette aventure académique. Leur présence et leurs sacrifices nous ont inspirés à donner le meilleur de nous-mêmes.

Nous exprimons aussi notre gratitude aux membres du jury de ce mémoire M.Fouad MALIKI, M.Mehdi SOUIER et M.Tarik CHARGUI. Leur temps, leur expertise et leurs précieux commentaires ont grandement enrichi notre travail. Leur évaluation rigoureuse et leurs suggestions constructives ont permis de rehausser la qualité de notre recherche. Nous les remercions sincèrement pour leur engagement et leur contribution à la réussite de ce projet.

À tous, nous vous adressons nos plus sincères remerciements. Votre soutien et votre encouragement ont été des piliers indispensables à la réalisation de ce travail.

Résumé

Cette étude propose une analyse d'un réseau de collecte et valorisation des batteries de véhicules électriques usagées (EVB) dans une économie circulaire. Utilisant une modélisation mathématique MILP, l'optimisation des coûts d'installation des centres de collecte et des routages est validée par CPLEX pour de petites instances. Pour des instances plus grandes, les Algorithmes Génétiques (AG) permettent une configuration optimale du réseau en un temps de calcul court, intégrant la stratégie des choix des routes et des moyens de transport.

Mots clés : Économie circulaire, problème de localisation-routage, batterie de véhicule électrique, algorithme génétique, réseau de recyclage .

Abstract

This study proposes an analysis of a collection and valorization network for used electric vehicle batteries (EVB) within a circular economy. Using a MILP mathematical model, the optimization of installation costs for collection centers and routing is validated by CPLEX for small instances. For larger instances, Genetic Algorithms (GA) allow for an optimal network configuration in a short computation time, integrating the strategy for route and transport mode selection.

Keywords : Circulaire economy , Location routing problem, Electric vehicle battery, Genetic algorithm, Recycling network.

ملخص

تقترح هذه الدراسة تحليلاً لشبكة جمع وتثمين بطاريات المركبات الكهربائية المستعملة (EVB) في إطار اقتصاد دائري. باستخدام نموذج رياضي MILP، يتم التحقق من تحسين تكاليف تركيب مراكز الجمع وتوجيه المسارات بواسطة CPLEX للحالات الصغيرة. بالنسبة للحالات الأكبر، تسمح الخوارزميات الجينية (GA) بتكوين شبكة مثالية في وقت حسابي قصير، مع دمج استراتيجية اختيار المسارات ووسائل النقل.

الكلمات المفتاحية : الاقتصاد الدائري، مشكلة تحديد الموقع وتوجيه المركبات، بطارية السيارة الكهربائية، الخوارزمية الجينية، شبكة إعادة التدوير.

Table des matières

Introduction générale	1
1 L'économie circulaire	4
1.1 Introduction	4
1.2 Définition	4
1.3 Historique de l'économie circulaire	6
1.4 Les caractéristiques de l'économie circulaire	7
1.5 Les principes de l'économie circulaire	8
1.6 Les sept piliers de l'économie circulaire	8
1.6.1 L'éco-conception :	8
1.6.2 L'écologie industrielle et territoriale :	9
1.6.3 L'économie de la fonctionnalité :	10
1.6.4 Le réemploi, la réparation et réutilisation :	11
1.6.5 Le recyclage :	12
1.7 Logistique inversée	13
1.7.1 Reverse supply chain :	13
1.7.2 Étapes de la reverse supply chain :	14
1.8 Les avantages de l'économie circulaire : pour quoi doivent nous passer à une économie circulaire?	15
1.9 Les limites de l'économie circulaire	16
1.10 Conclusion	17
2 Les différentes stratégies de revalorisation des batteries à base de li- thium	19
2.1 Introduction	19
2.2 Généralités sur les BVE	20
2.2.1 Définition des BVE	20
2.2.2 Historique	20

2.2.3	les différents types de BVE	21
2.3	BEV en lithium-ion	22
2.4	Les caractéristiques de BEV en lithium-ion	22
2.5	Composition des batteries	23
2.6	Les métaux de valeur utilisés dans la fabrication de batterie Lithium-ion	25
2.7	Viellissement de la batterie lithium-ion	28
2.8	Chaîne de valeur circulaire des batteries lithium-ion retirées du marché	28
2.9	Conclusion	33
3	Le problème de localisation-routage	34
3.1	Introduction	34
3.2	Définition	35
3.3	Les Fondements du Problème LRP : VRP et FLP	35
3.4	Les principales caractéristiques variantes de LRP	39
3.5	Classification du LRP en fonction du diagramme en couches	40
3.6	Les applications de LRP	42
3.7	Formulation de base du LRP	43
3.8	Les méthodes de résolution du LRP	45
3.9	Conclusion	47
4	Approche exacte d'optimisation du réseau LRP adapté à la récupération des batteries utilisées de véhicules électriques, cas de petite instance	48
4.1	Introduction	48
4.2	Travaux antérieurs sur le problème de LRP pour les BVE	49
4.3	Problématique	50
4.4	Les hypothèses	50
4.5	Description du réseau de recyclage	51
4.5.1	Description générale du réseau	51
4.5.2	Description détaillée de fonctionnement de chaque centre dans le réseau	52
4.6	Formulation mathématique du problème LRP	53
4.7	La simulation des scénarios	59
4.7.1	Scenario 01	59
4.7.2	Scenario 02	65
4.8	Analyse économique	74
4.9	Analyse des Résultats et Viabilité Économique du Réseau de Recyclage de EVB	75
4.9.1	Aperçu des résultats	76
4.9.2	Chiffre d'affaires et comparaison avec les coûts	76

4.10	Interprétation des résultats	76
4.11	Conclusion	77
5	L'implémentation de l'algorithme génétique dans le LRP	79
5.1	Introduction	79
5.2	L'algorithme génétique	80
5.2.1	Le codage des individus	82
5.2.2	La sélection	83
5.2.3	Les opérateurs de croisement	84
5.2.4	La mutation	86
5.3	L'état de l'art	86
5.4	La résolution de problème LRP par AG	87
5.4.1	La représentation du chromosome	87
5.4.2	Le fonctionnement de notre génétique	88
5.5	Résultat de l'exécution du l'AG	91
5.5.1	Scénario 01	91
5.5.2	Scénario 02	96
5.5.3	Scénario 03	101
5.5.4	Scénario 04	104
5.6	Comparaison de l'optimisation entre CPLEX et Algorithme Génétique : Analyse des Coûts, Temps de Simulation et Efficacité Logistique :	107
5.7	Conclusion	109
	Conclusion générale	111
	Bibliographie	113
	Annexes	118

Table des figures

1.1	Tendance Google sur la recherche de l'économie circulaire dans le monde en 10 ans 2010 – 2020	5
1.2	Schéma de l'économie circulaire	6
1.3	Formation de la "Closed-Loop Supply Chain" par la Combinaison des Deux Chaînes.	15
2.1	Model d'une BVE	20
2.2	Illustration des structures typiques des batteries lithium-ion ; cellules cylindriques, prismatiques et en poche [13]	24
2.3	Exemples de trois packs batteries et modules différents utilisés dans les VE [14]	25
2.4	Chaîne de valeur circulaire des batteries lithium-ion retirées du service [19]	29
3.1	3/R/R layer diagram (Laporte 1988)	41
4.1	Configuration du réseau étudié de recyclage des batteries des véhicules électrique	51
4.2	Carte géographique de 1 ^{er} test du scénario 1	60
4.3	Représentation de résultat de simulation de 1 ^{er} test sur la carte géographique du scénario 1	61
4.4	carte géographique du 2 ^{eme} test du scénario 1	62
4.5	Représentation de résultat de simulation de 2 ^{eme} test sur la carte géographique du scénario 1	63
4.6	Carte géographique du 3 ^{eme} test du scénario 1	64
4.7	Représentation de résultat de simulation de 3 ^{eme} test sur la carte géographique du scénario 1	65
4.8	Carte géographique du 1 ^{er} test du scénario 2	66
4.9	Représentation de résultat de simulation de 1 ^{er} test sur la carte géographique du scénario 2	67

4.10	Carte géographique du 2 ^{eme} test du scénario 2	68
4.11	Représentation de résultat de simulation de 2 ^{eme} test sur la carte géographique du scénario 2	69
4.12	Carte géographique du 3 ^{eme} test du scénario 2	70
4.13	Représentation de résultat de simulation de 3 ^{eme} test sur la carte géographique du scénario 2	71
4.14	Répartition des Coûts Stratégiques en Pourcentage du Coût Total	73
4.15	Répartition des Coûts Stratégiques moyenne en Pourcentage du Coût Total	74
4.16	Comparaison entre le coût totale et le chiffre d'affaire	75
5.1	Démarche d'un algorithme génétique. [Ghali, 2005]	81
5.2	Codage binaire d'un chromosome.	83
5.3	Codage réel d'un chromosome.	83
5.4	Codage entier d'un chromosome.	83
5.5	Codage à caractère d'un chromosome.	83
5.6	Croisement 1-point	84
5.7	Croisement 2-points.	85
5.8	Order crossover	85
5.9	Croisement Partiellement mappée	85
5.10	La représentation du chromosome	87
5.11	Carte géographique de résultat du 1 ^{er} test -scénario 1-	92
5.12	Carte géographique de résultat du 2 ^{eme} test -scénario 1-	94
5.13	Carte géographique de résultat du 3 ^{eme} test -scénario 1-	95
5.14	Carte géographique de résultat du 1 ^{er} test -scénario 2-	97
5.15	Carte géographique de résultat du 2 ^{eme} test -scénario 2-	99
5.16	Carte géographique de résultat du 3 ^{eme} test -scénario 2-	100
5.17	Carte géographique du 3 ^{eme} scénario	102
5.18	Carte géographique du 4 ^{eme} scénario	105
5.19	Comparaison entre le temps simulation à CPLEX et le temps d'exécution de AG	109

Liste des tableaux

4.1	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 1-	60
4.2	Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 1-	61
4.3	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 2-	62
4.4	Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 2-	63
4.5	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 3-	64
4.6	Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 3-	65
4.7	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 1-	67
4.8	Les résultats de variable de décision du scénario 2 -Test 1-	68
4.9	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 2-	69
4.10	Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 2-	70
4.11	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 3-	71
4.12	Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 3-	72
4.13	Les chiffres d'affaire de chaque cas	74
5.1	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 1- avec l'AG	93
5.2	Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 1- avec l'AG	93
5.3	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 2- avec l'AG	94
5.4	Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 2- avec l'AG	95
5.5	Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 3- avec l'AG	96
5.6	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 1- avec l'AG	98
5.7	Les résultats de variable de décision du scénario 2 -Test 1- avec l'AG	98
5.8	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 2- avec l'AG	99
5.9	Les résultats de variable de décision du scénario 2 -Test 2- avec l'AG	100
5.10	Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 3- avec l'AG	101
5.11	Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 3- avec l'AG	101
5.12	Les résultats de simulation de scénario 3 avec l'AG	103
5.13	Les résultats de variable de décision du scénario 3 avec l'AG	104
5.14	Les résultats de simulation de scénario 4 avec l'AG	106

5.15	Les résultats de variable de décision du scénario 4 avec l'AG	107
5.16	Comparaison entre le temps de simulation à CPLEX et le temps d'exécution de AG	108
17	Données pour le Scénario 1 avec 3 Tests	120
18	Données pour le Scénario 2 avec 3 Tests	121
19	Données pour les Scénarios 3 et 4	122
20	Les données des paramètres utilisées	123

Liste d'abréviations

CE	Circulaire Economy
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
EMF	Ellen MacArthur Foundation
EIT	Écologie Industrielle et Territoriale
AEE	Agence européenne pour l'environnement
UE	Union européenne
PIB	Produit intérieur brut
VE	Véhicule électrique
BEV	Batterie de véhicule électrique
BMS	Battery Management System
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
HEV	Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
ICSG	International Copper Study Group
IES	Interface d'électrolyte solide
LIBs	Lithium-ion batteries
RUL	Remaining Useful Life
SNT	Spiers New Technologies
VRP	Vehicle Routing Problem
LRP	Location Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
FLP	Facility Location Problem
TSP	Traveling Salesman Problem
VNS	Variable Neighbourhood Search
EVB	Electric Vehicle Battery
AG	Algorithme Génétique
MAX SAT	Maximum satisfiability problem

SLR	Sélection linéaire par rang
OX	Order Crossover
PMX	Partially Mapped Crossover
MA	Memetic Algorithms
SAMA	Memetic Algorithm hybridized with Simulated Annealing
OPS	Particle swarm optimization
IGA	Improved Genetic Algorithm
ILS	Iterated Local Search

Introduction générale

L'économie circulaire est un modèle économique conçu pour minimiser les déchets et maximiser l'utilisation des ressources. Contrairement à l'économie linéaire traditionnelle, où les produits sont fabriqués, utilisés, puis jetés, l'économie circulaire cherche à prolonger le cycle de vie des produits grâce au recyclage, à la réutilisation, à la réparation et à la refabrication. Ce modèle offre des avantages significatifs, notamment la réduction de la pression sur les ressources naturelles, la diminution des émissions de gaz à effet de serre et la création de nouvelles opportunités d'emploi. De nombreux pays et entreprises dans le monde entier adoptent des stratégies pour intégrer ces principes dans leurs opérations, faisant de l'économie circulaire une priorité mondiale.

L'un des secteurs où l'économie circulaire peut avoir un impact majeur est celui des batteries des véhicules électriques (VE). Les batteries au lithium, essentielles pour les VE, posent des défis environnementaux importants liés à l'extraction des matières premières et à leur gestion en fin de vie. L'intégration des principes de l'économie circulaire dans ce secteur vise à prolonger la durée de vie des batteries, à optimiser leur recyclage et à réduire les déchets. Respectivement, cela comprend des pratiques telles que la réutilisation des batteries dans des applications moins exigeantes après leur première vie, la récupération des métaux précieux contenus dans les batteries usagées par la voie de développement de technologies de recyclage plus efficaces. Ces efforts contribuent non seulement à la réduction des impacts environnementaux, mais aussi à la sécurisation de l'approvisionnement en matériaux critiques.

La recherche opérationnelle joue un rôle crucial dans la gestion des chaînes de valeur inversées, qui concernent les processus de récupération, de recyclage et de réutilisation des produits en fin de vie. En appliquant des méthodes quantitatives et des modèles mathématiques, la recherche opérationnelle aide à optimiser les décisions liées à la logistique inverse, au routage des véhicules de collecte, à la planification des ressources et à la gestion des stocks de matériaux recyclés. Dans le contexte des batteries des VE, cela permet de développer des solutions efficaces pour la collecte et le traitement des batteries usagées, maximisant ainsi la récupération des matériaux tout en minimisant les coûts opérationnels.

et les impacts environnementaux.

Le problème abordé dans ce mémoire appartient à la catégorie de l'optimisation combinatoire et concerne l'intégration du problème de la localisation et du routage (LRP) dans le contexte de la récupération des batteries des véhicules électriques. Le LRP combine deux aspects clés de la gestion de la chaîne d'approvisionnement : la localisation des sites de collecte des batteries, et le routage optimal des véhicules pour la collecte des batteries usagées. Ce problème englobe plusieurs aspects : la détermination des sites optimaux pour les centres de collecte et les itinéraires optimaux pour les véhicules de collecte. L'objectif est de minimiser les coûts totaux, qui incluent les coûts de localisation, de collecte, de traitement et de transport.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer des outils et des supports d'aide à la décision pour la chaîne de valeur dédiée à l'industries spécialisées dans la récupération des batteries des véhicules électriques. Ces outils visent à permettre une gestion optimale des ressources et des activités avec un coût minimal, tout en améliorant la rentabilité de la chaîne de revalorisation. Ils doivent intégrer des considérations environnementales et économiques pour proposer des solutions durables et efficaces. En particulier, ce mémoire se concentre sur la création d'un modèle mathématique décrivant la réalité technique du réseau inverse LRP pour la récupération des batteries usées dont son optimalité devient une évidence grâce à des méthodes de résolution innovantes pour gérer les opérations de collecte, de traitement et de redistribution des matériaux récupérés.

Cette étude est motivée par plusieurs facteurs clés misant à renforcer le rôle du dernier maillon de la chaîne inverse favorisant un fonctionnement plus efficace du réseau construit dans un cadre d'une économie circulaire plus durable. Premièrement, la réduction des déchets ; les batteries des véhicules électriques contiennent des matériaux toxiques et non dégradables qui posent des risques environnementaux, si elles ne sont pas correctement gérées. L'intégration de l'économie circulaire permet de réduire significativement les déchets en prolongeant la durée de vie des batteries et en optimisant leur recyclage. Deuxièmement, la conservation des ressources naturelles ; les matériaux nécessaires à la fabrication des batteries, tels que le lithium, le cobalt et le nickel, sont des ressources limitées. La récupération et la réutilisation de ces matériaux contribuent à la conservation des ressources naturelles et réduisent la dépendance à l'extraction minière. Troisièmement, l'amélioration de la durabilité économique ; la gestion efficace des batteries usagées permet de réduire les coûts de production en récupérant des matériaux précieux et en prolongeant la durée de vie des produits. Cela améliore la rentabilité des entreprises tout en favorisant des pratiques plus durables.

Le mémoire est organisé en cinq chapitres. Le premier chapitre introduit l'économie circulaire. Il couvre l'introduction, la définition, l'historique, les caractéristiques, les principes et les avantages de l'économie circulaire, en explorant les sept piliers de ce modèle et les concepts de logistique inversée. Le deuxième chapitre se concentre sur les différentes

stratégies de revalorisation des batteries à base de lithium. Il définit et retrace l'histoire des batteries BEV, examine leurs types et caractéristiques, identifie les métaux précieux qu'elles contiennent et décrit la chaîne de valeur circulaire associée. Le troisième chapitre aborde le problème de localisation-routage (LRP). Il en fournit une définition et les fondements, décrit ses variantes et applications, et discute des méthodes de résolution. Le quatrième chapitre traite de la résolution du problème de LRP pour la récupération des batteries de véhicules électriques. Il analyse les travaux antérieurs, formule le problème, décrit le réseau de recyclage, propose un modèle mathématique et simule divers scénarios. Le cinquième chapitre explore l'implémentation de l'algorithme génétique dans le LRP. Il présente une introduction aux algorithmes génétiques, explique leur codage, les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation, et compare les résultats obtenus avec les solutions du CPLEX.

A la fin, nous clôturons cette mémoire par une conclusion générale qui présente un résumé de travail effectué dans cette mémoire en citant les différentes perspectives qui peuvent avoir lieu pour continuer et améliorer nos travaux de recherche.

L'économie circulaire

1.1 Introduction

Le modèle économique linéaire actuel, basé sur l'extraction, la fabrication et le rejet de vastes quantités de matériaux et d'énergie peu coûteux et facilement accessibles, a été à l'origine du développement industriel et a généré une croissance sans précédent. Cependant, la volatilité des prix, les risques liés aux chaînes d'approvisionnement et la pression croissante sur les ressources naturelles ont incité les dirigeants d'entreprises et les responsables politiques à repenser la manière dont les matériaux et l'énergie sont utilisés. Beaucoup pensent que le moment est venu de tirer parti des opportunités offertes par l'économie circulaire. Cette économie circulaire est par nature restauratrice et régénératrice, visant à préserver la valeur et la qualité des produits, des composants et des matériaux à chaque étape de leur utilisation. Elle distingue les cycles biologiques et techniques. L'objectif de ce nouveau modèle économique est de décorrélérer la croissance économique mondiale de la consommation de ressources limitées. L'économie circulaire répond aux défis urgents liés aux ressources auxquels sont confrontées les entreprises et les pays, et pourrait en outre générer de la croissance, créer des emplois et réduire les impacts environnementaux, y compris les émissions de carbone. Alors que de plus en plus de voix plaident en faveur d'un nouveau modèle économique fondé sur une vision systémique, un alignement favorable de facteurs technologiques et sociaux contribue à la transition vers une économie circulaire.

1.2 Définition

L'économie circulaire (CE) est un concept de développement durable qui a gagné en popularité au cours de la dernière décennie, en particulier au cours des cinq dernières années, passant de seulement 679 articles en 2010 à 5 626 dans les 10 premiers mois de

2020 sur Science Direct (Science Direct, 2020). La même chose le mouvement est observé dans la tendance Google, où le niveau d'intérêt était insignifiant en 2010 avant d'attirer l'attention depuis 2016 (voir figure 1.1). Une prise de conscience similaire est observée dans différents domaines, de l'élaboration des politiques, de la consultation, des universitaires aux entreprises [1].

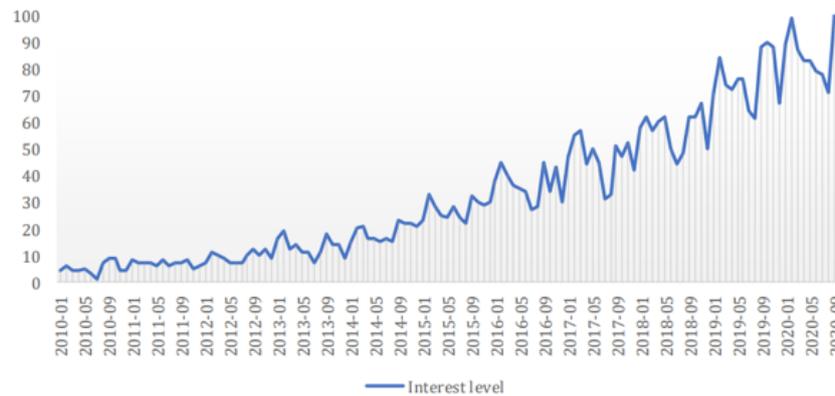


FIG. 1.1 – Tendence Google sur la recherche de l'économie circulaire dans le monde en 10 ans 2010 – 2020

Avec cette croissance exponentielle de l'intérêt pour l'économie circulaire, une sensibilisation accrue de tous les acteurs économiques aux problèmes environnementaux et aux solutions viables à long terme émerge comme une tendance dominante. Cette prise de conscience croissante reflète un changement de paradigme essentiel dans la façon dont nous percevons et abordons les défis liés à la durabilité. De ce fait, il devient impératif d'explorer plus en profondeur la notion d'économie circulaire et ses implications pour l'avenir.

La définition la plus largement considérée de l'économie circulaire est celle donnée par l'ADEME : « L'économie circulaire est 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 permettant le bien-être des individus. Cette définition situe l'économie circulaire comme une déclinaison opérationnelle aux principes fondateurs du développement durable. La concrétisation des nouvelles boucles de valeur promues par l'économie circulaire vise en effet à répondre à l'ensemble des problématiques sociales, économiques et environnementales liées à nos modes de production et de consommation actuels. » Cette définition se traduit dans l'illustration présentant le schéma de l'économie circulaire :

- Les produits doivent être conçus pour être sobres, lors de leur construction comme de leur usage.
- Les produits doivent être conçus de façon à être réparables et leur maintenance

prévue,

- Les produits doivent être réutilisés, mutualisés, leur usage doit être maximisé.
- Les produits doivent être démontables en vue du réemploi des sous-systèmes fonctionnels qui fournissent la construction de nouveaux produits.
- Les éléments ne pouvant plus être remanufacturés sont recyclés dans la mesure du possible [2].

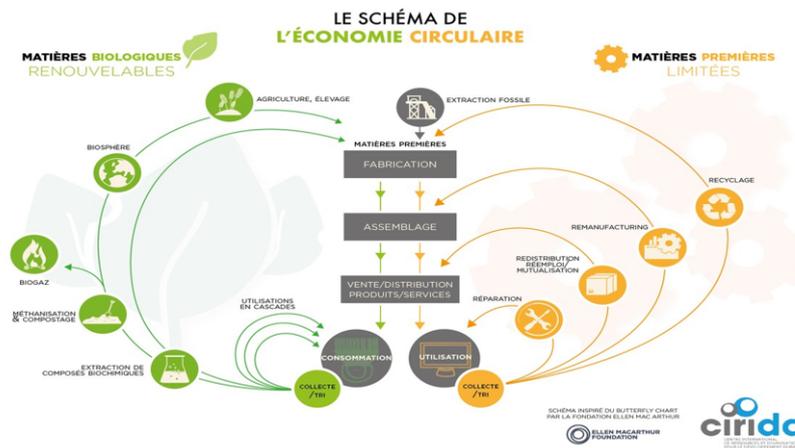


FIG. 1.2 – Schéma de l'économie circulaire

1.3 Historique de l'économie circulaire

Contrairement aux idées préconçues, l'origine du concept d'économie circulaire remonte aux années 1970, lorsque les premières études et comptes rendus ont commencé à émerger. Après la Seconde Guerre mondiale, les pays concernés ont commencé à explorer le lien entre la pensée écologique et la pensée économique. En 1966, par exemple, l'économiste britannique Kenneth Boulding a publié l'article "The Economics of the Coming Spaceship Earth", où la Terre était présentée comme un vaisseau spatial aux ressources limitées, soulignant la nécessité pour l'humanité de gérer ses ressources de manière responsable pour survivre. Cependant, le sens moderne de l'économie circulaire a été introduit par Walter Stahel, qui a souligné son importance dans son rapport de 1976 à la Commission européenne. Plus tard, en 1982, Stahel a fondé le Product-Life Institute, un institut de stratégie et de politique de durabilité visant à explorer de nouveaux systèmes circulaires. En 2002, William McDonough et Michael Braungart ont publié l'article "Cradle to Cradle", qui a renforcé l'importance d'une approche circulaire plutôt que linéaire dans la gestion des ressources .

Au fil des décennies suivantes, le concept d'économie circulaire est devenu de plus en plus répandu et approfondi. Il est essentiel de mentionner la Fondation Ellen MacArthur

(EMF) dans ce contexte, la plus grande organisation à but non lucratif axée sur ce domaine. Le Plan d'action pour l'économie circulaire, établi en 2015, a été particulièrement important, définissant une série d'actions législatives et non législatives pour faciliter la transition vers un modèle d'économie circulaire [3].

1.4 Les caractéristiques de l'économie circulaire

Dans un monde où la durabilité et l'efficacité des ressources sont devenues des enjeux majeurs, l'économie circulaire émerge comme une approche novatrice et essentielle. En explorant ses principes fondamentaux et leurs caractéristiques, nous plongeons dans un univers où la réutilisation, la régénération et la réduction des déchets façonnent un modèle économique résolument tourné vers l'avenir.

Mettant en lumière en premier lieu les cinq caractéristiques fondamentales de l'économie circulaire :

Élimination délibérée des déchets : Dans le modèle de l'économie circulaire, l'absence des déchets est un objectif délibéré. Les produits biologiques sont conçus avec des matériaux non toxiques et sont facilement biodégradables, tandis que les produits techniques sont conçus pour être récupérés, rénovés et mis à neuf et à jour, minimisant ainsi la consommation d'énergie tout en maximisant la valeur économique et des ressources. Contrairement à l'économie linéaire qui repose sur le recyclage de produits non conçus pour cela, cette approche vise à réduire la perte de valeur.

Robustesse par la diversité : Inspirée des écosystèmes naturels où la diversité renforce la résilience, l'économie circulaire nécessite un équilibre entre les grandes entreprises, qui apportent volume et efficacité, et les petites entreprises, qui proposent des solutions alternatives en période de crise.

Alimentation par des énergies renouvelables : Pour réduire la dépendance aux ressources et renforcer la résilience du système, l'énergie utilisée dans une économie circulaire doit provenir de sources renouvelables. Cela peut être réalisé en réduisant les besoins énergétiques grâce à l'efficacité des processus dans cette économie.

Approche systémique : Une transition efficace vers une économie circulaire nécessite une compréhension approfondie des interrelations entre les différentes composantes du système, qu'il s'agisse d'entreprises, de personnes, d'animaux ou de plantes. La surveillance étroite de ces liens est essentielle pour éviter des conséquences néfastes.

Prix reflétant les coûts réels : Dans une économie circulaire, les prix doivent refléter les coûts totaux, y compris les externalités négatives. Les subventions qui génèrent des effets pervers doivent être éliminées, car le manque de transparence sur ces externalités constitue un obstacle à la transition vers ce modèle économique [4].

1.5 Les principes de l'économie circulaire

L'économie circulaire repose sur trois principes fondamentaux afin de mener à bien son objectif de développement positif :

Principe 1 : préserver et augmenter le capital naturel en contrôlant les stocks finis de matières premières et en utilisant des ressources renouvelables : Quand des ressources sont nécessaires, l'économie circulaire les sélectionne avec attention et choisit les technologies et procédés qui utilisent des ressources renouvelables ou du moins les plus performantes. L'économie circulaire cherche aussi à améliorer le capital naturel en créant les conditions nécessaires pour la régénération du sol par exemple mais aussi de l'eau ou encore des écosystèmes.

Principe 2 : optimiser le rendement des ressources en appliquant la circularité aux produits , composants et matériaux dans les deux cycles différents. Cela implique de produire et de recycler pour garder les composants et matières premières utilisés dans l'économie. De plus, le modèle favorise les petites boucles chaque fois que c'est possible de manière à préserver le plus possible d'énergie et de valeur. Ce système favorise aussi les boucles ayant des vitesses plus lentes car cela signifie que la durée de vie du produit est plus longue.

Principe 3 : favoriser l'efficacité du système en révélant et en supprimant les externalités négatives : Ceci implique de réduire les dommages par les hommes mais aussi de les gérer comme l'utilisation de la terre, la pollution de l'eau et de l'air, la diffusion de substances toxiques et le réchauffement climatique [4].

1.6 Les sept piliers de l'économie circulaire

L'économie circulaire ne consiste pas qu'à un recyclage des produits une fois leur cycle de vie est terminé. Lorsqu'un produit n'est pas « fait » pour être recycler, le recyclage de celui-ci peut coûter très cher et il peut nécessiter une utilisation importante d'énergie pour pouvoir réinjecter le produit dans la chaîne de production. La pertinence du concept d'économie circulaire réside dans une nouvelle prise de conscience de la part des industriels (conception des produits) mais aussi des consommateurs (l'économie de la fonctionnalité). Il est important de saisir l'apport de chacun des piliers au concept d'économie circulaire pour que celui-ci prenne tout son sens.

1.6.1 L'éco-conception :

L'éco-conception est défini selon l'ADEME par la « Conception d'un produit, d'un bien ou d'un service, qui prend en compte?, afin de les réduire, ses effets négatifs sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, en s'efforçant de préserver ses qualités ou

ses performances ». En effet jusqu'à 70% des coûts et 80% des impacts environnementaux et sociétaux d'un produit sont déterminés au moment de sa conception. Il est important de prendre en compte dans l'écoconception toutes les étapes du cycle de vie du produit (fabrication, distribution, utilisation, valorisation finale).

Impact territorial

L'écoconception, bien que se déroulant principalement au sein des entreprises, a des répercussions directes sur les territoires. En effet, lors du cycle de vie d'un produit, celui-ci quitte inévitablement le cadre de l'entreprise pour atteindre les territoires et leurs habitants. Lorsque ce produit arrive en fin de vie et devient un déchet, c'est aux territoires de gérer leur traitement. En favorisant la réparation, la réutilisation et le recyclage, l'écoconception réduit les coûts de gestion des déchets, ce qui bénéficie aux territoires.

Par ailleurs, l'éco-conception peut stimuler l'emploi local. Les entreprises engagées dans cette démarche ont tendance à privilégier les fournisseurs locaux pour réduire leur empreinte environnementale, notamment en limitant le transport de marchandises. Les ressources locales, tant matérielles qu'immatérielles (telles que les compétences et connaissances), sont ainsi valorisées. Dans une approche d'écoconception prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, il est essentiel de comprendre le système d'acteurs impliqués à chaque phase. Une proximité territoriale, organisationnelle et institutionnelle facilite la coopération entre ces acteurs. En d'autres termes, une entreprise enracinée dans son territoire est plus encline à s'engager dans une démarche d'écoconception.

1.6.2 L'écologie industrielle et territoriale :

Le terme d'écologie industrielle et territoriale (EIT) s'appuie sur 3 notions :

L'écologie : Science des écosystèmes. Etude des relations des êtres vivants avec leur milieu

Industrielle : Relève de l'industrie les activités économiques qui combinent des facteurs de production (installations, approvisionnements, travail, savoir) pour produire des biens matériels destinés au marché.

Territoriale : Renvoi à la notion de territoire. La notion de territoire est à la fois juridique, sociale et culturelle, et même affective. Le territoire implique toujours une appropriation de l'espace : il est autre chose que l'espace.

L'écologie industrielle et territoriale (EIT) repose sur le principe de synergie entre les acteurs économiques et institutionnels d'un territoire, s'inspirant largement de la nature et de sa capacité à utiliser les déchets d'un organisme comme ressource pour un autre.

De ce fait, l'EIT consiste pour les entreprises à valoriser ou réutiliser les déchets d'une autre entreprise afin de limiter la pollution, le prélèvement de ressources, la production de déchets et la consommation d'énergie. Cela implique une capacité des acteurs du territoire à travailler ensemble (entreprises, collectivités) pour connaître les besoins de chacun et les possibilités d'échanges ou de mutualisation des ressources. La mutualisation des ressources implique le partage et l'utilisation conjointe des infrastructures, des équipements ou des matières premières entre les entreprises et les collectivités, dans le but de maximiser l'efficacité et de réduire les coûts.

1.6.3 L'économie de la fonctionnalité :

L'économie de la fonctionnalité est un concept qui est apparu assez tardivement en France. C'est dans les années 2000 que Nicolas Buclet et Dominique Bourg ont mis en avant les principes de l'économie de la fonctionnalité. Ainsi Nicola Buclet définit l'économie de la fonctionnalité comme un nouveau modèle de consommation qui propose de vendre aux clients des services plutôt que des biens matériels. Dans cette optique, une entreprise reste propriétaire des biens qu'elle met à disposition de ses clients, tandis que son chiffre d'affaire est lié à l'usage de ces biens par le client. Cette économie liée à l'usage et non plus à la possession, change radicalement la vision que doivent avoir les entreprises lors de la conception de leurs produits. En effet, Le producteur, en restant propriétaire de l'objet, et donc garant de sa réparation et de son maintien en état. Le producteur a tout intérêt à les rendre facilement réparable et le moins possible énergivore. En vendant son produit, le producteur afin de réduire ses coûts, se doit être attentif à la durée de vie de son produit et à ses performances énergétiques. Nous pouvons voir que les pratiques liées à l'économie de la fonctionnalité sont bien installées dans les relations inter-entreprises et les relations entreprises-citoyens. L'entreprise Michelin en est un parfait exemple.

Explication :

Les pneus nouvelles technologies avaient du mal à se vendre malgré leurs innovations dans la réduction des consommations d'essence. Michelin ne vend plus les pneus, mais prend en charge le cycle de vie chez le client utilisateur (ajuste le gonflage qui a une incidence sur la consommation, conseille les chauffeurs en conduite, et recreuse et recharge « au bon moment »). Le client ne paie plus les pneus, mais le kilomètre parcouru. La durée de vie des pneus est alors bien plus grande. En cumulant les facteurs, on arrive à 20 pneus au lieu de 64 (/3,2). On remarque de nombreuses initiatives dans les relations inter-citoyens notamment autour des pratiques de consommation collaboratives, du réemploi et du prêt entre particulier. C'est dans les relations Etat-citoyens et Etat-entreprises que l'économie de la fonctionnalité a du mal à se développer.

Une note de l'Institut de l'économie circulaire engage une réflexion sur la manière dont les politiques publiques pourraient prendre en considération l'économie de la fonctionnalité. Les auteurs (Georgeault et Aurez) nous parlent de la prise en compte de l'économie de la fonctionnalité par les pouvoirs publics dans l'élaboration de leurs politiques publiques. Cette appropriation du concept permettrait de faire gagner en visibilité et en légitimité à la notion d'économie de la fonctionnalité dans sa capacité à répondre aux problématiques d'un territoire. Les politiques publiques incarnent des visions de la société, des "théories du réel" économique. Selon les époques, les politiques publiques suivent un paradigme qui peut être défini comme un cadre d'idées et de normes qui spécifie non seulement les buts de la politique et le type d'instruments qui peuvent être mobilisés pour les atteindre, mais aussi la nature même des problèmes qu'ils sont censés traiter. **Exemple** : Au lieu de verser une prime à la naissance (923 € par enfant à naître), il serait envisageable de fournir des vêtements, un lit à barreaux, une poussette etc...

Impact territorial :

Les atouts d'une prise en compte de l'économie de la fonctionnalité dans l'élaboration de politiques publiques permettraient :

- Une réduction des financements publics .
- Le développement d'activités sur le territoire en lien avec la maintenance et la gestion des biens prêté .
- Une réduction des déchets.

L'économie de la fonctionnalité peut donc être une réelle opportunité pour un développement plus durable des territoires, une amélioration de la qualité de vie des habitants et une meilleure gestion des dépenses publiques

1.6.4 Le réemploi, la réparation et réutilisation :

Le réemploi : Le réemploi consiste à transmettre par don ou vente un produit à un autre utilisateur, augmentant ainsi la durée de vie du produit. Des initiatives existent déjà depuis plusieurs années. Nous pouvons citer par exemple Emmaüs, Ebay ou encore le Bon Coin. Cette pratique n'est donc pas nouvelle, selon l'Institut de l'économie circulaire, 98% des français affirment avoir déjà pratiqué le réemploi. Il faut toutefois noter que la principale motivation pour cette pratique est économique et non pas environnementale.

La réparation La réparation consiste là aussi à augmenter la durée de vie d'un produit. Avant réemploi, une réparation est parfois nécessaire, il faut toutefois que le produit soit conçu pour être réparé, ce qui n'est pas le cas de tous les produits. Le concept de réparation est donc en relation direct avec le premier pilier de l'économie

circulaire, l'écoconception. Outre l'apport écologique de la réparation, l'apport économique est là aussi à prendre en compte. La réparation peut en effet créer des emplois dans ce domaine.

La réutilisation La réutilisation ne doit pas être confondue avec le réemploi. Un produit peut être réutilisé pour une autre fonction que prévue initialement. En effet, lorsqu'un produit arrive en fin de vie, il est possible de réutiliser un ou plusieurs de ses composants dans la fabrication d'un autre produit. Cependant, comme pour la réparation, il est nécessaire que le produit soit conçu pour la réutilisation. Là encore le rôle de l'écoconception est important pour optimiser la réutilisation des biens de consommation.

1.6.5 Le recyclage :

La définition du recyclage définit par l'article L. 541-1-1 du code de l'environnement est la suivante : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage. » Le recyclage consiste donc à traiter les déchets afin de pouvoir les réinjecter dans la chaîne de production. Celui-ci apporte donc de grands avantages car il permet d'une part de réduire la quantité de déchets et d'autre part de limiter la consommation de ressource. Le recyclage est donc totalement en adéquation avec les objectifs de l'économie circulaire. Le défi du recyclage aujourd'hui est de trouver les technologies capables de transformer les déchets en ressources. Par exemple, le recyclage des métaux notamment des alliages s'avèrent difficile alors même qu'ils représentent une mine potentielle pour le recyclage.

Exemple des téléphones portables : Le nombre de téléphones portables en cours d'utilisation dans le monde serait passé de 1 milliard en 2002 à 2,5 milliards en 2009. Avec une fréquence moyenne de remplacement de 1,5 an, le stock de téléphones hors d'usage ne peut que croître exponentiellement. Les 500 millions d'unités hors d'usage estimées pour 2005 contiendraient 7 900 t de cuivre, 178 t d'argent, 17 t d'or, 7,4 t de palladium et 180 kg de platine. Moins de 1 % de ces métaux contenus sont recyclés. Le milliard de nouvelles unités vendues estimé pour 2009 nécessite l'extraction du double de ces tonnages. Là encore l'écoconception prend une place importante, comme pour la réutilisation et la réparation. Un produit bien éco-conçu est un produit qui peut se recycler de manière efficace.

Impact territorial :

Le recyclage impact les territoires en termes de réduction des déchets mais aussi en stimulant les innovations technologiques et l'emploi. Quelques chiffres :

- Une tonne de papier recyclé permet de préserver 19 arbres adultes et 100m³ d'eau.
- 1 tonne de plastique recyclé, c'est 830 litres de pétrole économisé.
- Il faut trois fois moins d'énergie pour produire du verre à partir de verre usagé qu'à partir de sable.

L'activité des entreprises de recyclage consiste à capter le gisement de déchets localement et à réaliser sur ce gisement les opérations nécessaires pour en faire une matière première recyclée.

C'est donc une activité de proximité ancrée par définition dans les territoires : les usines de traitement se situant à proximité des sources de déchets.

Selon le dernier rapport de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE), « Gains, emplois et innovations : le rôle du recyclage dans l'économie verte », les emplois dans le secteur du recyclage suivent en moyenne une augmentation de 11% par an. Les effectifs sont passés de 422 personnes par million d'habitants en 2000 à 611 en 2009. Toutefois le rapport indique aussi que la majorité de ces emplois sont considérés comme peu qualifiés, mais il existe également des postes requérant des compétences fortes, et ce, dans toutes les secteurs (collecte, manutention, traitement...). En France, ce sont 26 000 emplois dans le secteur du recyclage [24].

1.7 Logistique inversée

Au sein de l'économie circulaire, la logistique inverse émerge comme un élément clé, orchestrant le mouvement des produits et des matériaux depuis le consommateur vers les processus de réutilisation, de réparation et de recyclage. En inversant le flux traditionnel de la chaîne logistique, elle permet de maximiser la valeur des ressources tout en minimisant les déchets. Cette introduction explore le rôle central de la logistique inverse dans la réalisation des objectifs de durabilité et de circularité économique.

1.7.1 Reverse supply chain :

La reverse supply chain, également connue sous le nom de chaîne d'approvisionnement inversée, est un réseau comprenant un fabricant d'origine, des fournisseurs de composants neufs ou recyclés, des distributeurs et des clients. Son objectif principal est de récupérer et de valoriser les produits en fin de vie par le biais de processus de fabrication et de recyclage. Contrairement à la chaîne d'approvisionnement traditionnelle, qui se concentre

sur la livraison des produits au marché, la reverse supply chain se concentre sur la fin de vie des produits, en mettant un accent particulier sur les considérations environnementales.

Initialement conçue pour des motifs écologiques visant à réduire le gaspillage des matières premières, la reverse supply chain répond également à la demande des consommateurs pour des pratiques plus durables. Une approche intégrée de ces deux chaînes d'approvisionnement distinctes permet de créer une boucle fermée, où les produits en fin de vie sont récupérés et réintroduits dans le processus de production.

L'objectif de cette boucle fermée est double : d'une part, elle vise à apporter une valeur ajoutée au processus en répondant aux besoins des consommateurs, et d'autre part, elle cherche à récupérer les produits en fin de vie des clients pour les retraiter de manière appropriée. Par exemple, cela peut impliquer la possibilité pour les clients de renvoyer des produits défectueux, améliorant ainsi l'image de l'entreprise et renforçant sa responsabilité sociale.

1.7.2 Étapes de la reverse supply chain :

À partir des travaux de Lemoigne (2014) et de Fleischmann et al. (2000), quatre principales étapes de la reverse supply chain ont été identifiées dans la littérature :

Collecte : Cette étape consiste à récupérer les produits usagés auprès des clients, correspondant essentiellement à la collecte des déchets. Deux méthodes de collecte sont généralement distinguées, selon Lemoigne (2014) :

- a). **Le pick-up :** Le fabricant se rend directement chez l'utilisateur pour récupérer les produits usagés, ce qui peut également permettre la livraison de nouveaux produits en même temps.
- b). **Le drop-off :** Les utilisateurs se déplacent jusqu'à un point de collecte désigné, souvent chez leur distributeur, pour déposer les produits usagés.

Sélection/Tri : Cette étape inclut généralement les activités d'achat, de transport et de stockage, comme décrit par Fleischmann et al. (2000). Le tri consiste à classer les déchets en différentes catégories selon divers critères tels que leur état ou leurs composants, afin de les diriger vers des processus de traitement spécifiques.

Retraitement : Cette étape implique le choix du traitement à appliquer aux produits récupérés. Selon les auteurs Khor et Udin (2012) ainsi que Lemoigne (2014), plusieurs options de traitement sont envisageables :

- a). **Réparation :** Remplacement ou ajustement de composants ou de modules pour remettre le produit en état de fonctionnement. Les opérations de montage et de démontage sont généralement limitées, et la qualité peut être inférieure à celle d'un produit neuf.

- b). **Remise à neuf** : Désassemblage partiel du produit pour tester, réparer ou remplacer les composants défectueux signalés, afin de le remettre en état avec une qualité légèrement inférieure à celle d'un produit neuf.
- c). **Remanufacturing** : Désassemblage complet du produit pour des tests approfondis, une restauration et un remplacement des composants usagés, afin d'atteindre un niveau de qualité équivalent à celui d'un produit neuf.
- d). **Recyclage** : Processus d'extraction composé de collecte, déchetage, tri et traitement des matériaux. Les composants recyclables sont récupérés à partir des produits usagés pour être réutilisés dans la production de nouveaux produits. Certaines matières sont théoriquement recyclables à l'infini comme le métal mais d'autres matières comme le plastique perdent leur propriété au fur et à mesure des différents cycles de recyclage .
- e). **Détruire** : C'est le dernier recours, soit la destruction ou l'incinération des déchets qui ne peuvent pas être recyclés.

Revente : C'est simplement la revente des produits auprès des consommateurs après leur phase de retraitement. Généralement, les produits ayant subi un remanufacturing ou encore les produits fabriqués à l'aide de composants recyclés sont vendus à un prix inférieur à celui vendu initialement [25].

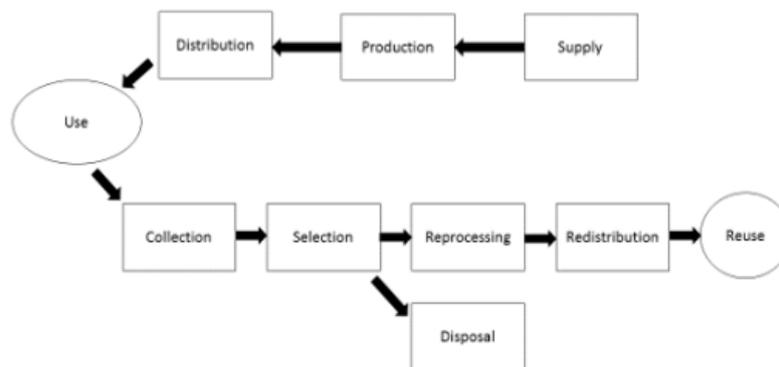


FIG. 1.3 – Formation de la "Closed-Loop Supply Chain" par la Combinaison des Deux Chaînes.

1.8 Les avantages de l'économie circulaire : pour quoi doivent nous passer à une économie circulaire ?

Pour protéger l'environnement : La réutilisation et le recyclage des produits sont essentiels. Ils ralentissent l'utilisation des ressources naturelles, réduisent la perturbation des paysages et de l'habitat, et contribuent à limiter la perte de biodiversité, en plus de :

- 1. Réduction des émissions de gaz à effet de serre :** Les procédés industriels et l'utilisation des produits sont responsables de 9,10 % des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE, tandis que la gestion des déchets représente 3,32 %.
- 2. Consommation d'énergie et de ressources réduite :** La conception de produits plus efficaces et durables dès le départ contribuerait à réduire la consommation d'énergie et des ressources, étant donné que plus de 80 % de l'impact environnemental d'un produit est déterminé lors de sa phase de conception.
- 3. Réduction des déchets :** En favorisant l'utilisation de produits plus fiables pouvant être réutilisés, améliorés et réparés, on peut réduire la quantité de déchets. L'objectif est de lutter contre les emballages excessifs et d'améliorer leur conception pour favoriser la réutilisation et le recyclage.

Pour réduire la dépendance aux matières premières :

- 1. Atténuation des risques associés à l'approvisionnement :** La population mondiale croissante entraîne une demande croissante en matières premières. Le recyclage de ces dernières atténue les risques tels que la volatilité des prix et la dépendance aux importations, en particulier pour les matières premières critiques nécessaires à la production de technologies cruciales pour atteindre les objectifs climatiques.
- 2. Économie de ressources et limitation des importations :** Certains pays de l'UE dépendent d'autres nations pour leurs matières premières, ce qui expose à des risques. Le recyclage des matières premières contribue à économiser des ressources et à réduire cette dépendance.

Enfin, la transition vers une économie circulaire peut :

- 1. Créer des emplois et stimuler l'innovation :** L'évolution vers une économie circulaire pourrait accroître la compétitivité, stimuler l'innovation, stimuler la croissance économique et créer des emplois (700 000 emplois dans l'UE d'ici 2030).
- 2. Améliorer la qualité de vie des consommateurs et réduire les coûts à long terme :** Les consommateurs bénéficieront de produits plus durables et innovants qui amélioreront leur qualité de vie et leur feront économiser de l'argent à long terme [26].

1.9 Les limites de l'économie circulaire

Bien que l'idée d'une économie circulaire semble très séduisante et souvent présentée comme la solution à tous nos problèmes, il est important de reconnaître qu'elle comporte plusieurs limites.

Tout d'abord, la transition vers une économie circulaire pourrait entraver la croissance économique à court terme et freiner le développement de certaines activités. Des études ont montré que dans certaines régions, comme la ville chinoise de Guiyang, l'adoption de l'économie circulaire pourrait même limiter le PIB à court terme. Cela souligne que la mise en œuvre de l'économie circulaire nécessite une perspective à long terme. De plus, les indicateurs économiques traditionnels comme le PIB ne capturent pas toujours les effets environnementaux à court ou long terme, ce qui rend difficile la mesure complète de la performance de l'économie circulaire.

Ensuite, le recyclage peut être économiquement rentable uniquement lorsque la demande en matières premières est forte. Par exemple, lors de la crise de 2008 en France, la chute de la demande en matières premières vierges a également entraîné une diminution importante de la demande en matériaux recyclés. De plus, malgré les progrès dans le recyclage, nous ne parvenons toujours pas à freiner suffisamment l'épuisement des ressources. Par exemple, même si nous recyclons plus de 70% de l'acier mondial, cela ne retarde l'épuisement des gisements de fer que dans quelques années.

Il existe également des limites législatives. Les réglementations comme le règlement européen REACH, qui définit les substances toxiques interdites dans les produits, peuvent poser des défis aux entreprises, en particulier pour les produits à longue durée de vie. Cette incertitude juridique constitue un obstacle majeur au recyclage car les entreprises doivent anticiper les futures restrictions pour concevoir des produits recyclables. Une autre difficulté réside dans les contraintes techniques. Les entreprises qui souhaitent concevoir des produits circulaires doivent tenir compte des infrastructures de recyclage existantes. Cependant, l'évolution constante des normes et des restrictions légales rend incertaine la viabilité à long terme de ces investissements.

Enfin, le prix des matières premières vierges reste un facteur crucial. Pour que l'économie circulaire soit viable, les matériaux recyclés doivent être moins chers que les ressources vierges. Sinon, les entreprises préféreront toujours les alternatives moins coûteuses. Cela signifie que même si une entreprise parvient à créer des produits non toxiques et recyclables, elle restera toujours vulnérable aux fluctuations des prix des matières premières vierges [4].

1.10 Conclusion

En conclusion, l'économie circulaire représente une approche essentielle pour promouvoir la durabilité économique et environnementale. En embrassant des principes tels que la réutilisation, le recyclage et la conception circulaire, elle offre une solution innovante aux défis actuels de notre société. Cependant, pour pleinement réaliser son potentiel, il

est crucial de surmonter les obstacles tels que les contraintes législatives, techniques et la dépendance aux fluctuations des prix des matières premières. Avec un engagement continu et une collaboration entre les différents acteurs, l'économie circulaire peut jouer un rôle majeur dans la construction d'un avenir plus durable et résilient pour tous .

Les différentes stratégies de revalorisation des batteries à base de lithium

2.1 Introduction

Les véhicules électriques (VE) sont devenus une réponse de plus en plus populaire et prometteuse aux défis environnementaux et énergétiques posés par les transports traditionnels. Au cœur de cette transition se trouvent les batteries au lithium-ion, qui alimentent la plupart des véhicules électriques modernes. Cependant, tandis que les VE gagnent en popularité et en adoption, la question de la gestion des batteries en fin de vie devient de plus en plus préoccupante.

Dans cette étude, nous aborderons de manière intégrée les défis de la mobilité électrique et de l'économie circulaire. Nous explorerons en détail les différentes stratégies de revalorisation des batteries des véhicules électriques à base de lithium, en mettant en lumière les synergies entre ces stratégies et les principes fondamentaux de l'économie circulaire. Avant d'entrer dans ces stratégies, nous établirons d'abord un cadre en définissant les types de véhicules électriques (BEV), en examinant les spécificités des batteries au lithium-ion, ainsi qu'en analysant la composition et la structure de ces batteries. Nous aborderons également les métaux clés utilisés dans ces batteries et explorerons la chaîne de valeur circulaire des batteries lithium-ion retirées du service.

À travers cette exploration, notre objectif est de fournir des insights précieux pour les décideurs politiques, les industriels, les chercheurs et toute personne concernée par la transition vers une société plus respectueuse de l'environnement et axée sur les énergies renouvelables. En intégrant efficacement les principes de l'économie circulaire dans la gestion des batteries des véhicules électriques, nous aspirons à prolonger leur durée de vie tout en réduisant leur impact environnemental, contribuant ainsi à une mobilité électrique plus durable.

2.2 Généralités sur les BVE

2.2.1 Définition des BVE

Une batterie de véhicule électrique (VE) est un type de batterie rechargeable qui fournit de l'énergie électrique à un véhicule électrique. Agissant comme principale source d'énergie, il propulse le moteur électrique du véhicule et alimente les systèmes électriques. Généralement composé de cellules lithium-ion ou d'autres chimies de batterie sophistiquées, il remplace les moteurs à combustion traditionnels, rendant la voiture plus propre et plus efficace.

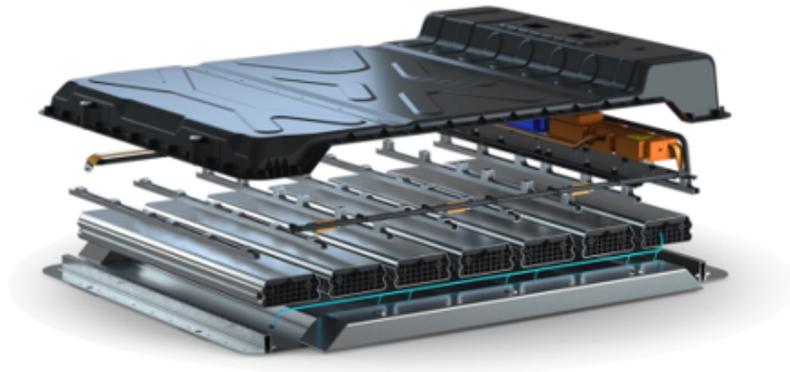


FIG. 2.1 – Model d'une BVE

2.2.2 Historique

L'histoire des batteries de voitures électriques remonte au 19^{ème} siècle, avec l'invention de la première batterie électrique non rechargeable par Alessandro Volta en 1800. Par la suite, Robert Anderson d'Écosse a conçu le premier wagon électrique rudimentaire alimenté par des piles primaires non rechargeables vers 1832-1839. Thomas Edison a encore affiné la technologie des batteries, en inventant la batterie nickel-fer en 1901, qui a grandement influencé le développement des véhicules électriques.

L'importance des batteries au lithium connaît une telle croissance qu'elles dominent actuellement ce segment de marché, principalement grâce à leur bon rapport énergie/masse. Cependant, ce succès doit être relativisé, car les batteries plomb-acide représentent encore 70% du marché. Elles conservent le monopole dans des applications telles que les batteries de démarrage des voitures et les alimentations de secours dans les centres de données. D'un point de vue économique, bien que le marché mondial des batteries en 2014 atteigne 60 milliards de dollars, les batteries Li-ion en représentent à elles seules 22 milliards (AVICENNE ENERGY, 2015).

Entre 2000 et 2008, la demande de lithium a augmenté d'environ 10% par an, principalement en raison de son utilisation dans les batteries pour petits appareils comme les téléphones portables, les ordinateurs portables, les appareils photo et les lecteurs MP3. Leur utilisation n'a cessé de croître et leur application dans la mobilité, allant des hoverboards et vélos à assistance électrique jusqu'aux voitures, n'a fait qu'amplifier leur taille et leur capacité.

Depuis 2008, la demande a continué d'augmenter, entraînant une croissance annuelle de 11%. Cette augmentation est due à la part croissante de ce type de batterie par rapport aux batteries non rechargeables et aux batteries NiMH. Alors que les premières générations de voitures hybrides utilisaient des batteries NiMH, les modèles électriques plus récents sont équipés de batteries lithium-ion. L'intérêt pour le lithium a considérablement augmenté depuis son utilisation dans les batteries, en particulier celles des voitures électriques et hybrides (2009). Ces dernières années, son exploitation a nettement progressé, au point qu'il est désormais considéré comme l'or blanc du 21e siècle [5].

2.2.3 les différents types de BVE

Les batteries des véhicules électriques varient en construction et en composition chimique, ce qui influe sur leurs performances, leur coût et leur impact environnemental. Voici un aperçu des différents types de batteries utilisées dans les véhicules électriques :

Batteries Nickel-Hydrure Métallique (NiMH) : Les batteries NiMH, introduites à la fin des années 1980, offraient une densité énergétique élevée et une bonne durabilité. Malgré ces avantages, elles ont été remplacées par les batteries lithium-ion en raison de leur autodécharge élevée et de leurs exigences de refroidissement plus complexes. Les voitures hybrides comme la Toyota Prius continuent cependant d'utiliser ces batteries pour leur rendement énergétique élevé .

Batteries au Plomb : Les batteries au plomb, utilisées depuis longtemps, sont abordables mais ont une densité énergétique plus faible et une durée de vie plus courte que les alternatives modernes. Elles ont joué un rôle crucial dans le développement automobile initial, bien qu'elles soient moins adaptées aux véhicules électriques contemporains en raison de leurs limitations.

Batterie Zebra : La batterie Zebra, utilisant un électrolyte à sels fondus, était innovante mais complexe à gérer en raison de ses hautes températures de fonctionnement. Son coût et son entretien ont limité sa popularité, la reléguant à un rôle plus marginal dans les applications actuelles des véhicules électriques.

Batteries Lithium-Ion : Les batteries lithium-ion, largement utilisées dans les voitures électriques, offrent une densité énergétique élevée, une longue durée de vie et une production d'énergie stable. Malgré leur coût et leurs défis de gestion, elles restent

populaires pour leur efficacité et sont adoptées par des constructeurs renommés comme Tesla et Nissan .

Batteries Lithium LiFePO4 : Les batteries LiFePO₄, un sous-type de batteries lithium-ion, offrent une sécurité exceptionnelle, une longue durée de vie et une efficacité de charge élevée. Elles sont utilisées dans diverses applications, y compris les voitures électriques, les systèmes solaires et les scooters de mobilité, en raison de leur stabilité et de leur durabilité [6].

2.3 BEV en lithium-ion

Le lithium est le troisième élément le plus léger, a le potentiel de réduction le plus faible et possède l'un des rayons ioniques les plus petits. Ces caractéristiques sont parfaites pour les batteries et le lithium continue de rouler dans les batteries de traction est donné dans un avenir prévisible.

2.4 Les caractéristiques de BEV en lithium-ion

Tension nominale : La tension nominale d'une batterie lithium-ion est une donnée cruciale qui varie selon la conception et la composition chimique spécifique de la batterie. Elle est déterminée par les réactions électrochimiques internes et peut être affectée par différents facteurs tels que la température et le niveau de charge. Au début de la décharge, la tension peut être légèrement supérieure à sa valeur nominale, puis diminuer progressivement à mesure que la décharge progresse, reflétant ainsi le comportement dynamique de la batterie [7].

Capacité : La capacité d'une batterie lithium-ion est exprimée en ampères-heures (Ah) ou en milliampères-heures (mAh), mesurant ainsi sa capacité à stocker et à fournir de l'énergie électrique. Cette mesure est fondamentale pour évaluer la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter un appareil, en fonction du courant demandé. Par exemple, une batterie lithium-ion avec une capacité de 2000mAh peut théoriquement fournir un courant de 2000 mA pendant une heure avant d'être complètement déchargée [8].

Résistance interne : La résistance interne d'une batterie lithium-ion est un paramètre significatif qui influence sa performance. Elle est causée par divers facteurs, notamment les connexions internes, les réactions électrochimiques et les dispositifs de protection intégrés. Une résistance interne élevée peut entraîner une chute de tension lorsque le courant demandé par la batterie augmente, impactant ainsi son efficacité et sa durée de vie [9].

Cycle de vie : Le cycle de vie d'une batterie lithium-ion représente le nombre total de cycles de charge et de décharge qu'elle peut subir avant d'atteindre la fin de sa durée de vie opérationnelle. Cette caractéristique est cruciale pour évaluer la longévité et la fiabilité de la batterie dans diverses applications. Un cycle de vie élevé est souvent un critère déterminant lors du choix d'une batterie pour garantir des performances durables et une utilisation prolongée [10].

Taux de charge/décharge : Le taux de charge/décharge, souvent désigné sous le terme de taux C, est un facteur déterminant pour les performances et la longévité d'une batterie. Il représente la vitesse à laquelle une batterie peut être chargée ou déchargée, mesurée en ampères (A). Par exemple, 1C correspond à un courant de décharge de 3A pour une batterie de 3000 mAh. Maintenir un taux C approprié est crucial pour maximiser l'efficacité et prolonger la durée de vie de la batterie. Une charge ou une décharge trop rapide peut entraîner une détérioration prématurée de la batterie, tandis qu'un taux plus modéré garantit des performances stables sur le long terme [8].

Température de fonctionnement : La plage de températures dans laquelle une batterie peut fonctionner efficacement sans subir de dommages importants est appelée température de fonctionnement. La température ambiante peut avoir un impact significatif sur les performances et la durée de vie de la batterie. Des températures élevées peuvent entraîner une dégradation accélérée des performances et réduire la durée de vie de la batterie, tandis que des températures basses peuvent également affecter négativement ses performances. Il est donc crucial de respecter les recommandations de température pour assurer un fonctionnement optimal de la batterie et prolonger sa durée de vie utile [11].

2.5 Composition des batteries

Vous trouverez ci-dessous une présentation des éléments constitutifs d'une batterie de véhicule électrique en lithium-ion .

1. **Cellule :** Une batterie lithium-ion est composée d'une anode, d'une cathode et d'un séparateur immergés dans un électrolyte, le tout encapsulé dans un boîtier métallique. Il existe trois grandes géométries de cellules ; cylindrique, prismatique et poche, voir figure 2.2 :

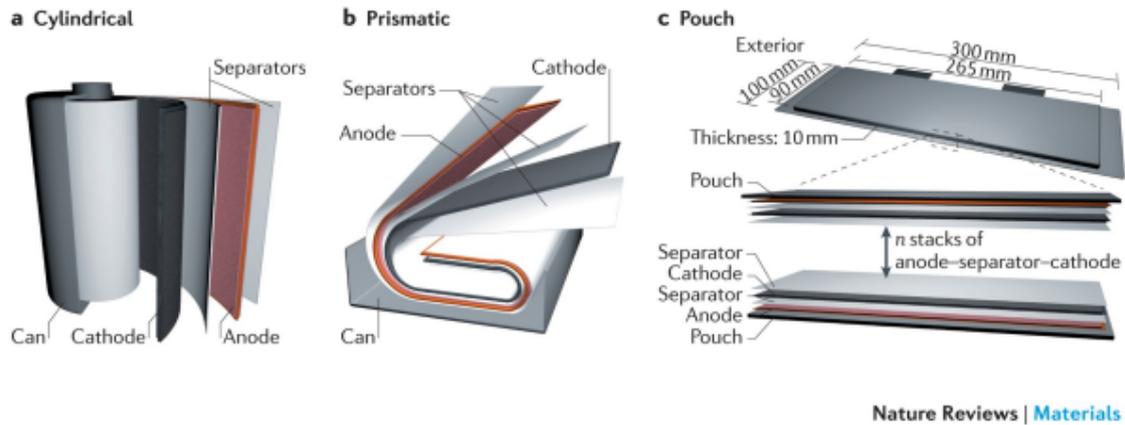


FIG. 2.2 – Illustration des structures typiques des batteries lithium-ion; cellules cylindriques, prismatiques et en poche [13]

L'anode, généralement composée de graphite et revêtue d'un collecteur de courant en cuivre, est actuellement l'approche dominante. Cependant, la recherche s'oriente désormais vers l'intégration d'autres éléments pour améliorer les performances, notamment le titane et le silicium. Le séparateur, fabriqué à partir d'un plastique semi-perméable comme le polyéthylène ou le polypropylène, permet uniquement le passage des ions lithium. Quant à l'électrolyte, il se compose d'un sel de lithium, souvent du LiPF_6 , dissous dans un solvant organique tel qu'un mélange de carbonate d'éthylène (EC) et de carbonate de diméthyle (DMC). Enfin, la cathode, qui différencie chimiquement les divers types de cellules, détermine le nom de chaque variante de cellule [12].

- 2. Module et Pack :** Un module se compose de plusieurs cellules interconnectées en série pour accumuler de la puissance ou en parallèle pour augmenter la capacité, comme illustré dans la figure 2.3 pour les modèles de Tesla Model S, BMW i3 et Nissan Leaf. De même, un pack est constitué de plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, comme représenté dans la figure 2.3 . Au niveau du pack, un système de gestion de batterie (BMS) assure l'équilibrage de la sortie de courant dans tout le pack, soit de manière active en redistribuant uniformément le courant dans le pack, soit de manière passive en éliminant les pics de courant. Il surveille également la température et mesure l'état de charge (SOC) et de santé (SOH) de la batterie. Le refroidissement est également assuré au niveau du pack. Les batteries sont généralement des systèmes haute tension. Le poids des véhicules électriques à batterie (EVB) varie en fonction de la capacité et de la puissance requise par le véhicule. Avec l'avènement des véhicules électriques à batterie (BEV), la taille et le poids ont considérablement augmenté par rapport aux véhicules électriques hybrides (HEV) et aux véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) [12].

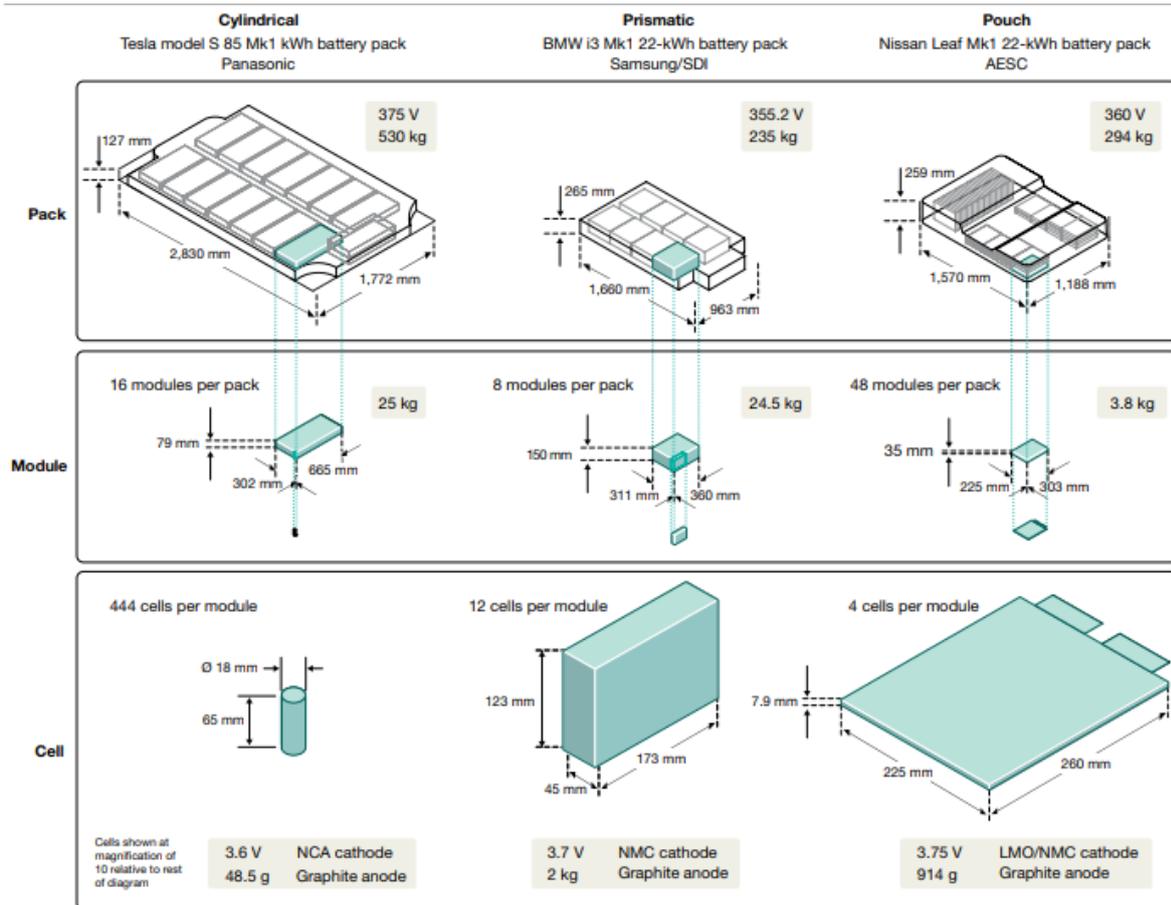


FIG. 2.3 – Exemples de trois packs batteries et modules différents utilisés dans les VE [14]

2.6 Les métaux de valeur utilisés dans la fabrication de batterie Lithium-ion

Le Lithium : Le lithium est un métal spécial qui a été découvert en 1817 et utilisé dans divers domaines depuis. Initialement utilisé dans les lubrifiants d'avions pendant la Seconde Guerre mondiale en raison de son point de fusion élevé, il est maintenant largement utilisé dans les batteries lithium-ion pour de nombreuses applications, y compris les appareils électroniques et les véhicules électriques. En plus de son utilisation dans les batteries, le lithium est également utilisé dans les céramiques pour augmenter leur résistance à la chaleur et dans certains alliages métalliques pour réduire leur poids. Bien qu'il ait des utilisations bénéfiques, des précautions sont nécessaires en raison de sa réactivité chimique et de ses effets sur la santé lorsqu'il est utilisé à des doses élevées.

Cobalt : Le cobalt a d'abord été utilisé dans la fabrication de poteries, ce qui lui a valu le nom de "bleu cobalt". Des artefacts de ce type ont été découverts dans la tombe du pharaon Toutankhamon. Aujourd'hui, le cobalt est largement utilisé dans di-

vers domaines. Il est crucial dans la fabrication d'alliages, notamment pour les turbines aéronautiques, car il confère une résistance accrue à la corrosion et aux hautes températures, ce qui est essentiel pour assurer la durabilité et la sécurité des équipements.

Le cobalt est également un composant clé des batteries lithium-ion, où il est présent dans la cathode. En médecine, il est utilisé sous forme de cobalt 60 dans le traitement du cancer. De plus, ses propriétés magnétiques à température ambiante le rendent utile dans diverses applications, tandis qu'il agit également comme catalyseur dans l'industrie pétrochimique. Sur le plan biologique, le cobalt est un élément essentiel à la vitamine B12, qui joue un rôle vital dans plusieurs processus biologiques, y compris la formation des cellules sanguines et la synthèse de l'ADN. Le cobalt est principalement extrait de minerais tels que la smaltite, la cobaltite et la modderite, souvent associés à de l'arsenic. Les principaux producteurs de cobalt sont situés en Afrique, notamment au Congo, suivi de la Chine, du Canada et de la Russie. Environ 30% de la consommation de cobalt provient du recyclage, avec une forte demande provenant de la Chine, principalement pour les batteries rechargeables. Au fil des ans, l'utilisation mondiale de cobalt dans ces batteries a considérablement augmenté, reflétant la croissance de l'électrification et des appareils électroniques portables. Bien que le prix du cobalt soit resté relativement stable au cours des dernières années, certains investisseurs prévoient une hausse significative cette année, en raison de la demande croissante dans divers secteurs industriels.

Nickel : Le nickel est principalement extrait à partir de minerais de sulfure de nickel ou de latérites. L'extraction du nickel à partir de sulfures est plus économe en énergie que celle des latérites, qui sont plus humides et nécessitent davantage d'énergie pour être traitées.

L'utilisation principale du nickel est dans la fabrication d'acier inoxydable, représentant environ 65% de sa consommation. Il est également largement utilisé dans les superalliages pour sa résistance à la corrosion. Une partie plus petite est utilisée dans les batteries rechargeables, les revêtements de surface métallique et comme catalyseur. Les Philippines sont les principaux producteurs mondiaux de nickel, suivis de près par la Russie, le Canada et l'Australie, qui possède les plus grandes réserves estimées à 19 millions de tonnes. Malgré cela, le prix du nickel a chuté de moitié depuis 2012, en raison de l'augmentation de l'exploitation minière aux Philippines et de problèmes rencontrés dans l'industrie métallurgique. L'incertitude quant à la demande de nickel de la part de la Chine a également contribué à cette baisse. Cependant, il est possible que le prix augmente à court terme en raison des récentes préoccupations environnementales aux Philippines.

En ce qui concerne le recyclage, environ 43% de la consommation annuelle de nickel provient du recyclage. Cependant, le nickel recyclé est généralement utilisé dans des

alliages plutôt que comme matière première pour de nouveaux produits. Une méthode courante de recyclage consiste à fondre les alliages recyclés avec une certaine quantité de nickel provenant de sources primaires pour créer de nouveaux alliages.

Le manganèse : Le Gabon est le principal producteur de manganèse, suivi par l'Afrique du Sud. Les minerais les plus courants sont les oxydes de manganèse, et bien que le manganèse soit relativement abondant, ne représentant que 0,1% de la croûte terrestre.

Historiquement, le manganèse a été utilisé comme pigment noir dans les peintures rupestres, et plus tard, les Romains l'ont utilisé dans la verrerie pour diverses teintes, allant du blanc au noir en passant par le violet et le brun, en fonction de sa concentration. Dans l'industrie, le manganèse est largement utilisé dans les alliages de fer pour augmenter la dureté et améliorer la résistance à la corrosion. Il joue également un rôle crucial dans la métallurgie en aidant à éliminer le soufre, ce qui renforce les alliages et prévient les poches d'air. En outre, le manganèse est utilisé dans la fabrication de batteries rechargeables. Il est utilisé dans la composition des cathodes des batteries lithium-ion, ce qui contribue à améliorer leurs performances et leur durabilité. En raison de ses propriétés, les alliages de manganèse sont également utilisés dans une gamme d'applications, y compris les rails de chemin de fer, les coffres-forts et les casques militaires.

Cuivre : L'extraction et la fonte du cuivre remontent à plus de 6000 ans, avec des preuves de son utilisation et de sa manipulation dans la région actuelle de l'Irak à cette époque. Dans l'Antiquité, Chypre était un fournisseur majeur de cuivre pour les civilisations méditerranéennes. Aujourd'hui, les principaux producteurs de cuivre sont le Chili, le Pérou et la Chine.

Le cuivre se trouve généralement lié au soufre dans les minerais. Ce métal est reconnu pour sa malléabilité et sa conductivité exceptionnelle, ce qui en fait un matériau privilégié dans la fabrication de fils électriques et de réseaux de télécommunication. Sa bonne conductivité thermique explique également sa présence dans les ustensiles de cuisine et les systèmes de plomberie.

De nombreux alliages contiennent du cuivre, chacun ayant une composition spécifique. Par exemple, le bronze est composé de cuivre mélangé à de l'étain, les laitons sont constitués de cuivre et de zinc, tandis que les maillechorts contiennent du zinc et du nickel en plus du cuivre. Environ 30% du cuivre utilisé provient du recyclage, selon l'International Copper Study Group (ICSG) en 2014.

Bien que le cuivre soit essentiel pour de nombreuses fonctions biologiques, telles que le fonctionnement du système nerveux, vasculaire, immunitaire et osseux, une concentration excessive peut être nocive. Il est également utilisé comme agent antifongique, algicide et bactéricide. L'Union européenne a récemment classé le cuivre parmi les sub-

stances à substituer dans les utilisations phytopharmaceutiques, ce qui peut poser des défis pour l'agriculture biologique [15].

2.7 Vieillissement de la batterie lithium-ion

Les batteries lithium-ion se détériorent avec le temps, ce qui entraîne une perte de puissance et de capacité. La perte de puissance est due à une diminution de la conductivité entre les matériaux de la batterie, causée par l'accumulation de couches résistantes à la conductivité à la surface de l'anode et de la cathode. Cette accumulation provoque également une perte de surface active et une réduction du transport de masse. La perte de capacité est causée par une diminution de la quantité de lithium disponible dans l'électrolyte, une perte de matériau des électrodes, la dissolution du métal de la cathode et des changements structurels. La couche de IES(Interface d'électrolyte solide) est la principale responsable du vieillissement et peut être dangereuse car elle peut former des dendrites qui peuvent court-circuiter la batterie, provoquant une surchauffe. Les dendrites peuvent également se former en raison d'une surcharge de la batterie. Les batteries se dégradent même lorsqu'elles ne sont pas utilisées, surtout si elles sont stockées avec un niveau de charge élevé et à des températures élevées. La dégradation pendant l'utilisation dépend du nombre de cycles, de la profondeur de décharge et de la charge de la batterie [12].

2.8 Chaîne de valeur circulaire des batteries lithium-ion retirées du marché

Bien que les fabricants d'équipements aient adopté diverses approches pour les applications des véhicules électriques, les processus de production des batteries lithium-ion sont remarquablement similaires. En général, la fabrication des batteries peut être décomposée en plusieurs étapes, comprenant le mélange, le revêtement, le calandrage, le découpage, l'enroulement, le soudage, et les essais, entre autres [16]. Les cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées en parallèle et en série pour former des packs, lesquels sont ensuite intégrés aux véhicules électriques pour servir de source d'énergie.

Les véhicules électriques peuvent parcourir entre 120 000 et 240 000 kilomètres tout au long de leur cycle de vie [17], et il est bien connu que les performances des batteries se dégradent avec le temps. Par conséquent, une quantité importante de batteries de véhicules électriques sera probablement mise hors service et ajoutée aux flux de déchets dans un avenir proche [18]. La circularité de la chaîne de valeur des batteries en fin de vie est illustrée dans la Figure 2.4. La gestion économiquement viable des batteries hors d'usage implique leur remise à neuf, leur réutilisation et leur recyclage, des activités qui

se situent à divers endroits dans la chaîne de valeur circulaire. Pour maximiser la valeur des cellules photovoltaïques, une approche privilégiée consisterait à les remettre à neuf, puis à les réutiliser avant de récupérer des matériaux de valeur par le biais du recyclage.

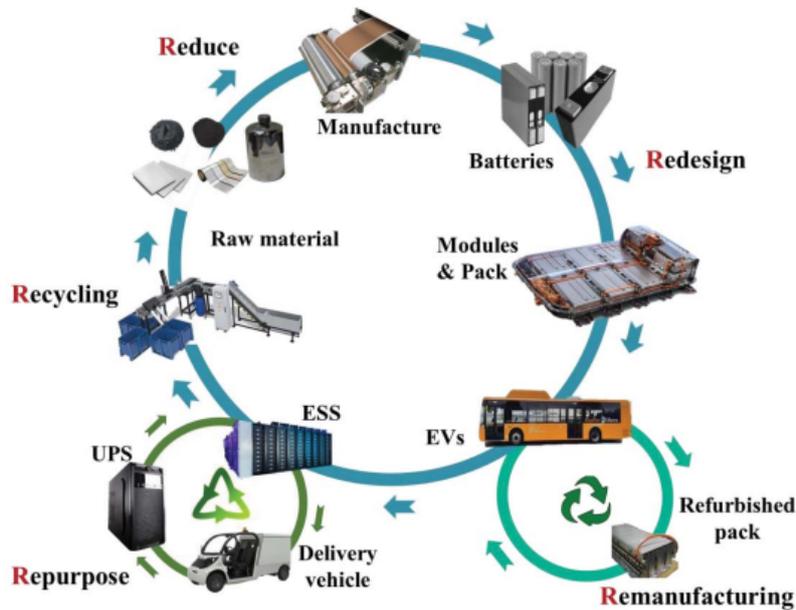


FIG. 2.4 – Chaîne de valeur circulaire des batteries lithium-ion retirées du service [19]

1. **Remise à neuf** : Une fois qu'elles ont perdu environ 20 à 30% de leur capacité initiale, les batteries lithium-ion (LIBs) ne peuvent plus répondre aux exigences strictes des véhicules électriques en termes d'autonomie et d'accélération. Cependant, même après cette perte de capacité, les LIBs retirées du service demeurent intéressantes pour la refabrication ou la réutilisation dans diverses applications en raison de la portion de capacité restante. Le processus de gestion des batteries en fin de vie commence par leur collecte et leur transport vers une usine de traitement dédiée, où elles sont ensuite évaluées pour déterminer le meilleur moyen de les traiter. Cette décision finale repose sur plusieurs facteurs, tels que l'état de santé (SOH), la durée de vie utile restante (RUL), le niveau de sécurité, ainsi que les coûts et les avantages spécifiques à chaque cas.

Les LIBs ayant les meilleurs résultats lors de l'évaluation peuvent être restaurées pour être utilisées à nouveau dans des applications destinées aux véhicules électriques. La prise en compte de ces divers critères permet de garantir une gestion efficace et responsable des batteries en fin de vie, contribuant ainsi à maximiser leur valeur économique, environnementale et de ressources.

Global Battery Solutions, anciennement connue sous le nom de Sybesma's Electronics, a développé une méthode innovante de réusinage baptisée "couper-coller". Cette méthode permet de restaurer les blocs de batteries défectueux en diagnosti-

quant les cellules endommagées, en les retirant et en les remplaçant par des cellules saines . De son côté, la société américaine Spiers New Technologies (SNT) propose une gamme complète de services 4R (réparation, réusinage, remise à neuf et réutilisation) pour les batteries de véhicules électriques utilisées par des constructeurs tels que Nissan et General Motors. SNT prévoit également d'étendre ses services de remise à neuf sur le marché automobile européen et chinois. Au Japon, à Namie, Nissan a érigé une installation de remise à neuf de batteries de véhicules électriques destinée aux propriétaires de Leaf, proposant cette solution à un coût d'environ 2 850 dollars pour une capacité de 24 kWh [19].

- 2. Réutilisation :** Les batteries réutilisées offrent une flexibilité d'utilisation dans des contextes moins exigeants, trouvant leur place dans une variété de scénarios tels que les systèmes d'énergie solaire, les onduleurs, les scooters électriques et les chariots élévateurs à fourche électriques. Selon la différence de capacité énergétique, ces applications réutilisées peuvent être catégorisées en applications industrielles, commerciales et domestiques. En termes de mobilité, les solutions réutilisées peuvent être subdivisées en trois niveaux : stationnaires (comme les systèmes de stockage d'énergie connectés au réseau, les bâtiments écologiques, etc.), quasi-stationnaires (comme les systèmes de stockage d'énergie pour les événements majeurs) et mobiles (pour alimenter les scooters électriques ou les chariots élévateurs à fourche).

Les scénarios de stockage d'énergie stationnaires, tels que les réseaux intelligents, les tours de secours pour les télécommunications et les bâtiments, représentent probablement les applications les plus populaires pour les cellules photovoltaïques réutilisées. Dans ces cas, des modules similaires sont triés et réaffectés pour répondre aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

Des études telles que celle de Matsuda et al [20] examinent la possibilité de réutiliser les batteries de véhicules électriques pour alimenter des systèmes d'énergie renouvelable dans des environnements isolés, résolvant ainsi les problèmes de fluctuation de fréquence et de surplus d'énergie. D'autres initiatives, telles que celle de Tong et al [21], proposent des solutions énergétiques résidentielles basées sur des batteries réutilisées et des panneaux solaires, réduisant ainsi la dépendance au réseau traditionnel. Debnath et al [22] ont quant à eux présenté un modèle de réseau intelligent utilisant des batteries de seconde vie pour servir de systèmes de secours, offrant des économies substantielles par rapport aux solutions conventionnelles.

Dans le secteur commercial, les batteries réutilisées trouvent également leur utilité comme sources d'énergie de secours pour la recharge des véhicules électriques, les centres de données, les hôpitaux et les tours de télécommunications. Par exemple, China Tower, le plus grand fournisseur de services de télécommunications au monde, prévoit de remplacer progressivement les batteries au plomb par des

batteries lithium-ion réutilisées, permettant ainsi une amélioration significative de la fiabilité et de l'efficacité de ses infrastructures. Des collaborations telles que celle entre FreeWire Technologies et Siemens permettent également de développer des solutions de recharge mobile pour les véhicules électriques, basées sur des batteries de seconde vie, offrant ainsi une mobilité accrue et une recharge pratique.

En dehors de ces applications spécifiques, les batteries hors d'usage peuvent également trouver leur place dans des contextes domestiques, industriels et même dans des véhicules motorisés moins contraignants, tels que les chariots élévateurs, les bicyclettes électriques et les voiturettes de golf. Par exemple, en Chine, de nombreuses sociétés de livraison express utilisent des milliers de véhicules électriques alimentés par des batteries de seconde vie, offrant ainsi une solution rentable et durable pour leurs besoins logistiques. Des initiatives telles que le système de stockage d'énergie résidentiel xStorage, développé conjointement par Nissan et Eaton, montrent également le potentiel des batteries réutilisées pour réduire les coûts énergétiques et promouvoir une utilisation plus efficace des ressources [19].

3. Recyclage : Le recyclage des batteries lithium-ion utilisées dans les véhicules électriques est crucial pour assurer la durabilité environnementale et économique de cette technologie. Cependant, ce processus est confronté à des défis majeurs en raison de la diversité des compositions chimiques des matériaux des batteries actuelles. Les batteries lithium-ion sont des structures complexes composées de divers types de cellules connectées en configurations spécifiques, ce qui rend le recyclage complexe et nécessitant des méthodes spécifiques pour chaque type de cellule. De plus, la composition des matériaux évolue avec de nouvelles technologies, comme l'augmentation du nickel et la réduction du cobalt dans les cathodes.

Pour surmonter ces défis, il est crucial de développer des technologies de recyclage adaptées à cette diversité, incluant des processus de séparation et de traitement des composants des batteries. La standardisation des designs de batteries est également importante pour faciliter le recyclage et la récupération des matériaux précieux. Une collaboration entre fabricants, recycleurs et régulateurs est nécessaire pour promouvoir des pratiques durables et économiquement viables dans l'industrie des batteries lithium-ion.

On cite :

Le processus pyrométallurgique : Le processus pyrométallurgique de recyclage des batteries lithium-ion implique un traitement à haute température en deux étapes. Les batteries sont brûlées pour éliminer les composés et les matériaux organiques, puis de nouveaux alliages sont générés. Les métaux coûteux comme le cobalt, le nickel et le cuivre sont récupérés efficacement. Cependant, le lithium présent dans les scories doit être récupéré avec des coûts et une consommation

d'énergie supplémentaires. Bien que ce processus ait été économiquement viable grâce à la forte teneur en cobalt des batteries électroniques, la tendance vers des batteries de véhicules électriques à faible teneur en cobalt rend ces modèles moins attrayants. Les avantages incluent la simplicité, la production de blocs élémentaires pour de nouveaux matériaux de cathode, mais les inconvénients sont la génération de CO_2 , la consommation énergétique élevée, la non-récupération de certains matériaux et l'adaptation nécessaire aux nouvelles tendances de faible cobalt.

Le processus hydrométallurgique : La valorisation des batteries au lithium par voie hydrométallurgique est une technique prometteuse pour le recyclage des matériaux précieux tels que le zinc, le cobalt, le manganèse, le lithium et le nickel. Ce procédé repose sur plusieurs étapes clés qui permettent de récupérer ces métaux tout en minimisant l'impact environnemental. Le processus commence par le broyage mécanique des batteries, réduisant leurs composants en poudre. Ensuite, un tri manuel ou mécanique sépare les matières non-ferreuses et les autres éléments métalliques. Les métaux ferreux sont extraits par voie magnétique. Les matériaux restants subissent un lessivage pour dissoudre les sels solubles à basse température. Les résidus de ce lessivage sont ensuite lixiviés à basse température, généralement en dessous de $130\text{ }^\circ\text{C}$, en utilisant une solution acide ou basique concentrée. Un oxydant, comme le chlore, peut être ajouté si nécessaire pour extraire les hydroxydes métalliques, les fines métalliques et le mercure. Les substances résiduelles passent par une purification, qui peut être réalisée par cémentation ou précipitation, en fonction de l'élément à séparer, sa quantité et le procédé chimique utilisé. Un des avantages majeurs de l'hydrométallurgie est qu'elle permet d'obtenir des métaux avec un degré de pureté élevé. De plus, ce procédé est peu énergivore, présente une empreinte carbone réduite et n'émet pas de dioxines, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement.

Le processus de recyclage direct : Le processus de recyclage direct est une méthode de récupération proposée pour récolter directement et récupérer les matériaux actifs des batteries lithium-ion (LIBs), tout en conservant leur structure chimique d'origine. Dans ce processus, les constituants de la batterie sont séparés principalement à l'aide de méthodes de séparation physique, de séparation magnétique et d'un traitement thermique modéré, afin d'éviter la décomposition chimique des matériaux actifs, qui sont la principale cible de récupération. Les matériaux actifs sont purifiés, et les défauts de surface et de masse sont réparés par re-lithiation ou des processus hydrothermaux. Cependant, les cathodes peuvent être un mélange de plusieurs matériaux actifs, et les séparer peut poser un défi en termes de processus de recyclage [23].

2.9 Conclusion

En explorant les différentes approches de valorisation, il devient évident que la prolongation de la durée de vie des batteries au lithium-ion et la réduction de l’empreinte environnementale des véhicules électriques sont des impératifs majeurs pour une transition durable vers une mobilité respectueuse de l’environnement. En adoptant des stratégies efficaces, nous pouvons non seulement mieux gérer les batteries en fin de vie, mais également améliorer la durabilité et l’efficacité des véhicules électriques, ce qui contribue à façonner une société plus respectueuse de l’environnement et axée sur les énergies renouvelables.

Le problème de localisation-routage

3.1 Introduction

Dans un monde façonné par la mondialisation, où les centres de production et de distribution se délocalisent et les marchés s'étendent, le rôle du transport devient primordial en assurant la connectivité entre ces entités. Cette interconnexion logistique engendre une multitude de défis, souvent complexes à résoudre de manière optimale. La problématique de la localisation des dépôts et de l'organisation des itinéraires de livraison (LRP) en est un exemple concret. Dans un contexte plus global, le but de la logistique du transport est de desservir un ensemble de points de livraison, qu'ils soient ponctuels comme des sites spécifiques ou linéaires comme des itinéraires, tout en minimisant les coûts.

L'importance de telles activités est croissante dans notre société contemporaine, car elles s'appliquent à une variété de domaines, qu'il s'agisse du transfert de biens physiques incluant la distribution du courrier, la livraison de colis, ou la collecte de produits comme le lait, ainsi que la planification des réseaux de transports publics, l'entretien des routes, ou encore la gestion des déchets.

À première vue, résoudre un Problème de Localisation-Routage (LRP) peut sembler peu réaliste, car il combine des décisions à long terme concernant les dépôts avec des décisions à plus court terme concernant les tournées. Cependant, dans des configurations où les tournées sont stables, telles que la maintenance (relevé de compteurs) ou la collecte de déchets ménagers, la prise en compte des futures tournées lors de la localisation des dépôts devient justifiée. De plus, les coûts fixes d'ouverture d'un site peuvent parfois être assimilés à des coûts d'exploitation pour une période donnée, ce qui rend le LRP plus adapté qu'une approche de décomposition en localisation et planification de tournées.

Donc, dans ce chapitre, on va entamer le LRP dans le cas général, les principales caractéristiques et leurs applications, et la formulation de problèmes et on va aborder sur les méthodes de résolution quelles que soient les méthodes exactes, heuristiques, métaheu-

ristiques.

3.2 Définition

Le problème de localisation routage (Location Routing Problem ou LRP) est un problème de logistique qui peut être vu comme la combinaison de deux problèmes de décision difficiles, à savoir le problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem ou VRP) et le problème de placement de ressources (Facility Location Problem ou FLP). Le LRP est un problème d'optimisation combinatoire NP-difficile largement étudié dont le but est d'optimiser un coût total combinant le coût des dépôts ouverts et le coût des routes empruntées. Chaque dépôt chargé de desservir un sous ensemble de clients, en respectant des contraintes de capacités. Tous les clients doivent être servis [27] .

3.3 Les Fondements du Problème LRP : VRP et FLP

1. Le problème VRP :

Dans le domaine de la logistique et de l'optimisation combinatoire, le Problème de Routage de Véhicules (VRP) se pose comme une énigme complexe à résoudre. Son objectif principal est de déterminer les trajets les plus efficaces pour une flotte de véhicules, tout en minimisant les coûts inhérents à ces déplacements.

Les objectifs du VRP sont aussi variés que les situations qu'il cherche à résoudre. Il peut s'agir de minimiser le temps d'utilisation des véhicules, de réduire la somme totale des distances parcourues, ou encore de limiter la distance maximale parcourue par l'un des véhicules. Parfois, l'objectif est simplement de minimiser les coûts associés à la livraison des marchandises.

Le VRP s'inscrit dans la lignée du Problème du Voyageur de Commerce (TSP) et du Problème du Dernier Kilomètre, qui traitent respectivement du déplacement d'un seul voyageur ou de la livraison finale dans une chaîne de distribution. Cependant, le VRP étend ces concepts en prenant en compte des flottes entières de véhicules, ajoutant ainsi une couche supplémentaire de complexité. Le VRP ne se limite pas à une simple question de trajets. Il englobe également des variantes telles que le VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), intégrant des contraintes temporelles pour garantir la ponctualité des services rendus. Cette dimension temporelle ajoute une couche supplémentaire de complexité, mais aussi de réalisme, à la résolution du problème. Ce défi, largement étudié dans le cadre de la recherche opérationnelle, trouve des applications concrètes dans des domaines tels que la livraison de marchandises ou les services de transport. Les entreprises se tournent vers des algorithmes sophistiqués pour résoudre efficacement le VRP, conscientes

des enjeux que représente une optimisation réussie des tournées de véhicules.

En somme, le VRP est bien plus qu'un simple puzzle logistique. Il incarne un véritable défi pour les entreprises souhaitant améliorer leur efficacité opérationnelle et réduire leurs coûts logistiques, nécessitant à la fois expertise technique et créativité algorithmique pour être relevé avec succès [28][29][30]

Formulation de base du VRP :

Un ensemble de client I , et un seul dépôt qui servi tous les clients avec un seul véhicule de capacité limitée en minimisant la distance totale :

- **Ensemble :**

A : Ensemble des clients, le nœud 1 représente le dépôt .

- **Paramètres :**

Dis_{ij} : Distance entre le client i et le client j .

Q_i : Demande du client i .

Cap : La capacité du véhicule .

- **Variable de décision :**

X_{ij} : Variable de décision égale à 1 s'il y'a un lien entre le client i et le client j , 0 sinon .

- **La fonction objective :**

$$Min Z = \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} Dis_{ij} * X_{ij} \quad (3.1)$$

La fonction objective (3.1) vise à minimiser la distance totale parcourue par le véhicule pour desservir tous les clients. Les termes Dis_{ij} représentent la distance entre le client i et le client j , et X_{ij} est une variable binaire qui prend la valeur 1 si le véhicule va directement du client i au client j , et 0 sinon.

- **Contraintes :**

(a) **Contrainte de sortie pour chaque client :**

$$\sum_{\substack{j \in A \\ i \neq j}} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in A - \{1\} \quad (3.2)$$

Cette contrainte (3.2) assure que chaque client i (sauf le dépôt) est desservi par exactement un véhicule partant du client i . Cela signifie qu'il y a une et une seule route sortant de chaque client.

(b) **Contrainte de départ du dépôt :**

$$\sum_{\substack{j \in A \\ j \neq 1}} X_{1j} = 1 \quad (3.3)$$

Cette contrainte (3.3) assure que le véhicule part du dépôt exactement une fois pour commencer sa tournée.

(c) **Contrainte de flux de véhicule (conservation de flux) :**

$$\sum_{i \in A} X_{ip} - \sum_{j \in A} X_{pj} = 0 \quad \forall p \in A \quad (3.4)$$

Cette contrainte (3.4) garantit la continuité de la route, c'est-à-dire que pour chaque client i , le nombre de véhicules entrant est égal au nombre de véhicules sortant. Cela empêche les véhicules de se "perdre" ou de créer des sous-tours indépendants.

(d) **Contrainte de capacité du véhicule :**

$$\sum_{i \in A} \sum_{\substack{j \in A \\ j \neq 1}} Q_i * X_{ij} \leq Cap \quad (3.5)$$

Cette contrainte (3.5) garantit que la demande totale des clients desservis par le véhicule ne dépasse pas sa capacité maximale .

(e) **Contrainte de sous-tours (sous-tours éliminés) :**

$$\sum_{i \in Z} \sum_{\substack{j \in Z \\ j \neq 1}} X_{ij} \leq |Z| - 1 \quad \forall Z \subseteq A - \{1\} \quad (3.6)$$

Cette contrainte (3.6) élimine les sous-tours en assurant que pour tout sous-ensemble Z des clients (excluant le dépôt), il n'y a pas plus de $|Z| - 1$ arcs. Cela force le véhicule à retourner au dépôt au lieu de rester bloqué dans un sous-tour.

(f) **Variables de décision binaires :**

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in A, \forall j \in A \quad (3.7)$$

Cette contrainte (3.7) définit la nature binaire des variables de décision X_{ij} , assurant que chaque arc entre les clients i et j est soit utilisé 1 soit non utilisé 0.

2. Problème FLP :

En français le Problème de Localisation d'Installations, souvent abrégés en FLP (Facility Location Problem), représentent un défi majeur à la croisée de la recherche opérationnelle et de la gestion logistique. Leur objectif principal est de déterminer les sites les plus stratégiques pour implanter de nouvelles installations, qu'il s'agisse d'usines, d'entrepôts ou de centres de distribution. L'enjeu est de répondre efficacement à une demande spécifique ou à une clientèle cible.

Ces problèmes peuvent prendre différentes formes, notamment le Problème de Localisation d'Installations Discrètes de Base (Uncapacitated Facility Location Problem - UFLP), qui se concentre sur l'ouverture d'un nombre limité d'installations pour servir une clientèle donnée avec un seul produit.

Les décisions prises dans le cadre des FLP revêtent une importance stratégique pour les entreprises, car elles ont un impact direct sur les coûts opérationnels, la satisfaction client et la fluidité de la chaîne d'approvisionnement. Pour trouver des solutions optimales ou proches de l'optimalité à ces problèmes complexes, des méthodes de résolution précises et heuristiques sont employées, contribuant ainsi à optimiser les opérations logistiques et à réduire les coûts associés [31][32].

Formulation de base du FLP :

Un ensemble de clients I , et un ensemble des sites potentiels J pour les installations, et les sites ont une capacité illimitée, l'objectif est de minimiser les coûts totaux en satisfaisant la demande des clients :

- **Ensemble :**

I : Ensemble des clients, indexé par i .

J : Ensemble des sites potentiels pour les installations, indexé par j .

- **Paramètres :**

F_j : Coût fixe pour établir une installation au site j .

C_{ij} : Coût de transport depuis l'installation située au site j au client i .

- **Variables de décision :**

X_{ij} : Variable binaire égale à 1 si le client i est affecté à la localisation j , 0 sinon.

Y_j : Variable binaire égale à 1 si une installation est établie au site j , 0 sinon.

- **Fonction objective :**

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in J} F_j * Y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} * X_{ij} \quad (3.8)$$

La fonction objective (3.8) vise à minimiser la somme des coûts fixes d'établissement des installations et des coûts de transport pour satisfaire la demande des clients.

- **Contraintes :**

- (a) **Affectation des clients :**

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.9)$$

Cette contrainte (3.9) assure que le client i est affecté à un et un seul site j .

- (b) **Forçage :**

$$X_{ij} \leq Y_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.10)$$

Cette contrainte (3.10) assure que si le site j n'est pas installé il n'y a pas une affectation des clients aux sites.

(c) **Variables de décision binaires :**

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.11)$$

$$Y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (3.12)$$

Ces contraintes (3.11) et (3.12) définissent la nature binaire des variables de décision X_{ij} et Y_j , assurant que chaque arc entre les clients i et j est soit utilisé 1 soit non utilisé 0.

3.4 Les principales caractéristiques variantes de LRP

Les principales caractéristiques des variantes de LRP définies par Drexl et Schneider sont celles qui déterminent la nature du problème. Dans cette étude, sept caractéristiques ont été utilisées pour catégoriser les personnes : le type d'incertitude des données, l'horizon de planification, l'emplacement des installations potentielles, le nombre d'échelons, le type d'objectif, les points de demande et le type de livraison .

L'incertitude des données : Cette caractéristique principale comporte trois sous-caractéristiques : les données déterministes, stochastiques et floues. Les données déterministes sont des données du problème qui sont connues à l'avance, tandis que les données stochastiques et floues sont données sous forme de distributions de probabilités et de nombres flous .

L'horizon de planification : Cette caractéristique principale présente trois sous-caractéristiques : statique, dynamique et dynamique. La statique est un problème avec une seule période de planification . Périodique est un problème avec plusieurs périodes de planification .

Emplacement potentiel d'une installation : Cette caractéristique principale présente trois sous-caractéristiques : l'emplacement en crête, l'emplacement en continu et l'emplacement du réseau. Un groupe de localisations discrètes potentielles est donné sous la forme d'un ensemble de sommets sur un réseau, tandis que des localisations continues potentielles sont données sous la forme du plan sur lequel le réseau est intégré et, selon le schéma de localisation du réseau de l'installation, chaque sommet du réseau est un emplacement potentiel.

Nombre d'échelons : Cette caractéristique principale comporte deux sous-caractéristiques : échelon unique et échelons multiples.

Type d'objectif : Cette caractéristique principale comporte deux sous-caractéristiques : l'objectif unique et les objectifs multiples , lorsqu'un seul objectif est utilisé, il tend à réduire les coûts, y compris les coûts fixes d'une installation et les coûts fixes et variables d'un véhicule. Les études axées sur plusieurs objectifs permettent de réduire

au minimum le risque environnemental ou le temps de déplacement, ou d'équilibrer la charge de travail tout en minimisant le coût total.

Points de demande : Cette caractéristique principale comporte deux sous-catégories : le routage de sommets et le routage d'arcs, dans lesquels les services sont effectués aux sommets et sur les arcs reliant les paires de sommets, respectivement.

Types de livraison : Cette caractéristique principale a sept sous-caractéristiques : standard, collecte de prix, livraison fractionnée, ramassage et livraison, inventaire, ouvert et multimodal. Dans un LRP standard, toutes les livraisons des clients sont effectuées en une seule visite. Dans un LRP de collecte de prix, les livraisons à certains clients qui ne contribuent pas à une valeur supérieure sont sautées. Dans un LRP de livraison fractionnée, les clients peuvent être visités plusieurs fois. Dans un LRP de ramassage et de livraison, les ramassages et les livraisons peuvent être effectués en une seule visite. Dans un LRP ouvert, les véhicules ne sont pas tenus de retourner au poste de facteurs. Dans un LRP multimodal, plusieurs modes de livraison sont utilisés et les transferts entre modes de livraison sont autorisés [33].

3.5 Classification du LRP en fonction du diagramme en couches

La classification du "Problème de Routage de Localisation" (PRL) en fonction du diagramme en couches offre une approche conceptuelle pour définir différents types de problèmes en tenant compte des utilisateurs ou des clients d'une part, et des installations à localiser d'autre part. Selon cette classification théorique, il est possible de distinguer quatre types de problèmes en fonction de la nature discrète ou continue des ensembles d'utilisateurs et d'installations, comme suggéré par Laporte en 1988. De plus, cette classification suppose que les utilisateurs et les installations appartiennent à des ensembles disjoints.

L'illustration par un diagramme en couches, tel que celui présenté dans la figure 3.1, permet de mieux appréhender ces distinctions. Dans cet exemple, trois couches sont identifiées : les installations primaires, les installations secondaires et les utilisateurs. Typiquement, les installations primaires correspondent aux usines, les installations secondaires aux entrepôts ou dépôts, et les utilisateurs aux clients. Alors que les emplacements des installations primaires et des utilisateurs sont généralement fixes, ceux des installations secondaires ne le sont pas nécessairement. Le nombre et l'emplacement de ces installations, ainsi que leur distribution associée, ne sont souvent pas connus à l'avance.

Les problèmes définis à partir du mode de distribution Mt utilisé par les véhicules, basés sur une installation située à la couche t , constituent un aspect central de cette classification.

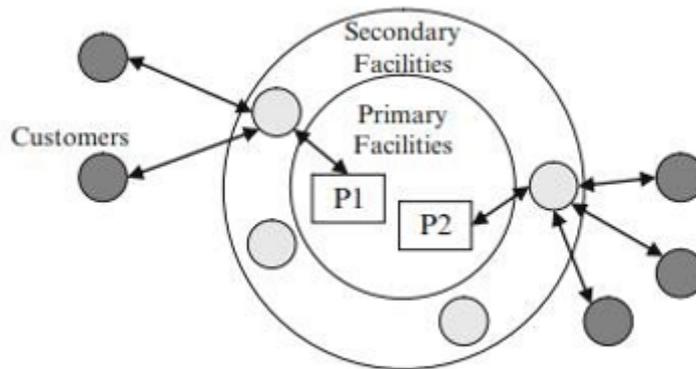


FIG. 3.1 – 3/R/R layer diagram (Laporte 1988)

Deux modes de distribution sont considérés :

$Mt = R$: où tous les trajets à partir de la couche t sont des trajets aller retour vers la couche $t + 1$.

$Mt = T$: où les déplacements à partir de la couche t peuvent inclure des tournées entre plusieurs utilisateurs ou établissements.

Les modes de distribution adoptés pour l'ensemble du système sont exprimés par l'équation $\lambda = M1 = M2 = \dots = M_{\lambda-1}$, où λ représente le nombre de couches dans le système. Cette expression reflète les différentes configurations possibles en fonction du nombre de couches. Dans un système composé de trois couches, par exemple, deux configurations distinctes sont envisageables :

$3/R/R$: Cette configuration est courante lorsque des matériaux généralement volumineux, tels que le bois de construction ou le ciment, doivent être expédiés en chargements complets entre les couches successives .

$3/R/T$: Dans ce cas, les grosses cargaisons arrivant aux installations secondaires sont fractionnées et expédiées en plus petits chargements aux clients. Cette configuration est fréquemment rencontrée dans l'industrie alimentaire, où les produits sont conditionnés en portions individuelles avant d'être distribués aux consommateurs.

Ces différentes configurations reflètent les diverses stratégies de distribution utilisées dans les systèmes logistiques en fonction des caractéristiques des produits, des besoins des clients et des contraintes opérationnelles. Chaque configuration peut nécessiter des méthodes de planification et de gestion spécifiques pour assurer une distribution efficace et rentable des marchandises.

Cette classification offre une vue d'ensemble des différents aspects du LRP et fournit une base théorique pour la formulation et la résolution de diverses variantes du problème,

en tenant compte des caractéristiques spécifiques des utilisateurs, des installations et des schémas de distribution [34].

3.6 Les applications de LRP

Dans le cadre de nos recherches, nous avons analysé de nombreux articles portant sur des études de cas d'application de la LRP. Parmi ceux-ci, on peut citer :

Livraison de produits périssables : Le principal problème avec les produits périssables est le besoin de délais de livraison très courts, car la valeur de ces produits diminue au fil du temps , Cela permet aux trains de servir les repas dans des délais serrés (Time windows).

Livraison de produits spéciaux à l'exclusion des produits périssables : Étant donné que les déchets solides municipaux sont traités à l'aide de technologies conçues pour des types spécifiques de déchets dangereux, des réseaux uniques de déchets solides devraient être définis pour différents types de déchets. De nombreux articles qui travail sur ce domaine on peut citer Asefi et al [63] qui travail sur un LRP municipal pour les déchets solides qui optimise l'emplacement des installations du système de gestion des déchets, comme les centres de traitement et d'élimination, et l'acheminement des déchets vers et depuis les installations .

Logistique en cas de catastrophe : Dans des situations de crise, où des secours doivent être acheminés rapidement pour sauver des vies, des conditions anormales et des défis spécifiques se présentent, imposant des ajustements dans les opérations logistiques. Certaines cargaisons peuvent devenir inutilisables en cas de catastrophe. Six études se sont penchées sur les Problèmes de Routage de Localisation (PRL) dans le contexte des catastrophes. Dans une étude menée par Zhang et al [64], il a été envisagé que les bureaux de poste soient affectés de manière aléatoire, ce qui a nécessité la réinsertion des clients des bureaux de poste défaillants dans les itinéraires des bureaux de poste en activité.

Gestion durable de la chaîne d'approvisionnement : Sustainable Supply Chain Management (SSCM), ou Gestion Durable de la Chaîne d'Approvisionnement, représente un défi crucial où l'objectif traditionnel de réduction des coûts est accompagné d'une volonté de minimiser les risques environnementaux. Cette objectif inclut notamment la réduction des émissions de carbone et de la consommation de carburant, mettant ainsi l'accent sur la durabilité environnementale dans la gestion globale de la chaîne d'approvisionnement.

Utilisation du parc de véhicule électriques : Le nombre de livraisons effectuées par les véhicules électriques, qui réduisent les émissions de carbone, augmente. Cependant, étant donné que les véhicules électriques ont des distances de déplacement

plus courtes que les véhicules conventionnels, il est nécessaire de les charger à un moment donné sur des itinéraires de longue distance . Dans leur étude, Schiffer et Walther [65] ont utilisé un Problème de Routage de Localisation (LRP) pour planifier l'itinéraire des véhicules électriques tout en déterminant l'emplacement optimal des stations de recharge. Ils ont intégré différentes options de recharge dans leur modèle, offrant ainsi une flexibilité accrue. La fonction objectif de leur approche pouvait être ajustée selon deux critères principaux : minimiser la distance parcourue, le nombre de véhicules requis et le nombre de stations de recharge ; ou minimiser le coût total du système.

3.7 Formulation de base du LRP

On considère un ensemble de nœuds K composé d'un sous-ensemble I de i clients et d'un sous-ensemble J de j dépôts à localiser , on suppose que chaque client i a une demande d_i qui peut être satisfaite ,et chaque dépôt a une capacité limitée P_j et un coût fixe d'ouverture CF_j .Un ensemble V de véhicules de capacité limités Cap_v et un coût d'utilisation fixe de chaque véhicule CU_v .

Sous les contraintes suivantes :

- Chaque clients doit être servi par un seul véhicule et une seule tournée .
- La somme des quantités livrées aux clients ne doit pas être dépasser la capacité maximale de dépôt .
- La somme des demandes de chaque tournée ne doit pas être dépasser la capacité de véhicule .
- La tournées doit commencer et finir au même dépôt .

Le modèle mathématique :

- **Les ensembles :**

K : ensemble de tous les nœuds $I \cup J$.

I : ensemble des clients .

J : ensemble des dépôts .

V : ensemble des véhicules .

- **Les indices :**

i : le client .

j : le dépôt .

v : le véhicule .

- **Les paramètres :**

d_i : la demande de client i .

P_j : la capacité de dépôt j .

Cap_v : la capacité de véhicule v .

CF_j : le coût fixe de localisation de chaque dépôt j .

CU_v : le coût d'utilisation fixe de chaque véhicule v .

• **Les variables de décisions :**

y_j : variable de décision binaire égale à 1 si le dépôts j est localisé , 0 sinon .

h_{ij} : variable de décision binaire égale à 1 si le client i est affecté au dépôt j ,0 sinon.

x_{ijv} : variable de décision binaire égale à 1 si il y'a une route entre le client i et le dépôt j par la véhicule v , 0 sinon .

u_{kv} : variable auxiliaire pour l'élimination des sub-tours .

• **La fonction objectif :**

L'objectif est de déterminer quels dépôts à localiser et minimiser les coûts fixes de localisation du dépôts et les coûts d'utilisations des véhicules .

$$Min Z = \sum_{j \in J} CF_j y_j + \sum_{v \in V} \sum_{j \in K} \sum_{i \in K} CU_v x_{ijv} \quad (3.13)$$

• **Les contraintes :**

1. Chaque client doit être sur une route :

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in K} x_{ijv} = 1 \quad \forall i \in I \cup J \quad (3.14)$$

2. Capacité limitée du véhicule v :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in K} x_{ijv} d_i \leq Cap_v \quad \forall v \in V \quad (3.15)$$

3. Chaque route qui rentre le nœud i doit en sortir :

$$\sum_{l \in K} x_{liv} - \sum_{z \in K} x_{izv} = 0 \quad \forall v \in V \text{ et } \forall i \in K \quad (3.16)$$

4. Capacité de dépôt :

$$\sum_{i \in I} d_i h_{ij} \leq P_j y_j \quad \forall j \in J \quad (3.17)$$

5. Si le véhicule v sert le client i et passe par le dépôt j alors le client i doit être desservi par le dépôt j :

$$\sum_{m \in K} x_{imv} + \sum_{l \in K} x_{jlv} \leq 1 + h_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall v \in V \quad (3.18)$$

6. L'ouverture des dépôts :

$$\sum_{j \in J} y_j \geq 1 \quad (3.19)$$

7. Contrainte de forçage :

$$\sum_{v \in V} x_{ijv} \leq h_{ij} \quad \forall i \in I \text{ et } j \in J \quad (3.20)$$

8. Chaque véhicule opère à partir d'un seul dépôt :

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijv} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (3.21)$$

9. Contrainte d'élimination des sub-tours :

$$u_{iv} - u_{jv} \leq -|K| \times x_{ijv} + |K| - 1 \quad \forall v \in V, \forall i \in K, \forall j \in K \quad (3.22)$$

10. Contrainte d'affecter un client à un et un seul centre dépôt :

$$\sum_{j \in J} h_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.23)$$

3.8 Les méthodes de résolution du LRP

1. Approches exactes :

Les approches exactes dans le cadre du LRP sont conçues pour déterminer la solution optimale en explorant systématiquement toutes les combinaisons possibles. Bien qu'elles offrent l'avantage de garantir la solution optimale, leur principal inconvénient réside dans leur coût computationnel élevé, particulièrement pour des instances de grande taille. Les techniques exactes comprennent souvent des algorithmes sophistiqués tels que le branch-and-bound, qui permet d'explorer de manière efficace l'arbre des solutions, ainsi que des méthodes de coupes et de séparation, qui permettent de réduire l'espace de recherche en éliminant les solutions non-prometteuses dès que possible.

(a) Les avantages des modèles de programmation linéaire et de programmation par contraintes :

Les modèles de programmation linéaire et de programmation par contraintes représentent des approches structurées pour aborder le "Location Routing Problem" (LRP) en le formalisant en un problème d'optimisation mathématique. Cette démarche permet une analyse approfondie du problème et facilite sa résolution grâce à l'utilisation de solveurs spécialisés. Les modèles de programmation linéaire s'avèrent particulièrement efficaces pour des instances de taille modérée, offrant une résolution rapide et précise grâce à des algorithmes bien établis.

En revanche, la programmation par contraintes se distingue par sa capacité à modéliser des contraintes plus complexes et des interactions entre les variables de décision, ce qui en fait un outil puissant pour traiter des problèmes du LRP comportant des facteurs plus dynamiques ou des contraintes multiples. Ces approches offrent ainsi un cadre flexible pour analyser et résoudre les défis posés par le LRP, en exploitant les avantages respectifs de la programmation linéaire et de la programmation par contraintes pour obtenir des solutions optimales ou proches de l'optimalité.

2. Approches non exactes heuristiques et métaheuristiques :

Les méthodes heuristiques et métaheuristiques représentent des approches flexibles et efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation dans des délais raisonnables, bien que sans garantie absolue de trouver la solution optimale. Ces stratégies sont particulièrement adaptées aux instances de grande taille où les méthodes exactes peuvent devenir prohibitives en termes de temps de calcul. Les méthodes heuristiques englobent un éventail d'approches, telles que les algorithmes de construction de routes comme le "nearest neighbor", les algorithmes de recherche locale tels que le recuit simulé ou la recherche tabou, qui se concentrent sur l'amélioration progressive de solutions initiales.

Comme la recherche de voisinage variable, souvent mentionnée sous l'acronyme VNS (Variable Neighborhood Search), a été largement utilisée dans le domaine de la recherche sur le Problème de Routage de Localisation (LRP) pour améliorer l'efficacité des opérations de livraison. Cette approche s'avère particulièrement utile dans les contextes où les clients demandent des livraisons le même jour que la commande ou selon des plages horaires spécifiques. En explorant de manière itérative les solutions voisines, les algorithmes de recherche de voisinage s'efforcent d'optimiser les itinéraires de livraison ainsi que l'emplacement des installations, ce qui est essentiel pour répondre à la complexité croissante des variantes du LRP et aux exigences changeantes des opérations logistiques modernes.

Grâce à la flexibilité offerte par la recherche de voisinage variable, les chercheurs et les praticiens peuvent ajuster les stratégies de livraison en fonction de divers paramètres, tels que les délais de livraison, les préférences des clients et les contraintes opérationnelles. Cette approche permet de trouver des solutions robustes et adaptatives pour les problèmes de routage et de localisation, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité globale des chaînes logistiques et à répondre de manière plus efficace aux demandes des clients en constante évolution.

En parallèle, les métaheuristiques, tels que les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, offrent des cadres plus globaux pour explorer l'espace de recherche de manière plus diversifiée et adaptative, souvent inspirés de phénomènes naturels ou

de concepts évolutifs. Ces méthodes, bien que ne garantissant pas l'optimalité, ont prouvé leur efficacité dans une variété de domaines, offrant des solutions de qualité dans des délais raisonnables pour des problèmes d'optimisation complexes. Hu et al. (2019) travail sur influence des restrictions de trafic sur le système de gestion des déchets dangereux afin de minimiser le coût total et le risque total et maximiser le niveau de satisfaction des clients et utilise algorithme génétique comme méthode de résolution .

3.9 Conclusion

En conclusion, le Problème de Localisation-Routage (LRP) représente un défi complexe et crucial dans le domaine de la logistique du transport. En combinant des approches de modélisation avancées et des méthodes de résolution efficaces, il est possible d'optimiser les processus de localisation des dépôts et d'organisation des itinéraires de livraison. La recherche continue dans ce domaine offre des perspectives prometteuses pour améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts logistiques et répondre aux besoins spécifiques des entreprises et des organisations.

Dans le prochain chapitre, nous explorerons l'application du LRP dans un contexte novateur : la chaîne inverse des batteries de véhicules électriques. Cette utilisation élargie du LRP démontre sa flexibilité et son potentiel pour résoudre des problèmes divers au sein de la logistique moderne. Nous pourrions ainsi relever avec succès les défis du LRP dans ce nouveau contexte et contribuer à une gestion plus efficace et durable des flux physique inverses.

Approche exacte d'optimisation du réseau LRP adapté à la récupération des batteries utilisées de véhicules électriques, cas de petite instance

4.1 Introduction

Recycler, réutiliser ou remettre à neuf les batteries des véhicules électriques (VE) présente plusieurs avantages significatifs. D'un point de vue environnemental, ces pratiques réduisent les déchets toxiques envoyés aux décharges, diminuant ainsi la pollution du sol et de l'eau, et permettent de récupérer des matériaux précieux tels que le lithium, le cobalt et le nickel, limitant ainsi l'extraction de nouvelles ressources naturelles. Elles contribuent également à la réduction des émissions de carbone liées à la production de nouvelles batteries. Économiquement, par le recyclage des batteries peut être moins coûteux que la production de nouvelles batteries à partir de matériaux vierges. De plus, la remise à neuf et la réutilisation prolongent la durée de vie des batteries, offrant des solutions plus économiques et créant des emplois dans les secteurs de la gestion des déchets et de la fabrication. Sur le plan de l'indépendance et de la sécurité énergétique, la valorisation des matériaux récupérés permet aux pays de réduire leur dépendance aux importations de matières premières nécessaires à la fabrication de nouvelles batteries et atténue les risques liés aux fluctuations des marchés des matières premières. En termes d'innovation technologique, la nécessité de recycler et de remettre à neuf les batteries stimule la recherche et le développement de nouvelles technologies de traitement et de valorisation des matériaux, améliorant ainsi l'efficacité et la durée de vie des batteries.

Enfin, d'un point de vue sociétal, les entreprises qui investissent dans le recyclage et la remise à neuf démontrent leur engagement envers des pratiques durables et responsables, répondant aux attentes croissantes des consommateurs pour des produits durables, ce qui peut améliorer leur image de marque et la satisfaction des clients. Recycler, réutiliser ou remettre à neuf les batteries des véhicules électriques est crucial pour protéger l'environnement, stimuler l'économie, renforcer la sécurité énergétique, encourager l'innovation technologique et promouvoir la responsabilité sociétale, soutenant ainsi la transition vers une économie circulaire et durable.

Dans ce chapitre, nous contribuons à mettre en place un réseau inverse LRP destiné à la collecte et la revalorisation de batteries usées de véhicules électrique. Une formulation mathématique fondée à partir de la programmation mathématique en nombre entier mixte (MILP) est réalisée puis testée de façon exacte en utilisant CPLEX version 12.8.0 où plusieurs scénarios sont proposés avec de petite instance.

4.2 Travaux antérieurs sur le problème de LRP pour les BVE

La gestion des batteries de véhicules électriques (VE) est devenue un enjeu majeur dans le contexte de la transition vers une économie circulaire et durable. Dans cette optique, l'article de Hu et al. (2022) [36] propose une approche novatrice basée sur la programmation linéaire pour concevoir un réseau de recyclage durable pour les batteries de VE, visant à minimiser les coûts totaux et les émissions de carbone associées au processus de recyclage. L'étude aborde trois stratégies clés pour traiter les batteries usagées : la remise à neuf, la réutilisation et le recyclage des matériaux.

En développant un modèle de réseau de recyclage pour les batteries de VE, les auteurs ont identifié les emplacements optimaux des centres de recyclage, optimisé les itinéraires de transport et évalué les coûts logistiques et opérationnels associés au processus de recyclage. Les résultats de l'étude soulignent que les coûts logistiques et opérationnels représentent la majeure partie des dépenses totales du réseau de recyclage, mettant en évidence l'importance de réduire ces coûts pour améliorer l'efficacité économique du recyclage des batteries de VE.

En poursuivant le travail de Hu et al. (2022) [36], nous nous sommes mis à améliorer la configuration du réseau au niveau de paramétrage, de la clarification du routage et de transport. Nous y détaillons les améliorations apportées à la configuration du réseau de récupération et fournissons une analyse approfondie des coûts stratégiques et tactiques. Pour résoudre le problème, nous avons utilisé le logiciel CPLEX pour donner une solution exacte issue de l'optimisation de la modélisation mathématique proposée avec un ensemble de jeux de données. Dans ce suit et pour bien tester ce problème pour des cas

de grande instance, le recours aux algorithmes génétiques comme une méthode approchée sera présentée dans le chapitre suivant dans le cas de mono-objectif.

4.3 Problématique

Notre étude vise à résoudre le problème LRP en intégrant l'économie circulaire et la logistique inverse. L'objectif de notre recherche est de collecter les batteries des véhicules électriques pour les recycler, les réutiliser ou les remettre à neuf, afin de valoriser les métaux et de promouvoir la réutilisation secondaire des batteries de véhicules électriques (EVB).

4.4 Les hypothèses

1. Toutes les batteries sont de même type.
2. Tous les véhicules ont la même capacité .
3. Chaque centre de collecte a une durée de vie N .
4. On suppose que la période de récupération des EVB est d'une semaine.
5. Les centres de collecte EVB ont des capacités limitées de collection , et les véhicules de transport ont des limites de charge.
6. Un seul centre de recyclage , un seul centre de réutilisation et un seul centre d'élimination existent dans le réseau.
7. Les emplacements du centre de collecte doivent être déterminés, le centre de recyclage, le centre de réutilisation, le centre d'élimination des déchets EVB et les centres de service et de maintenance sont déjà identifiés.
8. Les EVB seront soumises à de multiples stratégies potentielles (réutilisation, recyclage et élimination) en fonction de l'état de santé de batterie (SOH).
9. Le taux de rebut dans le centre de recyclage c'est de 5% .
10. La distance entre les nœuds de l'installation se déduit en utilisant la distance euclidienne.
11. Le Recyclage des déchets EVB se fait par la technique de recyclage d'hydro-métallurgique par le faite de sa consommation d'énergie relativement faible.

4.5 Description du réseau de recyclage

4.5.1 Description générale du réseau

La Figure 4.1 représente un réseau de récupération des batteries de véhicules électriques (EVV). Le réseau se compose de cinq entités à savoir : un centre de service et maintenance de EVV, un centre de collecte des EVV, un centre de recyclage, un centre de réutilisation et un centre d'élimination des déchets.

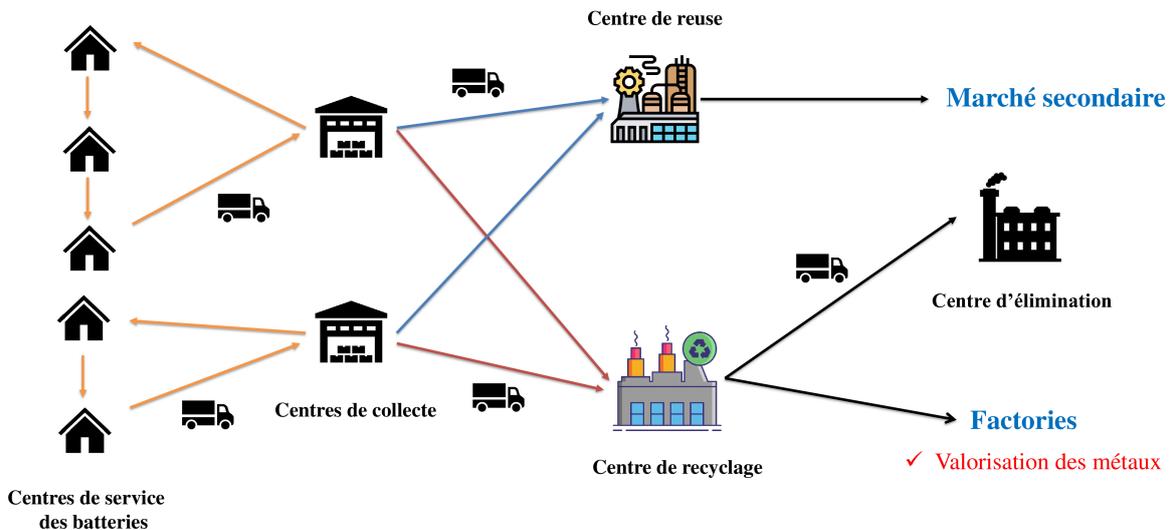


FIG. 4.1 – Configuration du réseau étudié de recyclage des batteries des véhicules électrique

Les batteries en fin de vie sont collectées par les centres de collecte auprès des centres de service et de maintenance de EVV et envoyées aux centres de collecte des EVV. Le centre de service et de maintenance de EVV est responsable du test initial de la batterie. Selon la capacité restante, les batteries sont divisées en deux catégories : T1 (capacité restante supérieure à 70%), T2 (capacité restante inférieure à 70%) [37]. Différentes stratégies de traitement sont adoptées pour les batteries selon leur état de santé.

Les batteries de type T1 sont transportées vers le centre de réutilisation et réassemblées dans de nouvelles batteries EVV ou bien réutilisées autrement pour des applications stationnaires. Les batteries de type T2 ne sont pas adaptées à la réutilisation et seront transportées vers le centre de recyclage pour être démantelées et recyclées. Au centre de recyclage, les batteries sont traitées pour récupérer les différents métaux précieux qu'elles contiennent. Grâce à l'efficacité de la technologie hydrométallurgie, il est possible d'atteindre une récupération de 99% du cobalt (Co) et du lithium (Li) dans des conditions

optimales [19]. Malgré cela, des résidus non récupérables demeurent et sont acheminés vers le centre d'élimination des déchets, où ils sont traités selon les normes environnementales.

4.5.2 Description détaillée de fonctionnement de chaque centre dans le réseau

Pour mieux comprendre le fonctionnement et l'importance de chaque centre dans le réseau de récupération des batteries de véhicules électriques (EVB), examinons de plus près les rôles et les processus spécifiques de chaque nœud .

Le centre de service et maintenance des batterie

Le centre se spécialise dans le diagnostic des batteries et l'étude de batteries (BMS) et aussi dans la maintenance EVB [38] [39] . Il assure l'étude de l'état des batteries en utilisant le BMS , et remplace celles dont l'état de santé (SOH) est insuffisant par de nouvelles batteries. Le diagnostic a pour objectif de vérifier l'état général des batteries, en s'assurant que le voltage de chaque cellule est identique [40]. Le BMS est conçu en fonction des caractéristiques des batteries telles que :

Tension nominale : Au début d'une décharge tension est plus élevée, et au fur et à mesure que la décharge progresse, la tension diminue.

Capacité : La capacité d'une cellule au lithium, généralement mesurée en ampère-heure (Ah) ou en milliampères-heure (mAh), représente sa capacité à stocker et à fournir de l'énergie électrique. Elle indique la quantité de charge que la cellule peut contenir et la durée pendant laquelle elle peut alimenter un appareil. Par exemple, une pile au lithium avec une capacité de 2000mAh peut théoriquement fournir un courant de 2000 mA pendant une heure.

Résistance interne : La résistance interne d'une batterie est un aspect défavorable car elle induit une baisse de tension à ses bornes à mesure que le courant augmente. Cette diminution de tension est causée par divers facteurs tels que les connexions internes, l'inertie des réactions chimiques, les circuits de protection intégrés et le vieillissement de la batterie. En conséquence, la résistance interne est un indicateur crucial de l'état de santé d'une batterie (SOH). Elle est généralement mesurée en quelques centaines de milliohms ($m\Omega$).

Cycle de vie : Le cycle de vie d'une batterie se réfère au nombre total de cycles de charge-décharge qu'elle peut subir avant d'atteindre la fin de sa durée de vie. Cela affecte directement sa longévité, car chaque cycle contribue à son usure. Lorsque la batterie atteint le nombre maximal de cycles, elle arrive à la fin de sa durée de vie utile. Ainsi, la capacité d'une batterie à résister à de nombreux cycles de charge-décharge est essentielle pour assurer sa fiabilité à long terme [8].

Le centre de collecte

Le centre de collecte rassemble les batteries [41] [39] usagées provenant des centres de service, les stocke en fonction de leur état de santé, puis les transporte vers le centre de recyclage ou de réutilisation selon leur type.

Le centre de réutilisation

Le centre se spécialise dans la remise à neuf, la réutilisation et le démontage des batteries de véhicules électriques. Lorsque ces batteries atteignent 80% de leur capacité nominale, elles ne sont plus adaptées à l'alimentation des VE en raison de leur autonomie réduite. Elles sont alors réutilisées dans d'autres applications telles que le stockage d'énergie renouvelable, les systèmes de télécommunication et la gestion des déchets [38]. Dans le processus de remanufacturing, seules les cellules sont remplacées par des cellules identiques aux autres, assurant ainsi une performance optimale [42]. De plus, l'énergie provenant de sources renouvelables est stockée dans une batterie avant d'être convertie par un convertisseur électronique de puissance approprié pour répondre aux besoins du réseau (en termes de tension, de fréquence et de distorsion harmonique totale admissible). Ce processus garantit une utilisation efficace et durable des batteries tout en contribuant à une transition énergétique [38].

Le centre de recyclage

Les opérations de recyclage des batteries visent à atteindre deux objectifs principaux : prévenir la dispersion des polluants dans l'environnement et valoriser les métaux stratégiques qu'elles contiennent. Initialement, les cellules sont broyées, puis un séparateur mécanique extrait les fractions recyclables de cuivre, de plastique et d'aluminium. Le reste après la séparation, est une poudre noire appelée "Black mass", contenant les oxydes de cobalt, de nickel et de lithium. Ces composés sont ensuite séparés grâce à un procédé physico-chimique appelé l'hydrométallurgie [43].

4.6 Formulation mathématique du problème LRP

L'implémentation du modèle de Problème de Localisation-Routage (LRP) à objectif unique, avec plusieurs véhicules et plusieurs centres de collecte et de service, sous contraintes de capacité, pour le cas d'une petite instance sur le solveur CPLEX est structuré selon la formulation suivante :

Les ensembles :

I : ensemble des centres de services de batteries.

J : ensemble des centres de collecte.
 RT : ensemble de tous les nœuds $I \cup J$.
 V : ensemble des véhicules.
 L : ensemble des centres de recyclage.
 R : ensemble des centres de reuse.
 W : ensemble des centres d'élimination.
 T : type de batterie (80%, 70%, ...)

Les paramètres :

$CAPV_v$: capacité de véhicule v par batterie .
 $CAPCC_j$: capacité de centre de collecte j par batterie.
 $Coutconstr_j$: coût de construction du centre de collecte j en dollar.
 $coutBMS_i$: coût de BMS dans le centre de service EVB i en dollar.
 $coutrecyclage_l$: coût de recyclage de EVB dans le centre de recyclage l en dollar.
 $coutreuse_r$: coût de reutilisation dans le centre de reuse r en dollar.
 $Coutchff$: coût de chauffeur par heure en dollar.
 $coutfuel$: coût de diesel en dollar.
 $coutveh$: coût d'utilisation de véhicule par heure en dollar.
 $coutmaint$: coût de maintenance des véhicules par km en dollar.
 fe : la consommation de diesel par le véhicule à vide par (1/100)km.
 feu : la consommation de diesel par le véhicule chargé par (1/ton.km) .
 Q_i : volume de batteries collectées au centre de service i .
 $POIDS$: poids de batterie en kg.
 TS_{ij} : temps de service entre le centre de service i et le centre de collecte j par heure.
 qnt_{it} : quantité de batteries selon le type t dans le centre de service i .
 d_{ij} : distance entre les points de services i et le centre de collecte j
tel que i dans $I \cup J$ et j dans $I \cup J$ en km.
 d_{jl} : distance entre le centre collecte j et le centre recyclage l
tel que j dans J et l dans L .
 d_{jr} : distance entre le centre collecte j et le centre reuse r
tel que j dans J et r dans R .
 d_{lw} : distance entre le centre de recyclage l et le centre d'élimination w
tel que l dans L et w dans W .
 α : coût unitaire de transport entre le centre de collecte
et le centre de service EVB en dollar.
 β : coût unitaire de transport entre le centre de collecte
et le centre de reuse EVB en dollar.
 γ : coût unitaire de transport entre le centre de collecte

et le centre de recyclage EVB en dollar.
 θ : coût unitaire de transport entre le centre de recyclage et le centre d'élimination.

Les variables de décision :

$AFFECT_{ij}$: variable de décision binaire égale à 1 si le centre de service i est affecté à le centre collecte j , 0 sinon.
 Y_j : variable de décision binaire égale à 1 si le centre de collecte j est ouvert et 0 sinon.
 X_{ijv} : variable de décision binaire égale à 1 si il y'a une route entre centre de service i et le centre de collecte j par la véhicule v et 0 sinon.
 TC_{ijv} : variable de décision entier représente la quantité chargée dans un véhicule.
 $Qrecy_{jl}$: variable de décision entier représente la quantité des batteries transporté depuis le centre de collecte j vers le centre de recyclage l .
 $Qreus_{jr}$: variable de décision entier représente la quantité des batteries transporté depuis le centre de collecte j vers le centre de reuse r .
 U_{RTv} : variable auxiliaire pour l'élimination des sub-tours.

La fonction objective :

La fonction objective vise à minimiser le coût total associé à la construction des centres de collecte, au transport, et les différents opérations du BMS, la réutilisation, le recyclage et le démontage. Elle est définie comme la somme de trois composantes principales : les coûts de transport et d'exploitation (C1), les coûts de traitement des batteries (C2), et les coûts de construction des centres de collecte (C3) :

$$Totalcost = \min(C1 + C2 + C3) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
C1 = & \sum_{v \in V} \sum_{i \in IUJ} \sum_{j \in IUJ} \alpha * X_{ijv} * d_{ij} + \\
& \sum_{j \in J} (\beta * d_{jr}) * Qreus_j + \sum_{j \in J} (\gamma * d_{jl}) * Qrecy_j + \\
& \sum_{j \in J} (\theta * d_{lw} * POIDS * 0.05) * Qrecy_j + \\
& \sum_{v \in V} \sum_{i \in IUJ} \sum_{j \in IUJ} coutfuel * d_{ij} * (fe * X_{ijv} + \\
& feu * TC_{ijv}) + \sum_{v \in V} \sum_{i \in IUJ} \sum_{j \in IUJ} coutveh * X_{ijv} * TS_{ij} \\
& + \sum_{v \in V} \sum_{i \in IUJ} \sum_{j \in IUJ} coutmaint * X_{ijv} * d_{ij} + \\
& \sum_{v \in V} \sum_{i \in IUJ} \sum_{j \in IUJ} Coutchff * X_{ijv} * TS_{ij} \tag{4.2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C2 = & \sum_{i \in I} coutBMS_i * Q_i + \sum_{j \in J} coutrecyclage_l * Qrecy_j + \\
& \sum_{j \in J} coutreuse_r * Qreus_j \tag{4.3}
\end{aligned}$$

$$C3 = \sum_{j \in J} Y_j * Coutconstr_j * (1/(N * 52)) \tag{4.4}$$

Où respectivement voici une description détaillée de chaque composante :

(4.2) représente les coûts de Transport et d'Exploitation qui couvrent les coûts liés au transport des batteries entre différents centres ainsi que les coûts opérationnels des véhicules utilisés :

- Le coût de transport des centres de service et maintenance vers les centres de collectes .
- Le coût de transport des centres de collecte vers le centre de recyclage et vers le centre de réutilisation .
- Le coût de transport de centre de recyclage vers le centre d'élimination .
- Le coût de diesel consommé par les camions .
- Le coût d'utilisation des camions par heure .
- Le coût de maintenance des camions par kilomètre .
- Le coût de chauffeur par heure .

(4.3) représente les coûts de Traitement des Batteries inclut les coûts liés aux différents traitements que subissent les batteries :

- Coût du système de gestion de batterie (BMS) pour chaque centre de service (pondéré par le volume de collecte Q_i)

- Coût de réutilisation et de démontage des batteries .

- Coûts de recyclage des batteries .

(4.4) représente les coûts de construction des centres de collecte. Ils couvrent les coûts fixes associés à l'ouverture des centres de collecte (amorti sur une période de 260 jours ouvrables) ; 260 représente $52 \text{ semaine} * N$; $N=5$ ans est la durée de vie de chaque centre .

Sous suivantes contraintes :

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in I \cup J} X_{ijv} = 1 \quad \forall i \in I \cup J \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} X_{ijv} * Q_i \leq CAPV_v \quad \forall v \in V \quad (4.6)$$

$$\sum_{z \in I \cup J} X_{ziv} - \sum_{k \in I \cup J} X_{ikv} = 0 \quad \forall v \in V, \forall i \in I \cup J \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in I} Q_i * AFFECT_{ij} \leq CAPCC_j * Y_j \quad \forall j \in J \quad (4.8)$$

$$\sum_{m \in I \cup J} X_{imv} + \sum_{n \in I \cup J} X_{jnv} \leq 1 + A_{ij} \quad \forall v \in V, \quad (4.9)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J$$

$$\sum_{j \in J} Y_j \geq 1 \quad (4.10)$$

$$\sum_{v \in V} X_{ijv} \leq AFFECT_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijv} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (4.12)$$

$$U_{iv} - U_{jv} \leq -|RT| * x_{ijv} + |RT| - 1 \quad \forall v \in V, \quad (4.13)$$

$$\forall i \in I \cup J, \forall j \in I \cup J$$

$$\sum_{i \in I} AFFECT_{ij} * qnt_{i1} = Qreus_j \quad \forall j \in J \quad (4.14)$$

$$\sum_{j \in J} AFFECT_{ij} * qnt_{i2} = Qrecy_j \quad \forall j \in J \quad (4.15)$$

$$\sum_{j \in J} AFFECT_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.16)$$

$$\sum_{z \in I \cup J} \sum_{v \in V} TC_{ziv} + Q_i = \sum_{j \in I \cup J} \sum_{v \in V} TC_{ijv} \quad \forall i \in I \cup J \quad (4.17)$$

$$TC_{ijv} \leq (CAPV_v - Q_j) * X_{ijv} \quad \forall i \in I \cup J, \quad (4.18)$$

$$\forall j \in I \cup J, \forall v \in V$$

$$Q_i * X_{ijv} \leq TC_{ijv} \quad \forall i \in I \cup J, \forall j \in I \cup J, \quad (4.19)$$

$$\forall v \in V$$

$$AFFECT_{ij}, X_{ijv}, Y_j \in \{0, 1\} \quad (4.20)$$

$$TC_{ijv}, Qreus_{jr}, Qrecy_{jl} \in \mathbb{N} \quad (4.21)$$

Les contraintes de ce modèle mathématique assurent une gestion efficace et optimisée du réseau de collecte, de transport, et de traitement des batteries des véhicules électriques. La contrainte (4.5), signifie que chaque client doit être inclus dans une route, ce qui garantit que toutes les batteries sont collectées. La Contrainte (4.6), revient au limite de capacité de chaque véhicule, assurant que la quantité totale de batteries transportée ne

dépasse pas leur capacité maximale. La contrainte (4.7), chaque route qui entre dans un nœud doit en sortir, assurant la continuité du trajet des véhicules. La contrainte (4.8), les centres de collecte ont une capacité limitée, et la quantité de batteries reçue ne doit pas dépasser cette capacité à moins que le centre soit effectivement ouvert. La contrainte (4.9), si un véhicule sert un centre de service et passe par un centre de collecte, ce centre de service doit être desservi par le centre de collecte. La contrainte (4.10), au moins un centre de collecte doit être ouvert pour garantir la faisabilité du réseau. La contrainte (4.11), les véhicules ne peuvent être affectés qu'à des centres de collecte ouverts, assurant la cohérence de l'affectation. La contrainte (4.12), chaque véhicule doit commencer et finir sa route dans un seul centre de collecte. (4.13), une contrainte élimine la formation de sous-tours, évitant les trajets inefficaces. La contraintes (4.14) et (4.15), les batteries doivent être correctement assignées aux centres de recyclage ou de réutilisation selon leur type. Les contraintes (4.17),(4.18),(4.19), les flux de véhicules doivent respecter les demandes des clients et les limites de charge des véhicules. La contrainte (4.16), chaque centre de service doit être affecté à un et un seul centre de collecte, garantissant une gestion unique et claire des affectations. (4.20) et (4.21) des contraintes qui assure l'ensemble qui inclut chaque variable de décision .

Ces contraintes combinées permettent d'optimiser le réseau en respectant les capacités et les conditions opérationnelles, tout en minimisant les coûts et en assurant un service efficace et durable.

4.7 La simulation des scénarios

Nous avons réalisé des scénarios pour tester notre modèle à l'aide du logiciel CPLEX version 12.8.0 avec différentes instances :

4.7.1 Scenario 01

Dans le premier scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur trois cartes géographiques comportant chacune 15 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont présentées dans le tableau 17.

Les ensembles sont définis comme suit :

- I : 1 à n
- J : $n + 1$ à m
- RT : 1 à m

Pour ce scénario $n = 12$ et $m = 15$

Test 01 :

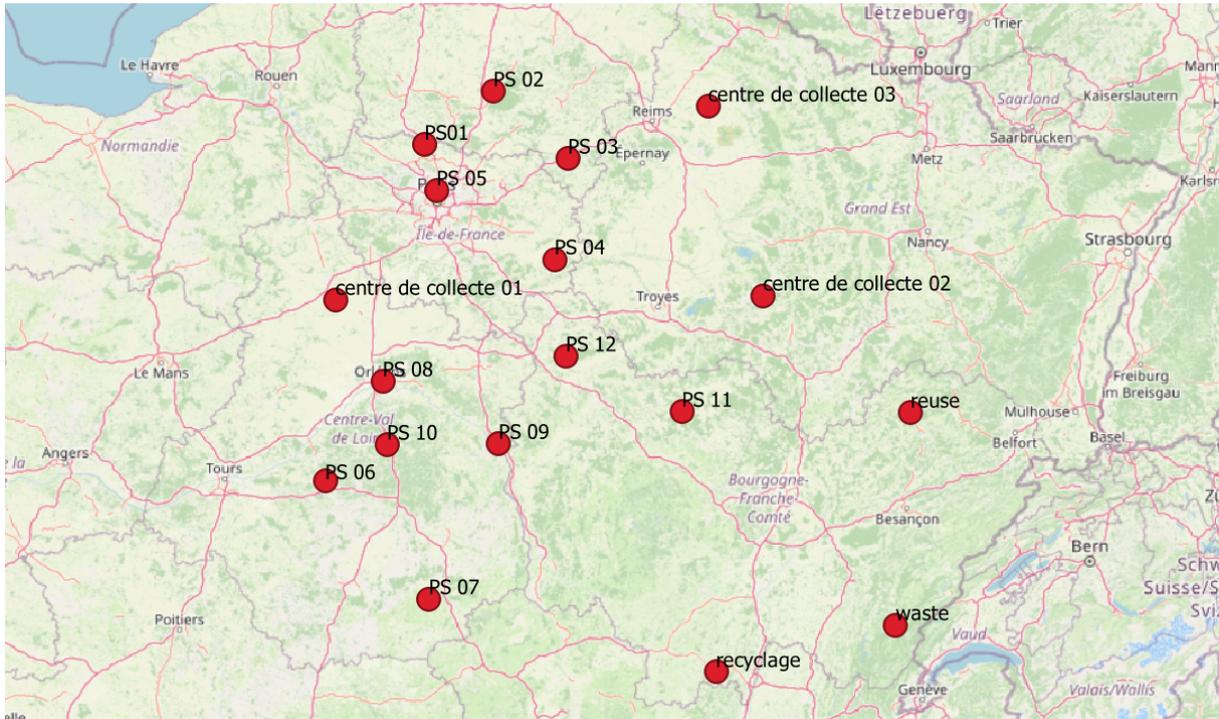


FIG. 4.2 – Carte géographique de 1^{er} test du scénario 1

Les résultats de simulations :

	Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	1246413.771 \$	C1=98862 \$ C2=1145859.872 \$ C3=3079.9 \$	14-2-14 14-12-14 14-5-4-14 13-6-13 14-1-3-14 14-9-11-14 13-8-13 13-7-10-13	Centre de collecte 01 et 02	12 secondes

TAB. 4.1 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 1-

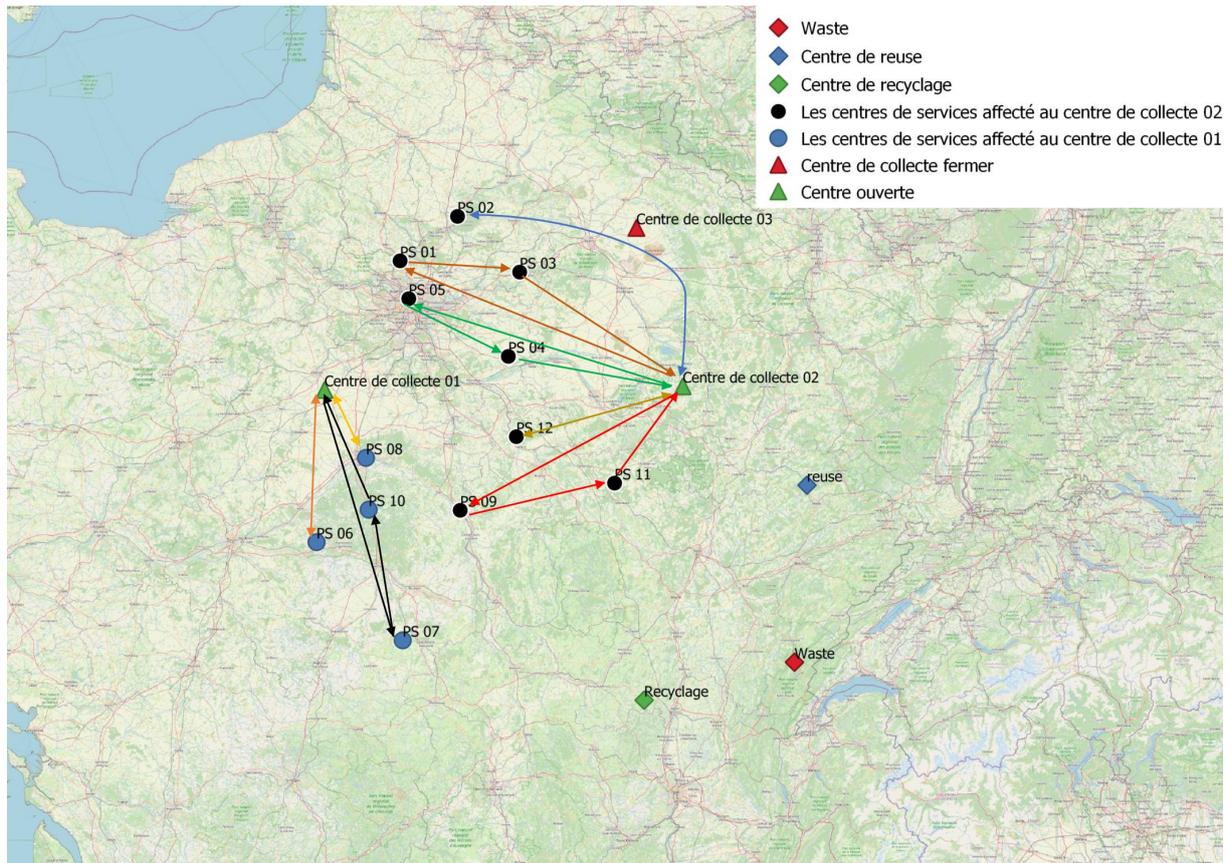


FIG. 4.3 – Représentation de résultat de simulation de 1^{er} test sur la carte géographique du scénario 1

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	13-6-13
	13-8-13
	13-7-10-13
Centre de collecte 02	14-2-14
	14-12-14
	14-5-4-14
	14-1-3-14
	14-9-11-14

TAB. 4.2 – Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 1-

Test 02 :

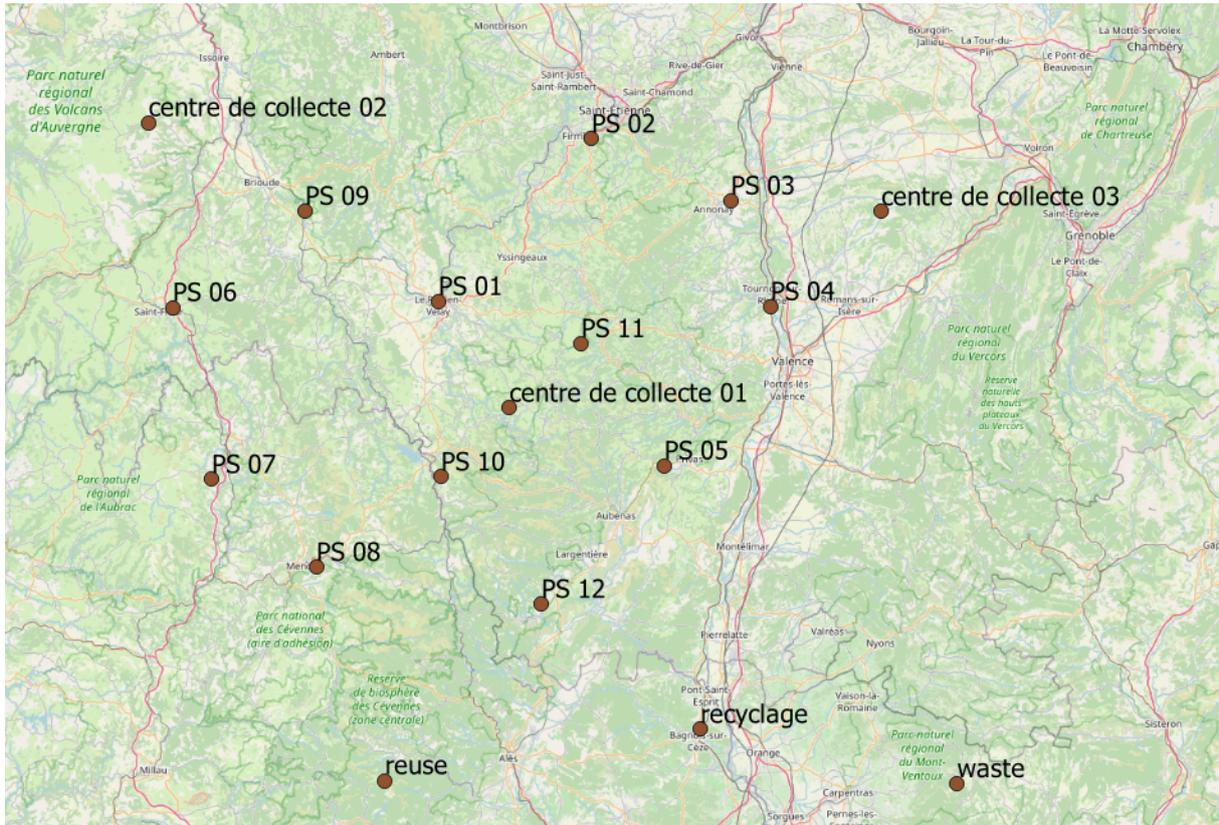


FIG. 4.4 – carte géographique du 2^{eme} test du scénario 1

Les résultats de simulations :

	Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	961752.833 \$	C1=37404 \$ C2=921271.933 \$ C3=3076.9 \$	13-1-10-13 13-12-13 13-8-13 13-4-3-11-13 13-5-13 13-2-13 14-7-6-14 14-9-14	Centre de collecte 01 et 02	7 secondes

TAB. 4.3 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 2-

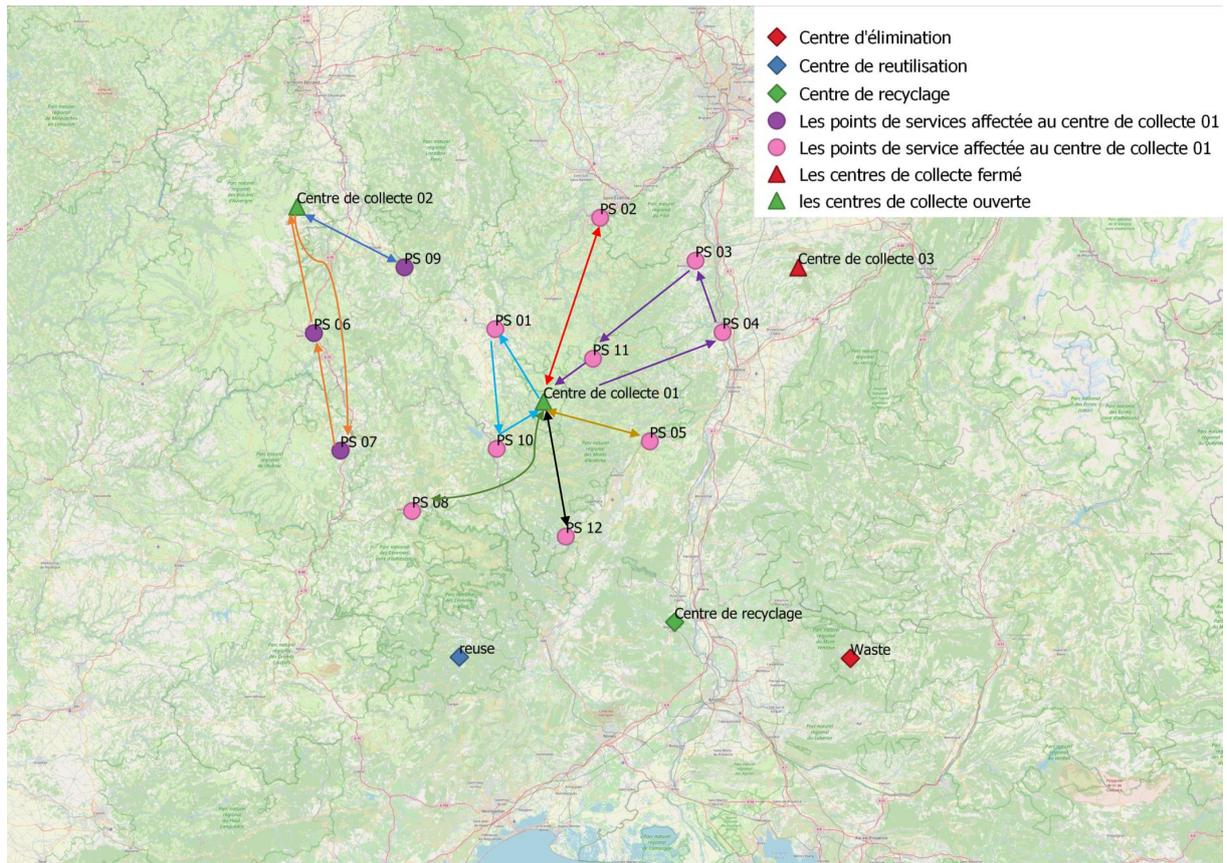


FIG. 4.5 – Représentation de résultat de simulation de 2^{eme} test sur la carte géographique du scénario 1

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	13-1-10-13
	13-12-13
	13-8-13
	13-4-3-11-13
	13-5-13
	13-2-13
Centre de collecte 02	14-7-6-14
	14-9-14

TAB. 4.4 – Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 2-

Test 03 :

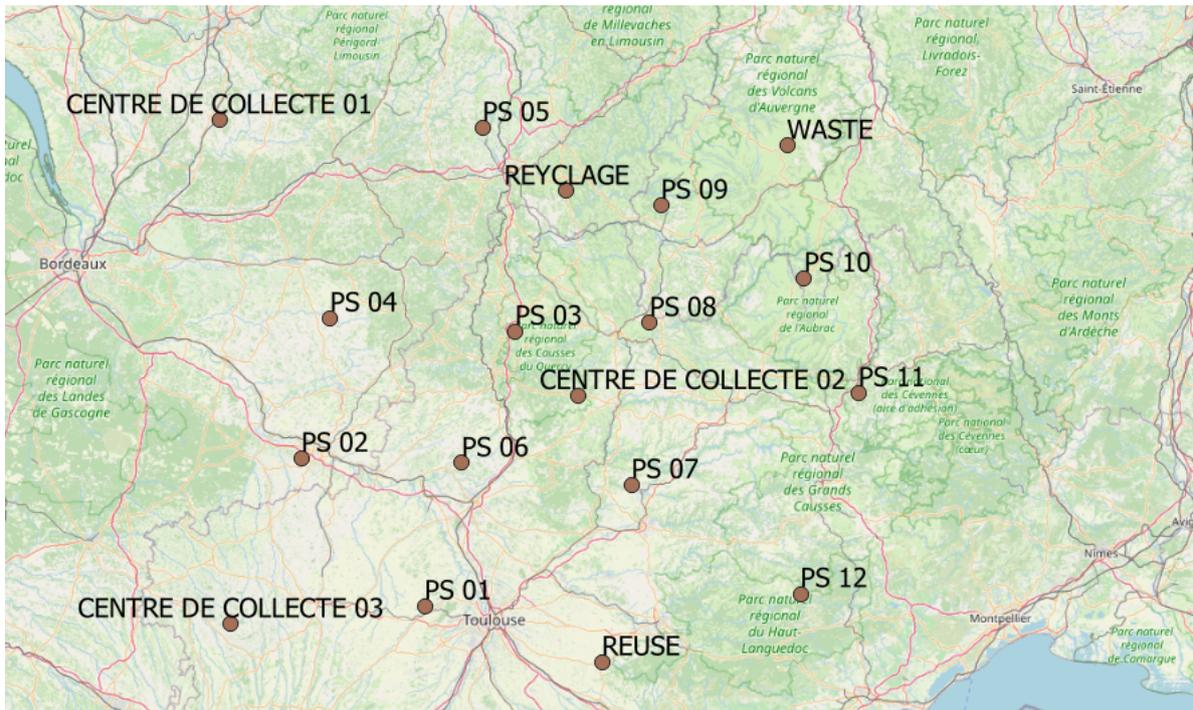


FIG. 4.6 – Carte géographique du 3^{eme} test du scénario 1

Les résultats de simulations :

Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	591822.845 \$	C1=32608 \$ C2=557676.345 \$ C3=1538.5 \$	14-12-7-14 14-11-14 14-10-9-8-14 14-4-5-3-14 14-1-2-6-14	Centre de collecte 03 secondes 02

TAB. 4.5 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 3-

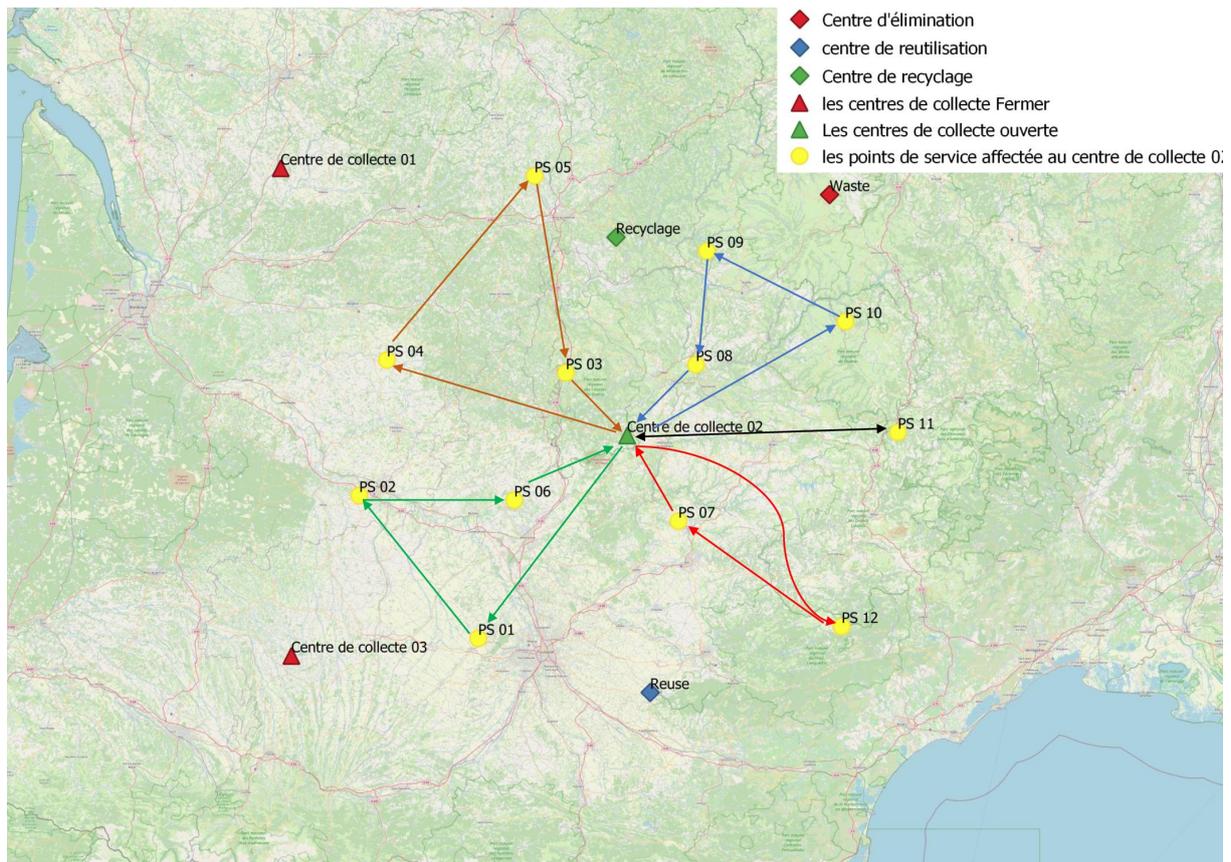


FIG. 4.7 – Représentation de résultat de simulation de 3^{eme} test sur la carte géographique du scénario 1

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 02	14-12-7-14
	14-11-14
	14-10-9-8-14
	14-4-5-3-14
	14-1-2-6-14

TAB. 4.6 – Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 3-

4.7.2 Scenario 02

Dans le premier scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur trois cartes géographiques comportant chacune 22 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont présentées dans le tableau 18.

Les ensembles sont définis comme suit :

- $I : 1 \text{ à } n$
- $J : n + 1 \text{ à } m$
- $RT : 1 \text{ à } m$

Pour ce scénario $n = 18$ et $m = 22$

Test 01 :

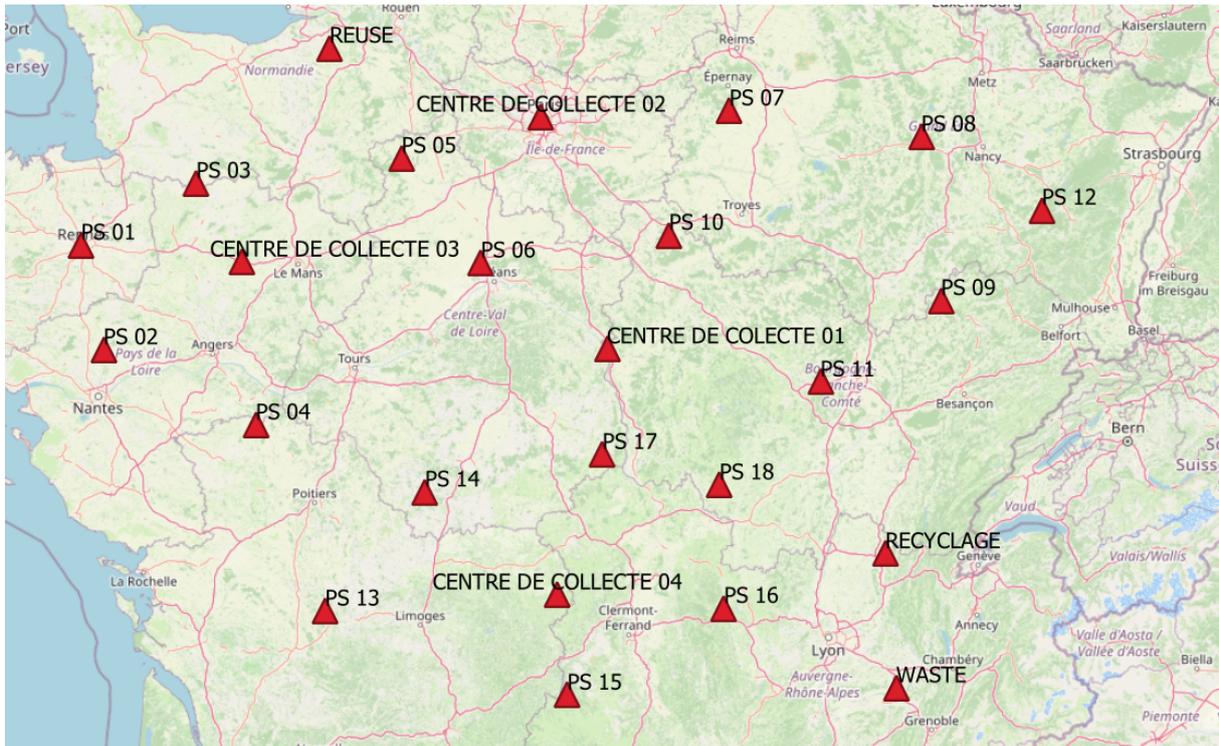


FIG. 4.8 – Carte géographique du 1^{er} test du scénario 2

Les résultats de simulations :

Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	1577930.818 \$	C1=152740 \$	Centre de collecte	30 min
	C2=1420606 \$	21-13-4-21	01,02 et 03	Avec un
	C3=4615.4 \$	21-3-21		gap de
		21-1-2-21		0.05%
		20-12-20		CPLEX
		20-8-20		
		20-6-20		
		20-5-20		
		19-17-19		
		19-15-16-18-		
		19		
		19-14-19		
		19-9-11-19		
		19-7-10-19		

TAB. 4.7 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 1-

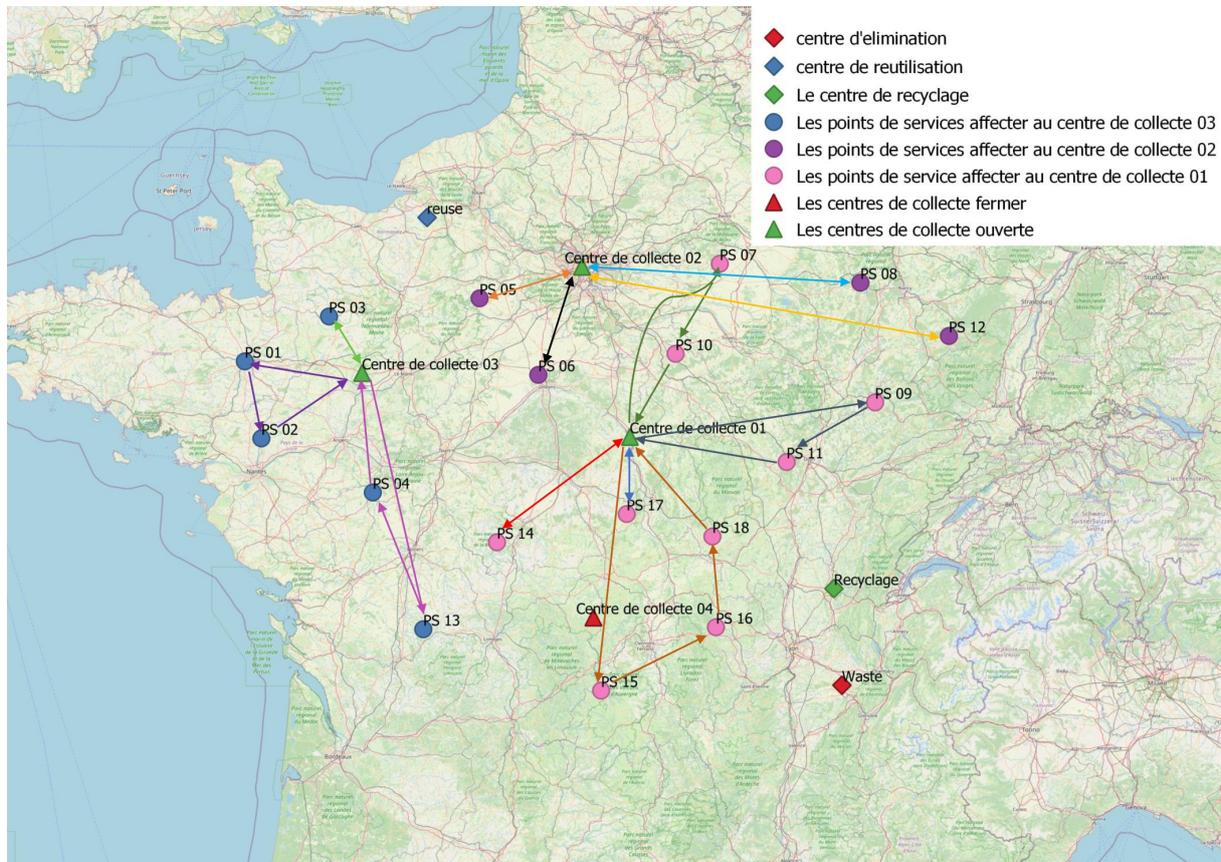


FIG. 4.9 – Représentation de résultat de simulation de 1^{er} test sur la carte géographique du scénario 2

Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	1192247.624 \$ C1=53614 \$ C2=1135605 \$ C3=3076.9 \$	21-17-18-15- 21 21-14-12-13- 21 21-6-21 20-16-10-20 20-11-7-20 20-9-4-20 20-8-20 20-3-5-20 20-1-2-20	Centre de collecte 02 et 03	17 min

TAB. 4.9 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 2-

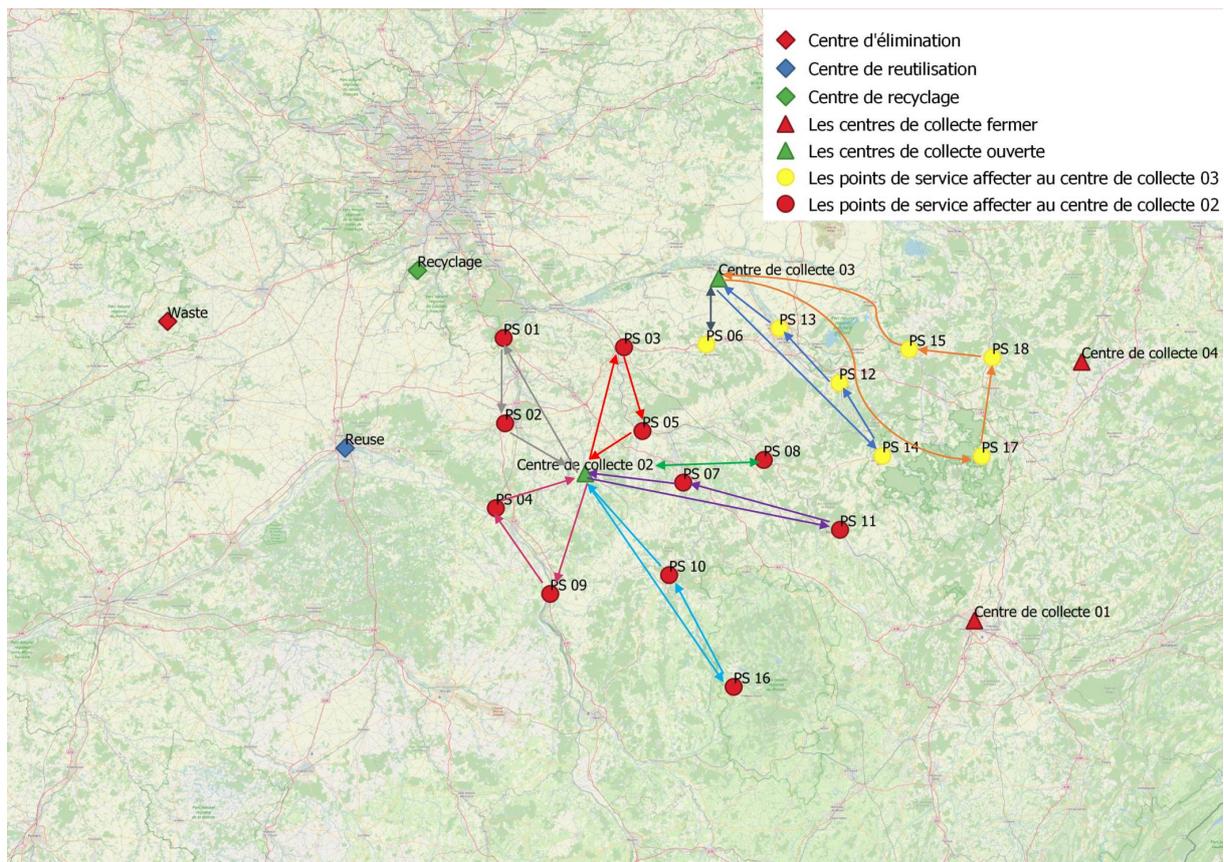


FIG. 4.11 – Représentation de résultat de simulation de 2^{eme} test sur la carte géographique du scénario 2

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 02	20-16-10-20
	20-11-7-20
	20-9-4-20
	20-8-20
	20-3-5-20
	20-1-2-20
Centre de collecte 03	21-17-18-15-21
	21-14-12-13-21
	21-6-21

TAB. 4.10 – Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 2-

Test 03 :

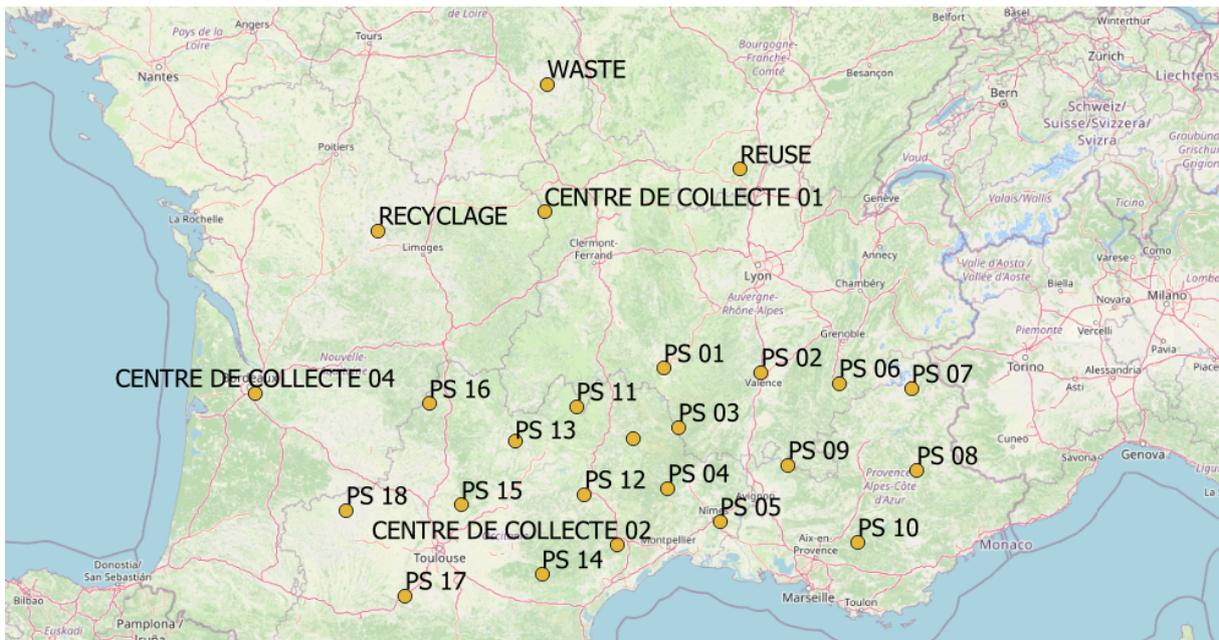


FIG. 4.12 – Carte géographique du 3^{ème} test du scénario 2

Les résultats de simulations :

Fonction objective	Les différents coûts	Routage	Localisation des centres	Temps de simulation
Valeurs	C1=83857 \$ C2=761247.76 \$ C3=3076.9 \$	21-17-14-12- 21 21-11-21 21-10-5-4- 21 21-8-9-3-21 21-7-6-2-21 21-1-21 19-18-16-19 19-15-13-19	Centre de collecte 01 et 03	30 minutes avec un Gap de CPLEX 0.43%

TAB. 4.11 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 3-

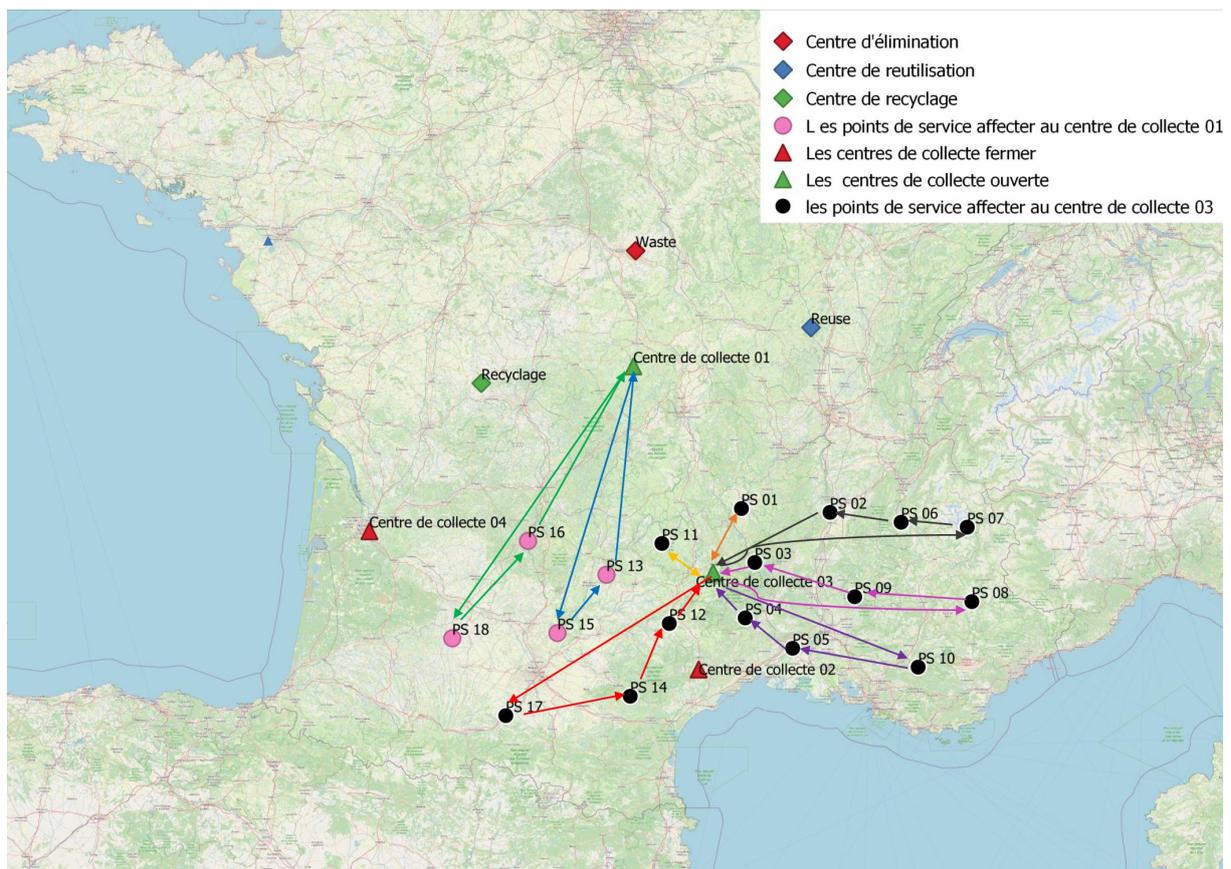


FIG. 4.13 – Représentation de résultat de simulation de 3^{eme} test sur la carte géographique du scénario 2

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	19-18-16-19
	19-15-13-19
Centre de collecte 03	21-17-14-12-21
	21-11-21
	21-10-5-4-21
	21-8-9-3-21
	21-7-6-2-21
	21-1-21

TAB. 4.12 – Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 3-

Récapitulation des résultats :

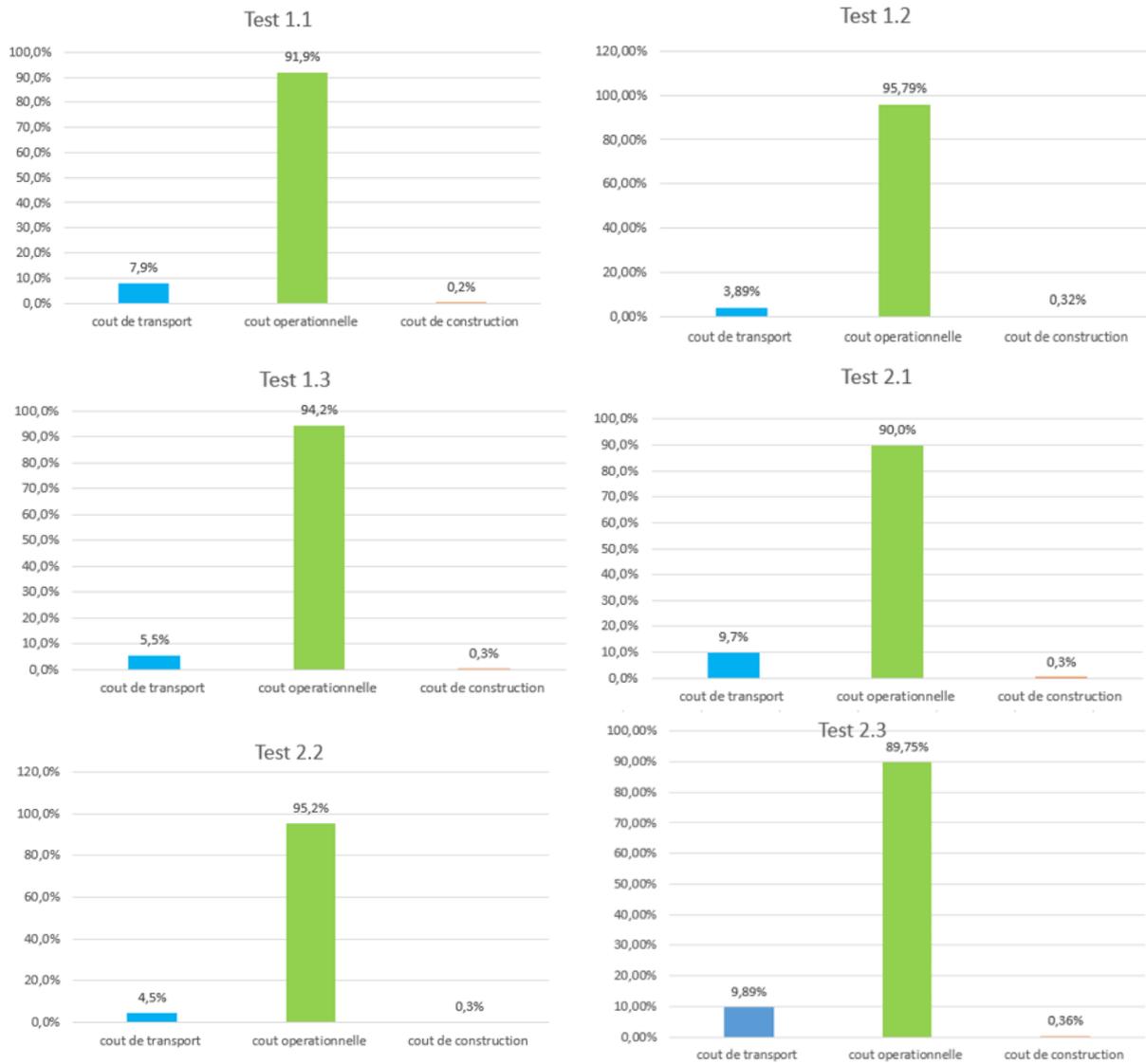


FIG. 4.14 – Répartition des Coûts Stratégiques en Pourcentage du Coût Total

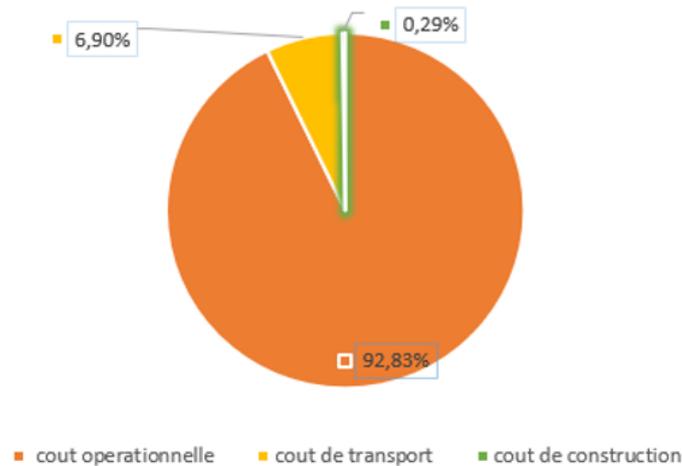


FIG. 4.15 – Répartition des Coûts Stratégiques moyenne en Pourcentage du Coût Total

Les figures 4.14 et 4.15 présentent la répartition des coûts stratégiques en pourcentage du coût total . Elles facilitent l'interprétation des résultats du modèle d'optimisation et la comparaison entre les différents coûts .

4.8 Analyse économique

Dans cette partie, nous avons calculé le chiffre d'affaires de notre réseau de recyclage en utilisant les données représentées dans le tableau ci-dessous. Le chiffre d'affaires est calculé selon la formule suivante :

Chiffre d'affaire = prix de vente de batterie réutilisée * quantité des batteries réutilisée + prix de vente de black mass * poids de batterie recyclée

Les résultats de ce calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tests	Chiffre d'affaire
Test 1.1	2626375.5 \$
Test 1.2	2205822 \$
Test 1.3	1491576 \$
Test 2.1	3240528 \$
Test 2.2	2696044.5 \$
Test 2.3	1903698 \$

TAB. 4.13 – Les chiffres d'affaire de chaque cas

Représentation graphique comparative entre le cout total et le chiffre d'affaire :

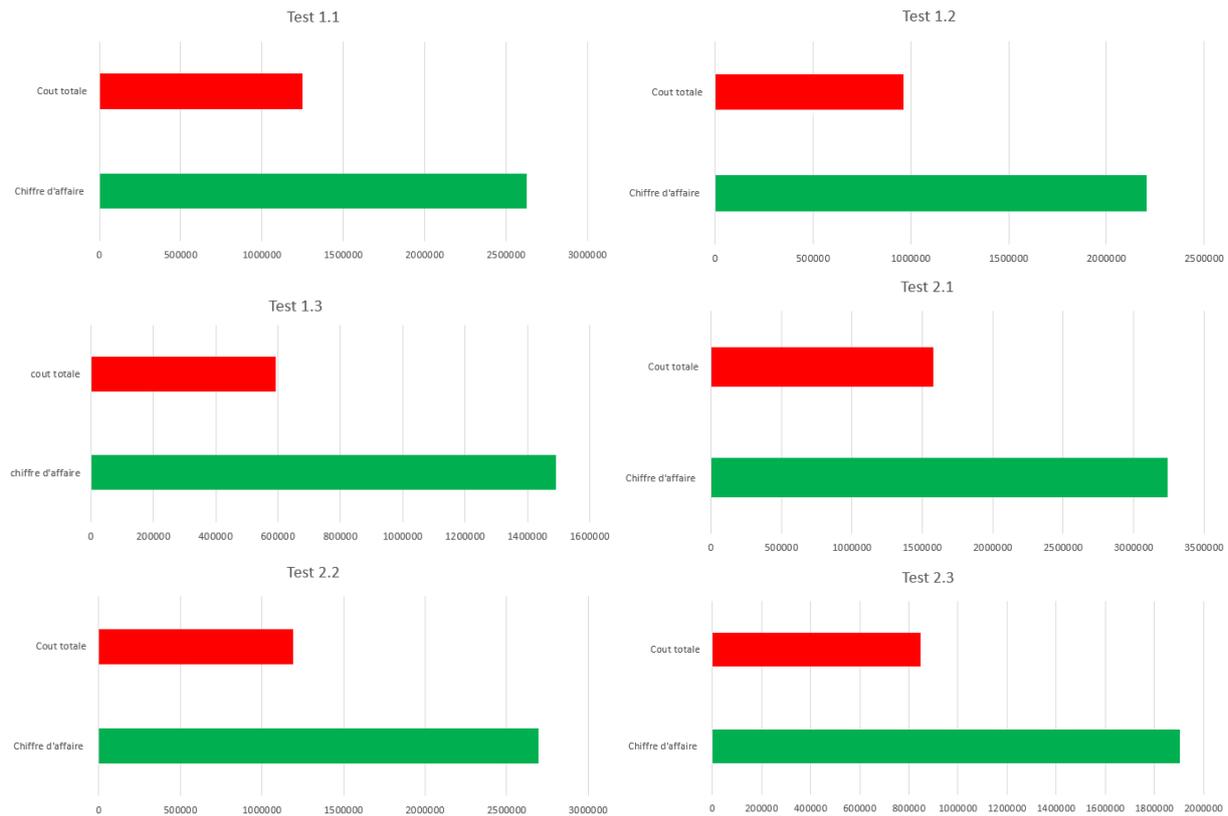


FIG. 4.16 – Comparaison entre le coût totale et le chiffre d'affaire

4.9 Analyse des Résultats et Viabilité Économique du Réseau de Recyclage de EVB

Les figures 4.3 , 4.5 , 4.7 , 4.9 , 4.11 et 4.13 ainsi que les tableaux de 4.1 à 4.11 présentent les résultats des tests effectués pour évaluer l'efficacité de notre modèle développé afin d'optimiser le coût du réseau de recyclage des batteries de véhicules électriques. Ces tests ont été réalisés sur deux scénarios de tailles différentes, chacun comportant trois tests utilisant des jeux de données variés. La différence entre chaque jeu de données réside dans la quantité à collecter dans les points de service, ces quantités étant générées par une loi uniforme avec un minimum de 5 et un maximum de 95. Nous avons également modifié à chaque fois les emplacements géographiques des nœuds, comme le montrent les figures 4.2 , 4.4 , 4.6 , 4.8 , 4.10 et 4.12.

Pour chaque test, nous avons identifié plusieurs paramètres tels que le coût total de recyclage, composé de trois coûts stratégiques : le coût de transport, le coût opérationnel et le coût de construction. Nous avons déterminé la répartition de ces coûts en pourcentage du coût total. En outre, nous avons établi le routage des véhicules et mesuré le temps de simulation de CPLEX.

4.9.1 Aperçu des résultats

Les simulations effectuées sur les différentes instances du problème ont permis d'obtenir des résultats détaillés sur l'optimisation du réseau de recyclage des batteries de véhicules électriques. Les principaux éléments à retenir sont :

- Le coût total du réseau, qui comprend les coûts de transport, de traitement et de construction des centres de collecte, varie entre 591 822 \$ et 1 577 930 \$ selon la taille et la complexité de l'instance.
- La répartition des coûts stratégiques montre que les coûts de opérationnelle (recyclage, réutilisation, etc.) représentent en moyenne 92,83% du coût total, tandis que les coûts de transport et de construction des centres ne représentent que 6,9% et 0,29% respectivement.
- Le nombre de centres de collecte ouverts varie de 2 à 3, en fonction de la demande à satisfaire et de la configuration géographique.
- Le nombre de véhicules utilisés varie de 8 à 12 selon la taille du réseau.
- Les temps de simulation varient de quelques secondes pour les petites instances à 30 minutes pour les plus grandes. Il est important de noter que le temps de simulation augmente avec la taille du réseau.

4.9.2 Chiffre d'affaires et comparaison avec les coûts

Les calculs réalisés ont permis d'estimer le chiffre d'affaires potentiel du réseau de recyclage, en se basant sur les quantités de batteries réutilisées et recyclées, ainsi que sur les prix de vente associés. Les résultats montrent que le chiffre d'affaires varie entre 1 491 576 \$ et 3 240 528 \$ selon les différents scénarios testés. En comparant ces chiffres d'affaires avec les coûts totaux correspondants (entre 591 822 \$ et 1 577 930 \$), on constate que le réseau de recyclage génère des marges bénéficiaires significatives.

4.10 Interprétation des résultats

L'analyse des résultats obtenus permet de tirer plusieurs conclusions intéressantes :

- 1. Viabilité économique du réseau :** Le fait que le chiffre d'affaires soit systématiquement supérieur aux coûts totaux démontre la viabilité économique du modèle de recyclage proposé. Les activités de réutilisation et de recyclage permettent de dégager des marges intéressantes.
- 2. Importance de la valorisation des matériaux :** La vente des matériaux recyclés, tels que le "black mass" contenant les métaux stratégiques, représente une part importante du chiffre d'affaires. Cela souligne l'importance de maximiser la récupération et la valorisation de ces éléments.

- 3. Importance des coûts de opérationnelle :** La prépondérance des coûts de traitement (recyclage, réutilisation, etc.) par rapport aux autres coûts montre que l'optimisation de ces processus est cruciale pour la viabilité économique du réseau. Cela souligne la nécessité de continuer à améliorer les technologies de traitement afin de réduire ces coûts.
- 4. Dimensionnement du réseau :** Le nombre de centres de collecte et de véhicules utilisés semble bien adapté aux différentes instances, permettant de satisfaire la demande tout en maintenant des coûts raisonnables. Cela montre que le modèle développé permet une conception efficace du réseau logistique.
- 5. Performance du modèle d'optimisation :** Les temps de simulation augmentent avec la taille du réseau, rendant la recherche d'une solution optimale très longue. C'est pourquoi nous avons recours aux méta-heuristiques pour obtenir une solution satisfaisante dans un temps réduit, rendant le modèle encore plus pertinent pour des applications pratiques.

4.11 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a permis de développer un modèle mathématique d'optimisation du réseau de recyclage des batteries de véhicules électriques, en intégrant les aspects de l'économie circulaire et de la logistique inverse. Les résultats obtenus à travers les différents scénarios testés démontrent la viabilité économique du modèle proposé. Le chiffre d'affaires généré par la valorisation des batteries réutilisées et recyclées s'avère systématiquement supérieur aux coûts totaux du réseau, mettant en évidence le potentiel de rentabilité de telles activités.

L'analyse approfondie de la répartition des coûts a souligné l'importance capitale des opérations de traitement des batteries, notamment le recyclage et la réutilisation. Cela souligne la nécessité de continuer à améliorer les technologies associées afin de réduire davantage ces coûts et d'optimiser la performance globale du système. Bien que le modèle mathématique développé ait permis d'obtenir des solutions optimales pour les petites et moyennes instances, les temps de calcul deviennent importants pour les réseaux de plus grande taille. C'est pourquoi, dans le chapitre suivant, nous nous concentrerons sur l'utilisation d'une approche métaheuristique pour résoudre ce problème de manière plus efficace et répondre aux exigences des applications pratiques.

L'objectif sera donc d'adapter le modèle actuel à une approche métaheuristique, telle qu'un algorithme génétique, afin de pouvoir traiter des instances de taille plus importante tout en conservant une qualité de solution satisfaisante. Cela permettra de fournir un outil d'aide à la décision encore plus robuste et performant pour la gestion optimisée des

réseaux de recyclage des batteries de véhicules électriques.

L'implémentation de l'algorithme génétique dans le LRP

5.1 Introduction

Dans le domaine de l'optimisation, les métaheuristiques ont gagné une importance considérable en raison de leur capacité à résoudre des problèmes complexes et réalistes, souvent caractérisés par des espaces de recherche vastes et non linéaires. Les métaheuristiques sont des algorithmes d'optimisation qui ne garantissent pas nécessairement une solution optimale, mais qui peuvent fournir des solutions de haute qualité en un temps raisonnable. Parmi ces méthodes, l'algorithme génétique (AG) se distingue par son efficacité et sa flexibilité.

L'algorithme génétique est inspiré des principes de la sélection naturelle et de la génétique biologique. L'une des applications majeures des algorithmes génétiques se trouve dans les problèmes de routage de transport, et plus spécifiquement dans le problème de localisation-routage (LRP). Ce problème est crucial pour les entreprises cherchant à minimiser les coûts logistiques tout en améliorant l'efficacité opérationnelle. En raison de la complexité combinatoire du LRP, les algorithmes exacts peuvent devenir impraticables pour des instances de grande taille. Ici, les algorithmes génétiques offrent une solution prometteuse, permettant de trouver rapidement des solutions viables et efficaces grâce à leur capacité d'exploration globale et d'exploitation locale de l'espace de recherche.

En somme, l'utilisation des métaheuristiques, et en particulier des algorithmes génétiques, s'avère essentielle pour aborder les problèmes de routage de transport tels que le LRP. Leur aptitude à gérer des problèmes complexes et à fournir des solutions optimisées dans des délais raisonnables en fait des outils précieux pour les entreprises et les chercheurs dans le domaine de l'optimisation logistique.

Ce chapitre inclut une partie théorique sur l'algorithme génétique et la résolution

de notre problème LRP avec l'utilisation de cette l'algorithme dans les grandes instances.

5.2 L'algorithme génétique

L'algorithme génétique, une métaheuristique évolutionnaire renommée, a été conceptualisé par John Holland en 1975, s'inspirant des principes biologiques tels que les lois de Mendel et la théorie de l'évolution de Charles Darwin en 1859. Ce processus de recherche de solutions pour un problème donné reproduit le processus évolutif observé chez les organismes vivants.

L'analogie avec la biologie est évidente dans le langage utilisé, où l'on parle de gènes, chromosomes, individus, populations et générations. L'algorithme génétique opère en faisant évoluer une population de solutions potentielles, simulant ainsi le processus de sélection naturelle et de reproduction observé dans la nature.

Un gène : est un ensemble de symboles représentant la valeur d'une variable. Dans la plupart des cas, un gène est représenté par un seul symbole (un bit, un entier, un réel ou un caractère).

Un chromosome : est un ensemble de gènes, présentés dans un ordre donné de manière qui prend en considération les contraintes du problème à traiter. Par exemple, dans le problème du voyageur de commerce, la taille du chromosome est égale au nombre de villes à parcourir. Son contenu représente l'ordre de parcours de différentes villes. En outre, on doit veiller à ce qu'une ville (représentée par un nombre ou un caractère par exemple) ne doit pas figurer dans le chromosome plus qu'une seule fois.

Un individu : est composé d'un ou de plusieurs chromosomes. Il représente une solution possible au problème traité.

Une population : est représentée par un ensemble d'individus (i.e. l'ensemble des solutions du problème).

Une génération : est une succession d'itérations composées d'un ensemble d'opérations permettant le passage d'une population à une autre.

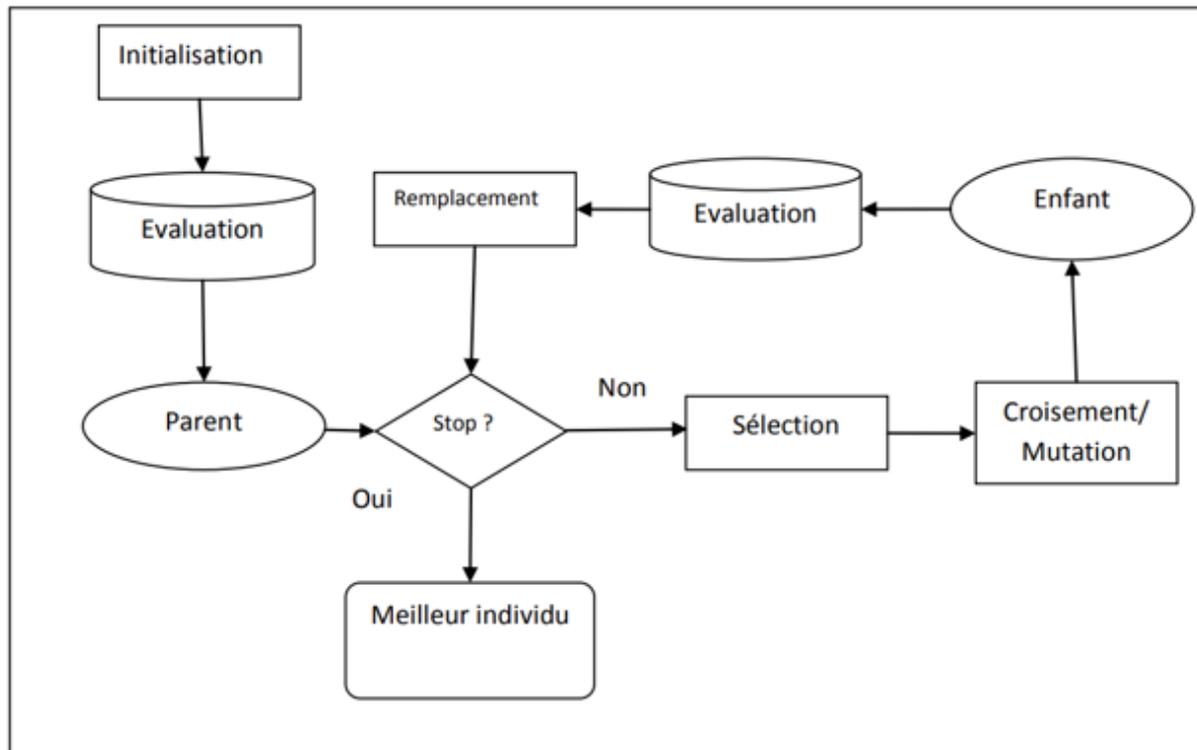


FIG. 5.1 – Démarche d'un algorithme génétique. [Ghali, 2005]

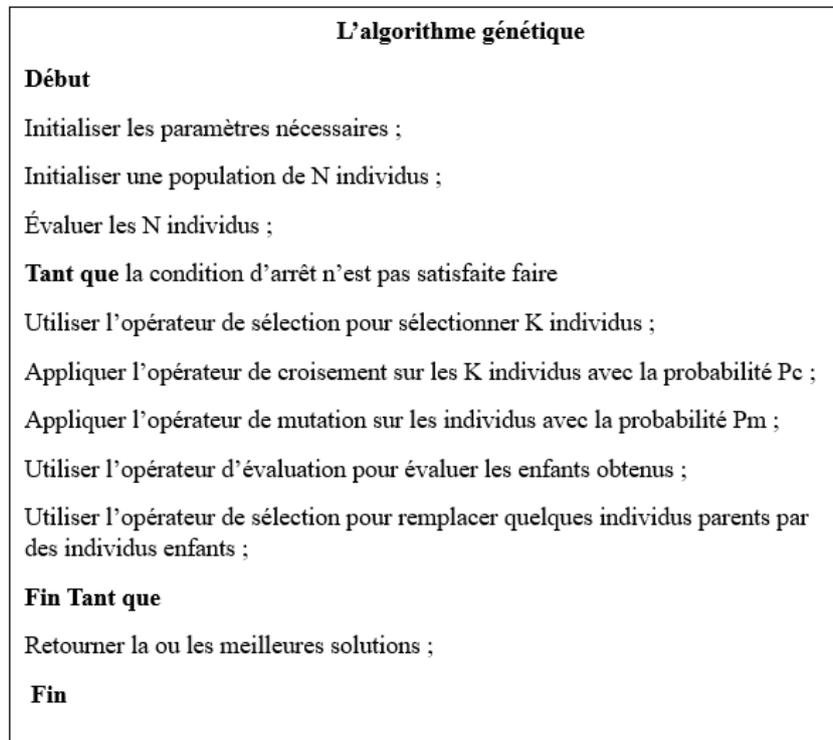
L'algorithme génétique opère sur une population d'individus, évoluant sur plusieurs générations jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. La figure 2.5 illustre un schéma général des étapes du processus de recherche de l'algorithme génétique, qui comprend l'évaluation, la sélection, le croisement, la mutation et le remplacement des individus dans la population.

Au début de la recherche, une population initiale est créée. Les individus sont évalués en fonction de leur qualité grâce à une fonction objectif. Ensuite, les individus les mieux adaptés sont sélectionnés pour se reproduire, via des opérations de croisement et de mutation, créant ainsi une nouvelle génération d'individus. Cette nouvelle génération est évaluée à son tour, et une partie des individus de la population courante est remplacée par cette nouvelle génération, selon des critères de sélection.

Les opérateurs fondamentaux de l'algorithme génétique comprennent le codage des individus, l'initialisation de la population, la sélection, le croisement, la mutation et l'évaluation. Ces opérateurs dépendent de plusieurs paramètres clés, tels que la taille de la population, la probabilité de croisement et de mutation, ainsi que le nombre maximum de générations. Ces paramètres influent sur la performance de l'algorithme, et leur ajustement adéquat est crucial pour obtenir des résultats optimaux. La taille de la population doit être choisie avec soin pour éviter à la fois une convergence prématurée due à un manque de diversité et des coûts de calcul excessifs. Les probabilités de croisement et de mutation impactent la génération de nouvelles solutions et doivent être réglées en consé-

quence. Le nombre maximum de générations agit comme un critère d'arrêt, nécessitant un équilibre entre une convergence efficace et un temps de calcul raisonnable.

L'algorithme suivante représente l'ensemble des étapes de l'algorithme génétique :



L'algorithme génétique est largement utilisé pour résoudre divers problèmes, tant académiques qu'industriels. Son principal avantage réside dans sa capacité à combiner efficacement l'exploitation des solutions et l'exploration de l'espace de recherche, grâce aux opérateurs de croisement et de mutation. Cependant, il présente deux inconvénients majeurs : des temps de calcul importants pour converger vers la solution optimale, bien que l'évolution des ordinateurs puissants ait atténué ce problème, et la nécessité de régler un nombre important de paramètres (taille de la population, paramètres de sélection, de croisement, de mutation, critères d'arrêt, etc.).

5.2.1 Le codage des individus

Le codage binaire : Le codage binaire est une méthode de représentation des solutions où les gènes sont des bits (0 ou 1) et les chromosomes sont des séquences de bits. Cette approche convient aux problèmes binaires tels que le problème MAX SAT ou les problèmes du sac à dos. Par exemple, dans le problème du sac à dos unidimensionnel, chaque objet est représenté par un bit dans une chaîne binaire. Un bit à 1 indique que l'objet est sélectionné, tandis qu'un bit à 0 indique qu'il est écarté. Ainsi, une solution est représentée par une chaîne binaire où les bits à 1 correspondent aux objets sélectionnés.

0	1	1	0	1	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

FIG. 5.2 – Codage binaire d'un chromosome.

Le codage réel : Le codage réel est efficace pour représenter des problèmes de type continu, où les solutions sont exprimées sous forme de nombres réels. Par exemple, dans le codage réel d'un chromosome, chaque élément de la suite représente une valeur réelle, comme illustré dans la figure (5.3) .

0.23	1.25	10.5	0.48	3.00	-20.87
------	------	------	------	------	--------

FIG. 5.3 – Codage réel d'un chromosome.

Pour certains problèmes discrets, le codage entier ou discret est préférable. Dans ce cas, des entiers sont utilisés au lieu de nombres réels. Ce type de codage est particulièrement adapté pour des problèmes comme l'ordonnancement ou le problème du voyageur de commerce. Dans ce dernier, chaque gène représente une ville, et l'ensemble des gènes détermine l'ordre de visite des villes, comme illustré dans la figure (5.4).

2	6	3	7	5	4	10	8	1	9
---	---	---	---	---	---	----	---	---	---

FIG. 5.4 – Codage entier d'un chromosome.

Le codage à caractère : Il s'agit d'utiliser une suite de caractères différents pour représenter le chromosome, comme le montre la figure (5.5) [44].

A	V	-	G	L	M
---	---	---	---	---	---

FIG. 5.5 – Codage à caractère d'un chromosome.

5.2.2 La sélection

Sélection par roulette : La caractéristique remarquable de cette méthode de sélection est le fait qu'elle attribue à chaque individu i de la population actuelle une probabilité $p(i)$ d'être sélectionné, proportionnelle à sa forme physique $f(i)$.

$$p(i) = \frac{f(i)}{\sum_{j=1}^n f(i)}$$

Où n représente la taille de la population en termes du nombre d'individus.

La sélection linéaire par rang (SLR) : SLR est également une variante de sélection par roulette qui tente de surmonter l'inconvénient de la convergence prématurée de l'AG vers un optimum local. Elle est basée sur le rang des individus plutôt que sur leur forme physique. Le rang n est attribué au meilleur individu tandis que le pire individu obtient le rang 1. Ainsi, en fonction de son rang, chaque individu i a la probabilité d'être sélectionné donnée par l'expression :

$$p(i) = \frac{\text{rang}(i)}{n \cdot (n - 1)}$$

La sélection par tournoi : La sélection par tournoi est une variante des méthodes de sélection basées sur le rang. Son principe consiste à sélectionner au hasard un ensemble de k individus. Ces individus sont ensuite classés en fonction de leur valeur adaptative relative et l'individu le plus apte est sélectionné pour la reproduction. L'ensemble du processus est répété n fois pour l'ensemble de la population [45]. Par conséquent, la probabilité que chaque individu soit sélectionné est donnée par l'expression :

$$p(i) = \begin{cases} \frac{c_{n-1}^{k-1}}{c_n^k} & \text{if } i \in [1, n - k - 1] \\ 0 & \text{if } i \in [n - k, n] \end{cases}$$

5.2.3 Les opérateurs de croisement

Les opérateurs de croisement sont des éléments fondamentaux dans les algorithmes génétiques et d'autres techniques d'optimisation inspirées de la biologie. Leur rôle est de combiner les caractéristiques de deux solutions parentes pour créer de nouvelles solutions potentiellement meilleures. Ces opérateurs simulent le processus de reproduction naturelle, favorisant ainsi l'évolution et l'amélioration des solutions au fil des générations. Grâce à leur capacité à explorer l'espace des solutions de manière efficace, les opérateurs de croisement jouent un rôle crucial dans la résolution de problèmes complexes.

Le croisement 1-point : consiste à choisir un seul point de coupure, puis échanger les fragments situés après ce point de coupure. Comme le montre la figure (5.6).

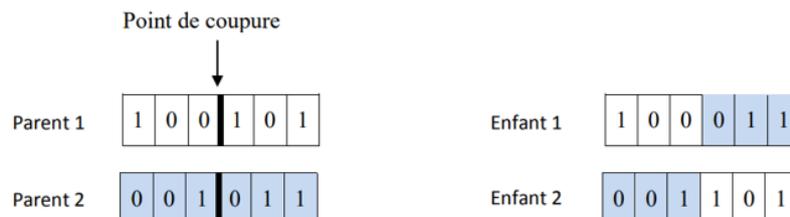


FIG. 5.6 – Croisement 1-point

Le croisement 2-point : consiste à choisir deux points de coupure, puis échanger les fragments situés entre ces deux points comme le montre la figure (5.7) .

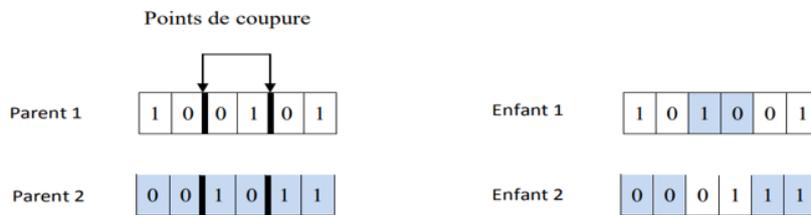


FIG. 5.7 – Croisement 2-points.

Order crossover (OX) : L'opérateur OX agit comme suit : il copie une partie du chromosome enfant à partir du premier parent et construit la partie restante en suivant l'ordre des sommets dans le deuxième parent. Plus précisément, deux points de coupure sont sélectionnés aléatoirement, et la partie du premier parent située entre ces points de coupure est copiée dans l'enfant. Les positions restantes dans l'enfant sont ensuite remplies une par une, en commençant après le deuxième point de coupure, en considérant les sommets des clients dans l'ordre trouvé dans le deuxième parent (en revenant à la liste de départ une fois atteinte la fin de la liste).

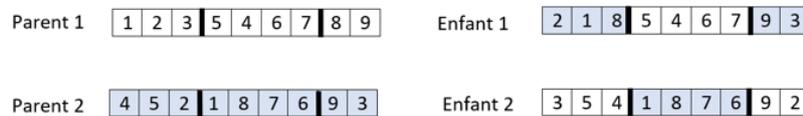


FIG. 5.8 – Order crossover

Croisement Partiellement mappée (PMX) : Le Partially Mapped Crossover (PMX) est un opérateur de croisement utilisé dans les algorithmes génétiques pour les chromosomes à codage par permutation. Il échange une section entre deux parents pour créer de nouveaux descendants tout en préservant l'ordre des gènes. Ce processus implique la sélection de points de coupure, la copie d'une section intermédiaire, et le placement des gènes restants en suivant l'ordre des parents. En inversant ce processus, un deuxième descendant est créé. Ainsi, le PMX permet de maintenir la diversité génétique tout en préservant les caractéristiques des parents [46].

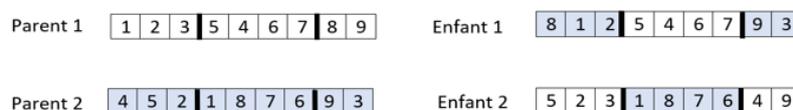


FIG. 5.9 – Croisement Partiellement mappée .

5.2.4 La mutation

L'opérateur de mutation permet d'apporter des modifications partielles (légères) aux chromosomes avec une certaine probabilité très faible. L'objectif de l'opérateur de mutation est d'aider l'algorithme à échapper au problème de stagnation de la recherche causé par les optima locaux. Il permet d'explorer l'espace de recherche en apportant à l'algorithme la possibilité de couvrir la totalité de l'espace de recherche. Les opérateurs de mutation les plus utilisés sont : mutation par échange, mutation par inversion ...

5.3 L'état de l'art

Rybickova et Burketova [47] ont proposé une solution au problème de localisation-routage en utilisant un algorithme génétique avec le langage Julia. L'objectif était de minimiser le coût total. L'intégration de l'algorithme génétique avec les fonctionnalités avancées de Julia a permis d'obtenir une solution optimale, offrant une résolution efficace et rapide. Cette approche a montré son efficacité dans la résolution de problèmes de localisation et de routage dans la logistique.

NGUYEN, PRINS et PRODHON [48] ont étudié le problème de localisation-routage à deux échelons en utilisant une approche hybride combinant un algorithme mémétique (MA) et un algorithme mémétique hybridé avec le recuit simulé (SAMA). L'objectif était de minimiser le coût total. Les résultats ont montré que le SAMA surpassait le MA et d'autres méthodes existantes en termes de coût des solutions trouvées, de temps de calcul et d'efficacité globale, positionnant ainsi le SAMA comme l'algorithme le plus efficace pour résoudre ce problème complexe.

Un autre travail de recherche s'est concentré sur l'optimisation des coûts de transport, de la construction de centres de collecte, des coûts d'élimination et des émissions de dioxyde de carbone dans le contexte des déchets pharmaceutiques. Les auteurs ont utilisé l'optimisation par essaims de particules (OPS) et l'algorithme génétique (GA). Les résultats ont indiqué que l'AG était plus performante que l'OPS en termes d'objectifs et de résultats, l'OPS étant particulièrement adapté pour explorer un grand espace de recherche tandis que l'AG est efficace pour trouver des solutions optimales [49].

En outre, une étude a proposé un algorithme génétique amélioré (IGA) pour optimiser le coût total de la chaîne d'approvisionnement dans le problème de location-routing. L'objectif était de minimiser les coûts de transport, de détention des stocks et de départ des véhicules. L'IGA utilise un algorithme génétique sur un nombre spécifié de générations, suivi d'une étape d'amélioration pour affiner les solutions. Cette méthode a montré des résultats prometteurs dans l'optimisation des coûts de la chaîne d'approvisionnement [50].

Pour le problème de localisation-routage régional pour la collecte des déchets, une méthode hybride combinant l'algorithme génétique avec le recuit simulé a été proposée.

L'objectif était de minimiser le coût total en déterminant les dépôts à ouvrir et en planifiant les itinéraires des véhicules. Cette méthode hybride permet un équilibre entre l'exploration et l'exploitation, évitant les optima locaux et améliorant les solutions générées par l'algorithme génétique [51].

Enfin, une approche utilisant un algorithme génétique avec une recherche locale itérative (ILS) a été développée pour résoudre le problème de localisation-routage. L'objectif était de minimiser le coût total d'ouverture des dépôts et de desserte des clients. Cette méthode hybride coordonne efficacement les décisions de localisation et de routage, offrant des solutions optimales et efficaces pour ce problème complexe [52].

5.4 La résolution de problème LRP par AG

Le problème de localisation et de routage est divisé en deux sous-problèmes : le problème de localisation des centres et le problème de routage des véhicules. Pour aborder ce problème, nous avons proposé d'utiliser un algorithme génétique. Voici une description détaillée de notre approche génétique :

5.4.1 La représentation du chromosome

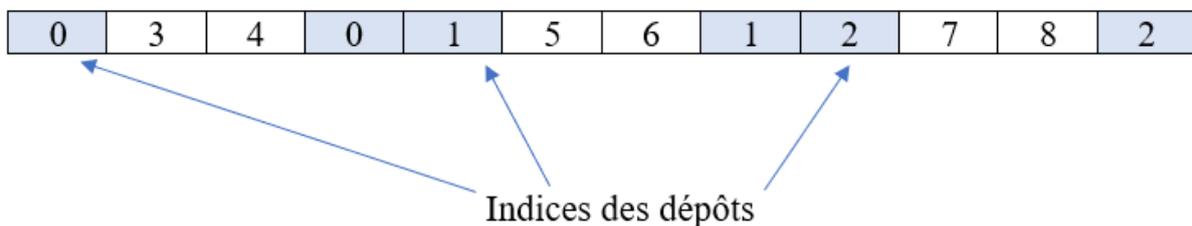


FIG. 5.10 – La représentation du chromosome

Le chromosome (5.10) dans notre problème de location routing problem (LRP) est une séquence de nombres représentant les routes des véhicules. Chaque chromosome contient des séquences où les véhicules partent d'un entrepôt, visitent une série de clients, puis retournent à l'entrepôt.

Par exemple :

Le chromosome $[0, 3, 4, 0, 1, 5, 6, 1, 2, 7, 8, 2]$ signifie que :

- Un véhicule part de l'entrepôt 0, visite les clients 3 et 4, puis retourne à l'entrepôt 0.
- Un autre véhicule part de l'entrepôt 1, visite les clients 5 et 6, puis retourne à l'entrepôt 1.
- Un troisième véhicule part de l'entrepôt 2, visite les clients 7 et 8, puis retourne à l'entrepôt 2.

- Les entrepôts (0, 1, 2) et les clients (3, 4, 5, *etc.*) sont représentés par des entiers, et chaque route commence et se termine par un entrepôt.

5.4.2 Le fonctionnement de notre génétique

Notre algorithme génétique comporte plusieurs étapes, détaillées comme suit :

1. Génération de la population initiale :

La génération de la population initiale utilise une heuristique qui sélectionne aléatoirement un dépôt, puis trie les clients par demande décroissante afin d'optimiser le chargement des véhicules. Chaque véhicule dessert les clients en respectant les capacités des véhicules et des dépôts. Les routes sont construites jusqu'à ce que tous les clients soient desservis ou que le nombre maximal de véhicules soit atteint, garantissant ainsi des solutions viables dès le départ.

2. Calcul de la fitness :

Dans cette partie, nous calculons le coût total de chaque solution.

3. Reconstruction des chromosomes :

Dans cette étape, nous éliminons les indices des dépôts utilisés dans le chromosome pour simplifier l'utilisation de l'opérateur de croisement et de mutation. Dans l'exemple suivant on a les indices des dépôts [0, 1, 2] :

4. Reconstruction des chromosomes :

Dans cette étape, nous éliminons les indices des dépôts utilisés dans le chromosome pour simplifier l'utilisation de l'opérateur de croisement et de mutation. Dans l'exemple suivant on a les indices des dépôts [0, 1, 2] :

0	3	4	0	1	5	6	1	2	7	8	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Après l'élimination des indices des dépôts, nous obtenons le chromosome reconstruit suivant :

3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---

5. Sélection des parents :

Nous utilisons une méthode de sélection de type roulette basée sur l'aptitude des chromosomes, favorisant ceux ayant une meilleure performance (meilleur score).

6. Croisement :

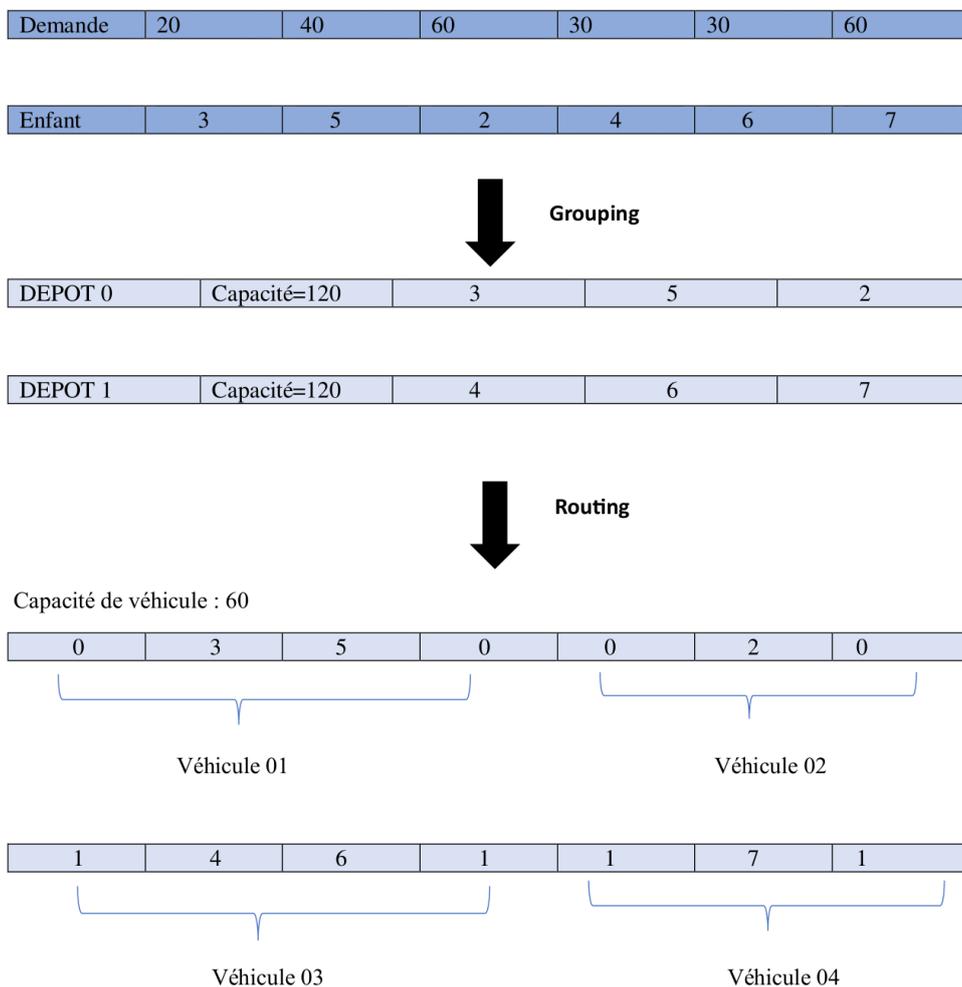
Le croisement, effectué via l'opérateur de Partially Mapped Crossover (PMX), combine des parties des chromosomes parents tout en préservant l'ordre des gènes (voir la figure (5.9)).

7. Mutation :

Nous avons utilisé la mutation par échange, qui sélectionne deux points aléatoires dans le chromosome et les intervertit.

8. Restauration des dépôts :

Dans cette partie, nous réintégrons les dépôts supprimés au début et recalculons la fitness des nouveaux enfants. Cette méthode est expliquée en détail ci-après :



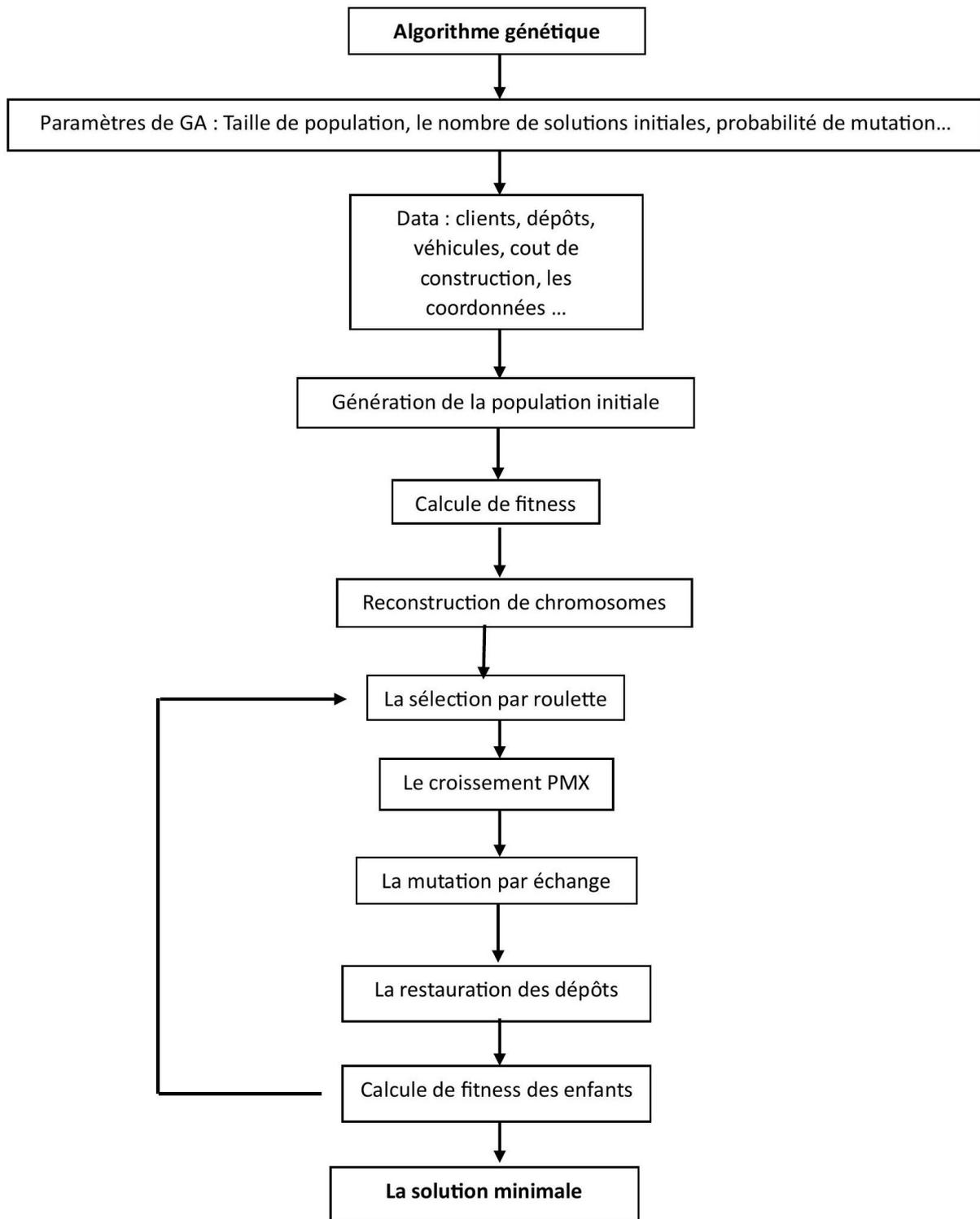
La méthode de restauration des dépôts vise à organiser une solution de tournée de véhicules en respectant les capacités des dépôts et des véhicules (méthode de correction), ainsi que les demandes des clients. Elle commence par créer une liste des dépôts disponibles avec leurs capacités, lesquels sont mélangés de manière aléatoire pour varier les solutions possibles.

Ensuite, la séquence initiale des clients est divisée en sous-séquences, chaque sous-séquence étant associée à un dépôt et ne dépassant pas sa capacité. Lorsqu'un client est rencontré, sa demande est vérifiée par rapport à la capacité restante du dépôt actuel. Si la capacité le permet, le client est ajouté à la sous-séquence en cours ; sinon, un nouveau dépôt est choisi et une nouvelle sous-séquence est créée.

Pour chaque sous-séquence, des routes de véhicules sont définies en s'assurant que la capacité de chaque véhicule n'est pas dépassée. Chaque route commence et se termine au dépôt correspondant, et les clients sont ajoutés tant que la capacité le permet.

Enfin, toutes les routes sont assemblées pour former la solution finale, qui est ensuite retournée. Cette solution respecte les contraintes de capacité des dépôts et des véhicules, et satisfait les demandes des clients de manière efficace. Nous nous sommes inspirés de cette méthode par l'article écrit par William Hoa et al [53].

Schéma récapitulative de fonctionnement de l'algorithme génétique :



5.5 Résultat de l'exécution du l'AG

5.5.1 Scénario 01

Dans le premier scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur trois cartes géographiques comportant chacune 15 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont

présentées dans le tableau 17.

Les ensembles sont définis comme suit :

- $I : 1 \text{ à } n$
- $J : n + 1 \text{ à } m$
- $RT : 1 \text{ à } m$

Pour ce scénario $n = 12$ et $m = 15$

Test 01 :

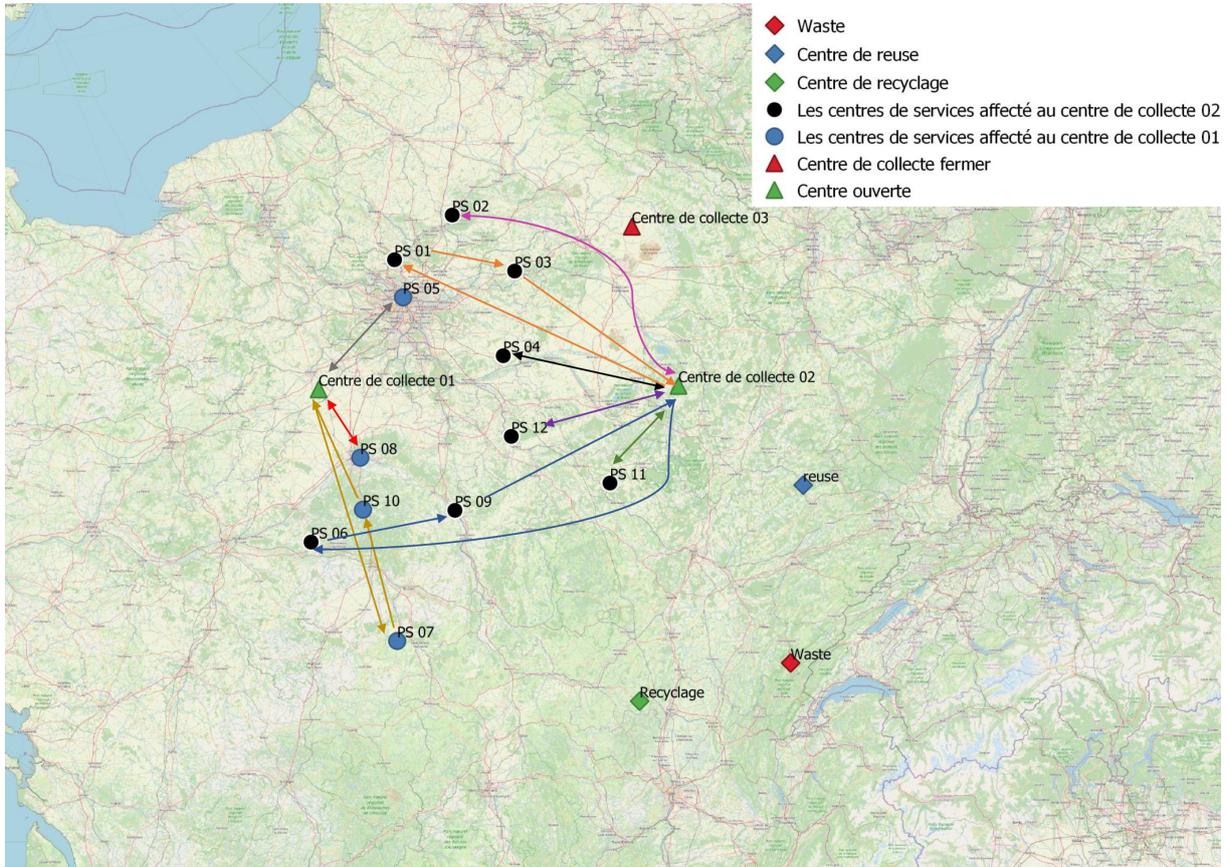


FIG. 5.11 – Carte géographique de résultat du 1^{er} test -scénario 1-

Les résultats de simulations :

	Fonction objective	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	1248935.08 \$	Centre 1 et 2	14-2-14 14-6-9-14 14-11-14 14-12-14 14-1-3-14 14-4-14 13-7-10-13 13-8-13 13-5-13	5000	1 ^{er} essai	3 minute

TAB. 5.1 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 1- avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	13-7-10-13
	13-8-13
	13-5-13
Centre de collecte 02	14-2-14
	14-6-9-14
	14-11-14
	14-12-14
	14-1-3-14
	14-4-14

TAB. 5.2 – Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 1- avec l'AG

Test 02

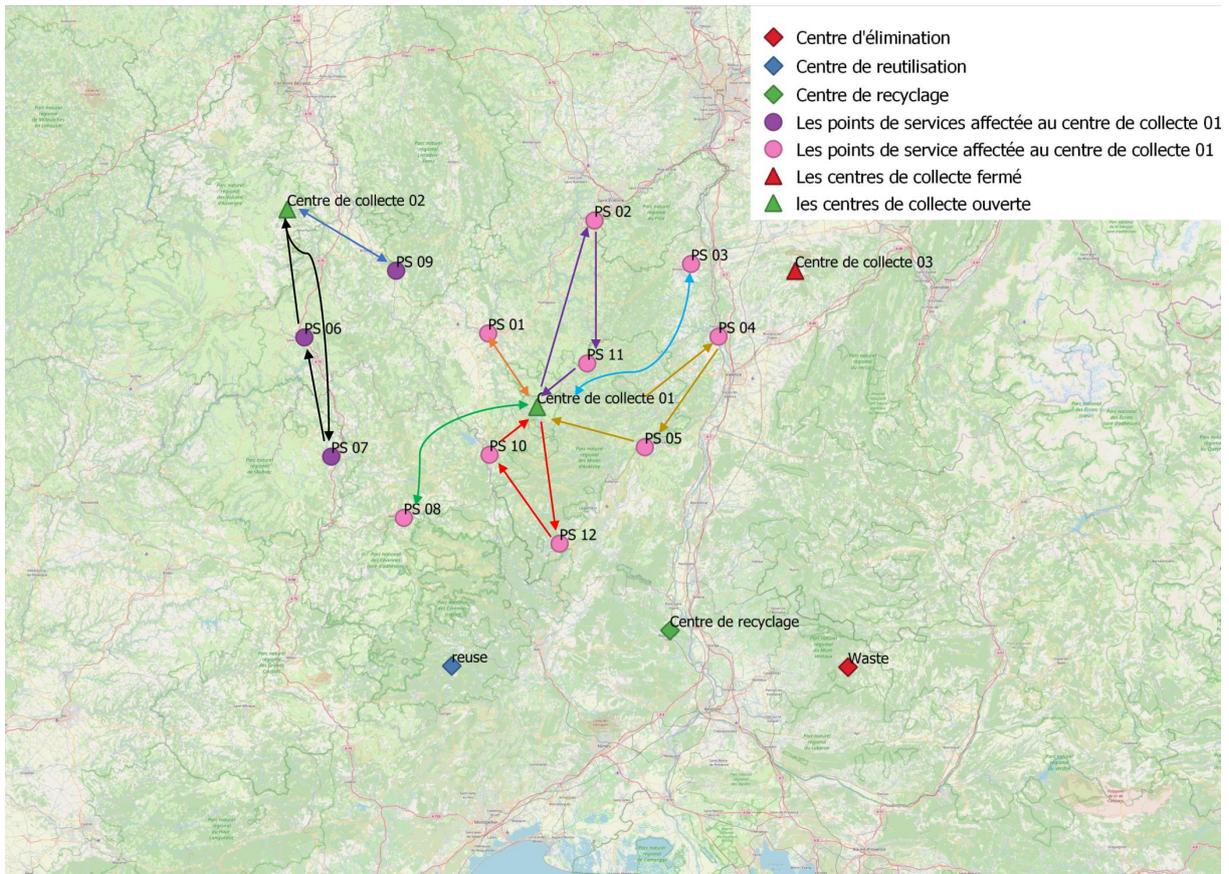


FIG. 5.12 – Carte géographique de résultat du 2^{eme} test -scénario 1-

Les résultats de simulations :

Fonction	La				Temps	
objectif	localisation	Routage	Itérations	Essai	d'exécution	
Valeurs	961969.9 \$	Centre 1 et	13-12-10-13	5000	2 ^{eme}	3 minute
		2	13-2-11-13			
			13-1-13			
			13-3-13			
			13-8-13			
			13-4-5-13			
			14-7-6-14			
			14-9-14			

TAB. 5.3 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 2- avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	13-12-10-13
	13-2-11-13
	13-1-13
	13-3-13
	13-8-13
	13-4-5-13
Centre de collecte 02	14-7-6-14
	14-9-14

TAB. 5.4 – Les résultats de variable de décision du scénario 1 -Test 2- avec l'AG

Test 03

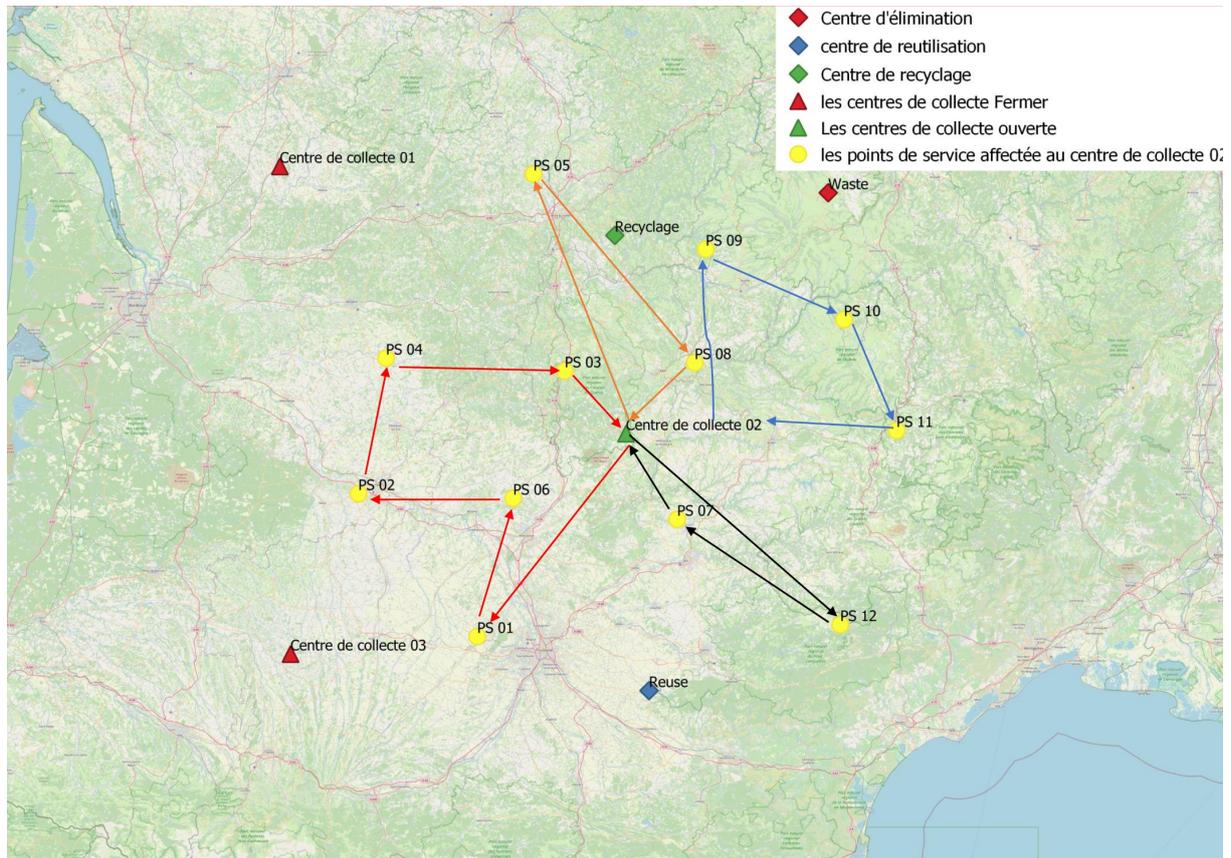


FIG. 5.13 – Carte géographique de résultat du 3^{ème} test -scénario 1-

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	594720.85 \$	Centre 2	14-1-6-2-4-3-14 14-9-10-11-14 14-12-7-14 14-5-8-14	5000	1 ^{ème}	3 minute

TAB. 5.5 – Les résultats de simulation de scénario 1 -Test 3- avec l'AG

5.5.2 Scénario 02

Dans le deuxième scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur trois cartes géographiques comportant chacune 22 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont présentées dans le tableau 18 .

Les ensembles sont définis comme suit :

- $I : 1 \text{ à } n$
- $J : n + 1 \text{ à } m$
- $RT : 1 \text{ à } m$

Pour ce scénario $n = 18$ et $m = 22$

Test 01

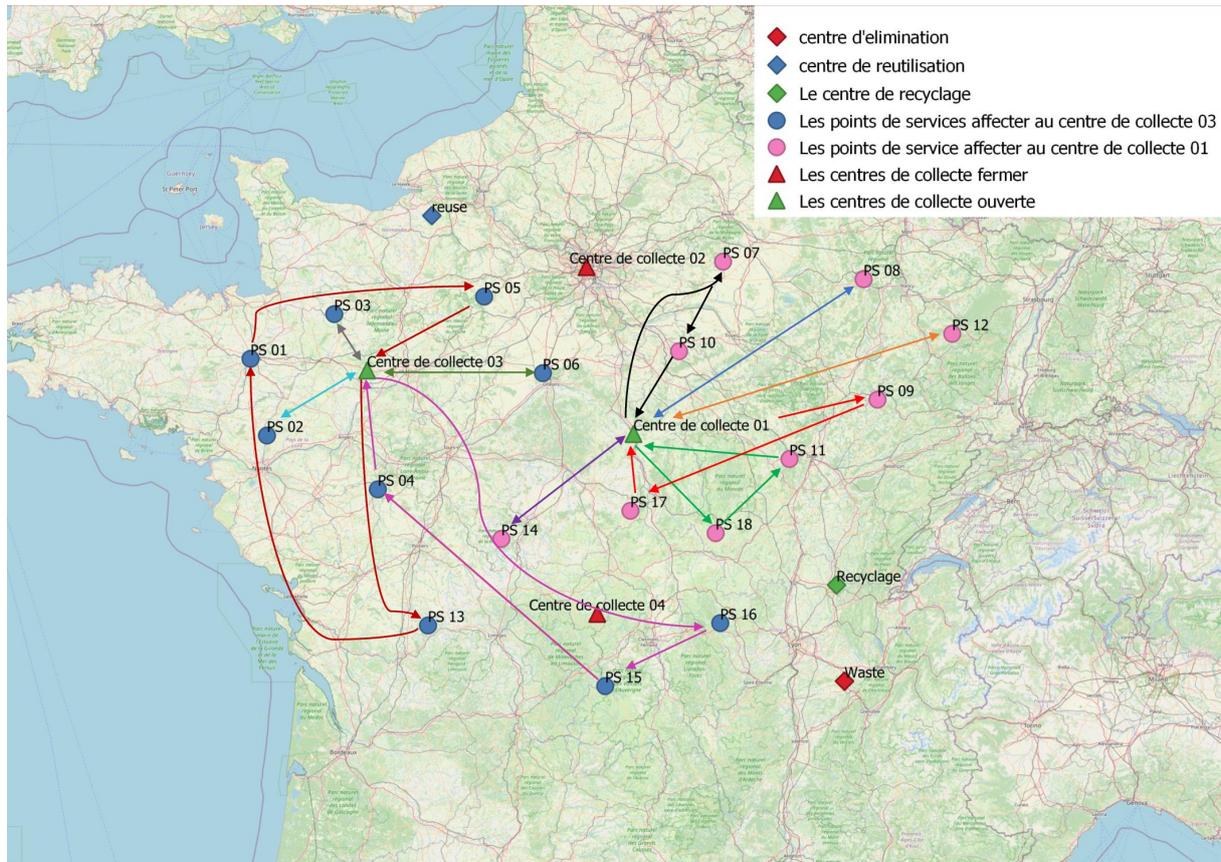


FIG. 5.14 – Carte géographique de résultat du 1^{er} test -scénario 2-

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	1586886.04 \$	Centre 1 et 3	19-14-19 19-8-19 19-7-10-19 19-18-11-19 19-12-19 19-9-17-19 21-6-21 21-2-21 21-3-21 21-16-15-4-21 21-13-1-5-21	5000	3 ^{ème}	7 minute

Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
----------------------	----------------------	---------	------------	-------	---------------------------

TAB. 5.6 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 1- avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 01	19-14-19
	19-8-19
	19-7-10-19
	19-18-11-19
	19-12-19
	19-9-17-19
Centre de collecte 03	21-6-21
	21-2-21
	21-3-21
	21-16-15-4-21
	21-13-1-5-21

TAB. 5.7 – Les résultats de variable de décision du scénario 2 -Test 1- avec l'AG

Test 02

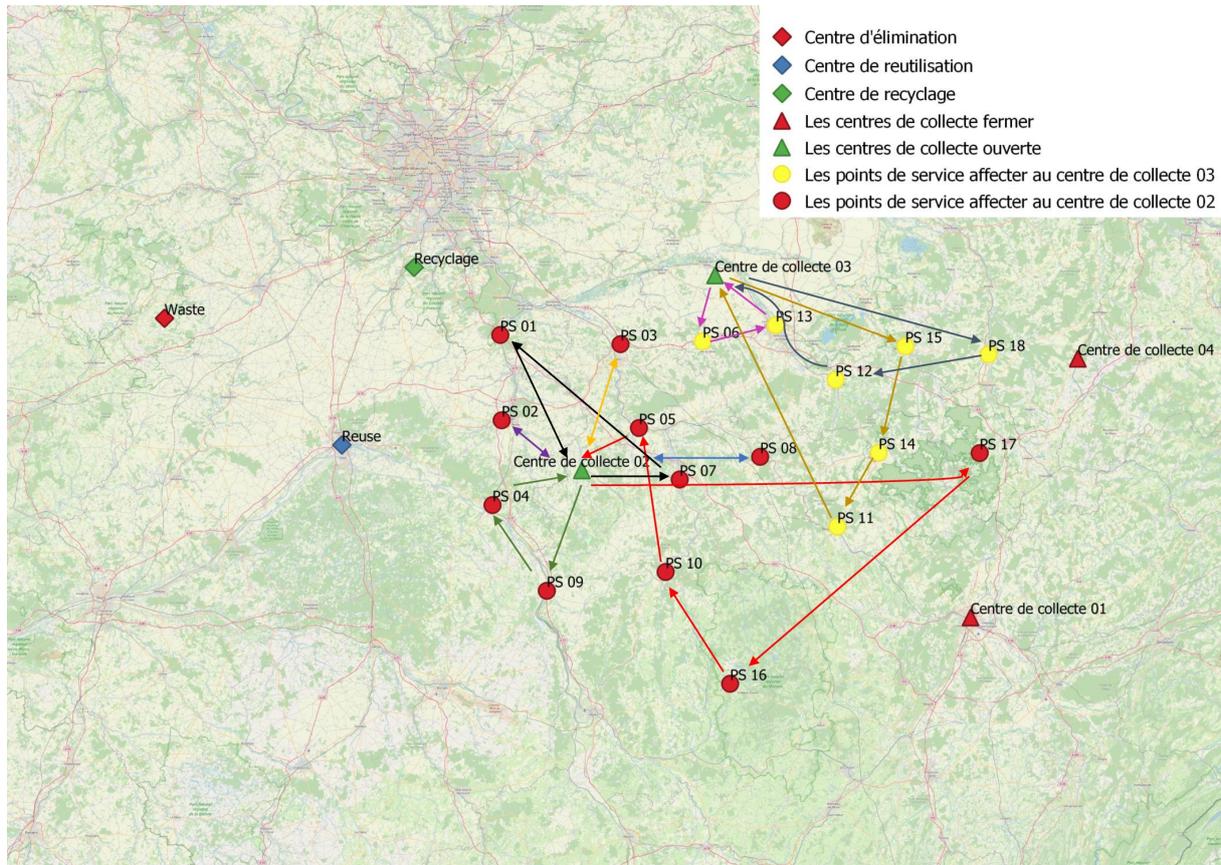


FIG. 5.15 – Carte géographique de résultat du 2^{eme} test -scénario 2-

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	1197729.29 \$	Centre 2 et 3	20-17-16-10-5-20 20-9-4-20 20-8-20 20-7-1-20 20-2-20 20-3-20 21-6-13-21 21-15-14-11-21 21-18-12-21	5000	1 ^{er}	4 minute

TAB. 5.8 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 2- avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 02	20-17-16-10-5-20
	20-9-4-20
	20-8-20
	20-7-1-20
	20-2-20
	20-3-20
Centre de collecte 03	21-6-13-21
	21-15-14-11-21
	21-18-12-21

TAB. 5.9 – Les résultats de variable de décision du scénario 2 -Test 2- avec l'AG

Test 03

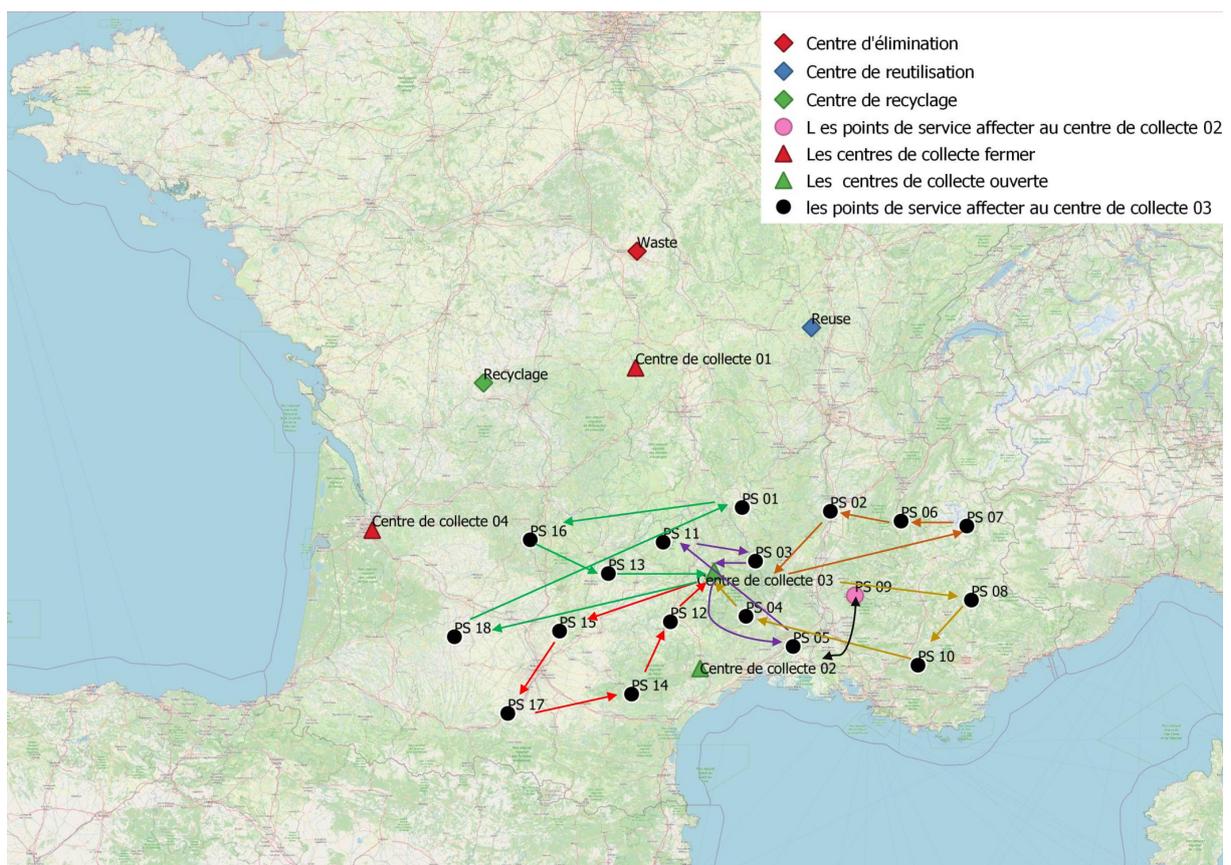


FIG. 5.16 – Carte géographique de résultat du 3^{ème} test -scénario 2-

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	861998.19 \$	Centre 2 et 3	21-7-6-2-21 21-15-17-14-12-21 21-18-1-16-13-21 21-8-10-4-21 21-5-11-3-21 20-9-20	5000	4 ^{er}	10 minute

TAB. 5.10 – Les résultats de simulation de scénario 2 -Test 3- avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 03	21-7-6-2-21 21-15-17-14-12-21 21-18-1-16-13-21 21-8-10-4-21 21-5-11-3-21
Centre de collecte 02	20-9-20

TAB. 5.11 – Les résultats des variable de décision du scénario 2 -Test 3- avec l'AG

5.5.3 Scénario 03

Dans le troisième scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur une carte géographiques comportant 35 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont présentées dans le tableau 19.

Les ensembles sont définis comme suit :

- I : 1 à n
- J : $n + 1$ à m
- RT : 1 à m

Pour ce scénario $n = 30$ et $m = 35$

Test

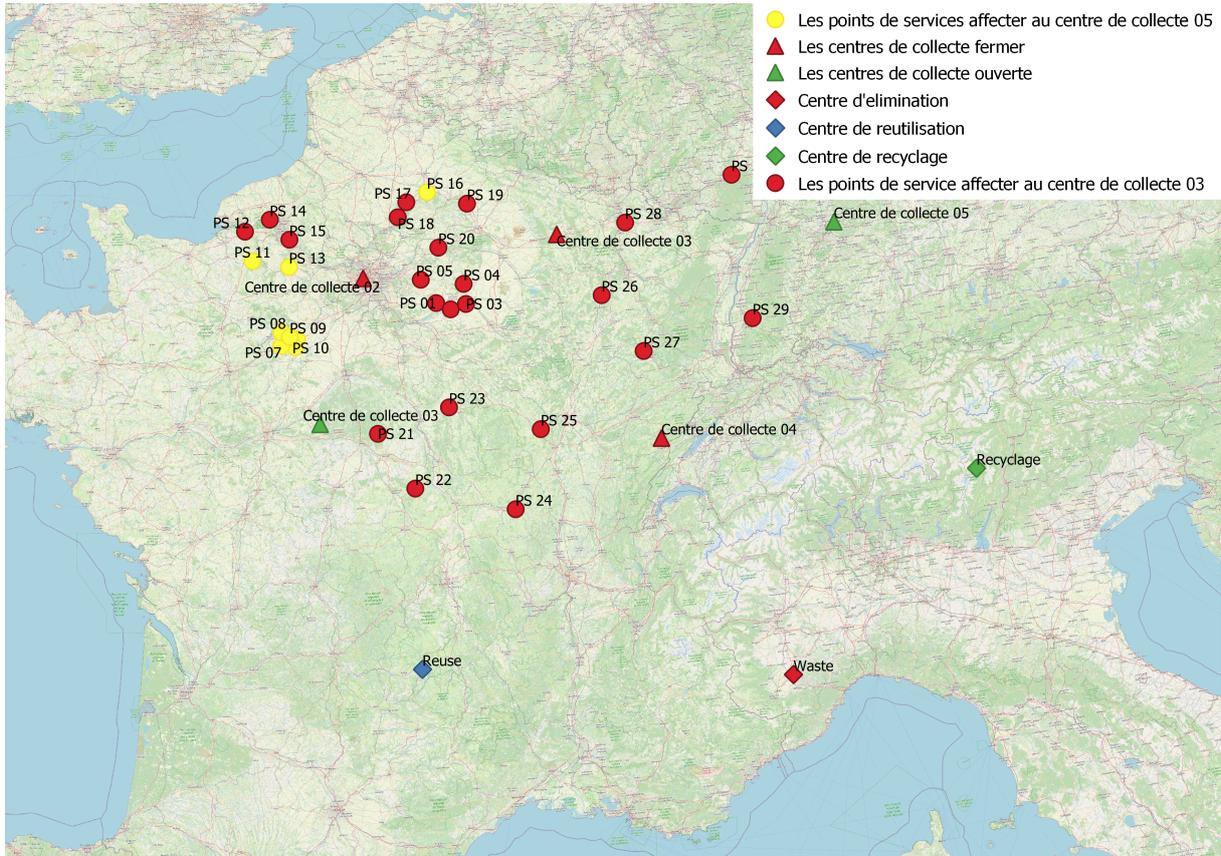


FIG. 5.17 – Carte géographique du 3^{eme} scénario

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	2440247.99 \$	Centre 3 et 5	33-17-23-33 33-15-3-33 33-25-33 33-12-33 33-19-20-33 33-4-21-33 33-14-29-22-33 33-2-1-33 35-11-35 35-6-35 35-10-7-35 35-8-35 35-13-16-9-35 35-24-28-26-35 35-18-27-30-35 35-5-35	9000	2 ^{er}	20 minute

TAB. 5.12 – Les résultats de simulation de scénario 3 avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 03	33-17-23-33 33-15-3-33 33-25-33 33-12-33 33-19-20-33 33-4-21-33 33-14-29-22-33 33-2-1-33

Localisation	Routage
Centre de collecte 05	35-11-35
	35-6-35
	35-10-7-35
	35-8-35
	35-13-16-9-35
	35-24-28-26-35
	35-18-27-30-35
	35-5-35

TAB. 5.13 – Les résultats de variable de décision du scénario 3 avec l'AG

5.5.4 Scénario 04

Dans le quatrième scénario, nous avons testé le modèle mathématique sur une carte géographiques comportant 50 nœuds. Les données utilisées dans le teste sont présentées dans le tableau 19.

Les ensembles sont définis comme suit :

- I : 1 à n
- J : $n + 1$ à m
- RT : 1 à m

Pour ce scénario $n = 42$ et $m = 50$

Test

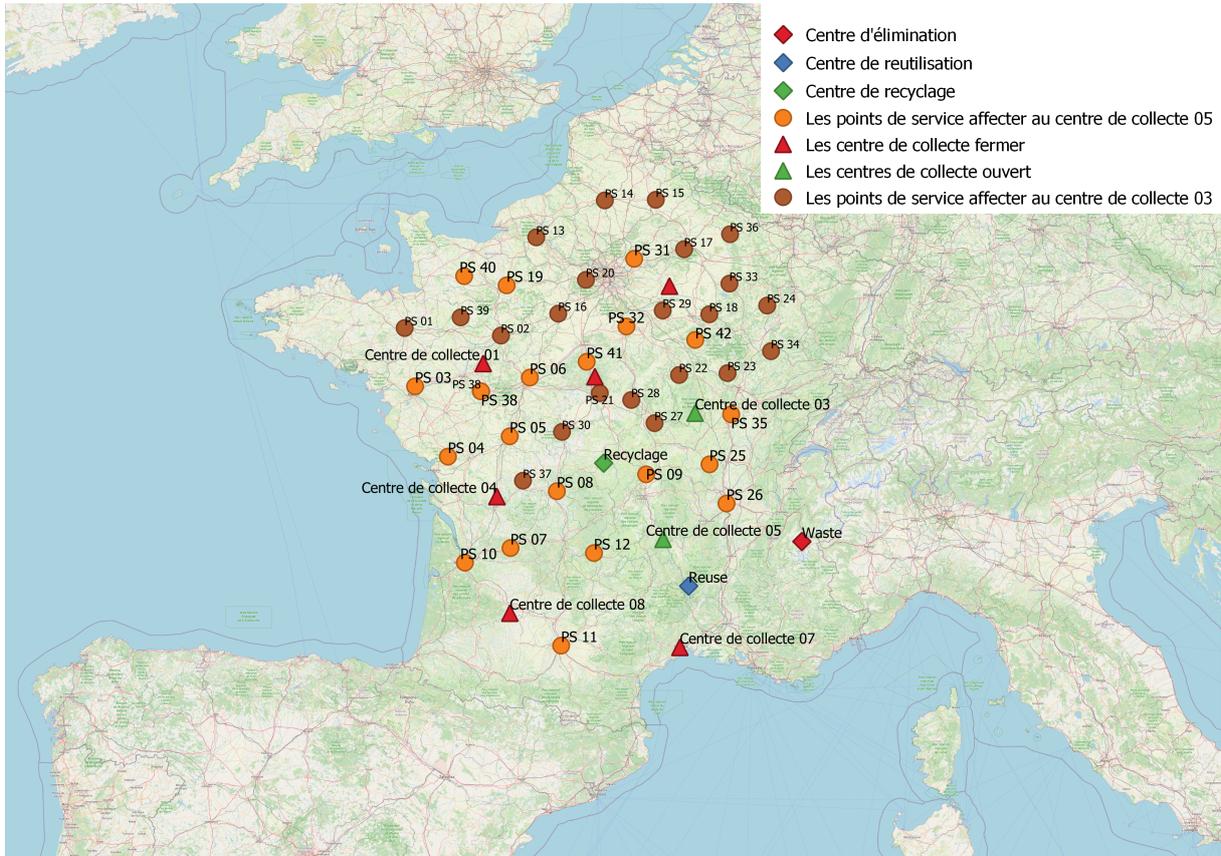


FIG. 5.18 – Carte géographique du 4^{eme} scénario

Les résultats de simulations :

	Fonction objectif	La locali- sation	Routage	Itérations	Essai	Temps d'exécu- tion
Valeurs	3250621.29 \$	Centre 3 et 5	45-20-13-29-45 45-15-14-33-45 45-21-45 45-2-16-45 45-27-24-45 45-22-17-28-45 45-34-45 45-23-45 45-39-1-30-45 45-37-36-18-45 47-42-12-47 47-8-47 47-38-7-47 47-19-10-41-26- 47 47-3-25-47 47-31-40-11-47 47-6-47 47-32-35-9-47 47-5-4-47	10000	4 ^{er}	60 minute

TAB. 5.14 – Les résultats de simulation de scénario 4 avec l'AG

Résultat des variables de décision :

Localisation	Routage
Centre de collecte 03	45-20-13-29-45
	45-15-14-33-45
	45-21-45
	45-2-16-45
	45-27-24-45
	45-22-17-28-45
	45-34-45
	45-23-45
	45-39-1-30-45
	45-37-36-18-45
Centre de collecte 05	47-42-12-47
	47-8-47
	47-38-7-47
	47-19-10-41-26-47
	47-3-25-47
	47-31-40-11-47
	47-6-47
	47-32-35-9-47
47-5-4-47	

TAB. 5.15 – Les résultats de variable de décision du scénario 4 avec l'AG

5.6 Comparaison de l'optimisation entre CPLEX et Algorithme Génétique : Analyse des Coûts, Temps de Simulation et Efficacité Logistique :

Les figures 5.11 à 5.18 ainsi que les tableaux de 5.1 à 5.14 présentent les résultats des tests effectués pour évaluer l'efficacité de notre algorithme génétique développé afin de trouver une solution proche de l'optimalité. Les résultats de simulation ont permis de comparer deux méthodes d'optimisation : CPLEX et l'algorithme génétique (AG). L'exécution de l'AG a été effectuée sur plusieurs tests, et pour chacun d'eux, le coût total, le temps de simulation et le gap d'erreur ont été mesurés par rapport aux résultats de la méthode exacte (CPLEX).

Les analyses montrent que le coût total des solutions obtenues avec CPLEX est légèrement inférieur à celui des solutions obtenues avec AG dans tous les tests. Par exemple, pour le Test 1.1, le coût total avec CPLEX est de 1,246,413.771 \$, tandis qu'avec AG, il

est de 1,248,935.08 \$. Ce constat se répète pour les autres tests, indiquant que CPLEX tend à trouver des solutions optimales en termes de coût.

Le temps de simulation est un autre facteur clé où des différences significatives ont été observées. Pour les tests simples, comme ceux du scénario 1, le temps de simulation de CPLEX est relativement court, de l'ordre de quelques secondes. En revanche, pour les tests plus complexes, comme ceux du scénario 2, le temps de simulation avec CPLEX augmente considérablement, atteignant jusqu'à 30 minutes. Dans les scénarios 3 et 4, notre modèle mathématique bloque avec CPLEX à cause de la taille du problème. Par exemple, pour le Test 2.1, CPLEX nécessite 30 minutes pour une solution avec un gap de 0.05%, alors que l'AG n'a besoin que de 7 minutes pour une solution avec un coût total légèrement supérieur. En comparaison, l'algorithme génétique présente des temps d'exécution beaucoup plus réduits et raisonnables, indépendamment de la complexité des tests.

Le gap d'erreur entre les coûts des solutions trouvées par les deux méthodes est relativement faible, variant entre 0.02% et 1.6%. Par exemple, pour le Test 1.2, le gap d'erreur est de 0.02%, tandis que pour le Test 2.3, il atteint 1.6%. Ce faible écart indique que les performances des deux méthodes sont assez proches, bien que CPLEX soit légèrement supérieur en termes d'optimisation des coûts.

	Coût totale CPLEX	Coût totale AG	Temps de simulation CPLEX	Temps d'exécution AG	Gap d'erreur
Test 1.1	1246413.771 \$	1248935.08 \$	12 secondes	3 minutes	0.2%
Test 1.2	961752.833 \$	961969.9 \$	7 secondes	3 minutes	0.02%
Test 1.3	591822.845 \$	594720.85 \$	3 secondes	3 minutes	0.4%
Test 2.1	1577930.818 \$	1586886.04 \$	30 min Avec un gap de 0.05% CPLEX	7 minutes	0.5%
Test 2.2	1192247.624 \$	1197729.29 \$	17 min	4 minutes	0.4%
Test 2.3	848181.633 \$	861998.19 \$	30 minutes Gap 0.43% CPLEX	10 minutes	1.6%

TAB. 5.16 – Comparaison entre le temps de simulation à CPLEX et le temps d'exécution de AG

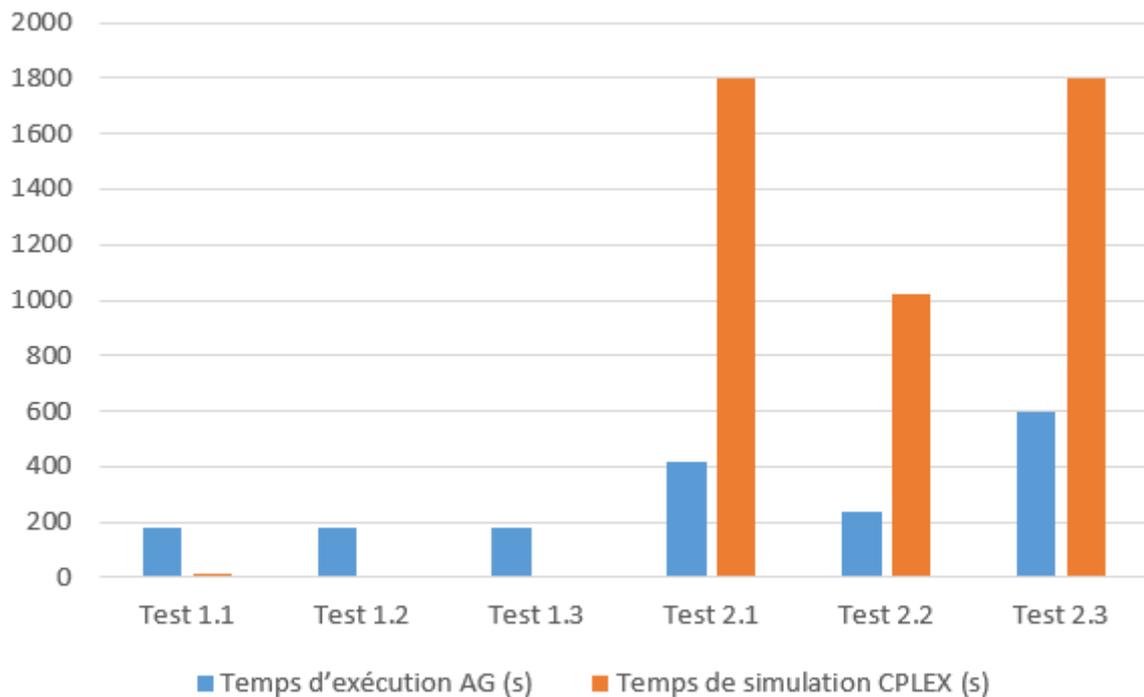


FIG. 5.19 – Comparaison entre le temps simulation à CPLEX et le temps d'exécution de AG

En ce qui concerne le nombre de véhicules utilisés et le nombre de centres localisés, il a été observé que les deux méthodes produisent des résultats très similaires. Par exemple, dans la plupart des tests, CPLEX et AG utilisent presque le même nombre de véhicules et localisent un nombre comparable de centres.

En résumé, bien que CPLEX offre des solutions optimales en termes de coût, il nécessite un temps de simulation significativement plus long pour les tests complexes. L'algorithme génétique, quant à lui, fournit des solutions presque aussi bonnes avec des temps d'exécution beaucoup plus réduits et raisonnables. Par conséquent, l'algorithme génétique peut être préféré dans des contextes où le temps de calcul est un facteur critique et où une solution légèrement sous-optimale est acceptable. Ces résultats peuvent guider le choix de l'algorithme en fonction des priorités spécifiques du projet, qu'il s'agisse de minimiser les coûts ou de respecter des délais de calcul stricts.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une application approfondie de l'algorithme génétique pour résoudre le problème de localisation et de routage (LRP). Nous avons d'abord examiné les principes de base de l'algorithme génétique, notamment le codage des individus, les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation. Nous avons ensuite décrit en détail

notre approche génétique pour le LRP, couvrant des aspects comme la représentation des chromosomes, la génération de la population initiale, le calcul de la fitness, la reconstruction des chromosomes, la sélection, le croisement, la mutation et la restauration des dépôts.

Les résultats de simulation ont montré que notre algorithme génétique était capable de fournir des solutions de haute qualité, avec des coûts totaux très proches de ceux obtenus par la méthode exacte CPLEX. Bien que CPLEX offre des solutions légèrement meilleures en termes de coût, l'algorithme génétique se distingue par des temps d'exécution nettement plus rapides, en particulier pour les instances de grande taille. Cet avantage en termes de temps de calcul fait de l'algorithme génétique une option très intéressante pour résoudre efficacement des problèmes complexes de localisation et de routage dans des contextes où le temps de réponse est critique.

Dans l'ensemble, ce chapitre a démontré l'efficacité et la flexibilité de l'algorithme génétique pour aborder le problème LRP, ouvrant la voie à de nombreuses applications dans le domaine de l'optimisation logistique.

Conclusion générale

Cette étude a exploré en profondeur l'application des principes de l'économie circulaire à la gestion et à la revalorisation des batteries usées à base de lithium, avec un focus particulier sur les batteries de véhicules électriques (BEV). Le travail a été structuré autour de plusieurs axes principaux ou chacun apporte une contribution essentielle à la compréhension et à l'amélioration des pratiques actuelles dans ce domaine.

Tout d'abord, les fondements théoriques de l'économie circulaire ont été présentés, soulignant ses avantages et limitations. Ensuite, les différentes stratégies de revalorisation des batteries lithium-ion ont été analysées, mettant en lumière les méthodes actuelles et innovantes pour le recyclage et la réutilisation des matériaux contenus dans ces batteries. Cette analyse a révélé le potentiel considérable de ces stratégies pour réduire l'empreinte écologique des batteries en fin de vie. Par ailleurs, l'étude a abordé le problème de localisation-routage (LRP) dans le cadre de la logistique inverse. Des solutions ont été identifiées pour optimiser les processus de récupération et de recyclage des batteries. L'implémentation d'algorithmes génétiques pour la résolution du LRP a démontré des améliorations significatives par rapport aux méthodes de solutions exactes souvent limitées par la taille du réseau à optimiser, ouvrant ainsi, la voie à des applications pratiques et efficaces dans la gestion des déchets.

Les perspectives pour la poursuite et l'amélioration des travaux de recherche sont multiples. La première perspective est la considération des véhicules électriques dans le transport. L'intégration des véhicules électriques dans les réseaux de transport qui présente un potentiel énorme pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. La gestion efficace de leurs batteries en fin de vie reste un enjeu crucial pour maximiser les bénéfices environnementaux. Ensuite, le développement d'autres configurations de réseau et d'autres algorithmes pour résoudre le problème de LRP est une voie prometteuse. L'exploration de nouvelles approches algorithmiques, au-delà des algorithmes génétiques, par hybridation ou indépendamment pourrait offrir des solutions encore plus efficaces pour le LRP. Des algorithmes comme les méthodes de colonies de fourmis ou les algorithmes évolutionnaires méritent une attention particulière pour améliorer les performances de

la logistique inversée. Enfin, l'intégration du LRP dans la deuxième partie du réseau de recyclage pour une considération la collecte d'autres produits similaires au traitement des BVE, constitue aussi une autre perspective importante. Entre autres, il sera plus judicieux de considérer une approche intégrée du LRP pour couvrir non seulement la collecte et le transport initial des batteries, mais aussi leur acheminement vers des installations de traitement, de recyclage, de réutilisation, de vente...ETC. Cela permettrait une optimisation complète de la chaîne logistique, améliorant ainsi l'efficacité globale du processus de recyclage.

En conclusion, cette étude fournit des solutions pratiques et innovantes pour la gestion durable des batteries de véhicules électriques. En combinant des stratégies de revalorisation avancées et des approches technologiques novatrices, ce travail aspire à jouer un rôle significatif dans la transition vers des systèmes plus durables et respectueux de l'environnement. Les futures recherches devront continuer à explorer et affiner ces solutions pour maximiser leur impact positif sur la société et l'environnement, tout en s'adaptant aux évolutions technologiques et aux exigences réglementaires.

Bibliographie

- [1] Vu Hong, Ngoc. Towards circular economy : analysis on how enterprises influence consumers through electronic marketing communications. Diss. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta, 2021.
- [2] <https://www.economiecirculaire.org>
- [3] <https://www.tondo.tech/en/circular-economy/what-is-circular-economy>
- [4] Peignois, Thomas, and Yves De Ronge. ”” Economie circulaire, quelles étapes pour engager la transition en entreprise ?.”
- [5] https://mem-envi.ulb.be/Memoires_en_pdf/MFE_16_17/MFE_De%20Rop_16_17.pdf
- [6] <https://ecotreelithium.co.uk/news/electric-vehicle-battery/>
- [7] Elmahdi, Fadlaoui, Lagrat Ismail, and Masaif Noureddine. ”Fitting the OCV-SOC relationship of a battery lithium-ion using genetic algorithm method.” E3S Web of Conferences. Vol. 234. EDP Sciences, 2021.
- [8] GUERMOUDI, Hadj Abdelkader. Development of an Intelligent Prototype for Lithium Battery State of Charge Estimation. Diss. Directeur : Mr AF KERBOUA/Co-Directeur 1: Mr F. BOUKLI HACEN/Co-Directeur 2: A. CHELLAL, 2023.
- [9] Tsiriry, R. A. N. A. R. I. S. O. N. Etude de l’amelioration de la longevite de la performance des batteries lithium-ion pour voitures electriques. Diss. Ph. D. dissertation, Université d’Antananarivo, 2017.
- [10] <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171>
- [11] Xing, Yinjiao, et al. ”State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures.” Applied energy 113 (2014) : 106-115.
- [12] Bergh, William. ”Mapping the European reverse logistics of electric vehicle batteries.” (2020).
- [13] Choi, Jang Wook, and Doron Aurbach. ”Promise and reality of post-lithium-ion batteries with high energy densities.” Nature reviews materials 1.4 (2016) : 1-16.

- [14] Harper, Gavin, et al. "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles." *nature* 575.7781 (2019) : 75-86.
- [15] https://mem-envi.ulb.be/Memoires_en_pdf/MFE_16_17/MFE_De%20Rop_16_17.pdf
- [16] Han, Xuebing, et al. "A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle." *ETransportation* 1 (2019) : 100005.
- [17] Martinez-Laserna, Egoitz, et al. "Battery second life : Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (2018) : 701-718.
- [18] Richa, Kirti, et al. "A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles." *Resources, Conservation and Recycling* 83 (2014) : 63-76.
- [19] Hua, Yang, et al. "Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles." *Journal of Power Sources* 478 (2020) : 228753.
- [20] Y. Matsuda, K. Tanaka, Reuse EV battery system for renewable energy introduction to island powergrid, *IEEE*, 2017, pp. 1-6.
- [21] Tong, Shijie, et al. "Demonstration of reusing electric vehicle battery for solar energy storage and demand side management." *Journal of Energy Storage* 11 (2017) : 200-210.
- [22] Debnath, Uttam Kumar, Iftexhar Ahmad, and Daryoush Habibi. "Gridable vehicles and second life batteries for generation side asset management in the Smart Grid." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 82 (2016) : 114-123.
- [23] Chen, Mengyuan, et al. "Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries." *Joule* 3.11 (2019) : 2622-2646.
- [24] Le Moing, Jérémy. *L'économie circulaire : pour un développement durable des territoires*. Diss. Adret et territoires, 193 rue Chassolières, 38340 Voreppe, 2015.
- [25] Thomas, Gaspard. "L'économie circulaire de la théorie à la pratique : les facteurs nécessaires pour l'engagement des entreprises en Wallonie."
- [26] <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20151201STO05603/economie-circulaire-definition-importance-et-benefices>
- [27] Brisoux-Devendeville, Laure, and Corinne Lucet. "Etude de la modélisation en programmation par contraintes pour résoudre le problème de localisation/routage." *Troisièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes, JFPC 2017*. Association Française pour la Programmation par Contraintes (AFPC), 2017.
- [28] <https://blog.route4me.com/fr/les-reelles-solutions-contre-les-problemes-de-routage-de-vehicules/>

- [29] Malapert, Arnaud. "Optimisation de tournées de véhicules pour l'exploitation de Réseau Telecom." Rapp. Stage Diplôme Master Intell. Artif. Décision Univ. Paris 6 (2006).
- [30] <https://www.quantmetry.com/blog/solution-routage-programmation-lineaire-optimizee-apprentissage-automatique/>
- [31] Mateluna, Cristian Durán. Exact solution methods for large-scale discrete p-facility location problems. Diss. Institut Polytechnique de Paris, 2024.
- [32] http://sergelhomme.fr/doc/modele_localisation_allocation.pdf
- [33] Hosoda, Junko, and Takashi Irohara. "Recent research on variants of the location routing problem." *Journal of Japan Industrial Management Association* 73.2E (2022) : 75-91. <https://doi.org/10.11221/jima.73.75>.
- [34] Farahani, Reza Zanjirani, and Masoud Hekmatfar, eds. *Facility location : concepts, models, algorithms and case studies*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [35] PRODHON, Caroline. "LE PROBLÈME DE LOCALISATION-ROUTAGE." (2006).
- [36] Hu, Xiaping, et al. "LRP-based design of sustainable recycling network for electric vehicle batteries." *Processes* 10.2 (2022) : 273.
- [37] Casals, Lluc Canals, Beatriz Amante García, and Lázaro V. Cremades. "Electric vehicle battery reuse : Preparing for a second life." *Journal of Industrial Engineering and Management* 10.2 (2017) : 266-285.
- [38] Shahjalal, Mohammad, et al. "A review on second-life of Li-ion batteries : Prospects, challenges, and issues." *Energy* 241 (2022) : 122881.
- [39] Hendrickson, Thomas P., et al. "Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California." *Environmental Research Letters* 10.1 (2015) : 014011.
- [40] <https://www.youtube.com/watch?v=X7NMDrpk2mI>
- [41] Gonzales-Calienes, Giovanna, Ben Yu, and Farid Bensebaa. "Development of a Reverse Logistics Modeling for End-of-Life Lithium-Ion Batteries and Its Impact on Recycling Viability—A Case Study to Support End-of-Life Electric Vehicle Battery Strategy in Canada." *Sustainability* 14.22 (2022) : 15321.
- [42] Foster, Meaghan, et al. "Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries." *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)* 7.3 (2014) : 698-715.
- [43] <https://www.youtube.com/watch?v=xPDkiwoq6Vg>
- [44] Gherboudj, Amira. "Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques." Université de Constantine2 (2013).

- [45] Jebari, Khalid, and Mohammed Madiafi. "Selection methods for genetic algorithms." *International Journal of Emerging Sciences* 3.4 (2013) : 333-344.
- [46] Puljić, Krunoslav, and Robert Manger. "Comparison of eight evolutionary crossover operators for the vehicle routing problem." *Mathematical Communications* 18.2 (2013) : 359-375.
- [47] Rybičková, Alena, Adéla Burketová, and Denisa Mocková. "Solution to the location-routing problem using a genetic algorithm." *2016 Smart Cities Symposium Prague (SCSP)*. IEEE, 2016.
- [48] NGUYEN, Viet-Phuong; PRINS, Christian; PRODHON, Caroline. A hybrid meta-heuristic for the two-echelon location routing problem. In : *IESM 2011 (International Conference on Industrial Engineering and Systems Management)*. Metz, France. .2011
- [49] AGHAKHANI, Sina, et al. A mathematical optimization model for the pharmaceutical waste location-routing problem using genetic algorithm and particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2023, .2023
- [50] SAIF-EDDINE, Ahmad Sayed; EL-BEHEIRY, Mohammed Mostafa; EL-KHARBOTLY, Amin Kamel. An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem. *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, 10.1: .63-76
- [51] Yu, Vincent F., et al. "Regional location routing problem for waste collection using hybrid genetic algorithm-simulated annealing." *Mathematics* 10.12 (2022) : 2131.
- [52] DERBEL, Houda, et al. Genetic algorithm with iterated local search for solving a location-routing problem. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39.3: .2865-2871
- [53] Ho, William, et al. "A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem." *Engineering applications of artificial intelligence* 21.4 (2008) : 548-557.
- [54] Wang, Lei, Xiang Wang, and Wenxian Yang. "Optimal design of electric vehicle battery recycling network—From the perspective of electric vehicle manufacturers." *Applied Energy* 275 (2020) : 115328.
- [55] https://blog.ucsusa.org/hanjiro-ambrose/the-second-life-of-used-ev-batteries/?fbclid=IwAR32f87rFWTITAWBX3V1C04kpd0wkP3_wvF5UpoyF-3F3Xx_or5uMHDfY00
- [56] Selon les statistique de Google 2024
- [57] <https://www.isuzu.jp.com/fr/product/8x4-isuzu-giga-30-ton-heavy-duty-excavator-carrier-flatbed-truck-for-sale/>
- [58] Selon les statistique d'internet en France 08 – 05 – 2024
- [59] Selon les statistique d'internet 2011

- [60] https://www.webfleet.com/fr_fr/webfleet/blog/connaissez-vous-la-consommation-carburant-dun-poids-lourd/
- [61] Erechtkhoukova, Marina G., Peter A. Khaïter, and Paulina Golinska, eds. Sustainability appraisal : quantitative methods and mathematical techniques for environmental performance evaluation. Springer Science & Business Media, 2013.
- [62] Harper, Gavin, et al. "Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles." *nature* 575.7781 (2019) : 75-86.
- [63] Asefi, H., Lim, S., Maghrebi, M. and Shahpar-vari, S.: "Mathematical modelling and heuristic approaches to the location-routing problem of a cost-effective integrated solid waste management," *Annals of Operations Research*, Vol. 273, No. 1–2, pp. 75–110 (2019) <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2912-1>
- [64] Zhang, Y., Qi, M., Lin, W. H. and Miao, L.: "A metaheuristic approach to the reliable location routing problem under disruptions," *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, Vol. 83, pp. 90–110 (2015) <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.09.001>
- [65] Schiffer, M. and Walther, G. : "Strategic planning of electric logistics fleet networks : A robust location-routing approach," *Omega*, Vol. 80,pp. 31–42 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.09.003>

Annexes

Le tableau 1 :

	Test 1	Test 2	Test 3
Capacité du centre de collecte	400	400	400
Capacité du véhicule	100	100	100
Coût de construction	400 000	400 000	400 000
La quantité de chaque centre de service	[30,55,65,40,35,70,50, 85,30,40,35,75]	[10,70,45,10,32,60,30 ,95,20,36,35,55]	[10,31,25,10,32,20,30, 45,20,16,25,50]
La quantité transportée vers le centre de recyclage	[20, 22, 35, 20, 15, 30, 50, 60, 10, 20, 20, 45]	[0, 40, 35, 5,12,30,30, 50, 0, 16, 25, 25]	[0, 1, 15, 5, 12, 10,30, 20, 0, 16, 15, 20]
La quantité transportée vers le centre de réutilisation	[10, 33, 30, 20, 20, 40, 0 ,25, 20, 20, 15, 30]	[10, 30, 10, 5, 20, 30, 0 ,45, 20, 20, 10, 30]	[10, 30, 10, 5, 20, 10, 0 ,25, 20, 0, 10, 30]
Nombre de centres de collecte	3	3	3
Nombre de centres de service	12	12	12
Nombre de véhicules disponible	9	8	5

TAB. 17 – Données pour le Scénario 1 avec 3 Tests

Le tableau 2 :

	Test 1	Test 2	Test 3
Capacité du centre de collecte	400	400	400
Capacité du véhicule	100	100	100
Coût de construction	400 000	400 000	400 000
La quantité de chaque centre de service	[30,55,65,40,35,70,50, 85,30,40,35,75, 20,30,10, 45,15,25]	[10,70,45,10,32,60,30, 95,20 ,36,35,55,15,25,30, 10,22,12]	[10,31,25,10,32,20, 30,45,20,16,25,50, 24,11,33,20,6,10]
La quantité transportée vers le centre de recyclage	[20, 22, 35, 20, 15, 30, 50, 60, 10, 20, 20, 45, 10 ,20, 10, 25, 5, 15]	[0, 40, 35, 5, 12, 30,30, 50, 0, 16, 25, 25 ,10,15,15,5,10,10]	[0, 1, 15, 5, 12, 10,30, 20, 0, 16, 15, 20,10,10,22,15,6,5]
La quantité transportée vers le centre de réutilisation	[10, 33, 30, 20, 20, 40, 0 ,25, 20, 20, 15, 30, 10, 10, 0, 20, 10, 10]	[10, 30, 10, 5, 20, 30, 0 ,45, 20, 20, 10, 30,5,10,15,5,12,2]	[10, 30, 10, 5, 20, 10, 0 ,25, 20, 0, 10, 30,14,1,11,5,0,5]
Nombre de centres de collecte	4	4	4
Nombre de centres de service	18	18	18
Nombre de véhicules disponible	12	12	8

TAB. 18 – Données pour le Scénario 2 avec 3 Tests

Le tableau 3 :

	Scénario 3	Scénario 4
Capacité du centre de collecte	600	800
Capacité du véhicule	100	100
Coût de construction	600 000	800 000
La quantité de chaque centre de service	[30,55,65,40,35,70,50,85,30,40,35,75,20,30,10,45,15,25,35,40,60,25,80,55,30,10,45,10,32,30,20,36,35,55,15,25,35,30,40,4,10,5]	[30,55,65,40,35,70,50,85,30,40,35,75,20,30,10,45,15,25,35,40,60,25,80,55,30,10,45,10,32,30,20,36,35,55,15,25,35,30,40,4,10,5]
La quantité transportée vers le centre de recyclage	[20, 22, 35, 20, 15, 30, 50, 60, 10, 20, 20, 45, 10, 20, 10, 25, 5, 15, 10, 30, 40, 15, 40, 30, 10,6,10,10,0,10]	[20, 22, 35, 20, 15, 30, 50, 60, 10, 20, 20, 45, 10, 20, 10, 25, 5, 15, 10, 30, 40, 15, 40, 30,10,5,25,0,20,15,12,20,15,10,0,15,15,20,25,4,5,5]
La quantité transportée vers le centre de réutilisation	[10, 33, 30, 20, 20, 40, 0, 25, 20, 20, 15, 30, 10, 10, 0, 20, 10, 10, 25, 10, 20, 10, 40, 25, 20,6,12,0,2,10]	[10, 33, 30, 20, 20, 40, 0, 25, 20, 20, 20, 15, 30, 10, 10, 0, 20, 10, 10, 25, 10, 20, 10, 40, 25, 20,5,20,10,12,15,8,16,20,0,15,10,20,10,15,0,5,0]
Nombre de centres de collecte	5	8
Nombre de centres de service	30	42
Nombre de véhicules disponibles	18	22

TAB. 19 – Données pour les Scénarios 3 et 4

Le tableau 4 :

Paramètres	Valeurs
Coût de recyclage (\$/battery)	1475 \$ [54]
Coût de réutilisation (\$/battery)	550 \$ [55]
Coût de transport unitaire (\$/battery.km)	0.19 (GAMMA) – 0.6 (BETA) \$ [54]
Coût de transport unitaire (\$/waste.km)	0.012 \$ [54]
Coût de transport unitaire (\$/km)	1.2 \$ [54]
Coût de construction (\$)	[250 000,850 000] [54]
Coût de chauffeur par heure	32.52 \$ [56]
Coût de fuel \$	1.92 \$ [58]
Coût d'utilisation de véhicule par heure	18.02 \$ [59]
Consommation de fuel de véhicule à vide par km	0.32
Consommation de fuel de véhicule chargé par battery.km	0.24
Coût de maintenance par Km	0.065 \$ [61]
Camion	8 × 4 isuzu giga [57]
Capacité du camion	30 Tonnes [57]
Capacité du centre de collecte	[100 – 800]
Poids de Nissan Leaf Mk1 22-kWh battery pack AESC	294 KG [62]

TAB. 20 – Les données des paramètres utilisées

Résumé

Cette étude propose une analyse d'un réseau de collecte et valorisation des batteries de véhicules électriques usagées (EVB) dans une économie circulaire. Utilisant une modélisation mathématique MILP, l'optimisation des coûts d'installation des centres de collecte et des routages est validée par CPLEX pour de petites instances. Pour des instances plus grandes, les Algorithmes Génétiques (AG) permettent une configuration optimale du réseau en un temps de calcul court, intégrant la stratégie des choix des routes et des moyens de transport.

Mots clés : Économie circulaire, problème de localisation-routage, batterie de véhicule électrique, algorithme génétique, réseau de recyclage .

Abstract

This study proposes an analysis of a collection and valorization network for used electric vehicle batteries (EVB) within a circular economy. Using a MILP mathematical model, the optimization of installation costs for collection centers and routing is validated by CPLEX for small instances. For larger instances, Genetic Algorithms (GA) allow for an optimal network configuration in a short computation time, integrating the strategy for route and transport mode selection.

Keywords : Circulaire economy , Location routing problem, Electric vehicle battery, Genetic algorithm, Recycling network.

ملخص

تقترح هذه الدراسة تحليلاً لشبكة جمع وتثمين بطاريات المركبات الكهربائية المستعملة (EVB) في إطار اقتصاد دائري. باستخدام نموذج رياضي MILP، يتم التحقق من تحسين تكاليف تركيب مراكز الجمع وتوجيه المسارات بواسطة CPLEX للحالات الصغيرة. بالنسبة للحالات الأكبر، تسمح الخوارزميات الجينية (GA) بتكوين شبكة مثالية في وقت حسابي قصير، مع دمج استراتيجية اختيار المسارات ووسائل النقل.

الكلمات المفتاحية : الاقتصاد الدائري، مشكلة تحديد الموقع وتوجيه المركبات، بطارية السيارة الكهربائية، الخوارزمية الجينية، شبكة إعادة التدوير.