

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 de master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par :

**Kenza BAADOUD
Yasmina SALAH**

Thème

**L'utilisation de l'internet physique pour
l'optimisation des flux de marchandises d'une
chaîne logistique durable**

Soutenu publiquement, le 29 /09/2020, devant le jury composé de :

Dr Hocine KAHOUADJI	MCB	UNIV-Tlemcen	Président
M. Fouad MALIKI	MCB	ESSA-Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr Mohammed BENEKROUF	MCB	ESSA-Tlemcen	Examineur 1
Dr Amine GUEZZEN	MCB	UNIV-Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Table des matières

1	Chapitre I : Les émissions CO ₂ et la logistique	14
1.1	Introduction	14
1.2	Les sources d'émission de CO ₂	14
1.2.1	Le secteur de transport	15
1.2.2	Le secteur de l'énergie « Utilisation des combustibles fossiles»	16
1.2.3	Procédés industriels	16
1.3	Les émissions des gaz à effet de serre en Algérie	17
1.3.1	Secteur de l'énergie	17
1.3.2	Secteur de transport	17
1.4	Les émissions CO ₂ et la logistique	18
1.4.1	Comment la logistique réduit son empreinte carbone?	18
1.5	Les Facteurs et méthodes de calcul d'émission de gaz à effet de serre.....	20
1.5.1	Les facteurs d'émission de GES.....	20
1.5.2	Calcul d'émission de gaz à effet de serre :	23
1.6	Conclusion	23
2	Chapitre II : Les méthodes d'optimisation multiobjectif	26
2.1	Introduction	26
2.2	L'optimisation multiobjectif.....	26
2.3	Formulation générale d'un problème d'optimisation multiobjectif	27
2.4	Notions de dominance et optimalité de Pareto	28
2.5	Les exemples sur les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif	28
2.5.1	Les approches non Pareto.....	29
2.5.2	Les métaheuristiques « NSGA II »	30
2.5.3	La méthode TOPSIS « technique for Order by Similarity to ideal Solution »...	33
2.5.4	Les méthodes floues	34
2.6	Conclusion	35
3	Chapitre III : Minimisation des émissions CO ₂ lors de TM.....	37
3.1	Introduction	37
3.2	Formule de calcul l'information CO ₂	37
3.3	Définition du problème.....	37
3.4	Méthodes de résolution utilisées.....	38
3.4.1	Le programme linéaire	38
3.4.2	Métaheuristique multiobjectif	39

3.5	Le programme linéaire.....	39
3.5.1	La reformulation du problème.....	39
3.5.2	Le modèle mathématique	40
3.6	La méthode NSGA II.....	43
3.6.1	Les paramètres et les opérateurs de notre problème	43
3.6.2	Définition de notre réseau de distribution	46
3.6.3	Résultat de l'exécution	49
3.6.4	Interprétation des résultats	54
3.7	Conclusion :.....	54

Dédicace I

À mes très chers parents Bakhta et Abdelkader,
Vous êtes le secret de ma force, la source de ma joie, je vous remercie pour votre soutien, amour, courage, vos sacrifices, tout au long de ma vie, que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, Que dieu tout puissant vous accorder santé, bonheur et longue vie...

À mes chères sœurs Amina, Safia, Ikram et mon cher frère Ali,
Je vous remercie pour leurs soutiens moraux et matériels tout au long de mes études. Et aussi à mes petits amours : Riham, Djinane et Moayad,
Que dieu les protèges.

À M. Fouad Maliki, Mon directeur de mémoire,
Je vous remercie pour tout votre aide, encouragement, votre grande disponibilité, et vos précieux conseils durant la rédaction de notre mémoire.

À ma chère binôme Yasmina et toute votre famille SAAH,
Sans votre aide, vos conseils et encouragements ce travail n'aurait pas vu le jour. Je vous remercie infiniment ainsi que votre famille pour votre accueil chaleureux, je vous souhaite beaucoup de succès pour l'avenir

À mes meilleures amies Racha et Selma,
Je leurs souhaite un avenir plein de bonheur, de réussite et de santé.

À toute ma famille,
Mes amis,
Et mes enseignants,
Je vous dédie ce travail. . .

Kenza

Dédicace II

Je dédie ce modeste travail accompagné d'une sincère reconnaissance :

À celui qui m'a toujours supportée, dirigée, encouragée et qui a déployé beaucoup de sacrifices pour mon éducation et ma formation . . . mon père, que ma réussite soit le meilleur cadeau que je puisse l'offrir,

À la source d'amour et d'espoir, celle qui m'a bénie par ses prières . . . ma mère, que ce travail soit l'accomplissement de tes vœux tant attendus,

À ma très chère sœur et mon très cher frère,

À mes adorables nièces : Amina, Zineb et Soumia,

À mes oncles, mes tantes et mes chers cousins et cousines pour tous le soutien et l'amour qu'ils m'offrent,

À ma chère Kenza, pour tout son aide et sa patience,

À mes amies Nabila, Imen, Hayet, Sabrina et Keltoum, pour tous les bons et inoubliables moments que nous avons vécu ensemble,

Je vous aime . . .

Yasmina

Remerciements

Ce modeste travail fut le fruit de beaucoup d'efforts et de nombreux sacrifices. Pour cela, nous remercions, dans un premier temps, Dieu le créateur de l'univers, qui nous a maintenues en force, en courage et en santé pour mener à bien ce mémoire de fin d'étude.

Nous adressons tous nos remerciements et notre sincère gratitude à M. Fouad Maliki, en tant que directeur de ce mémoire, pour tout son aide, sa patience, le temps qui nous a consacré, la confiance qui nous a accordé et surtout pour ses judicieux conseils. Nous leur remercions ainsi, en tant que chef de filière génie industriel, pour tout ce qu'il nous a appris et partagé tout au long de nos trois ans de spécialité. L'encouragement et le soutien moral qui nous a fourni nous ont permis de fructifier des expériences professionnelles et personnelles marquantes.

Nous tenons ainsi à remercier les corps professoral et administratif de l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, pour leurs efforts fournis durant notre parcours au sein de l'école.

Nos sincères remerciements vont aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir examiner ce travail :

M. Hocine KACHOUADJ

M. Mohammed BENEKROUF

M. Amine GHEZZEN

Et enfin, nous remercions du fond du cœur toute personne ayant contribué à ce travail.

Abréviations

CO₂ : Dioxyde de carbone.

CH₄ : Le méthane.

N₂O : Protoxyde d'azote.

GT : Gigatonne ou milliard de tonnes

Mt : Mégatonne ou million de tonnes.

KJ : Kilojoules.

IP : Internet physique

Kg : Kilogramme

Km: Kilometre

l: litre

EVP: Equivalent pied

HC: High Cube

TM : transport de marchandises

Liste des tableaux

Tableau 1.1: les émissions de CO2 générés par les différents types de carburant de transport.	21
Tableau 1.2: Les 27 facteurs influençant les émissions des gaz à effet de serre	22
Tableau 3.1: les 6 positions possibles du placement d'un article dans un conteneur.....	40
Tableau 3.2: les indices, les ensembles et les paramètres du modèle	41
Tableau 3.3: caractéristiques des articles	47
Tableau 3.4: les caractéristiques des conteneurs.....	47
Tableau 3.5: facteur et taux de consommation	47
Tableau 3.6: les distances parcourues entre la plateforme et les CLR(s)	47
Tableau 3.7: les demandes clients	48
Tableau 3.8: tableau résumant les résultats d'affectation des conteneurs dans le 1 ^{er} cas.....	49

Liste des figures

Figure 1.1: Emission de carbones liés aux transports routiers en 2018	15
Figure 1.2: les émissions mondiales de CO ₂ liées à la combustion de combustibles fossiles	16
Figure 1.3: les émissions de co ₂ évitées en Algérie à l'horizon de 2030	18
Figure 2.1: Représentation d'un problème multiobjectif	27
Figure 2.2: Dominance de Pareto et optimalité de Pareto	28
Figure 2.3: Illustration de la méthode pondération des fonctions objectif en cas d'optimisation bi-objectif.	30
Figure 2.4: le principe d'algorithme NSGAI [Deb et al, 2002	31
Figure 2.5: la distance crowding ou surpeuplement.....	32
Figure 3.1: un exemple d'une solution	44
Figure 3.2: illustration de l'opération de croisement sur l'exemple cité.....	45
Figure 3.3: schématisation de notre réseau de distribution	46

Introduction générale

La fonte des glaces, les vagues de chaleurs et le décalage saisonnier sont parmi les conséquences du réchauffement climatique qui mettent en danger notre planète terre. Ce changement, observé depuis le XX^{ème} siècle, est principalement dû aux émissions des gaz à effet de serre, dont le CO₂ représente le principal en quantité. Ce dernier est d'origine naturelle ou anthropique. Les émissions anthropiques proviennent de plusieurs secteurs économiques, dont le secteur de transport et logistique en fait partie.

Avoir une chaîne de distribution efficace en termes de coûts logistiques et de réduction de l'empreinte environnementale d'un produit, est l'intérêt actuel de plusieurs opérateurs de transport et logistique. Ces derniers veillent de plus en plus à optimiser le transport notamment à travers la réduction des distances parcourues, le nombre de déplacements et les retours à vide et par conséquent minimiser les émissions de CO₂.

Ceci est rendu possible par l'implémentation d'un concept innovant qui doit révolutionner le transport de marchandises, nommé : « l'internet physique ». L'une des préoccupations majeures de l'IP qui peut s'ajouter à sa caractéristique principale d'être un système global et ouvert est d'assurer l'interconnexion des réseaux logistiques tout en réduisant les émissions CO₂ lors de l'expédition des produits.

Le présent mémoire a pour objectif l'utilisation de l'internet physique pour l'optimisation des flux de marchandises tout en tenant compte de l'aspect environnemental. Nous allons poursuivre le travail déjà fait dans notre mémoire de fin d'étude d'ingénieur, où nous avons travaillé sur la minimisation des coûts engendrés par les espaces perdus dans les conteneurs et les opérations des expéditions. Nous introduisons un deuxième objectif qui sert à minimiser l'information CO₂ lors des livraisons des demandes clients. Pour cela, nous aborderons les trois chapitres suivants :

Le premier chapitre introduira les principales sources humaines des émissions des gaz à effet de serre. Nous expliquerons en chiffres les émissions engendrés par le secteur de transport et le secteur de production d'énergie et l'industrie. Ainsi, nous allons définir la logistique durable et les solutions approuvées pour réduire l'empreinte carbone, dont la plus importante est l'application du nouveau concept « internet physique ». De plus, nous allons présenter les

facteurs influençant les émissions de carbone liées aux transports routiers ainsi que les méthodes de calcul de la quantité CO₂ émise.

Le second chapitre sera constitué d'une partie très importante pour la réalisation de notre mémoire qui est les méthodes d'optimisation multiobjectif. Nous introduirons les bases de l'optimisation multiobjectif ainsi que ces différents algorithmes.

Pour le dernier chapitre, nous étudierons la résolution de notre problème. Ce dernier sera modélisé par un programme linéaire. Nous utilisons une approche multiobjectif basée sur la métaheuristique « NSGAI II ». Cet algorithme est programmé avec le langage de programmation VBA « Visual Basic for Application » afin de tester un scénario de distribution proposé inspiré d'un cas réel.

CHAPITRE I

Les émissions CO₂ et la logistique

1 Chapitre I : Les émissions CO₂ et la logistique

1.1 Introduction

La logistique se trouve dans une situation défavorable entre ses performances actuelles qui consistent à assurer la satisfaction du client et les performances attendues à moyen et à long termes qui visent à minimiser les flux de marchandises en intégrant une réduction de l'impact environnemental et en premier lieu des émissions de CO₂ de l'ordre de 20% en 2020¹. Notamment, le secteur de transport de marchandises qui était responsable de l'émission directe d'environ 9,7 Gt de CO₂ en 2018.

Dans ce contexte, les principaux enjeux associés aux transports sont aujourd'hui de réduire la consommation d'énergie du secteur et aussi ses émissions de gaz à effet de serre. Afin de réduire l'impact carbone de ce secteur, plusieurs solutions ont été proposées pour rendre la logistique plus durable, dont la plus importante est l'application du principe de « l'Internet physique ». Ce dernier repose sur l'idée d'encapsulation des marchandises dans des conteneurs modulaires standardisés pour minimiser la perte d'espace et passer d'un système de transport point à point à un système de transport distribué intermodal en minimisant les déplacements et par conséquent les émissions de gaz à effet de serre.

Ce premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les principales sources d'émission de gaz à effet de serre, les facteurs et méthodes de calcul d'émission de carbone ainsi que l'impact des activités logistiques sur l'environnement.

1.2 Les sources d'émission de CO₂

Les émissions de CO₂ sont le résultat de nombreux facteurs humains et naturels. Les sources naturelles incluent la décomposition, le rejet océanique, les sols, les plantes, les animaux et les volcans². Les sources humaines proviennent de nombreuses activités et de nombreux secteurs économiques, dont les plus importants sont :

¹CIRRELT, EPFL, Simulation de l'Internet Physique: contribution à la mesure des enjeux et à sa définition, juin 2012. Disponible sur http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0078/Temis-0078977/20871_rapport.pdf

²Les sources principales d'émissions de dioxyde de carbone, article. Disponible sur : <https://votreimpact.org>

1.2.1 Le secteur de transport

- En 2018, 24 % des émissions mondiales de CO₂ dues à la combustion d'énergie relève du secteur des transports³.
- Le secteur des transports a émis environ 9,7 Gt de CO₂ en 2018 et la plupart des émissions de carbone dues aux transports proviennent du secteur routier.

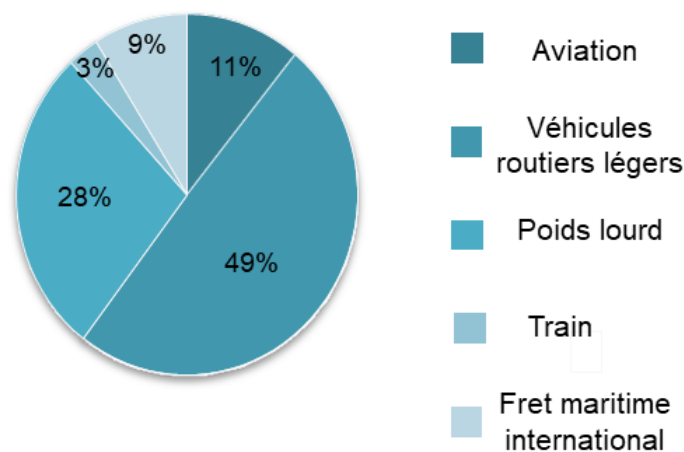


Figure 1.1: Emission de carbones liés aux transports routiers en 2018

- Au cours des deux dernières décennies, le secteur du transport routier a contribué d'environ 80 % à l'augmentation des émissions totales de CO₂ du secteur des transports.
- La demande d'énergie du transport routier a augmenté avec un taux de croissance annuel de 1,3% à partir de 2017 par rapport à 2016. En 2018, le secteur du transport routier représentait environ 77 % de la demande énergétique mondiale du secteur des transports⁴.
- Les émissions de carbone du transport ferroviaire sont estimées à 247 millions de tonnes en 2018, ce qui représente environ 2 à 3 % des émissions mondiales de CO₂ liées au transport.
- Les émissions de carbone du transport maritime international ont été estimées à environ 870 millions de tonnes de CO₂ en 2018, soit environ 9 % des émissions mondiales de CO₂ liées au transport.

³Transports mondiaux : émissions de CO₂ en hausse, article, 16 Aout 2017. disponible sur : <https://www.planete-energies.com>

⁴Ronan Dantec, CLIMATE CHANCE « CAHIER SECTORIEL » - BILAN 2019 DE L'ACTION CLIMAT PAR SECTEUR. OBSERVATOIRE MONDIAL DE L'ACTION CLIMAT NON-ÉTATIQUE. Décembre 2019. Disponible sur: <https://www.climate-chance.org>

1.2.2 Le secteur de l'énergie « Utilisation des combustibles fossiles »

C'est la source d'émissions de dioxyde de carbone la plus considérable. Cette activité produit 87% des émissions de dioxyde de carbone de source humaine. La combustion de ces combustibles libère de l'énergie, une énergie pour la plupart transformée en chaleur, en électricité ou en carburant utilisé dans le secteur des transports. En 2018, les émissions mondiales de CO₂ liées à la combustion de combustibles fossiles et aux procédés industriels ont atteint 36,6 Gt de CO₂.

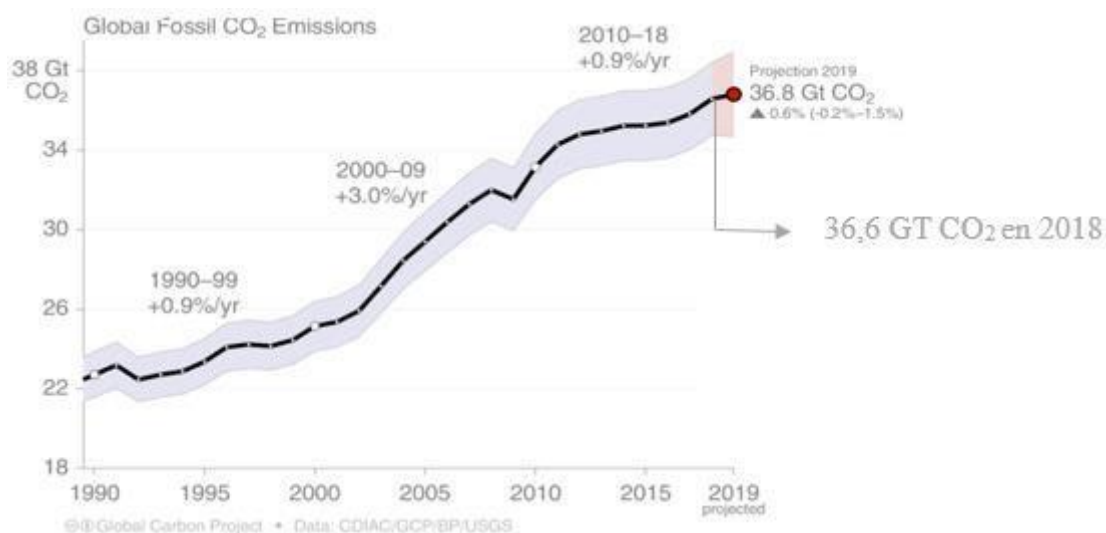


Figure 1.2: les émissions mondiales de CO₂ liées à la combustion de combustibles fossiles⁵

1.2.3 Procédés industriels

A l'échelle mondiale, les activités industrielles ont été responsables de l'émission directe d'environ 7,6 milliards de tonnes de CO₂ en 2018. Cela représente environ un quart des émissions de gaz à effet de serre mondiales. De nombreux procédés industriels émettent du dioxyde de carbone de façon directe, par le biais de la combustion des combustibles fossiles, mais aussi de façon indirecte, par l'intermédiaire de l'utilisation de l'électricité générée par les combustibles fossiles. Néanmoins, il y a quatre types de procédés industriels majeurs qui représentent une source importante d'émissions de dioxyde de carbone à savoir : La production et la consommation de produits minéraux comme le ciment. Les estimations ont été revues sensiblement à la baisse, passant de 2,02 milliards de tonnes de CO₂ en 2016 à 1,48 Gt de CO₂ pour 2017.

La production de métaux tels que le fer et l'acier et la production de produits chimiques

⁵ Global carbonproject, 10 janvier 2020. Disponible sur : <https://www.citepa.org>

représentent aussi une source importante des émissions CO₂. Les émissions directes du secteur de la chimie étaient estimées à 1,25 milliards de tonne de CO₂ en 2017.

1.3 Les émissions des gaz à effet de serre en Algérie

L'Algérie, comme les autres pays du monde, souffre du problème d'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, qu'était de l'ordre de 156 Mt de CO₂ en 2018⁶.

En Algérie, les deux importants gaz qui constituent la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre sont le CO₂ et le CH₄. Les émissions proviennent essentiellement du :

1.3.1 Secteur de l'énergie

Dans le secteur de l'énergie, les émissions de gaz à effet de serre résultent de l'exploration des sources d'énergie primaire, de la conversion de ces énergies sous forme d'énergie plus utile dans les raffineries et les centrales électriques. En 2017, les émissions nationales de CO₂ liées à la transformation d'énergie dans les centrales électriques ont atteint 42.93 Mt de CO₂. (41,82 Mt de CO₂, 0,55 Mt de CH₄, 0,55 Mt de N₂O) et 3.05 Mt (2.95 Mt de CO₂, 0,085 Mt de CH₄, 0,014 Mt de N₂O) pour les raffineries⁷.

1.3.2 Secteur de transport

Avec 36.5% % de la consommation d'énergie finale et 36,35% des émissions globales de CO₂, le secteur de transport a représenté, en 2017, le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en Algérie avec un total des émissions de GES avoisinant 29 Mt tonne. Notons que la plupart des émissions de carbone dues aux transports proviennent du secteur routier.

Dans ce contexte, L'Algérie a engagé plusieurs efforts pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Selon les explications de M. Kamel Dali, directeur des projets à l'APRUE⁸, l'Algérie a évité l'émission de 1,1 millions de tonnes de CO₂ en 2015. L'objectif est désormais de passer à 32,1 millions de tonnes en 2020 et 95,9 millions de tonnes à l'horizon 2025 puis 193,3 millions de tonnes à l'horizon 2030⁹.

⁶<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>

⁷KaddouriHoudaifa, TinamriAdnan, Réalisation d'un bilan carbone pour différents secteurs en Algérie, mémoire, 2019. Disponible sur : <https://dspace.univ-ouargla.dz>

⁸ L'APRUE : l'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie

⁹Algérie presse service, efficacité énergétique, article, 12 mars 2019. Disponible sur : <http://www.aps.dz>

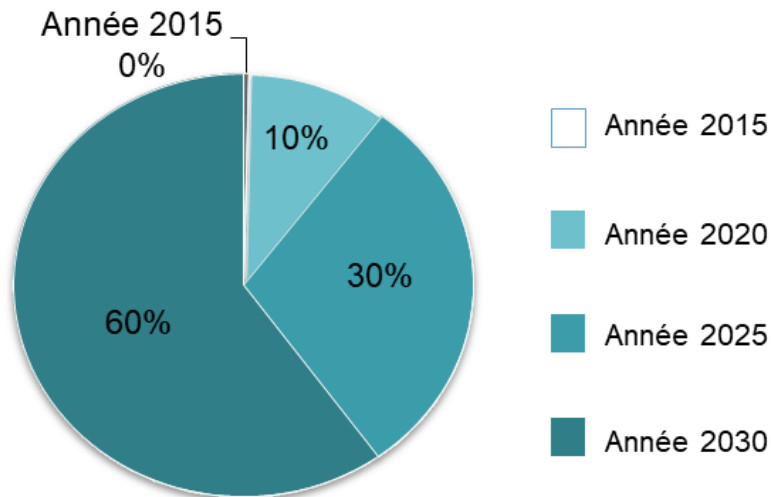


Figure 1.3: les émissions de co2 évitées en Algérie à l'horizon de 2030

1.4 Les émissions CO₂ et la logistique

Les activités logistiques représentent à peu près 5,5 % de la totalité des émissions mondiales de gaz à effet de serre sur le plan mondial, alors que le transport, l'entreposage et la manutention des marchandises représentent 10 à 11 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie¹⁰. De plus, les deux-tiers des émissions de GES provenant du secteur des transports sont imputables aux véhicules utilitaires légers et aux poids lourds. Les activités logistiques engendrent aussi des nuisances, parmi lesquelles nous citons : la détérioration de la qualité de l'air, le bruit et les vibrations, des accidents et le réchauffement de la planète.

1.4.1 Comment la logistique réduit son empreinte carbone ?

Plusieurs solutions ont été proposées pour réduire l'empreinte carbone, parmi lesquelles nous présentons les suivantes :

1.4.1.1 La présence des centres de regroupement

C'est l'idée de « l'internet physique », elle contribue beaucoup à réduire l'empreinte carbone des entreprises, surtout dans les grandes villes où le transport de marchandises est important. De plus, le regroupement des chargements de plusieurs clients et la coordination entre expéditeurs et transporteurs aide à éviter la dispersion des marchandises en petites unités convoyées vers de nombreuses destinations par des véhicules peu chargés et donc à faire baisser le niveau du trafic, la consommation d'énergie, les émissions et les coûts.

¹⁰ Groupe de travail du transport intermodal et de la logistique, rapport concernant la logistique respectueuse de l'environnement, 17 août 2016. disponible sur : <https://www.unece.org/>

1.4.1.2 Limiter les conséquences négatives du problème « dernier kilomètre »

Si le secteur veut engager des réductions durables d'émissions de gaz à effet de serre, il va devoir s'intéresser au problème du « dernier kilomètre », le maillon le plus coûteux (20% du montant) et le plus polluant de la chaîne de livraison. Aujourd'hui, de nombreuses solutions se mettent en place pour limiter les conséquences négatives de ce problème. Nous citons par exemple : le e-commerce ou la livraison et l'achat en ligne qui génère aujourd'hui 80% du volume de colis livrés. Cette logistique urbaine bénéficie des solutions efficaces et nouvelles, le remplacement des véhicules diesel par des utilitaires électriques et encore mieux, par l'auto-partage de véhicules propres.

1.4.1.3 Appliquer les dimensions de la logistique durable

The Sustainable Supply Chain Management ou la chaîne logistique durable s'apprécie comme la gestion des flux de matières, d'informations, financiers, de personnes et d'intelligence. Elle requiert la conjonction de trois principaux piliers ¹¹:

1.4.1.3.1 Le volet « environnemental » de la logistique durable

Au sein de cette logistique environnementale, il est possible de considérer trois principaux axes :

a. Le transport vert : recherche la multi-modalité par l'utilisation de plusieurs moyens de transport moins polluants.

b. Les opérations vertes : qui se rapportent à la gestion des déchets afin de limiter les déchets ultimes, aussi la gestion des retours : invendus, réparations et la production et reproduction verte dans l'optique d'utiliser le moins de matières dans le processus de fabrication.

c. la conception verte : elle consiste à prendre en compte des critères environnementaux dès la phase de conception du produit.

1.4.1.3.2 Le volet « économique » de la logistique durable

La logistique durable « économique » se fonde dans les connexions intra et inter organisationnelles. On y trouve tous les travaux et pratiques associés aux trois logistiques de

¹¹JoelleMorana, état des lieux et enjeux de la logistique durable, conférence, 23 octobre 2014. Disponible sur <https://www.researchgate.net>

base, à savoir : la logistique amont (dans ses relations avec les fournisseurs), la logistique interne (qui représente le processus industriel) et la logistique aval (celle qui est au plus près du consommateur final).

Le volet économique prend en compte d'autres éléments. Parmi ceux-ci : la gestion des transports, le rôle des prestataires logistiques, la gestion de la traçabilité et le domaine de la gestion de l'information.

1.4.1.3.3 Le volet «social/sociétal» de la logistique durable

Dans ce volet social/sociétal, nous citons :

a. Sur le plan interne : quatre facteurs sont considérés, à savoir, la justice (les droits des salariés), l'implication (la reconnaissance et la valorisation des compétences), la satisfaction et l'identification.

b. sur le plan externe : on examinera l'attractivité, l'image de marque et l'assistance des acteurs externes.

1.5 Les Facteurs et méthodes de calcul d'émission de gaz à effet de serre

1.5.1 Les facteurs d'émission de GES

Les émissions liées aux transports routiers de marchandises proviennent de plusieurs facteurs qui sont classifiés selon les quatre catégories suivantes¹² :

1.5.1.1 Caractéristiques du véhicule

1.5.1.1.1 Catégorie du véhicule

Les émissions de gaz à effet de serre sont différentes d'un type de véhicule à un autre. Par exemple les camions lourds émettent plus de GES que les camions légers et les automobiles¹³. De plus un camions lourd peut contenir différentes caractéristiques tels que le nombre d'essieux, le nombre de remorques, la longueur de remorque, etc. Ce facteur est contrôlable, donc l'entreprise doit tenir compte de ces caractéristiques environnementales lors de l'achat d'un véhicule.

¹²Marie Pier Trépanier ,Leandro Coelho ,Facteurs et méthodes de calcul d'émission de gaz à effet de serre, février 2017. Disponible sur :<https://www.cirreft.ca/documentstravail/cirreft-2017-08.pdf>

¹³Daniel Berton, les véhicules lourds devant les autos et les véhicules légers, article,02 décembre 2018 . Disponible sur<https://roulezelectrique.com/ges-les-vehicules-lourds-devant-les-autos-et-les-camions-legers/>

1.5.1.1.2 Type de carburant

Les émissions d'échappement de CO₂ varient selon le type de carburant en raison de leur densité différente. Le tableau ci-dessous résume les émissions de CO₂ de divers carburants de transport ¹⁴:

Tableau 1.1: les émissions de CO₂ générés par les différents types de carburant de transport.

Type de carburant	Emissions de CO ₂ (Kg/L)
Essence	2.38
Gazole	2.65
GPL	1.78
Gaz naturel	2.74

1.5.1.1.3 Poids du véhicule

Le poids du véhicule joue un rôle très important en ce qui a trait aux émissions. Une étude du MIT (Massachusetts Institute of Technology) a estimé que d'ici 2035, une réduction de 35% de consommation de carburant, accréditée à la diminution de 20% des poids des véhicules à leur fabrication. Au cours de ces dernières années les fabricants réduisaient le poids des véhicules en fabricant de petits moteurs, en recourant à des matériaux plus légers, comme l'aluminium. Donc la réduction de poids du véhicule pourrait réduire la consommation de carburant

1.5.1.2 Caractéristiques du trajet

1.5.1.2.1 Le relief de la route

Le relief de la route mesuré en degré, joue un rôle dans la consommation de carburant d'un véhicule lourd. Par exemple : si le camion doit monter une pente abrupte, il devra consommer beaucoup plus de carburant que s'il était dans une pente descendante. Toutefois, le moyen pour consommer le moins de carburant possible est la constante, c.à.d. de rouler sur une route avec un relief de zéro, soit à plat.

1.5.1.2.2 Distance à parcourir

Plus la distance à parcourir sera petite, moins il y aura d'émissions CO₂, c'est pour cela

¹⁴<https://www.moteurnature.com/actu/consommation-emission-CO2.php>

plusieurs problèmes de tournées de véhicules (VRP) existent pour diminuer les distances.

1.5.1.3 Caractéristiques du trafic

1.5.1.3.1 Vitesse moyenne

Il existe des dispositifs sur les véhicules qui calculent la vitesse moyenne entre deux points. Certaines méthodes de calcul utilisent cette donnée. Cette dernière est utilisée pour calculer la consommation moyenne de carburant dans un trajet.

1.5.1.3.2 Congestion routière

Il existe quatre types de congestion routière, en ordre décroissant de congestion : la congestion « stop and go », la congestion saturée, la congestion chargée et la congestion fluide. Certaines méthodes estimeront des facteurs d'émission pour chaque type de congestion et l'appliqueront à leurs modèles.

1.5.1.4 Caractéristiques environnementales

Les conditions climatiques ont un impact sur les émissions polluantes. Ces facteurs sont peu prédictibles et totalement incontrôlables. Par exemple la vitesse du vent augmente la force d'inertie avec le véhicule en mouvement, ce qui implique une augmentation de consommation d'essence.

Le tableau ci-dessous résume les 27 facteurs influençant les émissions des gaz à effet de serre.

Tableau 1.2: Les 27 facteurs influençant les émissions des gaz à effet de serre

Caractéristiques du véhicule	Caractéristiques du trajet
<ul style="list-style-type: none"> • Catégorie de véhicule. • Poids du véhicule. • Type de carburant. • Age du véhicule. • Cylindrée du moteur. • Type de transmission. • Configuration des pneus. • Viscosité de l'huile. • Aérodynamisme. • Fréquence de l'entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> • poids du chargement. • Distance à parcourir. • Type de chaussée. • Etat de la chaussée. • Relief de la route. • Type de conducteur. • Degré d'utilisation des appareils auxiliaires électroniques.

Caractéristiques du trafic	Caractéristiques environnementales
<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse moyenne. • Congestion routière. 	<ul style="list-style-type: none"> • Températures ambiante. • Vitesse du vent. • Altitude. • Précipitation. • Humidité. • Utilisation de la climatisation. • Température du moteur. • Démarrage à froid moteur.

1.5.2 Calcul d'émission de gaz à effet de serre :

Les méthodes de calcul nationales et internationales des GES se basent toutes sur le même principe :

➤ Convertir la consommation d'une quantité de source d'énergie en dioxyde de carbone ou en équivalent dioxyde de carbone (lorsque l'on tient compte des autres gaz à effet de serre que le CO₂) par l'utilisation d'un facteur d'émission qui est spécifique à l'élément qui est consommé¹⁵.

$$\text{Emission CO}_2 = \text{consommation de source d'énergie} \times \text{facteur d'émission.}$$

L'unité de mesure des gaz à effet de serre est le gramme équivalent carbone noté gC ou geqC et ses multiples (le kg équivalent carbone, noté kgC, et le tonne équivalent carbone, que l'on notera aussi tC ou teqC)¹⁶.

1.6 Conclusion

Dans un contexte d'économie verte et durable, nombreux sont les pays qui essayent de mettre en place des systèmes de transport permettant la réduction des quantités de CO₂ émises afin d'avoir des chaînes de distribution efficaces en terme de coûts logistiques et de contraintes environnementales.

¹⁵ Information co2 des prestations de transport, guide méthodologique . Disponible sur :

http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide2_information_co2_cle7a3f22.pdf

¹⁶<http://www.uccle.be/administration/environnement/air-et-climat/Rapport%20Bilan%20Carbone%20220909.pdf>

Ce chapitre nous a permis de présenter les statistiques mondiales et celles de l'Algérie relatives aux émissions CO₂ ainsi que les objectifs visés à court et moyen terme. Les facteurs influençant les émissions CO₂ sont aussi détaillés afin de faciliter le calcul de ces émissions.

CHAPITRE II

Les méthodes d'optimisation multiobjectif

2 Chapitre II : Les méthodes d'optimisation multiobjectif

2.1 Introduction

L'optimisation multiobjectif est une branche de l'optimisation mathématique traitant spécifiquement des problèmes d'optimisation ayant plusieurs fonctions objectifs. Les premiers travaux menés sur les problèmes de cette dernière furent réalisés au 19^{ème} siècle sur des études en économie par Edgeworth et généralisés par Pareto.

Depuis les années 80, le domaine de l'aide à la décision multicritère permet de chercher des solutions de compromis pour des problèmes comportant plusieurs critères. Il s'agit de définir au préalable les critères à optimiser (minimiser ou maximiser) et de choisir l'algorithme d'optimisation qui permettra la résolution du problème en cherchant les meilleures solutions ayant un compromis entre ces critères.

De nombreuses méthodes existent pour résoudre les problèmes d'optimisation multiobjectif. Les premières tendances aboutissent à des méthodes purement mathématiques, dont elles ne peuvent pas tendre vers l'ensemble de solutions dans un temps minimal comme : la programmation linéaire. En outre, une deuxième tendance ayant pour but d'avoir des méthodes qui tendent vers l'ensemble des solutions dans un temps optimal et d'une manière simple en se basant sur le principe des heuristiques, comme : les métaheuristiques (Le Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGAI), Archived Multiple Objective Simulated Annealing(A. M.O.S.A)...,etc.).

2.2 L'optimisation multiobjectif

L'optimisation multiobjectif permet de rechercher les valeurs des variables d'un problème qui maximisent ou minimisent plusieurs fonctions objectifs. La formulation du problème d'optimisation comporte les étapes suivantes¹⁷ :

- Exprimer les critères (ou fonctions) objectif d'optimalité.
- Choisir les paramètres (ou variables) d'optimisation.
- Définir un espace admissible pour les variables d'optimisation.
- Définir les contraintes associées.

Les problèmes multiobjectif ont la particularité d'être beaucoup plus difficiles à traiter que leur équivalent mono-objectif. La difficulté réside dans l'absence d'une relation d'ordre total

¹⁷Jean Dipama, optimisation multiobjectif des systèmes énergétiques, thèse de doctorat, université de Montréal, Avril 2010. Disponible sur : <https://publications.polymtl.ca>

entre les solutions c.à.d. une solution peut être meilleure qu'une autre sur certains objectifs et moins bonne sur les autres. Donc généralement il n'existe pas une solution unique qui procure simultanément la solution optimale pour l'ensemble des objectifs. Dans ce cas la solution optimale n'est plus une solution unique, mais un ensemble de solutions compromis entre les différents objectifs à optimiser.

2.3 Formulation générale d'un problème d'optimisation multiobjectif

Un problème d'optimisation multiobjectif peut être formulé d'une façon générale selon les équations suivantes :

Minimiser (ou maximiser) $f_i(X)$ $i=1,2,\dots, m$

Soumis aux contraintes

$g_j(X) \geq 0$ $j=1,2,\dots, q$

$h_k(X) = 0$ $k=1,2,\dots, p$

Où

- m est le nombre de fonctions objectif.
- $X=[x_1, x_2, x_3,\dots, x_n]$ est un vecteur de n variables de décision.
- $g_j(X)$ et $h_k(X)$ sont respectivement des contraintes d'inégalités et d'égalités.

Les fonctions objectifs du problème d'optimisation forment un espace multidimensionnel appelé espace des fonctions objectifs.

Le schéma de la figure ci-dessous illustre les deux espaces, espace décisionnel et espace des fonctions objectifs. Pour chaque solution $X=(x_1, x_2, x_3,\dots, x_n)$ dans l'espace des variables de décision, il existe un point dans l'espace des fonctions objectif tel que $F(X)=(f_1(X), f_2(X),\dots, f_m(X))$.

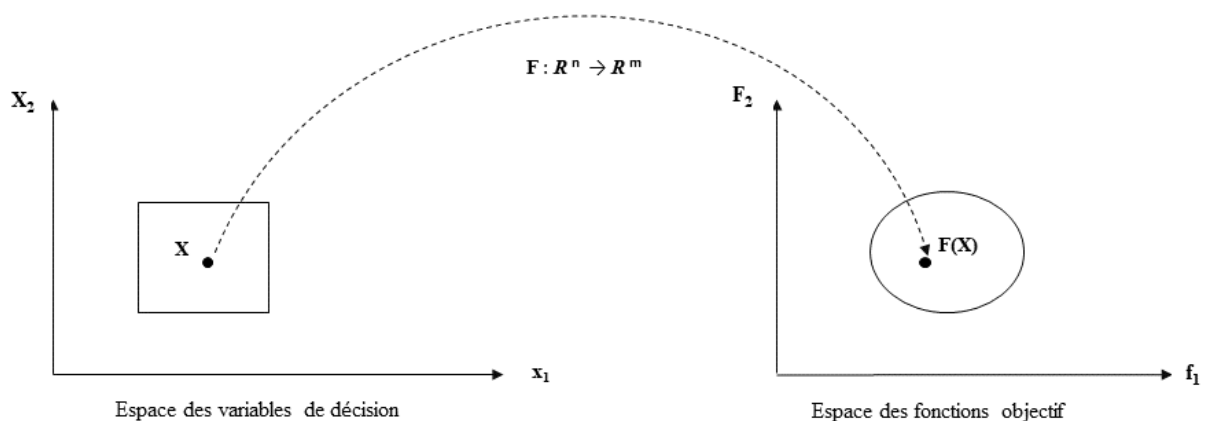


Figure 2.1: Représentation d'un problème multiobjectif

2.4 Notions de dominance et optimalité de Pareto

Le concept de "l'optimalité de Pareto" est utilisé pour établir une hiérarchie entre les solutions d'un problème multiobjectif en vue de déterminer si une solution appartient réellement à l'ensemble des meilleurs compromis.

Pour mieux comprendre le concept de l'optimalité de Pareto, introduisons d'abord la notion de "dominance de Pareto".

- Soit deux vecteurs U et V dans l'espace des fonctions objectif où un problème de minimisation est considéré.
- On dit que le vecteur $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ domine le vecteur $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, si et seulement si toutes les composantes de U sont inférieures ou égales à celles correspondantes dans V , et au moins une composante de U est strictement inférieure à celle correspondante dans V . autrement dit le vecteur U est au moins aussi bon que le vecteur V et le vecteur U est strictement meilleur que le vecteur V dans au moins un objectif.

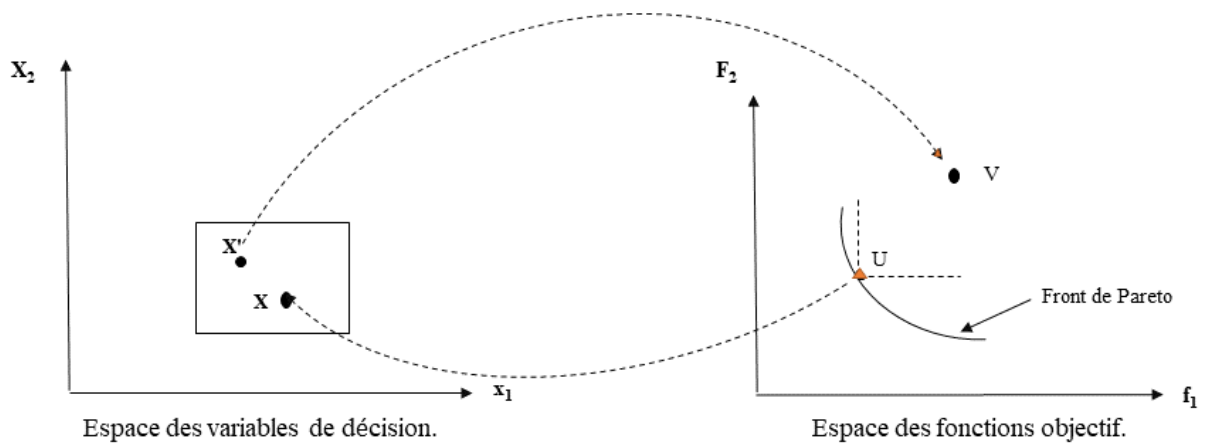


Figure 2.2: Dominance de Pareto et optimalité de Pareto

- L'ensemble des solutions optimales est appelé "ensemble Pareto optimal", c'est-à-dire celles qui couvrent tout le front de Pareto.
- Dans le contexte de l'optimisation multi-objectif, on vise en général à trouver l'ensemble des solutions Pareto optimales et assurer que les solutions soient suffisamment différentes les unes des autres.

2.5 Les exemples sur les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif

2.5.1 Les approches non Pareto

Les approches non Pareto sont classées en deux catégories :

- Les approches scalaires, qui transforment le problème multiobjectif en problème mono-objectif.
- Les approches non scalaires, qui gardent l'approche multiobjectif, mais en traitant séparément chacun des objectifs.

2.5.1.1 La méthode scalaire « méthode de pondération des fonctions objectifs »

Cette approche de résolution de problème d'optimisation multiobjectif est simple à traiter. Le principe est de revenir à un problème d'optimisation mono-objectif, dont il existe de nombreuses méthodes de résolution. La manière la plus simple de procéder consiste à prendre chacune des fonctions objectifs, à lui appliquer un coefficient de pondération et à faire la somme des fonctions objectifs pondérées. On obtient alors une nouvelle fonction objectif. La transformation que l'on effectue est la suivante¹⁸ :

$$\text{Minimiser } \sum_{i=1}^k W_i f_i(x)$$

Soumis aux contraintes

$$g_j(X) \geq 0 \quad j=1,2,\dots, q$$

$$h_k(X) = 0 \quad k=1,2,\dots, p$$

Où

- $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ est un vecteur de n variables de décision.
- Les fonctions $g_j(X)$ et $h_k(X)$ sont respectivement des contraintes d'inégalités et d'égalités.

• W_i Appelé le poids, est une pondération associée au critère, cette pondération permet d'exprimer des préférences sur les critères de décision. $W_i \geq 0$ pour tous les $i \in \{1, \dots, k\}$ et $\sum_{i=1}^k W_i = 1$

Afin de mieux comprendre cette méthode, on peut représenter graphiquement le fonctionnement sur un problème à deux objectifs, l'exemple est le suivant :

$$\begin{aligned} &\text{Minimiser } f_1(x) \\ &\text{Minimiser } f_2(x) \\ &\text{Avec } g_j(X) \geq 0 \quad j=1,2,\dots, q \end{aligned}$$

¹⁸Yann collecte, Patrick Siarry , Optimisation multiobjectif, disponible livre .Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/optimisation-multiobjectif>

Et $h_k(X) = 0$ $k=1,2,\dots, p$

- La nouvelle fonction objectif :

Minimiser $W_1 \cdot f_1(x) + W_2 \cdot f_2(x)$, cette l'expression représente une droite dans le plan f_1, f_2 . Pour minimiser cette fonction objectif on cherche une constante C de cette équation :

$$f_2(x) = \frac{W_1}{W_2} \cdot f_1(x) + C$$

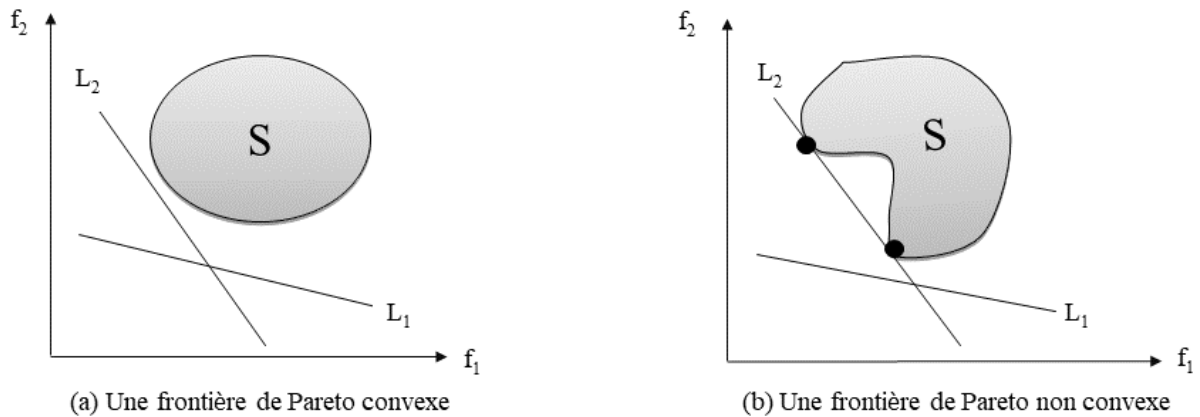


Figure 2.3: Illustration de la méthode pondération des fonctions objectifs en cas d'optimisation bi-objectif.

- L'ensemble S correspond à l'ensemble des valeurs du couple (f_1, f_2) en respectant les contraintes.
- Les droites L_1 et L_2 représentent les deux couples de coefficients de pondération (w_1, w_2) différents.
- Cette méthode consiste à construire la tangente entre les deux droites et l'ensemble S, le point de tangence est la solution recherchée.
- Cette méthode est très efficace du point de vue algorithmique, mais elle ne permet pas de trouver les solutions enfermées dans des concavités, c.à.d. cette méthode n'est applicable qu'à des ensembles S convexes.

2.5.2 L'algorithme multiobjectif « NSGA II »

Le Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA II) est une métaheuristique d'optimisation multiobjectif proposée par K. Deb en 2002. Elle est la version améliorée des algorithmes NSGA et NSGA-I [Deb, 1999 ; Deb et al, 2002]¹⁹.

¹⁹Riadh MADIOUNI, Contribution à la synthèse et l'optimisation multiobjectif par essais particuliers de lois de commande robuste RST de systèmes dynamiques, thèse de doctorat, l'école nationale d'ingénieurs de Tunis, juin 2016. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr>

L'algorithme NSGA II est considéré comme étant le meilleur et le plus efficace parmi les algorithmes multiobjectif évolutionnaires. Cet algorithme est conçu en utilisant une approche élitiste permettant de retenir que les meilleurs individus au cours des générations. Le NSGA-II utilise la notion de dominance et une autre technique de comparaison pour calculer la distance de surpeuplement, dite aussi de "crowding".

2.5.2.1 Le principe de l'algorithme

L'algorithme NSGAI est basé sur plusieurs niveaux de classification des individus. Avant la sélection des individus, la population est classée sur la base du non dominance. Tous les individus non dominés sont stockés dans la même catégorie (rang). Ce groupe d'individus est ignoré et on considère une autre couche d'individus non dominés. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que tous les individus de la population soient classifiés. Puisque les individus dans le premier front ont les meilleures valeurs, ils obtiennent toujours plus de copies que le reste de la population. Ceci permet la meilleure recherche des régions de front optimal et mène à la convergence de la population vers ces régions.

Le principe de l'algorithme NSGA-II est illustré dans la figure suivant :

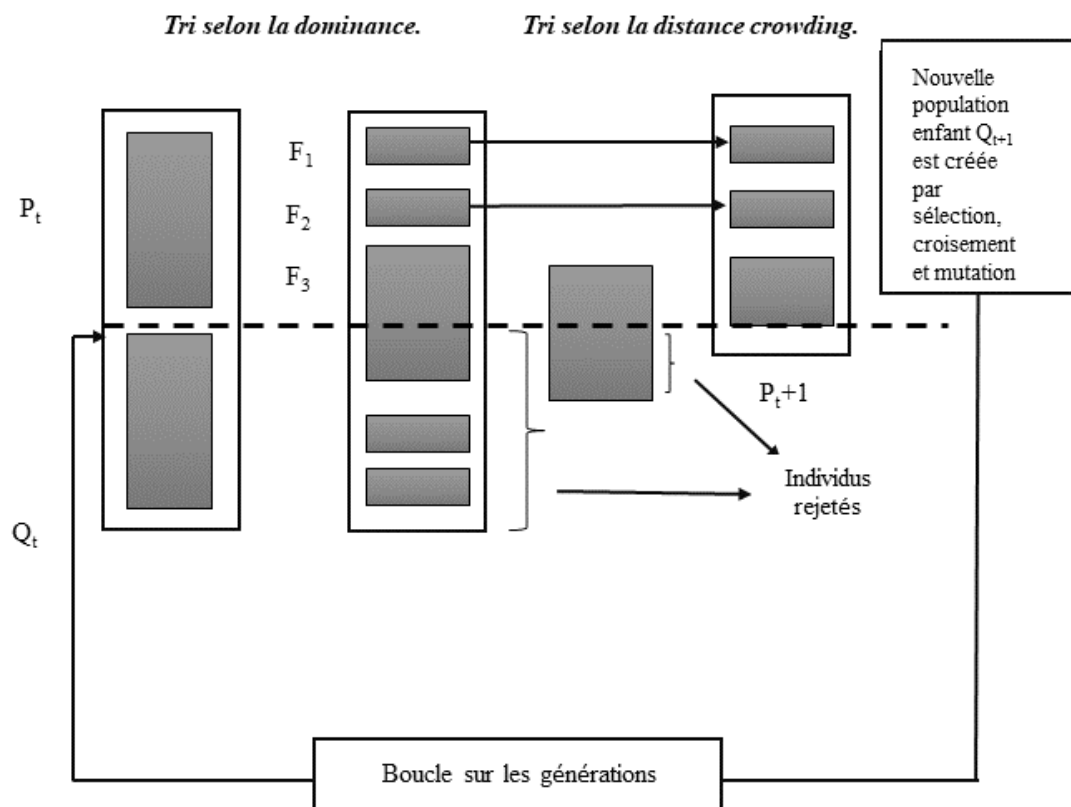


Figure 2.4: le principe d'algorithme NSGAI [Deb et al, 2002]

- La population $R_t = P_t \cup Q_t$ est la combinaison des deux populations, la population Parents P_t , de taille N , et la population Enfants Q_t . Cet assemblage permet d'assurer l'élitisme de l'algorithme et d'obtenir

- La procédure de tri permet de trier les $2N$ solutions en utilisant le principe de dominance et d'obtenir les n fronts de Pareto (F_1, F_2, \dots, F_n). Notons que les meilleures solutions appartiennent aux premiers fronts.

- Une nouvelle population de Parents P_{t+1} est formée par l'ajout des solutions trouvées en passant d'un front à l'autre tant que la taille de la population Parents P_{t+1} est inférieure à N . une procédure de "crowding" est appliquée sur le front F_i si l'ajout de toutes les solutions du front en question dans la population P_{t+1} n'est pas possible à cause du dépassement de la taille N . le "crowding" permet donc de déterminer les solutions à ajouter dans P_{t+1} . Une fois la population P_{t+1} est formulée, une nouvelle population Enfants Q_{t+1} est créée après les trois phases de sélection, de croisement et de mutation.

2.5.2.2 Calcul de la distance « crowding »

Elle est calculée en fonction du périmètre formé par tous les individus voisins d'une solution. Une procédure de tri des solutions dans un ordre ascendant sera lancée avant le calcul de la distance crowding. Ensuite, tous les individus auront à la fois une valeur minimale et une valeur maximale de la fonction objectif. Ces valeurs se voient associées une distance infinie. Pour les autres individus, on calcule la distance crowding qui est égale à la différence absolue normalisée entre les valeurs des deux solutions adjacentes pour chaque fonction objectif.

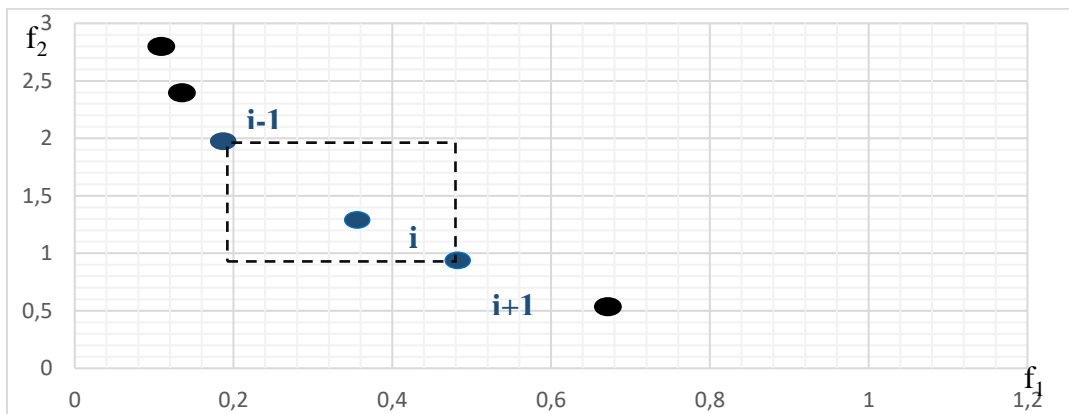


Figure 2.5: la distance crowding ou surpeuplement

2.5.3 La méthode TOPSIS « technique for Order by Similarity to ideal

Solution »

TOPSIS est l'une des méthodes classiques de résolution de certains problèmes de décision multicritère MCDM (Multi Criteria Decision Making). Proposée pour la première fois par (Hwang et Yoon, 1981)²⁰.

Le principe de cette méthode consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de s'éloigner le plus possible de la pire solution. En effet, la solution choisie par TOPSIS doit avoir la distance la plus courte de la solution idéale et la distance la plus long de la pire solution.

La méthode se présente comme suit :

- **Etape 1** : normalisation de la matrice des performances E :
- E matrice des performances composée de m alternatives et n critères.
- E' matrice des performances normalisée.

$$E' = \left[e'_{ij} = \frac{g_j(a_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [g_j(a_i)]^2}} \right] \text{ avec } i=1,2,\dots, m ; j=1,2,\dots, n$$

- **Etape 2** : pondération des performances :

$$E'' = e''_{ij} = W_{ij} * e'_{ij} \quad]$$

Avec $i=1,2,\dots, m ; j=1,2,\dots, n$

- **Etape 3** : déterminer les profils idéal (a^*) et anti-idéal (a_*) :

$$a^* = \{ \max E'' \ i = 1,2, \dots, m ; j = 1,2, \dots, n \} \text{ avec } E^* = \max E''$$

$$a_* = \{ \min E'' \ i = 1,2, \dots, m ; j = 1,2, \dots, n \} \text{ avec } E_* = \max E''$$

- **Etape 4** : Calculer les distances euclidiennes par rapport aux profils a^* et a_* :

$$D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E''_{ij} - E^*_j)^2} \text{ avec } i = 1,2, \dots, m$$

$$D_{i*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E''_{ij} - E_{*j})^2} \text{ avec } i = 1,2, \dots, m$$

- **Etape 5** : Calculer les coefficients de mesure du rapprochement au profil idéal :

$$C_i^* = \frac{D_{i*}}{D_{i*} + D_i^*}, \text{ avec } i = 1,2, \dots, m; 0 \leq C_i^* \leq 1$$

²⁰Abdelkader HAMMAMI, modélisation technico-économique d'une chaîne dans une entreprise réseau, thèse de doctorat, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/>

- **Etape 6** : Classer les actions en fonction des valeurs décroissantes de C_i^* .

2.5.4 Les méthodes floues

L'automaticien L. A. Zadeh a élaboré une nouvelle logique basée sur les ensembles flous. Elle permet de traiter l'imprécision et l'incertitude dans la connaissance humaine ainsi que les transitions progressives entre états. La différence principale entre une logique classique et cette logique floue est l'existence d'une transition progressive entre le VRAI et le FAUX.

2.5.4.1 Méthode de Sakawa

Cette méthode fait intervenir la logique floue à tous les niveaux (sur les paramètres du problème ainsi que sur les paramètres des contraintes). L'ensemble des solutions que l'on va trouver, lui aussi, fera intervenir la logique floue. Ces solutions auront un niveau d'appartenance. Ce seront des solutions qui auront une corrélation variable avec l'objectif initial (le niveau de corrélation avec l'objectif initial est fixé par l'utilisateur).

- **L'algorithme de la méthode Sakawa²¹** :

On part du problème suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f_1(X), \dots, f_k(X) \\ \text{Sous contrainte } g(x) \leq 0 \end{array} \right.$$

Où :

- k est le nombre de fonctions objectifs.
- $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ est un vecteur de n variables de décision.
- $g(X)$ contrainte d'inégalité.

Etape 1 : sous la contrainte $g(x) \leq 0$, on minimise, puis on maximise, chaque fonction objectif séparément, de manière à obtenir la plage de variation de la fonction d'appartenance des fonctions objectifs.

Etape 2 : On définit les fonctions d'appartenance de la manière suivante :

$$U_i(X) = \frac{f_{i1} - f_i(X)}{f_{i1} - f_{i0}}$$

- f_{i0} est la valeur de la fonction d'appartenance la moins intéressante.
- f_{i1} est la valeur de la fonction d'appartenance la plus intéressante.

²¹ Yann collecte, Patrick Siarry, Optimisation multiobjectif, disponible livre. Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/optimisation-multiobjectif>

Etape 3 : On définit les fonctions de prise de décision DM_i (Decision Making) comme suit :

$$DM_i(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } U_i(X) \leq 0 \\ U_i(X) & \text{si } 0 \leq U_i(X) \leq 1 \\ 1 & \text{si } U_i(X) \geq 1 \end{cases}$$

Où

- $DM_i(X) = 0$, quand l'objectif n'est pas atteint,
- $DM_i(X) = 1$, quand l'objectif est atteint.

Etape 4 : On maximise les fonctions $DM_i(X)$

Etape 5 : S'il n'y a pas de solutions, ou si la solution ne satisfait pas l'utilisateur, alors il faut modifier les fonctions d'appartenance, et retourner à l'étape 3.

Etape 6 : Arrêt et affichage des résultats.

Fin.

2.6 Conclusion

Dans la pratique, les problèmes d'optimisation sont rarement mono-objectif puisqu'il y a généralement plusieurs critères contradictoires à optimiser simultanément. Ainsi, la plupart de ces problèmes sont complexes et l'un des aspects contribuant à cette complexité est leur nature multiobjectif. Donc l'optimisation multiobjectif permet de résoudre particulièrement les problèmes d'optimisation liés à des problématiques réelles.

Dans ce chapitre, nous avons décrit la forme d'un problème d'optimisation multiobjectif, ainsi que quelques méthodes permettant sa résolution

CHAPITRE III

Minimisation des émissions CO₂ lors du transport de marchandises

3 Chapitre III : Minimisation des émissions CO₂ lors du TM

3.1 Introduction

Les approches multiobjectifs permettent souvent de trouver une solution qui représente un compromis entre plusieurs objectifs, les chapitres précédents ont présenté des statistiques nationales et internationales relatives aux émissions CO₂, ainsi que les facteurs et les méthodes de calcul de ces émissions. Nous avons aussi abordés plusieurs méthodes permettant la résolution des problèmes d'optimisation multiobjectifs.

Dans ce contexte, et en appliquant le concept de l'IP pour optimiser le flux de marchandises, nous traitons dans ce chapitre un problème multiobjectif visant à minimiser simultanément les coûts d'expédition ainsi que la quantité des émissions CO₂ générée lors du transport de marchandises. Nous proposons une approche de résolution basée sur l'algorithme «NSGAI» pour trouver la meilleure expédition des produits offrant le meilleur compromis entre les deux objectifs considérés.

3.2 Formule de calcul de l'information CO₂

Afin de calculer la quantité de CO₂ émise lors du transport routier de marchandises, nous utilisons la formule suivante :

Information CO₂²² = Taux de consommation de source d'énergie * distance * facteur d'émission * (nombre d'unités transportées / capacité moyenne de conteneur)

Où :

- Le facteur d'émission d'une source d'énergie est un coefficient qui permet de convertir une quantité d'énergie en émissions de CO₂ (kg (CO₂) /l).
- Le taux de consommation de CO₂ exprimé en kg/km.
- Une distance parcourue de la plateforme aux clients (km).

3.3 Définition du problème

Notre problème est défini comme suit :

Soit un ensemble de « n » articles de différentes tailles. Chaque article est emballé afin de le protéger contre toute dégradation lors des opérations de chargement, déchargement ou de

²² Information GES des prestations de transport, guide méthodologique, septembre 2018. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr>

déplacement. De cet emballage en résulte 6 positions possibles pour le placement de l'article dans le conteneur selon ses 6 faces. Chaque article emballé possède une longueur (LA), une largeur (WA), une hauteur (HA), un poids (PA) et un volume (VA).

Ces n articles doivent être chargés dans un nombre limité et optimal de conteneurs appartenant à un ensemble de « l » conteneurs. Ces derniers sont caractérisés par une longueur (LC), une largeur (WC), une hauteur (HC), un volume (VC) et une capacité maximale (CapC).

Ces « l » conteneurs sont réservées pour approvisionner des clients appartenant à un ensemble de « m » clients, où chacun possède une demande d'article bien déterminée que nous devons satisfaire. Les clients sont partagés en un ensemble de p zones.

Pour chaque client, nous avons mesuré une distance (Dist) entre le point de départ (plateforme logistique) et le point d'arrivée (client).

Nous avons introduit un facteur d'émission qui permet de convertir une quantité d'énergie en émissions de CO₂ (kg (CO₂) /l) y compris un taux de consommation d'une source d'énergie, afin de calculer la quantité de CO₂ émise lors de l'expédition des produits.

Le transport routier de marchandises reste l'un des principaux émetteurs de CO₂, notre objectif est d'optimiser ces flux tout en tenant compte de l'aspect environnemental. Ceci signifie que nous devons trouver la meilleure livraison des produits qui permet de minimiser la quantité des émissions CO₂ ainsi que les coûts engendrés par les espaces perdus dans les conteneurs sélectionnés et les coûts générés par les expéditions des articles demandés, tout en satisfaisant les demandes clients et en respectant les capacités des conteneurs sélectionnés.

Ce problème d'optimisation est de classe des problèmes NP-difficile. Ces derniers n'ont pas d'algorithme permettant de les résoudre de manière optimale pour les instances de grande taille dans un temps de calcul raisonnable.

Pour la résolution de ce problème, nous utilisons un programme linéaire que nous résolvons par une approche multi-objectif basée sur les métaheuristiques.

3.4 Méthodes de résolution utilisées

3.4.1 Le programme linéaire

Le programme linéaire est adapté pour résoudre les problèmes mathématiques qui consistent à optimiser (maximiser ou minimiser) une fonction linéaire de plusieurs variables qui sont reliées par des relations linéaires appelées contraintes.

Nous présentons en ce qui suit un modèle mathématique avec deux fonctions objectifs et des contraintes. La résolution de ce problème se fera par un algorithme génétique « NSGAI » qui sera détaillé dans les sections suivantes.

3.4.2 Métaheuristique multiobjectif

Les algorithmes génériques sont des métaheuristiques applicables à une grande variété de problèmes. Ce sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global. La plupart de ces méthodes sont inspirées de la physique (recuit simulé), de la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou de l'éthologie (essais particuliers, colonies de fourmis).

Nous nous intéressons dans ce travail aux algorithmes évolutionnaire multiobjectifs pour la résolution de notre problème visant à minimiser les coûts logistiques ainsi que les émissions CO₂.

Notre choix s'est porté sur la méthode NSGAI qui est considérée dans la littérature comme la meilleure et la plus efficace parmi les méthodes multiobjectif évolutionnaires.

3.5 Le programme linéaire

3.5.1 La formulation du problème

Etant donnés :

- A un ensemble de n articles (i) de formes parallélépipédiques différentes ayant chacun les caractéristiques suivantes : une longueur $LA(i)$, une largeur $WA(i)$, une hauteur $HA(i)$, un volume $VA(i)$ et un poids $PA(i)$.
- C un ensemble de « m » conteneurs (j) ayant chacun les caractéristiques suivantes : une longueur $LC(j)$, une largeur $WC(j)$, une hauteur $HC(j)$, un volume $VC(j)$ et une capacité maximale $Cap(j)$.
- L un ensemble de « l » clients (k) ayant chacun une demande $D(i,k,z)$ et une distance $dist(k,z)$ qui le sépare de la plateforme logistique.
- P un ensemble de positions (n) tel que n varie de 1 à 6.
- B un ensemble de p zone.

Notre objectif est de minimiser les émissions CO₂ liées à l'expédition de marchandises. Afin de réduire l'impact du carbone et par conséquent rendre la logistique plus durable. Pour ce faire, nous utilisons le concept de l'IP afin de minimiser les espaces perdus dans les conteneurs et les déplacements à l'intérieur des différentes zones et par conséquent les émissions du gaz à effet de serre.

CHAPITRE III : Minimisation des émissions CO₂ lors du TM

La minimisation des coûts de transport de marchandises dans les conteneurs revient à minimiser les distances parcourues et à maximiser le taux de remplissage, pour l'obtention d'un nombre optimal de conteneurs sélectionnés. Ceci a une relation avec la façon du chargement des articles. Chacun de ses derniers peut être placé selon l'une des six positions possibles qui sont relatives au parallélisme par rapport aux axes dimensionnels du conteneur (longueur LC(j), largeur WC(j), hauteur HC(j)) comme l'indique le tableau suivant :

Tableau 3.1: les 6 positions possibles du placement d'un article dans un conteneur

Positions	Axes parallèles à LCj	Axes parallèles à WCj	Axes parallèles à HCj
1	Longueur LAi	Largeur WAi	Hauteur HAI
2	Largeur Wai	Longueur LAi	Hauteur HAI
3	Largeur Wai	Hauteur HAI	Longueur LAi
4	Longueur LAi	Hauteur HAI	Largeur WAi
5	Hauteur Hai	Largeur WAi	Longueur LAi
6	Hauteur Hai	Longueur LAi	Largeur WAi

3.5.2 Le modèle mathématique

➤ Les ensembles, les paramètres ainsi que les indices sont résumés dans le tableau suivant :

Indices	Ensembles	Paramètres
i : articles	A : articles	LAi : longueur de l'article i
j : conteneurs	C : conteneurs	WAi : largeur de l'article i
k : clients	L : clients	HAi : hauteur de l'article i
n : position	P : positions	VAi : volume de l'article i
z : zone	B : zones	PAi : poids de l'article i
		LCj : longueur du conteneur j
		WCj : largeur du conteneur j
		HCj : hauteur du conteneur j
		VCj : volume du conteneur j
		Capj : capacité du conteneur j
		Dikz : demande de l'article i du client k de la zone z
		Cep : cout de l'espace perdu /m ³
		Cexp : coût d'expédition /km
		distk,z : la distance totale de la plateforme au client k de la zone z
		taux_{consj} : le taux de consommation de CO ₂ (kg/km)
		fact : Le facteur d'émission d'une source d'énergie (kg (CO ₂) /l).

Tableau 3.2: les indices, les ensembles et les paramètres du modèle

➤ Les variables de décision :

- $X_{j,z}$: variable binaire égale à 1 si le conteneur j est réservé pour la zone z, 0 si non.
- $Q_{j,k,z}$: variable binaire égale à 1 si le conteneur j est réservé pour le client k de la zone z, 0 si non.
- $Y_{i,j,n,k,z}$: variable binaire égale à 1 si l'article i du client k de la zone z est chargé dans le conteneur j avec la position n, 0 sinon.
- $W_{i,j,n,k,z}$: variable entière indiquant la quantité d'article i du client k de la zone z chargée dans le conteneur j avec la position n.

➤ Les fonctions objectifs :

$$\text{Min } \sum_{z=1}^p \sum_{j=1}^m (\text{taux}_{\text{consj}} * \text{fact} * S * \sum_{k=1}^l \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^6 W_{i,j,n,k,z} - \sum_{k=1}^{l-1} W_{i,j,n,k,z}}{\text{Cap}_j}) \dots \quad (3.1)$$

$$\text{Min } \sum_{z=1}^p \sum_{j=1}^m ([(VC_j * X_{jz}) - \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^6 (VA_i * W_{i,j,n,k,z})] * C_{ep} + S * C_{exp}) \dots \quad (3.2)$$

$$S = \begin{cases} \sum_{k=1}^l \text{dist}_{k,z} * Q_{j,k,z} + \sum_{y=1}^{\frac{l}{2}-1} \sum_{t=1}^{l-2*y} \text{dist}_{t,z} * Q_{j,t,z} * \prod_{a=1}^{2*y} \sum_{b=t+a}^{l-2*y-a} Q_{j,b,z} - \\ \sum_{y=0}^{\frac{l-3}{2}} \sum_{t=1}^{l-(2*y+1)} \text{dist}_{t,z} * Q_{j,t,z} * \prod_{a=1}^{2*y+1} \sum_{b=t+a}^{l-(2*y+1-a)} Q_{j,b,z} \dots \text{ si } l \text{ est pair} \\ \sum_{k=1}^l \text{dist}_{k,z} * Q_{j,k,z} + \sum_{y=1}^{\frac{l-1}{2}} \sum_{t=1}^{l-2*y} \text{dist}_{t,z} * Q_{j,t,z} * \prod_{a=1}^{2*y} \sum_{b=t+a}^{l-2*y-a} Q_{j,b,z} - \\ \sum_{y=0}^{\frac{l-1}{2}-1} \sum_{t=1}^{l-(2*y+2)} \text{dist}_{t,z} * Q_{j,t,z} * \prod_{a=1}^{2*y+1} \sum_{b=t+a}^{l-(2*y+1-a)} Q_{j,b,z} \dots \text{ si } l \text{ est impair} \end{cases}$$

➤ Contraintes :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,1,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,4,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,2,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,3,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,5,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,6,k,z} \leq LC_j * X_{j,z} \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,2,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,6,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,1,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,5,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,3,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,4,k,z} \leq WC_j * X_{j,z} \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,3,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l LA_i * Y_{i,j,5,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,4,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l WA_i * Y_{i,j,6,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,1,k,z} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l HA_i * Y_{i,j,2,k,z} \leq HC_j * X_{j,z} \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^6 \sum_{k=1}^l PA_i * W_{i,j,n,k,z} \leq Cap_j * X_{j,z} \dots \dots \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^6 \sum_{k=1}^l VA_i * W_{i,j,n,k,z} \leq VC_j * X_{j,z} \dots \dots \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{n=1}^6 W_{i,j,n,k,z} \geq D_{i,k,z} \dots \dots \dots \forall i \in A, k \in L, z \in B \dots \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^m Q_{j,k,z} = 1 \dots \dots \dots \forall k \in L, \forall z \in B \dots \quad (3.9)$$

$$\sum_{z=1}^p X_{j,z} \leq 1 \dots \dots \dots \forall j \in C \dots \quad (3.10)$$

$$Y_{i,j,n,k,z} \leq X_{j,z} \dots \dots \dots \forall i \in A, j \in C, k \in L, n \in P, z \in B \dots \quad (3.11)$$

$$W_{i,j,n,k,z} \leq 1000 * Y_{i,j,n,k,z} \dots \dots \dots \forall i \in A, j \in C, k \in L, n \in P, z \in B \dots \quad (3.12)$$

$$X_{j,z} \in \{0,1\} \dots \dots \dots \forall j \in C, \forall z \in B \dots (3.13)$$

$$Q_{j,k,z} \in \{0,1\} \dots \dots \dots \forall j \in C, \forall k \in L, \forall z \in B \dots (3.14)$$

$$Y_{i,j,n,k,z} \in \{0,1\} \dots \dots \dots \forall i \in A, j \in C, k \in L, n \in P, z \in B \dots (3.15)$$

$$W_{i,j,n,k,z} \in \mathbb{N} \dots (3.16)$$

➤ Explication des contraintes :

- L'équation (3.1) représente la fonction objectif qui sert à minimiser les émissions de CO₂ lors de l'expédition des articles commandés.
- L'équation (3.2) représente la fonction objectif qui sert à minimiser les coûts engendrés par les espaces perdus et les expéditions des articles commandés.
- Les contraintes (3.3), (3.4) et (3.5) permettent de vérifier le chargement des articles dans les conteneurs pour ne pas dépasser sa longueur, sa largeur et sa hauteur.
- Les contraintes (3.6) et (3.7) permettent de ne pas dépasser la capacité et le volume respectivement des conteneurs lors du chargement.
- La contrainte (3.8) a pour objectif la satisfaction des demandes clients.
- La contrainte (3.9) exige que la demande d'un client doit être chargée dans le même conteneur.
- La contrainte (3.10) permet qu'un conteneur sélectionné soit réservé pour une seule zone.
- Les contraintes (3.11) et (3.12) représentent les liens entre les variables X et Y, W et Y respectivement.
- Les contraintes (3.13), (3.14) et (3.15) définissent les variables binaires du modèle.
- La contrainte (3.16) définit la variable entière du modèle.

3.6 La méthode NSGA II

3.6.1 Les paramètres et les opérateurs de notre problème

3.6.1.1 Le codage

Dans notre problème, nous avons procédé à un codage matriciel. La solution initial S est une matrice [p * (6*l*n*m)] tel que :

- p est le nombre de zones.
- l est le nombre de clients.
- n est le nombre d'articles.
- m est le nombre de conteneurs.

Nous utilisons un codage binaire, où chaque gène est égal à 1 si la position n dans le conteneur j est choisie pour l'article i du client k de la zone z, 0 si non

Soit un exemple de deux zones, deux clients, deux articles et deux conteneurs. Le codage formé est une matrice [2 * 48]. La figure suivante schématise la représentation du codage d'un individu.

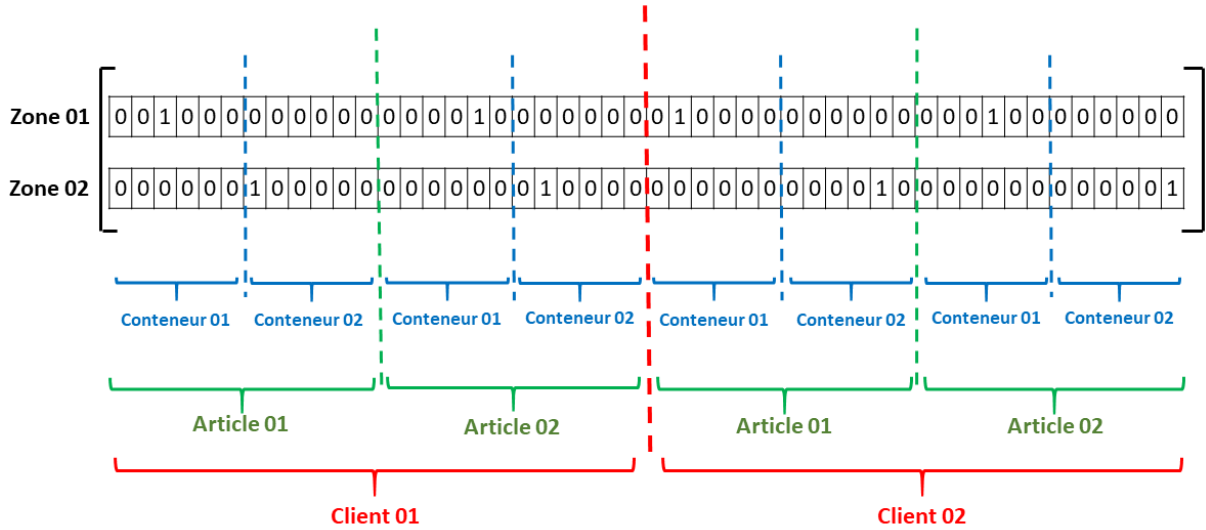


Figure 3.1: un exemple d'une solution

Le codage élaboré pour l'exemple cité affecte le conteneur 1 aux clients de la zone 1 et le conteneur 2 aux clients de la zone 2. Par exemple, la demande en article 1 du client 1 de la zone 1 est placée dans le conteneur 1 avec la position 3.

Après avoir généré la population initiale et l'avoir codé, nous devons calculer les fonctions objectifs pour chaque solution.

3.6.1.2 Le calcul des rangs

Le calcul des fonctions objectif nous permet de calculer les rangs. La population est triée sur une base de non-dominance. Ce tri associe un rang de dominance à chaque individu. Les individus non dominés ont un rang de 1. Les autres rangs sont ensuite définis récursivement en ignorant les solutions déjà dominées.

3.6.1.3 La sélection

La sélection est faite en se basant sur les rangs calculés. On choisit deux solutions de la population initiale aléatoirement, celle ayant le plus petit rang sera choisie pour l'étape du croisement ou mutation avec une autre solution choisie de la même manière.

3.6.1.4 Le croisement

L'opération de croisement se fait à un point où les séquences de gènes sont simplement échangées avec un seul point de coupure. Un point de coupure est choisi aléatoirement pour la

séquence du gène à condition qu'il vienne toujours entre les clients et non pas entre les conteneurs, ni entre les articles, ni dans la séquence de positions. L'opération de croisement pour l'exemple cité est illustrée dans la figure suivante :

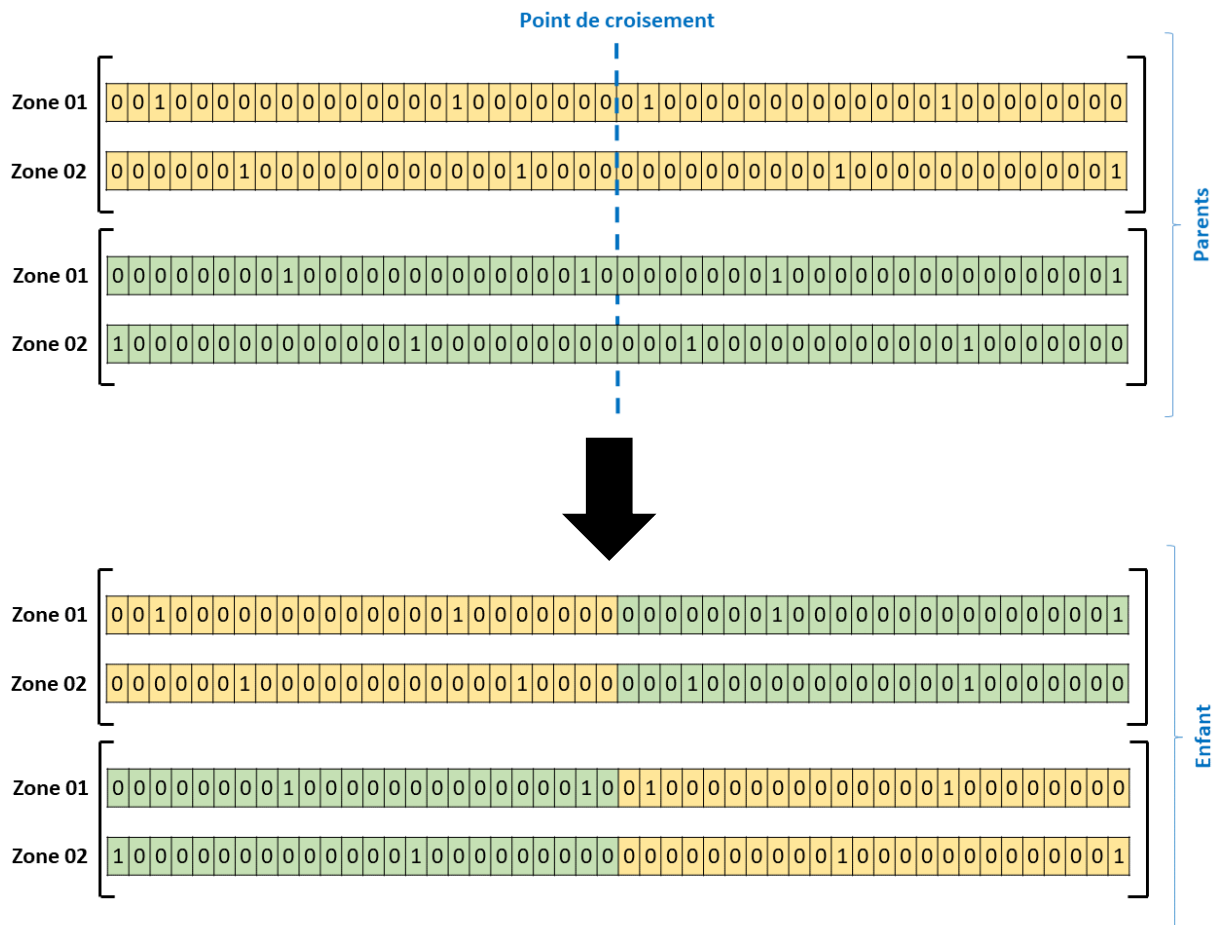


Figure 3.2: illustration de l'opération de croisement sur l'exemple cité

3.6.1.5 La mutation

Cette opération consiste à faire une mutation avec une probabilité P_m . Nous choisissons un gène aléatoirement et nous faisons une mutation. Dans notre cas, la mutation est simple, il suffit de remplacer le 1 avec 0 ou 0 avec 1.

Une opération de correction est souvent nécessaire après les opérations de croisement et de mutation, afin de vérifier les contraintes. Dans notre problème, un conteneur doit être affecté à une seule zone. Alors qu'après le croisement effectué, le conteneur 1 par exemple est affecté aux deux zones.

3.6.1.6 Calcul du crowding :

Après les opérations du croisement et mutation, nous recalculons les rangs pour les 2N solution (N solutions de la population initiale + N solutions obtenus après les opérations de

croisement et mutation). Les solutions de rang 1 seront les individus de la nouvelle population. Cependant, si le nombre de solution de rang 1 est inférieur à la taille de la population, nous devons calculer la distance crowding entre les solutions du rang 2 (si la somme des nombres de solution des rangs 1 et 2 est inférieure à la taille de la population, nous devons calculer la distance crowding entre les solutions du rang 3 ... etc.). Cette distance nous permettra de sélectionner les individus nécessaires pour l'obtention de N individus dans la génération suivante.

3.6.2 Définition de notre réseau de distribution

Afin de tester notre algorithme, nous nous sommes inspirées de l'entreprise NUMILOG pour la réalisation d'un scénario de distribution.

Notre réseau de distribution couvre l'ouest de l'Algérie et se compose d'une plateforme logistique qui se situe à Oran (Es Senia) et alimente 24 centres de livraisons régionaux. Ces derniers sont considérés comme des π -hubs, d'où commence un deuxième scénario de distribution des articles vers les clients finaux. Dans notre travail, nous nous intéressons à l'expédition des articles de la plateforme logistique vers les π -hubs (les CLR).

Afin de minimiser les distances parcourues, nous avons décomposé notre réseau de distribution en 6 zones.

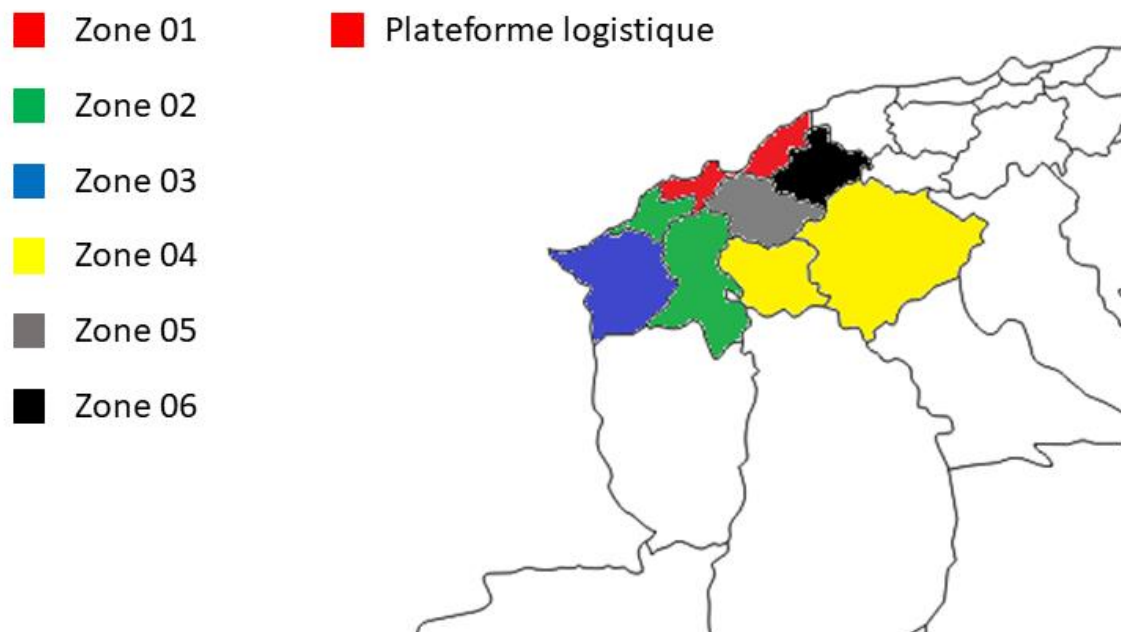


Figure 3.3: schématisation de notre réseau de distribution

Les distances parcourues entre la plateforme logistique et chaque client, les demandes clients, le facteur et le taux de consommation d'énergie utilisés ainsi que les caractéristiques des articles et des conteneurs sont résumées dans les tableaux suivants :

Tableau 3.3: les caractéristiques des articles

Article	1	2	3	4
LA	1	0.8	2	1.5
WA	0.5	0.6	1	0.9
HA	0.6	0.6	1.5	1
VA	0.3	0.288	3	1.35
PA	0.015	0.02	0.04	0.03

Tableau 3.4: les caractéristiques des conteneurs

	LC(m)	WC(m)	HC(m)	VC(m)	Cap(m)
40 EVP	12.04	2.35	2.39	67.8	26.7
40 HC EVP	12.04	2.35	2.7	76.4	26.51

Tableau 3.5: facteur et taux de consommation²³

	Facteur d'émission (kg/l)	Taux de consommation de source d'énergie (l/km)
Ensemble articulé 40 tonnes PTRAs marchandises diverses/ gazole routier	3.07	0.342

Tableau 3.6: les distances parcourues entre la plateforme et les CLR(s)

Zones	CLR(s)	Distance (Km)
Zone 01	Ain El-Turk	22.02
	Gdyel	59.47
	Arzew	76.27

²³ Information CO₂ des prestations de transport, guide méthodologique, Ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'énergie, octobre 2012 : disponible sur : http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide2_information_co2_cle7a3f22.pdf

	Mostaganem	133.84
Zone 02	Hammam Bouhdjar	64.46
	Beni Saf	114.48
	Sidi Bel Abbès	177.87
	Sfisef	266.12
Zone 03	Remchi	121.67
	Nedroma	161.47
	Ghazaouet	180.24
	Maghnia	227.81
Zone 04	Saida	169.46
	Sougueur	324.21
	Mahdia	374.69
	Ksar Chellala	436.9
Zone 05	Sig	52.77
	Mohammadia	79.06
	Mascara ville	114.4
	Tighenif	134.76
Zone 06	Relizène	130.62
	Sidi Khattab	154.17
	Oued Rhiou	196.3
	Mazona	220.72

Tableau 3.7: les demandes clients

Zones	CLR(s)	Article	Article	Article	Article
		01	02	03	04
Zone 01	Ain El-Turk	15	20	10	20
	Gdyel	08	15	05	10
	Arzew	10	20	08	15
	Mostaganem	20	13	05	25
Zone 02	Hammam Bouhdjar	20	15	09	10
	Beni Saf	07	15	11	13
	Sidi Bel Abbès	09	07	11	09

	Sfifef	15	15	07	25
Zone 03	Remchi	10	25	07	15
	Nedroma	05	20	10	10
	Ghazaouet	20	15	06	07
	Maghnia	25	20	14	15
Zone 04	Saida	15	22	09	15
	Sougueur	09	15	10	25
	Mahdia	13	19	11	20
	Ksar Chellala	25	15	05	15
Zone 05	Sig	20	15	04	20
	Mohammadia	15	20	08	20
	Mascara ville	10	06	04	07
	Tighenif	14	20	10	18
Zone 06	Relizène	20	10	13	20
	Sidi Khattab	15	20	10	15
	Oued Rhiau	10	15	10	13
	Mazona	07	10	09	12

3.6.3 Résultat obtenus par l’algorithme NSGA-II

3.6.3.1 Premier cas

Dans une première exécution, nous supposons que la plateforme possède 24 conteneurs de même type (40 high cube EVP). Le programme sous VBA nous a donné les résultats suivants :

La valeur de la première fonction objectif : Z1=176965.3 DZD

La valeur de la deuxième fonction objectif : Z2=5015.21kgC

Les résultats des conteneurs sélectionnés ainsi que leur affectation aux différentes zones sont détaillées dans le tableau suivant :

Tableau 3.8:tableau résumant les résultats d'affectation des conteneurs dans le 1^{er} cas

zone	article	position	client	conteneur	Taux de remplissage
01	1	1	1	11	0.88
	2	2			

	3	6	2	22	0.46
	4	4			
	1	2			
	2	3			
	3	4			
	4	6			
	1	3			
	2	1			
	3	5			
	4	5			
	1	5			
	2	5			
	3	4			
	4	1			
02	1	4	1	20	0.67
	2	6			
	3	2			
	4	2			
	1	5			
	2	6			
	3	2			
	4	2			
	1	1			
	2	4			
	3	4			
	4	6			
	1	4			
	2	6			
3	4				
4	6				
03	1	4	1	17	0.67
	2	6			
	3	1			
	4	3			
	1	5			
	2	1			
	3	1			
	4	6			
	1	6			
	2	5			
	3	6			
	4	2			
	1	6			
	2	5			
3	6				
4	2				
04	1	6	1	14	0.76
	2	4			
	3	1			
	4	5			
	1	5			
			2	21	0.93

	2	5					
	3	6					
	4	2					
	1	4					
		2	1	3	3	0.91	
		3	4				
		4	6				
		1	1				
			2	1	4	4	0.62
			3	6			
			4	6			
			1	3			
05			2	4	1 3	7	0.99
			3	1			
			4	2			
				1	2	2	13
	2			1			
	3			4			
	4			1			
				1	5	4	8
		2		2			
		3		3			
		4		4			
				1	3	1	1
2				6			
3				6			
4				6			
06			1	2	2	2	0.79
			2	4			
			3	3			
			4	6			
			1	6	3	15	0.72
			2	3			
			3	6			
			4	4			
			1	2	4	24	0.63
			2	5			
			3	6			
			4	6			

3.6.3.2 Deuxième cas

Dans la deuxième exécution, nous supposons que la plateforme possède 24 conteneurs dont 8 conteneurs sont de type 40 HC EVP et 16 conteneurs sont de type 40 standards EVP. Le programme sous VBA nous a donné les résultats suivants :

La valeur de la première fonction objectif : Z1=174385.3 DZD

La valeur de la deuxième fonction objectif : Z2=4993.24kgC

Les résultats des conteneurs sélectionnés ainsi leur affectation aux différentes zones sont détaillées dans le tableau suivant :

zone	article	position	client	conteneur	Taux de remplissage %
01	1	1	1	10	0.99
	2	1			
	3	1			
	4	6			
	1	1	2	21	0.52
	2	2			
	3	6			
	4	3			
	1	1	3	19	0.78
	2	6			
	3	6			
	4	6			
	1	6	4	11	0.86
	2	6			
	3	3			
	4	6			
02	1	1	1	15	0.75
	2	3			
	3	1			
	4	3			
	1	4	2	18	0.84
	2	3			
	3	6			
	4	6			
	1	5	3	12	0.74
	2	2			
	3	2			
	4	6			
	1	1	4	23	0.94
	2	4			
	3	2			
	4	5			
03	1	3	1	16	0.76
	2	2			
	3	3			
	4	2			
	1	4	2	7	0.96
	2	3			
	3	2	3		
	4	4			
1	3	4	4	0.98	

	2	6			
	3	2			
	4	5			
04	1	6	1	17	0.86
	2	1			
	3	6			
	4	2			
	1	4	2	2	0.93
	2	5			
	3	5			
	4	6			
	1	5	3	6	0.91
	2	1			
	3	3			
	4	6			
	1	3	4	24	0.69
	2	5			
	3	5			
	4	4			
05	1	6	1 3	5	0.98
	2	5			
	3	3			
	4	5			
	1	5	2	1	0.8
	2	3			
	3	3			
	4	2			
	1	2	4	9	0.95
	2	2			
	3	1			
	4	3			
06	1	4	1	3	0.98
	2	3			
	3	4			
	4	5			
	1	3	2	22	0.89
	2	3			
	3	5			
	4	5			
	1	6	3	14	0.81
	2	2			
	3	6			
	4	6			
	1	4	4	13	0.71
	2	5			
	3	4			
	4	6			

3.6.4 Interprétation des résultats

3.6.4.1 Premier cas

L'exécution de l'algorithme NSGAI sous VBA nous a donné une valeur de coût d'expédition égale à 176965.3 DZD pour la première fonction objectif et une valeur égale à 5.015,21 Kg de quantité de CO₂ émise pour la deuxième fonction objectif. Le programme a sélectionné 22 conteneurs, dont un conteneur est affecté pour les deux clients (2 et 3) de la zone 3, un conteneur est affecté aux deux clients (1 et 3) de la zone 5 et un conteneur est affecté à chaque client pour les clients restants.

Le taux de remplissage de la plupart des conteneurs sélectionnés est supérieur à 50%. Sauf pour le conteneur 22 affecté au client 2 de la zone 1 qui est inférieur à 50%. Notons que le conteneur 22 est de type 40 Standard EVP et qu'il est impossible de rassembler les demandes de ce client avec un autre de la même zone. Ceci montre l'efficacité de l'algorithme proposé pour la résolution de ce problème, et ces résultats peuvent être améliorés si on rajoute un autre type de conteneur ayant un volume plus petit.

3.6.4.2 Deuxième cas

Dans ce deuxième cas, 22 conteneurs ont été choisis pour l'expédition des articles, dont 7 conteneurs de type 40 HC EVP et 15 conteneurs de type 40 Standard EVP. Le choix des conteneurs 40 Standard EVP, au lieu des conteneurs 40 HC EVP, a permis de minimiser la fonction objectif représentant la quantité des émissions CO₂ qui est devenue 4.993,237 kgC. Ce choix a fait aussi diminuer la deuxième fonction objectif représentant les coûts logistiques qui est passée à 180.209,45 DZD, en minimisant l'espace perdu dans les conteneurs.

Le taux de remplissage dépasse aussi pour ce cas les 50% pour la plupart des conteneurs, il est même aux alentours de 80% pour 79% des conteneurs sélectionnés. Ceci indique que le programme proposé est très performant pour l'atteinte de l'un des objectifs de l'internet physique qui est le remplissage des camions à 80%.

Nous avons opté pour une optimisation multiobjectifs dont les deux fonctions objectifs sont contradictoires. La minimisation de l'une peut entraîner l'augmentation de l'autre. Notons que le programme que nous avons établi à l'aide de l'algorithme NSGAI nous a permis de trouver un compromis entre les deux fonctions objectifs.

3.7 Conclusion :

CHAPITRE III : Minimisation des émissions CO₂ lors du TM

Dans ce chapitre, nous nous sommes servis de l'IP pour l'optimisation des flux de marchandises. Nous avons établi un modèle mathématique en entiers mixtes à deux objectifs dont la première fonction sert à minimiser les coûts engendrés par les espaces perdus dans les conteneurs et les expéditions des demandes clients, et la deuxième fonction sert à minimiser les émissions CO₂. Ce qui mène à minimiser le nombre de conteneurs sélectionnés.

Nous nous sommes inspirés d'un cas réel pour générer des scénarios d'expédition de marchandises afin de tester l'efficacité de l'approche proposée pour la résolution de ce problème. Les résultats obtenus sont très encourageants et nous ont permis d'atteindre le taux de remplissage visé par l'IP.

Conclusion générale

L'une des solutions innovantes dans le domaine de transport et de la logistique, qui prend en considération l'aspect environnemental est bien l'internet physique. Ce nouveau concept est défini comme un système logistique global tirant profit de l'interconnexion des réseaux d'approvisionnement par un ensemble standardisé de protocoles de collaboration, de conteneurs modulaires et d'interfaces intelligentes pour une efficacité et une durabilité accrues. L'un de ses objectifs est la réduction de 60% des gaz à effet de serre à l'horizon 2050.

Dans ce travail, nous avons essayé de poursuivre le travail fait dans notre mémoire de fin d'études d'ingénieur, en introduisant l'aspect environnemental. Donc, nous avons également gardé le modèle mathématique élaboré dans le mémoire d'ingénieur et qui sert à minimiser les coûts engendrés par les espaces perdus dans les conteneurs et les expéditions des commandes clients. Et nous avons introduit notre deuxième objectif qui sert à minimiser les émissions CO₂ résultant des opérations d'expédition des commandes clients, tout en satisfaisant les demandes clients et en respectant les capacités et les volumes des conteneurs.

Les problèmes multiobjectifs ont un intérêt grandissant dans l'industrie où les responsables sont contraints de tenter d'optimiser des objectifs contradictoires. Notre problème est inspiré du monde réel et pour sa résolution, nous avons utilisé les métaheuristiques multiobjectifs et plus précisément : la méthode NSGAII que nous avons programmé avec le langage VBA. Sachant qu'une solution optimale n'existe pas, l'utilisation des métaheuristiques multiobjectifs nous a permis de trouver un compromis entre les deux fonctions objectifs.

Enfin pour conclure, l'internet physique est né d'un manque de moyens, de stratégie et d'une bonne gestion. Jusqu'à présent, il n'est qu'à ses débuts et il y a encore un long chemin à faire. Selon Éric Ballot, l'un des fondateurs de l'IP : « Quand un concept commence à échapper de ses créateurs, la partie est en bonne voie ». Et aujourd'hui des initiatives commencent à s'apparaitre petit à petit. Espérant un jour voir ce concept bouleverser les opérations logistiques.

Références

- [1] CIRRELT, EPFL, Simulation de l'Internet Physique : contribution à la mesure des enjeux et à sa définition, juin 2012. Disponible sur http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0078/Temis-0078977/20871_rapport.pdf
- [2] Les sources principales d'émissions de dioxyde de carbone, article. Disponible sur : <https://votreimpact.org>
- [3] Transports mondiaux : émissions de CO2 en hausse, article, 16 Aout 2017.disponible sur : <https://www.planete-energies.com>
- [4] Ronan Dantec, CLIMATE CHANCE « CAHIER SECTORIEL » - BILAN 2019 DE L'ACTION CLIMAT PARSECTEUR. OBSERVATOIRE MONDIAL DE L'ACTION CLIMAT NON-ÉTATIQUE. Décembre 2019.Disponible sur : <https://www.climate-chance.org>
- [5] Global carbonproject, 10 janvier 2020.Disponible sur : <https://www.citepa.org>
- [6] [Online] : <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- [7] KaddouriHoudaifa, TinamriAdnan, Réalisation d'un bilan carbone pour différents secteurs en Algérie, mémoire, 2019. Disponible sur : <https://dspace.univ-ouargla.dz>
- [8] L'APRUE : l'agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
- [9] Algérie presse service, efficacité énergétique, article, 12 mars 2019.Disponible sur : <http://www.aps.dz>
- [10] Groupe de travail du transport intermodal et de la logistique, rapport concernant la logistique respectueuse de l'environnement, 17 aout 2016.disponible sur : <https://www.unece.org/>
- [11] Joelle Morana, état des lieux et enjeux de la logistique durable, conférence, 23 octobre 2014. Disponible sur : <https://www.researchgate.net>
- [12] Marie Pier Trépanier, Leandro Coelho, Facteurs et méthodes de calcul d'émission de gaz à effet de serre, février 2017. Disponible sur : <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2017-08.pdf>
- [13] Daniel Berton, les véhicules lourds devant les autos et les véhicules légers, article, 02 décembre 2018. Disponible sur <https://roulezelectrique.com/ges-les-vehicules-lourds-devant-les-autos-et-les-camions-legers/>
- [14] [Online] : <https://www.moteurnature.com/actu/consommation-emission-CO2.php>

- [15] Information co2 des prestations de transport, guide méthodologique. Disponible sur : http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide2_information_co2_cle7a3f22.pdf
- [16] [Online] : <http://www.uccle.be/administration/environnement/air-et-climat/Rapport%20Bilan%20Carbone%20220909.pdf>
- [17] Jean Dipama, optimisation multiobjectif des systèmes énergétiques, thèse de doctorat, université de Montréal , Avril 2010. Disponible sur : <https://publications.polymtl.ca>
- [18] Yann collecte, Patrick Siarry , Optimisation multiobjectif, disponible livre .Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/optimisation-multiobjectif>
- [19] Riadh MADIOUNI, Contribution à la synthèse et l'optimisation multiobjectif par essais particuliers de lois de commande robuste RST de systèmes dynamiques, thèse de doctorat, l'école nationale d'ingénieurs de Tunis, juin 2016.Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr>
- [20] Abdelkader HAMMAMI,modélisation technico-économique d'une chaîne dans une entreprise réseau, thèse de doctorat,Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/>
- [21] Yann collecte, Patrick Siarry, Optimisation multiobjectif, livre .Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/Informatique/Livre/optimisation-multiobjectif>
- [22] Information GES des prestations de transport, guide méthodologique, septembre 2018. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr>
- [23] Information CO₂ des prestations de transport, guide méthodologique, Ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'énergie, octobre 2012 : disponible sur : http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide2_information_co2_cle7a3f22.pdf

Résumé :

De nos jours, l'aspect environnemental devient de plus en plus un point qu'on doit prendre en considération dans beaucoup de secteurs, notamment le secteur de transport et de la logistique. L'une des préoccupations majeure de l'internet physique qui peut s'ajouter à sa caractéristique principale d'être un système global et ouvert est d'assurer l'interconnexion des réseaux logistiques tout en réduisant les émissions CO₂ lors de l'expédition des produits.

Ce travail consiste à optimiser les flux de marchandises tout en tenant compte de l'aspect environnemental. Une approche multiobjectifs basée sur les métaheuristiques multiobjectifs est utilisée pour trouver la meilleure expédition des produits permettant de minimiser les coûts logistiques ainsi que la quantité des émissions CO₂.

Mots clés : l'internet physique, émission CO₂, métaheuristiques multiobjectifs.

Abstract

Nowadays, the aspect of environment becomes a subject to be taken into consideration in many fields, especially transport and logistics. One of the major concerns of physical internet, which can be added to its main characteristic of being a global and open system, is to ensure the interconnection of logistics networks while reducing CO₂ emissions when shipping products.

This work consists of optimizing the flow of goods while taking into account the aspect of environment. A multi-objective approach based on multi-objective metaheuristics will be used to find the best shipment of products to minimize logistics costs and CO₂ emissions.

Key words: physical internet (PI), CO₂ emissions, multi-objective metaheuristics.

ملخص

في الوقت الحاضر، أصبح الجانب البيئي نقطة يجب أخذها بعين الاعتبار في العديد من القطاعات، لا سيما قطاع النقل والخدمات اللوجستية. أحد الاهتمامات الرئيسية للإنترنت المادي الذي يمكن إضافته إلى خصائصه الرئيسية لكونه نظاما عالميا ومفتوحا هو ضمان الترابط بين الشبكات اللوجستية مع تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أثناء شحن البضائع. يقوم هذا العمل على تحسين تدفق البضائع مع مراعاة الجانب البيئي. سيتم استخدام نهج متعدد الأهداف يعتمد على الميتاوريستك متعددة الأغراض للعثور على أفضل شحنة من المنتجات مما يسمح بتقليل التكاليف اللوجستية وكذلك كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

الكلمات المفتاحية: الإنترنت المادي، انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، الميتاوريستك