



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées



Département Génie Logistique Et Transport

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

d'Ingénieur d'État

-Filière-

Ingénierie des transports

-Spécialité-

Ingénierie des transports

- Thème -

La mise en place d'un outil d'aide à décision pour l'optimisation des flux de transport

Cas SPA Numilog

Réalisé par

ALLOUNE Manel

BOUAFIA Hibat Allah Amira

Membres de Jury :

ANNAD Oussama

MCB ENSTA

Président

BADJARA Mohamed el Amine

MAA ENSTA

Promoteur

BOUZID M. Cherif

MCA ENSTA

Examinateur

TALBI Tayeb

MAA ENSTA

Examinateur

Alger, le 01/07/24

Année universitaire : 2023-2024

Dédicaces

je dédie ce travail :

À mes chers parents, pour votre soutien constant et votre amour inconditionnel. Grâce aux valeurs que vous m'avez transmises et à la passion du savoir que vous m'avez inspirée, j'ai pu réaliser ce travail.

À mes chers soeurs et frères Imène, Oumaima, Arwa, Tayeb et Taha, merci d'être là pour toujours.

À mes amies adorées Amina, Yasmine, Melissa, Khadidja, Rahma et Hadil, merci pour votre soutien.

À mon binôme Manel, merci pour ton incroyable collaboration.

À toute ma famille et mes amies merci à chacun d'entre vous pour votre soutien et vos encouragements tout au long de mon parcours.

Amira

Dédicaces

*À toi, mon cher père, mon plus fervent croyant,
Tu as été mon guide et ma source de force. Chaque leçon que tu m'as offerte, chaque conseil
que tu m'as prodigué, ont été des pierres angulaires qui ont façonné la personne que je suis
aujourd'hui. Je te remercie du fond du cœur pour tous.*

*À toi, ma chère mère, à la femme la plus incroyable que je connaisse ,
À celle qui m'a inspirée, encouragée et soutenue tout au long de ce voyage académique. Tes
conseils avisés, ton amour ont été les piliers sur lesquels j'ai construit ce mémoire. Chaque
étape de ce chemin a été éclairée par ta présence bienveillante et ton soutien constant. Merci
pour ta patience, tes encouragements et ta croyance en mes capacités.*

*À vous, mes soeurs Cherifa et Nada ,
Vous avez toujours été présentes, partageant mes joies et me consolant dans les moments dif-
fiques, m'inspirant à devenir la meilleure version de moi-même.Je suis tellement chanceuse de
vous avoir dans ma vie.*

*À toi, mon frère Imad,
Merci pour ta présence précieuse dans les moments où j'avais le plus besoin de soutien, et pour
m'avoir encouragé à continuer même quand les défis.*

*À toi, Lina,
Votre amitié précieuse m'a aidé à traverser les hauts et les bas de ce chemin. Merci d'avoir
toujours été là pour moi, de m'écouter sans jugement, de me comprendre profondément et de
partager tant de moments précieux ensemble.*

*À mon binôme Hiba,
Je te remercie pour notre collaboration remarquable.*

Manel

Remerciements

Nous remercions avant tout le bon Dieu de nous avoir donné patience, santé et volonté tout au long de nos études.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur BADJARA Mohamed el Amine, pour son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce projet. Sa patience et son expertise ont été essentielles à la réussite de ce travail.

Nous remercions Monsieur DOUADI Sid Ali, responsable SYNCHRO, pour nous avoir accueillis et pour avoir accepté notre thème de stage. Nous le remercions pour son aide tout au long de notre projet.

Nous tenons à adresser nos remerciements à Monsieur ALIOUANE Omar et à Monsieur KAOUANE Mohamed el Amine, ingénieurs d'étude, pour leur contribution à la réussite de ce projet. Leurs conseils avisés et leur expertise nous ont été d'une grande aide tout au long de ce travail. Nous sommes reconnaissants pour leur disponibilité et leur patience face à nos questions

Nous souhaitons adresser nos remerciements à toute l'équipe de Numilog, qui a contribué à la réussite de ce projet.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de Génie Logistique et Transport pour les connaissances transmises durant notre cursus.

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.

ملخص

في مواجهة التحديات التي تواجهها شركة نوميلوج الجزائر في تحضير وتوزيع أوامر النقل على الشاحنات المتاحة، يهدف هذا البحث إلى تحسين تدفقات النقل. سمح التحليل المعمق للخلل الحالي بتطوير منهجية تحسين تعتمد على نهج متعدد الأهداف وممتعدد المعايير. أدى المذكورة الرياضية للمشكلة، تليها تنفيذ خوارزمية مسار وتحسين باستخدام تقنيات ميتا هيرستيك، إلى إنشاء أداة برمجية تعمل على أتمتة عملية التحسين. تظهر النتائج الحصلية تحسيناً كبيراً في جودة توزيع أوامر النقل على الشاحنات، مما يؤدي إلى زيادة في الرحلات المحملة، والتزام أكبر بالأولويات والمواعيد النهائية للتسليم، وتقليل العقوبات. يساهم هذا التحسين لتدفقات النقل في تحسين الكفاءة التشغيلية لشركة نوميلوج الجزائر وتقليل تكاليف النقل.

الكلمات المفتاحية :

النقل - التحسين - الخوارزمية التقريبية - الخوارزمية الميتا التقريبية - التحليل متعدد المعايير - تخصيص أوامر النقل - نوميلوج الجزائر.

Abstract

Faced with the challenges encountered by Numilog Algeria in the planning and allocation of transport orders to available trucks, this thesis aims to optimize transport flows. An in-depth analysis of the current malfunctions allowed the development of an optimization methodology based on multi-objective and multi-criteria approaches. The mathematical modeling of the problem, followed by the implementation of a trajectory heuristic and metaheuristics, led to the creation of a software tool automating the optimization process. The results obtained demonstrate a significant improvement in the quality of TO-truck allocations, resulting in an increase in loaded travel, greater adherence to priorities and delivery deadlines, and a reduction in penalties. This optimization of transport flows contributes to the improvement of Numilog Algeria's operational efficiency and the reduction of its transport costs.

Keywords : Transport - Optimization - Heuristic - Metaheuristic - Multicriteria Analysis - Allocation of Transport Orders - Numilog Algeria.

Résumé

Face aux défis rencontrés par Numilog Algérie dans la planification et l'affectation des ordres de transport aux camions disponibles, ce mémoire a pour objectif d'optimiser les flux de transport. Une analyse approfondie des dysfonctionnements actuels a permis de développer une méthodologie d'optimisation basée sur des approches multiobjectifs et multicritères. La modélisation mathématique du problème, suivi par l'implémentation d'une heuristique trajectorielle et de métahéuristiques, a conduit à la création d'un outil logiciel automatisant le processus d'optimisation. Les résultats obtenus démontrent une amélioration significative de la qualité des affectations OT-camion, se traduisant par une augmentation du roulage à charge, un respect accru des priorités et des délais de livraison, ainsi qu'une réduction des pénalités. Cette optimisation des flux de transport contribue à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle de Numilog Algérie et à la réduction de ses coûts de transport.

Mots clés : Transport - Optimisation - Heuristique - Métaheuristique - Analyse multicritère - Affectation des ordres de transport - Numilog Algérie.

Table des matières

Liste des tableaux	ii
Table des figures	iii
Liste des acronymes	iv
Introduction générale	1
1 Étude de l'existant	3
1.1 Introduction	3
1.2 Transport Routier de Marchandises	3
1.2.1 Définition	3
1.2.2 Types	3
1.2.3 Indicateurs de performances clés	3
1.2.4 Impact du kilométrage à vide	4
1.3 Présentation de Numilog	5
1.3.1 Contexte et création	5
1.3.2 Activités	5
1.3.2.1 Activité de logistique	5
1.3.2.2 Activité de transport	5
1.3.3 Moyens et infrastructures de Numilog	6
1.3.4 Opérations clients	6
1.3.4.1 Pour les clients ordinaires	6
1.3.4.2 Pour Cevital	6
1.4 Analyse de la situation actuelle	7
1.4.1 Présentation de la tour de contrôle de Numilog	7

1.4.2	Système d'information de la tour de contrôle	7
1.4.3	Processus de réception et de réalisation des ordres de transport	8
1.4.3.1	Réception des demandes de transport	8
1.4.3.2	Création et affectation des OTs	8
1.4.3.3	Prise de contact avec les chauffeurs et chargement des marchandises	8
1.4.3.4	Livraison des marchandises et facturation	8
1.4.4	Dysfonctionnements détectés	9
1.5	Conclusion	10
2	Notions de base	11
2.1	Introduction	11
2.2	Problème d'optimisation combinatoire	11
2.2.1	La complexité d'un problème	11
2.2.2	Les classes de complexité	11
2.3	Problème de recouvrement	12
2.3.1	Définition	12
2.3.2	Modèle mathématique	13
2.4	Optimisation Multiobjectifs	13
2.4.1	Définition	13
2.4.2	Notion de dominance	13
2.4.3	Solutions de Pareto	14
2.4.4	Point Idéal et Point Nadir	14
2.5	Méthodes de résolution	14
2.5.1	Lexiques	14
2.5.2	Les méthodes exactes	16
2.5.3	Les méthodes approchées	16
2.6	Analyse Multicritère	18
2.6.1	Définition	18
2.6.2	Terminologie de base	18
2.6.3	Quelques méthodes d'analyse multicritères	19
2.6.3.1	La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)	19

2.6.3.2	La methode Preference Ranking Organisation METHode for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)	21
2.7	Conclusion	24
3	Modélisation mathématique et Résolution	25
3.1	Introduction	25
3.2	Formulation de la problématique	25
3.2.1	Hypothèses	26
3.2.2	Ensembles	27
3.2.3	Paramètres	27
3.2.4	Variables	27
3.2.5	Contraintes	28
3.2.6	Fonctions objectifs	28
3.3	Description de la démarche globale de résolution	29
3.4	Traitemet des données	31
3.4.1	Fichier de disponibilité	31
3.4.2	Fichier des OTs	31
3.4.3	Matrice des distances	32
3.5	Analyse multicritére	32
3.5.1	Définition des critères	32
3.5.2	Poids des critères	33
3.5.3	Évaluation de la priorité des villes d'arrivée	33
3.5.4	Évaluation de la priorité des clients	34
3.5.5	Le calcul du flux net par PROMETHEE II	35
3.6	Heuristique	35
3.6.1	Conception de l'heuristique	35
3.6.2	Description de l'Algorithme	36
3.6.2.1	Données initiales	36
3.6.2.2	Déroulement de l'algorithme	36
3.7	Métaheuristique	37
3.7.1	Étape 1 : Intensification par la métaheristique Sonar	37
3.7.1.1	Principe de base de l'algorithme sonar	37

3.7.1.2	Adaptation de la métaheuristique à notre problème	38
3.7.2	Étape 2 : Diversification avec les métaheuristique 2-opt et Recherche Tabou	38
3.7.2.1	Principe de base de l'algorithme 2-opt	38
3.7.2.2	Principe de base de l'algorithme Recherche Tabou	39
3.7.2.3	Adaptation de la métaheuristique à notre problème	39
3.8	Conclusion	40
4	Résultats et interprétation	42
4.1	Introduction	42
4.2	Présentation de l'outil	42
4.2.1	Fonctionnalités principales	42
4.3	Choix des paramètres de réglage pour la fonction fitness	46
4.3.1	Présentation des paramètres de réglage	47
4.3.2	Justification des valeurs choisies	47
4.4	Résultats	49
4.4.1	Résultat de l'heuristique (Solution initiale)	49
4.4.2	Résultat de la métaheuristique	49
4.5	Recommendations pour l'entreprise	50
4.5.1	Refaire un zoning des départs et arrivées des clients	50
4.5.2	Analyse des données historiques pour prévoir les temps de service	51
4.5.3	Analyse des destinations fréquentes pour réduire les kilomètres à vide	51
4.6	Perspectives pour des améliorations futures	51
4.6.1	Amélioration de l'analyse multicritère pour la priorisation des ordres de transport	51
4.6.2	Prise en compte de la variabilité du trafic	52
4.6.3	Amélioration des paramètres de réglage de la fonction fitness	52
4.7	Conclusion	52
Conclusion générale		53
Bibliographie		54
Annexes		1

Annexe A	2
A.1 Fichiers des OTs	2
A.2 Fichier de disponibilités	2
A.3 Fichier clients	3
A.4 Fichier villes	3
A.5 Fichier des coordonnées géographiques	4
A.6 Matrice des distances	4

Liste des tableaux

1.1	Les moyens et les infrastructures de Numilog	6
2.1	Échelle de Sataay	20
2.2	Types de critères utilisés dans PROMETHEE	22
2.3	Flux de surclassement dans la méthode PROMETHEE	23
3.1	Matrice des critères.	33
3.2	Poids des critères.	33
3.3	Matrice de comparaison des catégories de clients.	33
3.4	Matrice des scores des villes d'arrivée	34
3.5	Matrice de comparaison des catégories de clients.	34
3.6	Matrice des scores des client	34
4.1	Tableau des résultats des test des paramètres α , β et γ	48
4.2	Tableau de comparaison des résultats de l'entreprise et l'Heuristique	49
4.3	Tableau de comparaison des résultats de l'entreprise et la Métaheuristique	50
A.1	Fichier des OTs avant datacleaning	2
A.2	Fichier des OTs après datacleaning	2
A.3	Fichier de disponibilite avant datacleaning	2
A.4	Fichier de disponibilite après datacleaning	3
A.5	Fichier des clients	3
A.6	Fichier des villes	4
A.7	Les coordonnées géographiques	4
A.8	Matrice des distances	4

Table des figures

1.1	Processus de réalisation des ordres de transport	9
2.1	Classes NP et P avec $NP \neq P$	12
2.2	Classes P, NP et NP-complets	12
2.3	Processus d'intensification de solution	15
2.4	Processus desertification de solution	16
2.5	Le méthodes de résolutions	18
3.1	illustration de processus d'affectation	26
3.2	illustration de processus d'affectation	26
4.1	La page d'accueil	43
4.2	L'importation des données	43
4.3	L'importation des données	44
4.4	La page services : Traitement	44
4.5	La page services : Traitement	45
4.6	La page services : Traitement	45
4.7	La page services : L'optimisation	46
4.8	La page services : L'optimisation	46

Liste des abréviations

- **AHP** : Analytic Hierarchy Process
- **CA** : Chiffre d'affaire
- **CLR** : Centre Logistique Régionale
- **OT** : Ordre de transport
- **PL** : Plateforme Logistique
- **PROMETHEE** : Preference Ranking Organisation METHode for Enrichment Evaluation
- **SND** : Solutions Non Dominées
- **TMS** : Transport Management System
- **TRM** : Transport Routier de Marchandises

Introduction générale

“Le transport optimal, c'est l'art de faire plus avec moins”

Peter Drucker, "Management Challenges for the 21st Century" - 1999

Le secteur du transport joue un rôle crucial dans l'économie moderne, en assurant la circulation des biens et des marchandises. Face à la complexité croissante des chaînes d'approvisionnement et de distribution pour une optimisation des coûts et des délais, les entreprises de transport doivent constamment améliorer leurs processus de planification et de gestion des flux.

Numilog comme acteur majeur du transport en Algérie rencontre des défis similaires. La planification des affectations des camions aux ordres de transport s'avère complexe et sujette à des dysfonctionnements qui entraînent des retards, des itinéraires non optimisés et des coûts excessifs. Ces inefficacités impactent négativement la satisfaction des clients et la rentabilité de l'entreprise.

Ce projet de fin d'études vise à développer un outil d'aide à la décision pour optimiser la gestion des flux de transport chez SPA Numilog en répondant à la question : Quelle est la meilleure façon d'affectation des camions aux ordres de transport en respectant les différentes contraintes techniques liées au problème ? Plusieurs aspects techniques et sociaux sont pris en considération dans cette étude. L'objectif principal est de proposer une solution logicielle permettant d'automatiser et d'optimiser la planification des affectations des camions aux ordres de transport, en tenant compte de multiples critères et contraintes.

Le projet englobe l'analyse des processus actuels de planification, la modélisation mathématique du problème d'optimisation, le développement et l'implémentation d'une solution logicielle basée sur des algorithmes d'optimisation, ainsi que l'évaluation des performances de la solution proposée.

Ce mémoire est structuré en 4 chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : Étude de l'existant

consiste à analyser les processus actuels de planification des affectations de camions chez SPA Numilog. Cela implique l'identification des dysfonctionnements observés, la compréhension des contraintes et des objectifs de l'entreprise.

Chapitre 2 : Notions de base

vise à recenser les travaux de recherche existants dans le domaine de l'optimisation multiobjectives, en particulier les approches basées sur les heuristiques et métahéuristiques.

Chapitre 3 : Modélisation mathématique et Résolution

consiste à formaliser le problème d'optimisation des affectations de camions dans un modèle mathématique, et à développer une solution logicielle pour résoudre le problème d'optimisation. Cela implique la sélection d'algorithmes heuristiques et métahéuristiques appropriés ainsi que

leur adaptation au contexte spécifique de Numilog.

Chapitre 4 : Résultats et interprétation

consiste à évaluer les performances de la solution logicielle développée en utilisant des données réelles. Cela implique de comparer les résultats obtenus avec les solutions actuelles et de mesurer l'impact de l'outil d'aide à la décision sur les indicateurs clés de performance de l'entreprise.

Chapitre 1

Étude de l'existant

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous abordons une analyse générale du transport routier de marchandises, une présentation détaillée de l'entreprise, ses activités principales et ses moyens et infrastructures. Nous examinons également la tour de contrôle de Numilog, son système d'information et le processus de réception et de réalisation des ordres de transport. Enfin, nous identifions les principaux dysfonctionnements actuels dans le processus de gestion des ordres de transport.

1.2 Transport Routier de Marchandises

1.2.1 Définition

Le transport routier des marchandises est le fait de porter pour déplacer une marchandise d'un lieu, dit lieu de départ, à un autre, dit lieu d'arrivé, pour une finalité commerciale. Pour une entreprise, le transport de marchandise est une activité indispensable dans la chaîne logistique. Il permet l'approvisionnement de l'entreprise en matières premières, effectuer les déplacements à l'intérieur de l'entreprise, l'acheminement des produits finis aux lieux de consommation.

1.2.2 Types

L'accomplissement du processus de transport se répartit entre deux régimes :

Transport pour compte propre : Visant le déplacement de biens dont les transporteurs propriétaires, soit parce qu'il les a produits, soit parce qu'il s'en est rendu acquéreur. On parle du transport en compte propre lorsque la marchandise est la propriété de l'entreprise.

Transport pour compte autrui : On parle du transport en compte autrui lorsque la marchandise n'est pas la propriété de l'entreprise. .

1.2.3 Indicateurs de performances clés

Pour mesurer leur performance et leur efficacité, les opérateurs de TRM utilisent divers indicateurs clés, tels que :

Taux de remplissage des camions : Ce ratio permet d'évaluer l'utilisation optimale de la capacité de transport.

Délais de livraison : Respecter les délais de livraison est crucial pour la satisfaction des clients.

Coûts de transport : Optimiser les coûts de transport est essentiel pour la rentabilité de l'entreprise.

Niveau de sinistralité : Un faible taux d'accidents est un indicateur de sécurité et de professionnalisme.

Flexibilité : La flexibilité se traduit par la capacité de transport à satisfaire une demande inattendue. Elle est permise par le recours aisément à la sous-traitance, par ailleurs, le transport routier peut s'appuyer sur des organisations telles que les relais, qui permettent d'optimiser le temps de travail.

Sécurité : La sécurité des marchandises dépend du mode de transport utilisé du caractère approprié de l'emballage et de la solution globale élaborée par le transporteur : itinéraire retenu, contrôle du chargement et du déchargement de marchandises.

Satisfaction des clients : La perception des clients est un élément important pour fidéliser la clientèle et développer l'activité.

1.2.4 Impact du kilométrage à vide

Le kilométrage à vide s'agit de la distance parcourue par un véhicule de transport sans marchandises à bord. Ce kilométrage ne génère aucun revenu pour le transporteur et représente un coût supplémentaire en termes de carburant, d'usure du véhicule et de péages.

Le kilométrage à vide a un impact négatif significatif sur le TRM en Algérie, à plusieurs niveaux :

Augmentation des coûts de transport : Le kilométrage à vide représente une perte de revenus et une augmentation des charges d'exploitation pour les transporteurs. Cela se traduit par des prix de transport plus élevés pour les chargeurs.

Impact environnemental : Le kilométrage à vide contribue aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution atmosphérique, car il implique une consommation inutile de carburant.

Inefficacité du système logistique : Un kilométrage à vide élevé signifie que les véhicules circulent sans être remplis, ce qui réduit l'efficacité du système logistique global et entraîne une perte de temps et de ressources.

Plusieurs facteurs contribuent au kilométrage à vide élevé dans le secteur du TRM :

Manque de coordination des chargements : La difficulté à trouver des chargements de retour pour les véhicules vides entraîne une augmentation du kilométrage à vide.

Flux de marchandises déséquilibrés : Les flux de marchandises peuvent être déséquilibrés entre les différentes régions du pays, ce qui signifie que les véhicules circulent souvent à vide dans un sens.

Infrastructures routières inefficaces : L'état des infrastructures routières peut entraîner des retards et des embouteillages, ce qui augmente le temps passé par les véhicules à rouler au ralenti ou à l'arrêt, contribuant ainsi au kilométrage à vide.

Pratiques logistiques inefficaces : Le manque d'optimisation des itinéraires et la mauvaise gestion des stocks peuvent également entraîner une augmentation du kilométrage à vide.

1.3 Présentation de Numilog

1.3.1 Contexte et création

Numilog Algérie a été créé en 2007 en tant que filiale du groupe Cevital, leader dans l'agroalimentaire et d'autres secteurs. Sa création s'inscrivait dans un contexte de croissance du groupe Cevital pour réduire les coûts liés aux besoins de transport et de logistique. En effet, le groupe Cevital était confronté à :

Des coûts de transport et de logistique importants : Le groupe Cevital s'appuyait auparavant sur des prestataires logistiques externes et chaque filiale avait sa propre structure logistique. Cette situation engendrait des coûts de transport élevés.

Une gestion des flux de marchandises perfectible : Le manque de centralisation et de coordination dans la gestion des flux de marchandises nuisait à l'efficacité de la chaîne logistique du groupe Cevital.

Une organisation logistique disparate : L'absence d'une organisation unifiée rendait la gestion des stocks et des livraisons plus complexe et moins efficiente.

1.3.2 Activités

Numilog déploie ses activités autour de trois missions principales :

1. Accompagner la croissance des activités du groupe Cevital en matière logistique et de transport.
2. Proposer aux acteurs économiques et industriels en Algérie des prestations de transport et/ou logistiques à travers tout le territoire.
3. Assurer un partenariat fiable et durable.

1.3.2.1 Activité de logistique

Elle consiste en une gestion des flux de marchandises (Stockage et entreposage, préparation de commandes, logistique du froid) avec une traçabilité complète des flux.

Elle vise notamment une gestion optimale des stocks de manière à assurer la disponibilité permanente des produits.

1.3.2.2 Activité de transport

Numilog dispose d'une flotte de 550 camions entre une flotte propre et un réseau de partenaires référencés aux normes Numilog.

Celle-ci est composée de maraîchers, de cellules frigorifiques et de citernes, ce qui permettra aux clients de bénéficier d'un service garantissant transferts sécurisés et une traçabilité en temps réel.

Les transferts sont assurés sur tout le territoire national tout au long de l'année.

1.3.3 Moyens et infrastructures de Numilog

Les moyens et infrastructures de Numilog sont résumés dans le tableau suivant :

3 Plateformes	6 Agences de transport	22 Centres logistiques	550 Camions
<ul style="list-style-type: none"> - Bouira - Oran - Constantine 	<ul style="list-style-type: none"> - Bouira - Oran - Constantine - Béjaïa - Sétif - LLK (Tizi ouzou) 	Distribuer dans tout le territoire national	<ul style="list-style-type: none"> - Maraîcher - Citerne - Cocotte - Transport sous température dirigée

TABLE 1.1 – Les moyens et les infrastructures de Numilog

Source : Numilog

1.3.4 Opérations clients

À partir de 17h, le département d'exploitation transport reçoit des ordres de transport (OT). En premier lieu, il s'occupe de son premier client qui est Cevital, puis d'autres clients.

1.3.4.1 Pour les clients ordinaires

Numilog s'occupe des déplacements de marchandises que ce soit pour les matières premières, semi-finies ou finies. Le responsable d'exploitation et transport met à disposition de son client les camions nécessaires pour l'acheminement des marchandises d'un point à un autre selon le programme reçu.

1.3.4.2 Pour Cevital

Numilog s'occupe de tous les déplacements de Cevital de l'approvisionnement à la distribution. Elle s'occupe de :

- L'approvisionnement des usines en matières premières depuis les plateformes.
- Le transfert des marchandises de l'usine aux plateformes logistiques. Le temps de service de ces plateformes est de 24H/24H.
- Des PL aux CLR : chaque plateforme est destinée à alimenter les CLR situés dans la même région. La réception et la livraison des produits se font quotidiennement comme suit : de 17H à 7H c'est le réapprovisionnement des CLR par les plateformes, de 7H à 17H de soir c'est les clients qui viennent récupérer leurs commandes par leurs propres moyens de transport.
- Les ventes directes : la livraison directe des usines jusqu'aux clients finales sans rupture de charge.

1.4 Analyse de la situation actuelle

1.4.1 Présentation de la tour de contrôle de Numilog

La tour de contrôle est une infrastructure de Numilog a pour mission la coordination des activités entre les différentes structures dispersées à travers le territoire national. Le but de la mise en place de cette division est donc la centralisation des opérations d'affectations des différentes ressources, aux différentes requêtes de clients devant être satisfaites, et ce à des localisations différentes. La structure est organisée en open-space, afin de fluidifier les échanges entre les différents collaborateurs et accélérer la réactivité des opérations.

La tour de contrôle héberge actuellement trois services :

Le service Ingénierie des transports : Il s'agit du service s'occupant de l'aspect ingénierie des opérations. Sa tâche consiste à élaborer des prévisions et des plans de transport prédéfini afin de conforter le travail à temps réel, et réduire ainsi l'écart séparant la réalité de l'optimalité.

Le service synchro : l'équipe chargée d'affecter les moyens et de les disperser afin de satisfaire une quantité de requêtes dispersées à travers le territoire, puis d'en assurer le suivi jusqu'à la fin des missions.

Le service relation client : Il s'agit de l'équipe chargée du relationnel client, prélèvement des commandes, réponse au client, reporting sur l'avancement des opérations, etc.

1.4.2 Système d'information de la tour de contrôle

Un système d'information est un ensemble d'éléments composé d'outils informatiques, de serveurs, de logiciels, de ressources humaines ou matérielles, ayant pour objectif de capturer, stocker, traiter ou modifier le flux d'informations, qui est généralement jumelé au flux matériels d'une entreprise.

Le système d'information mis en place dans la tour de contrôle actuellement est composé de :

- **Le géologue FleetCenter :** est un système d'information géographique, déployé par Numilog afin de mettre à disposition des opérateurs les différentes informations (en temps réel) concernant les véhicules de la flotte. Il permet en outre :
 - Le suivi du positionnement des camions par géolocalisation, en temps réel.
 - L'accès à des informations générales sur les véhicules, en temps réel, tel que le niveau de carburant, le tonnage, ou encore la température des remorques frigorifiques.
- **Le TMS Reflex :** est un système informatique de support pour les activités de transport. Le TMS reflex mis en place dans l'entreprise permet d'effectuer diverses tâches telles que :
 - La vérification de l'état d'avancement de chaque OT.
 - Le suivi des anomalies et des retards sur le planning.
 - Le suivi de toutes les opérations de transport en cours de façon simultanée.

1.4.3 Processus de réception et de réalisation des ordres de transport

1.4.3.1 Réception des demandes de transport

- Les demandes de transport sont reçues par le Service Relation Client (SRC) jusqu'à 17h le jour J pour une livraison le jour J+1.
- Le SRC enregistre les informations relatives à la demande, telles que l'expéditeur, le destinataire, la nature de la marchandise, et le chiffre d'affaires (CA) de l'OT.

1.4.3.2 Création et affectation des OTs

- Le SRC crée des OTs dans le Transport Management System (TMS) et les envoie au service SYNCRO.
- SYNCRO reçoit les OTs et les listes des disponibilités des camions de différentes agences. Le nombre de camions disponibles n'est souvent pas suffisant pour satisfaire toutes les demandes de transport. En conséquence, environ 20 % des OTs ne sont pas pris en charge.
- SYNCRO affecte les OTs aux camions disponibles en respectant les priorités des clients, en tenant compte des contraintes de temps et de distance, et en sélectionnant les OTs les plus rentables. La sélection des OTs à affecter est complexe et dépend de plusieurs facteurs, tels que la destination de l'OT, la priorité de client, le CA de l'OT et la disponibilité des camions.
- SYNCRO envoie les affectations aux agences.

1.4.3.3 Prise de contact avec les chauffeurs et chargement des marchandises

- Les agences contactent les chauffeurs pour leur communiquer les OTs qui leur ont été affectés.
- Les chauffeurs se rendent aux points de chargement pour servir les OTs.
- Une fois les marchandises chargées, les chauffeurs se mettent en route vers les destinations finales.

1.4.3.4 Livraison des marchandises et facturation

- Les chauffeurs livrent les marchandises aux destinataires. Ils remettent un Bon de livraison à facturer à Numilog.
- La direction financière établit les factures et procède à l'encaissement des paiements des clients.

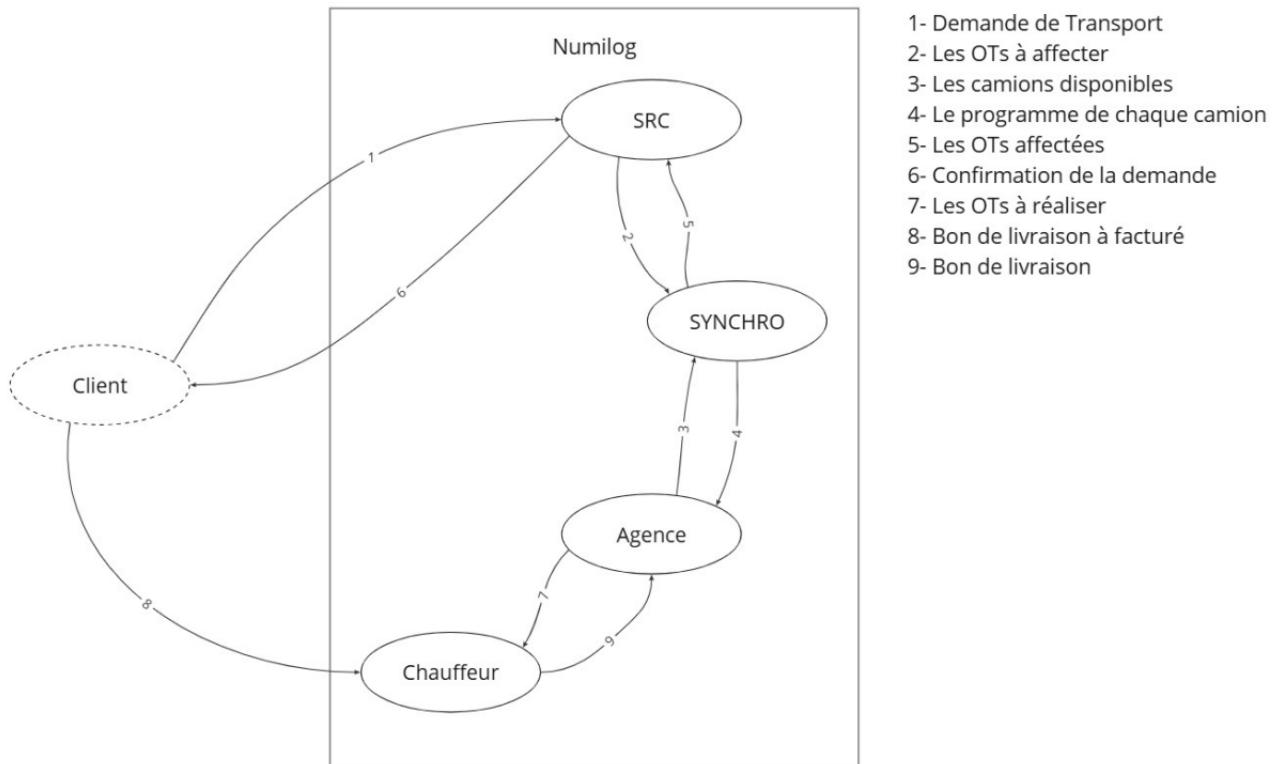


FIGURE 1.1 – Processus de réalisation des ordres de transport

Source : Fait par les étudiantes

1.4.4 Dysfonctionnements détectés

Le processus de réception et de réalisation des OTs souffre de plusieurs dysfonctionnements :

Temps de réponse important pour l'affectation des moyens : Il s'écoule souvent un certain temps avant que les OTs ne soient affectés aux camions et aux chauffeurs.

Absence d'outils scientifiques pour la prise de décision : L'affectation des OTs aux camions et aux chauffeurs est actuellement basée sur l'expérience et le savoir-faire des opérateurs.

Choix des OTs à affecter non optimal : La sélection des OTs à affecter est complexe et dépend de plusieurs facteurs, ce qui peut conduire à des décisions non optimales et à une perte de revenus.

Manque d'optimisation des tournées : Les camions ne sont pas toujours utilisés de manière optimale, ce qui entraîne des kilomètres parcourus à vide et des coûts inutiles.

Non-respect des règles sociales : Les jours de repos des chauffeurs ne sont pas respecter, ce qui peut compromettre leur sécurité et celle des autres usagers de la route.

Les dysfonctionnements identifiés dans le processus de réception et de réalisation des OTs ont un impact négatif sur l'efficacité des opérations de transport de l'entreprise et peuvent entraîner des pertes de clients et de chiffre d'affaires.

La problématique principale est la suivante : Comment améliorer l'efficacité de la prise de décision pour le choix des OTs à réaliser et l'affectation des camions ?

1.5 Conclusion

En conclusion, l'analyse de la situation actuelle chez Numilog Algérie a révélé plusieurs dysfonctionnements qui entravent l'efficacité des opérations de transport de l'entreprise. L'absence d'outils scientifiques pour la prise de décision, le choix non optimal des OTs à affecter, le manque d'optimisation des tournées, et le non-respect des règles sociales sont autant de facteurs qui compromettent la performance globale et la satisfaction des clients. La tour de contrôle de Numilog, bien que structurée pour centraliser les opérations, doit encore surmonter des défis importants pour améliorer la coordination et l'efficacité. Les prochains chapitres abordent les solutions proposées.

Chapitre 2

Notions de base

2.1 Introduction

Dans de nombreuses situations de prise de décision complexe, il est souvent nécessaire de trouver des solutions qui répondent à plusieurs objectifs concurrents ou contradictoires.

Pour relever ce défi, deux approches principales sont largement utilisées : l'optimisation multiobjectif et l'analyse multicritère. L'optimisation multiobjectif vise à trouver un ensemble de solutions optimales, appelé ensemble de Pareto, qui représente un compromis entre les différents objectifs, tandis que l'analyse multicritère vise à évaluer et à comparer les solutions alternatives sur la base de plusieurs critères, souvent contradictoires.

Dans ce chapitre, nous explorerons ces deux approches en détail, en examinant leurs principes fondamentaux et leurs méthodes de résolution.

2.2 Problème d'optimisation combinatoire

Le problème d'optimisation combinatoire est un domaine de l'optimisation qui consiste à trouver la meilleure solution parmi un ensemble fini ou dénombrablement infini de solutions possibles. Ce type de problème se caractérise par la nécessité de choisir la meilleure combinaison d'éléments selon certains critères, souvent sous des contraintes spécifiques. [1].

2.2.1 La complexité d'un problème

La complexité d'un problème est liée à la fois à la nature du problème lui-même et à la méthode de résolution utilisée pour trouver la solution optimale en fonction d'un critère donné. En d'autres termes, la complexité d'un problème est déterminée par la complexité du meilleur algorithme connu capable de le résoudre.

2.2.2 Les classes de complexité

La théorie de la complexité consiste de classer les problèmes de décision en deux classes importantes P (Problème Polynomial) et NP (Problème Non-déterministe Polynomial).

La classe des problèmes P est constituée des problèmes de décision pour lesquels il existe un algorithme qui peut trouver une solution en temps polynomial. Cela signifie que le temps de calcul nécessaire pour résoudre ces problèmes augmente polynomialement avec la taille de l'entrée. [2].

La classe des problèmes NP contient les problèmes de décision pour lesquels une solution proposée peut être vérifiée en temps polynomial. Cela signifie qu'il est possible de vérifier si une solution donnée est correcte en un temps qui augmente polynomialement avec la taille de l'entrée.

Un problème Π appartient à NP si, pour toute instance I de Π , la validité de toutes les solutions de Π peut être vérifiée en temps polynomial. [2]

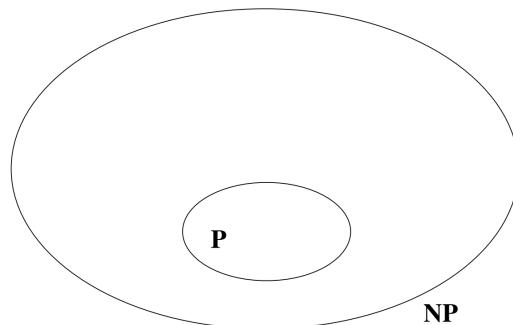


FIGURE 2.1 – Classes NP et P avec $NP \neq P$

Source : [2]

La classe des problèmes NP-complets Les problèmes NP-complets forment une sous-classe de NP et sont considérés comme les plus difficiles parmi les problèmes de NP. Un problème de décision Π est NP-complet s'il satisfait les deux conditions suivantes :

1. $\Pi \in NP$;
2. Pour tout $\Pi' \in NP$, Π' se réduit à Π . [2]

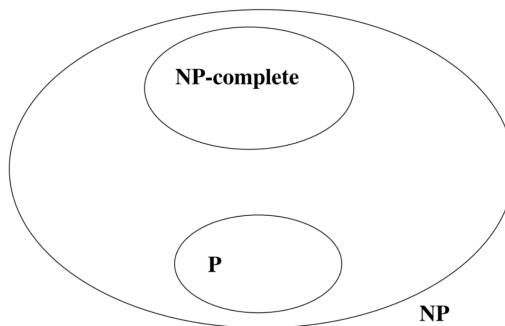


FIGURE 2.2 – Classes P, NP et NP-complets

Source : [2]

2.3 Problème de recouvrement

2.3.1 Définition

Le problème de recouvrement consiste à sélectionner un sous-ensemble d'éléments à partir d'un ensemble donné, de manière à ce que tout membre d'un autre ensemble soit "couvert" par au moins un des éléments sélectionnés, tout en minimisant un coût associé [3].

2.3.2 Modèle mathématique

$$(PR) = \begin{cases} \min & \sum_{j \in J} c_j x_j \\ \text{s.c.} & \sum_{\substack{j \in J \\ i \in I_j}} x_j \geq 1 \quad \forall i \in I \\ & x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \end{cases} \quad (2.1)$$

Où :

- $I = \{1, 2, \dots, m\}$ est l'ensemble des éléments à couvrir
- $J = \{1, 2, \dots, n\}$ est l'ensemble des éléments couvrants
- Pour chaque $j \in J$, $I_j \subseteq I$ est le sous-ensemble des éléments couverts par j
- x_j est une variable binaire qui vaut 1 si l'élément j est sélectionné, 0 sinon
- $c_j \geq 0$ est le coût associé à l'élément j

2.4 Optimisation Multiobjectifs

2.4.1 Définition

Les problèmes d'optimisation multiobjectifs fait partie du domaine de l'optimisation combinatoire, ce sont une généralisation à n fonctions objectives des problèmes d'optimisation classiques. Ils sont définis formellement comme suit :

$$(PMO) \left\{ \begin{array}{ll} \text{Optimiser} & F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \\ \text{sous} & x \in D \end{array} \right. \quad (2.2)$$

Où n est le nombre d'objectifs ($n \geq 2$), $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ est le vecteur représentant des variables de décision, D représente l'ensemble des solutions réalisables, et chacune des fonctions $f_i(x)$ est à optimiser, c'est-à-dire à minimiser ou à maximiser [4].

D est dit **espace des décisions** de dimension k et son image $F(D)$ est dite **espace des critères** de dimension n .

Contrairement à l'optimisation mono-objectif, la solution d'un problème multiobjectif n'est pas unique, mais est un ensemble de solutions non dominées, connu comme l'ensemble des solutions Pareto Optimales (PO).

2.4.2 Notion de dominance

On dit une solution $F(y) \in F(D)$ **domine** une solution $F(z) \in F(D)$ et on note : $F(y) \prec F(z)$ [5] si et seulement si :

- le cas d'une minimisation d'objectifs : $\forall i \in [1 \dots n], f_i(y) \leq f_i(z)$ et $\exists i \in [1 \dots n]$ tel que $f_i(y) < f_i(z)$.
- le cas d'une maximisation d'objectifs : $\forall i \in [1 \dots n], f_i(y) \geq f_i(z)$ et $\exists i \in [1 \dots n]$ tel que $f_i(y) > f_i(z)$.

2.4.3 Solutions de Pareto

Solution efficace : Une solution $X \in D$ est dite *efficace* si son image $F(X) \in F(D)$ n'est dominée par aucune autre solution $Y \in D$ et $Y \neq X$. En d'autres termes, il n'existe aucune autre solution $Y \in D$ pour laquelle $F(Y) \prec F(X)$. L'ensemble des solutions efficaces est notées par EFF .

Solution non-dominée (solution de Pareto) : Une solution $F(X) \in F(D)$ est dite *non-dominée* si X est efficace dans l'espace des décisions. L'ensemble des solutions non-dominées est notées par SND .

Front de Pareto : Le front de Pareto est l'ensemble des solutions non-dominées [6].

2.4.4 Point Idéal et Point Nadir

Le point idéal est obtenu en optimisant chaque fonction objectif séparément. Il correspond aux meilleures valeurs de chaque objectif des points de la surface de compromis (on considère un problème de maximisation) :

$$I = (\max_{x \in D} f_1(x), \max_{x \in D} f_2(x), \dots, \max_{x \in D} f_n(x))$$

Le point Nadir correspond aux pires valeurs obtenues par chaque fonction objectif lorsque l'on restreint l'espace des solutions à l'ensemble des solutions non-dominées :

$$N = (\min_{x \in \text{EFF}} f_1(x), \min_{x \in \text{EFF}} f_2(x), \dots, \min_{x \in \text{EFF}} f_n(x))$$

2.5 Méthodes de résolution

Les problèmes d'optimisation combinatoire consistent à sélectionner la meilleure méthode de résolution. Afin de définir une méthode de résolution, on doit d'abord étudier la complexité du problème puis on fixe la méthode de résolution. Cela s'applique pour les deux cas mono-objectif et multiobjectif. En général, les méthodes de résolution peuvent être divisées en deux catégories principales :

- Les méthodes exactes.
- Les méthodes approchées.

2.5.1 Lexiques

Optimum global

Un optimum global d'un problème d'optimisation est une solution optimale de la fonction objectif dans tout l'espace de recherche. Un optimum global peut être soit un maximum global, soit un minimum global [7].

Voisinage

Soit un univers S tel que $D \subset S$. Le voisinage d'une solution $s \in S$ est un sous-ensemble de solutions de S , directement atteignables à partir d'une transformation donnée de s . Il est noté $V(s)$ et

une solution $s' \in V(s)$ est dite voisine de s .

Cette notion de voisinage structure l'espace de recherche dans le sens où elle permet de définir des sous-ensembles de solutions. En particulier, à partir d'une solution donnée, on peut établir plusieurs structures de voisinage selon la transformation que l'on s'autorise. Chaque structure de voisinage fournit un voisinage, ou un ensemble de solutions, précis via la transformation définie [7].

Optimum local

Un optimum local d'un problème d'optimisation est une solution réalisable qui donne la valeur maximale ou minimale de la fonction objectif dans le voisinage de cette solution [7].

La définition d'un optimum local est liée à la structure de voisinage. En d'autres termes, un optimum local pour une structure de voisinage donnée ne l'est pas forcément pour une autre structure de voisinage.

Il est important de noter qu'un optimum global est nécessairement un optimum local, mais un optimum local n'est pas nécessairement un optimum global.

Intensification

L'intensification est un processus qui focalise la recherche sur les régions de l'espace de recherche qui semblent prometteuses, c'est-à-dire celles dans le voisinage de la meilleure solution actuelle. Elle consiste à approfondir la recherche dans certaines régions du domaine, identifiées comme susceptibles de contenir un optimum global. Cette intensification est appliquée périodiquement, et pour une durée limitée généralement jusqu'à l'obtention d'un optimum local [8].

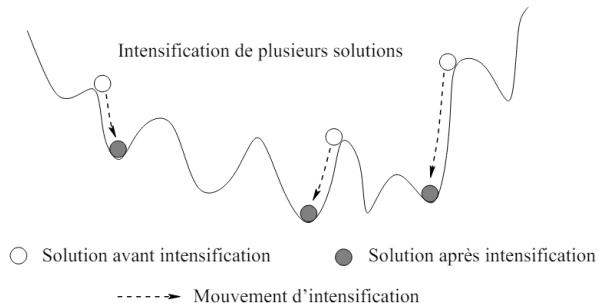


FIGURE 2.3 – Processus d'intensification de solution

Source : [9]

Diversification

La diversification est un processus dont l'objectif est l'exploration de régions encore inconnues de l'espace de recherche dans l'espoir de trouver de meilleures solutions et d'éviter que le processus de recherche tombe sur des solutions locales d'une manière prématurées. Ces notions reposent généralement sur la mémorisation des solutions visitées [8].

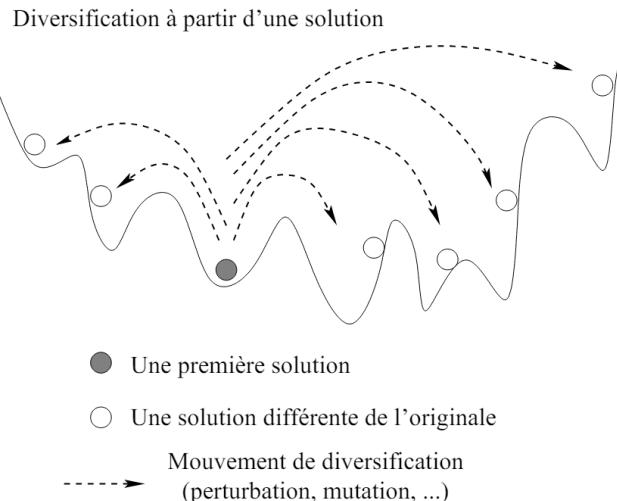


FIGURE 2.4 – Processus de diversification de solution

Source : [9]

2.5.2 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes reposent sur l'utilisation d'algorithmes qui mènent de façon sûre vers la solution optimale. Le principe essentiel de ces méthodes est d'énumérer de manière implicite l'ensemble des solutions de l'espace de recherche [10].

Il s'agit principalement des approches de type Branch and Bound, ou de type Branch and Cut et celles issues de la programmation dynamique [10].

Ces méthodes qui fournissent la meilleure solution sont très effectives pour les problèmes appartenant à la classe P , cependant, elles sont limitées à de petites instances de problèmes appartenant à la classe NP -complet. Dès que le nombre de variables de décision augmente, les temps de résolution avec les méthodes exactes augmentent rapidement. Certaines approches exactes permettent cependant de réduire le nombre de solutions examinées.

2.5.3 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées représentent une alternative pour résoudre les problèmes d'optimisation de grande taille lorsque les méthodes exactes ne sont pas capables de trouver une solution dans un temps raisonnable. Les méthodes approchées ne garantissent pas l'optimalité de la solution mais, elles permettent d'obtenir des solutions réalisables sans garantir leurs qualités en un temps de calcul réduit [7]. C'est pour cette raison que l'utilisation des méthodes approchées s'est avérée d'une grande utilité. On peut les subdiviser en deux classes :

- Les heuristiques.
- Les métahéuristiques.

Les heuristiques

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes heuristiques ne garantissent pas la qualité des solutions qu'elles retournent. Une heuristique est généralement une stratégie de résolution empirique qui exploite la structure particulière d'un problème spécifique et fixé qu'elle cherche à résoudre.

Les heuristiques peuvent être classées en deux catégories :

- **les méthodes constructives** : Partant d'une solution initialement vide, elles travaillent d'une façon itérative et construisent pas à pas une solution et elles cherchent à étendre à chaque étape la solution partielle de l'étape précédent, et ce processus se répète jusqu'à ce que l'on obtienne une solution réalisable [11]. En général, les méthodes constructives sont des algorithmes gloutons. Elles permettent de construire rapidement des solutions réalisables.
- **les méthodes d'amélioration** : Ces méthodes font appel à des méthodes de recherche locale, qui améliorent progressivement une solution initiale déjà obtenue. À chaque itération d'une recherche locale, il y aura une exploration d'un voisinage de la solution actuelle pour trouver une meilleure solution. Dans ce voisinage des solutions, nous cherchons à trouver en général la meilleure solution et pour chaque cas nous avons un critère d'arrêt spécial. Ces méthodes ont été développées pour aider la recherche à échapper aux minima locaux [11].

Les méta-heuristiques

Très utilisées de nos jours, les métaheuristiques sont des schémas globaux, applicables et adaptables aux différents problèmes rencontrés. La plupart sont des algorithmes stochastiques itératifs ayant des méthodes de recherche favorisant la convergence vers un optimum global. Certains travaux (Fleury, 1993 ; Hajek, 1986) permettent de déterminer les conditions nécessaires et suffisantes démontrant la convergence de certaines métaheuristiques vers les solutions optimales. Elles intègrent toutes des mécanismes de diversifications, qui alternent avec des phases d'intensification. Une des qualités principales des métaheuristiques est leur capacité à se combiner à des méthodes heuristiques ou exactes déjà existantes afin d'améliorer leur vitesse de résolution et la qualité des solutions proposées [7] .

Le rapport entre le temps d'exécution et la qualité de la solution trouvée d'une métaheuristique reste alors dans la majorité des cas très intéressant par rapport aux différents types d'approches de résolution. Le principe des approches métaheuristiques est qu'elles utilisent des processus aléatoires et itératifs afin d'explorer l'espace de recherche et de résoudre les problèmes complexes. L'un des enjeux de la conception des métaheuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et le réglage des paramètres pour les adapter à un problème donné. Les métaheuristiques peuvent être réparties en :

1. **méta-heuristique avec solution unique** : Les méthodes itératives à solution unique sont toutes basées sur un algorithme de recherche de voisinage qui commence avec une solution initiale, puis l'améliore pas à pas en choisissant une nouvelle solution dans son voisinage . Citons les méthodes les plus utilisées tels que les méthodes de descente, le recuit simulé et la recherche tabou. [12]
2. **Les métahéuristiques à base de populations** : Elles font évoluer un groupe de solutions en parallèle, ces dernières s'échangeant des informations afin de converger vers un optimum global. Les algorithmes génétiques (Genetic Algorithm – GA), les méthodes de colonies de fourmis (Ant Colony Optimization – ACO) ou encore l'optimisation par essaims particulaires (Particle Swarm Optimization – PSO) sont les plus connus [13].

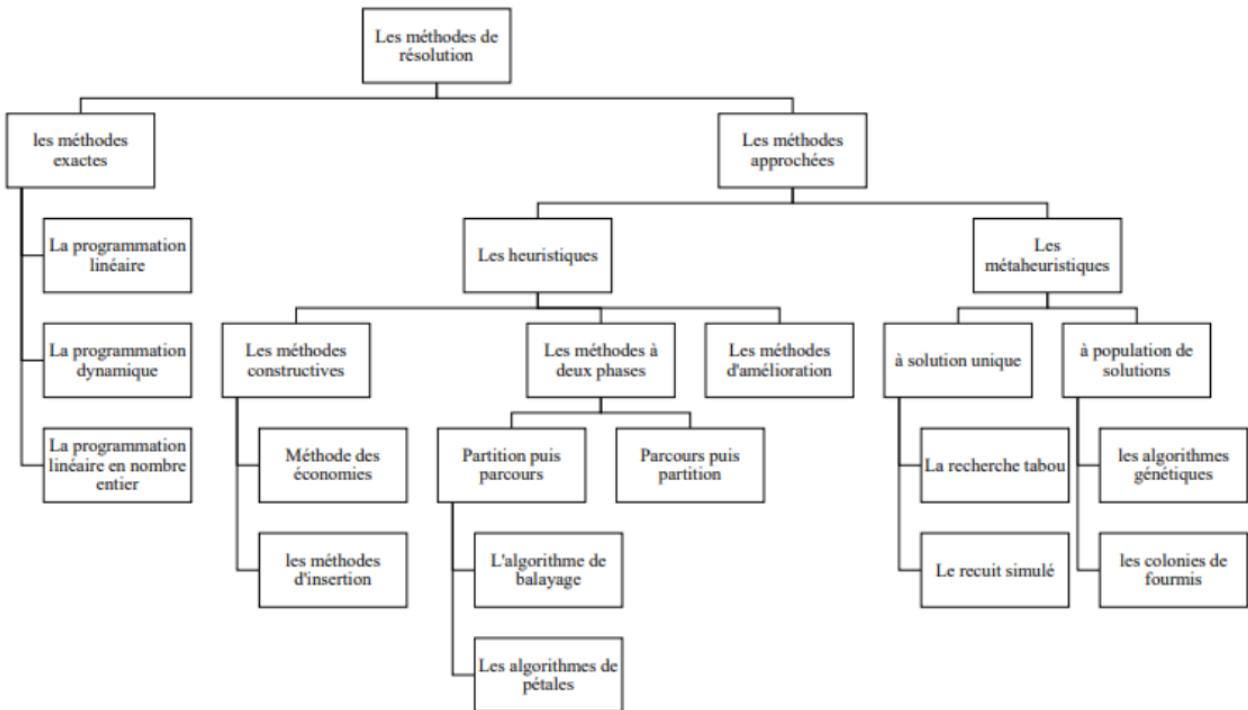


FIGURE 2.5 – Le méthodes de résolutions

Source : [9]

2.6 Analyse Multicritère

2.6.1 Définition

L'analyse multicritère ou les méthodes d'aide à la décision multicritères désignent généralement un ensemble des approches permettant de prendre la décision en tenant compte l'ensemble des critères avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs actions ou solutions. Elle vise à fournir des outils qui permettront de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs objectifs, souvent contradictoires, doivent être pris en compte. [14, 15].

L'application de ces méthodes consiste à :

- Identifier l'objectif global de la démarche et le type de décision
- Dresser la liste des actions ou solutions potentielles
- Identifier les critères ou standards qui orienteront les décideurs
- Juger chacune des solutions par rapport à chacun des critères
- Agréger ces jugements pour choisir la solution la plus satisfaisante

2.6.2 Terminologie de base

Alternatives (ou solutions ou actions) : choix disponibles (de quelques-unes à des centaines).

Critères (ou attributs) : aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées qui peuvent être qualitatifs ou quantitatifs.

Unités : façon d'exprimer la performance vs les critères qui sont tangibles ou intangibles.

Poids (des critères) : importance attribuée aux critères.

2.6.3 Quelques méthodes d'analyse multicritères

On va présenter les méthodes utiles pour notre cas d'étude. La première est la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) [16], la deuxième méthode Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) [17].

2.6.3.1 La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)

L'Analytic Hierarchy Process (AHP), conçue par Thomas L. Saaty [16], est une méthode de hiérarchie analytique visant à simplifier l'évaluation finale dans les processus décisionnels. Elle repose sur la création d'une hiérarchie pour structurer les décisions, avec des combinaisons binaires établies à chaque niveau. Ce qui distingue l'AHP, c'est son approche distinctive pour déterminer les poids des critères, ce qui permet une prise de décision plus éclairée et systématique.

Les étapes de L'AHP :

Étape 1 : Décomposition le problème complexe en structure hiérarchique :

- Niveau 0 : contient le but ou l'objectif de l'étude ainsi que le type de problématique étudiée.
- Niveau 1 : contient l'ensemble des critères du problème étudié.
- Niveau 2 : contient l'ensemble des actions ou alternatives du problème étudié.

Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires :

- Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur.
- Configurer une matrice carrée A réciproque formée par les évaluations des rapports des poids ($K \times K$), K étant le nombre d'éléments comparés. On obtient de cette façon : $a = a_{ij}$ avec $a_{jj} = 1$ et $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ (valeur réciproque).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{a_{12}} & \dots & \frac{1}{a_{1K}} \\ a_{21} & 1 & \dots & \frac{1}{a_{2K}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{K1} & a_{K2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

- Les valeurs $a = a_{ij}$ sont déterminées à l'aide de l'échelle de Satay :

Échelle numérique	Échelle verbale
1.0	Importance égale des deux éléments
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements utilisées pour affiner le jugement

TABLE 2.1 – Échelle de Sataay

*Source : [18]***Étape 3 :** Déterminer les priorités :

- Normaliser les matrices obtenues.
- Calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente .
- La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propre .
- L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé entre 0 et 1. Plus grande est cette valeur et plus important est le critère correspondant.

Étape 4 : Synthétiser les priorités :

- Une fois que les priorités locales pour tous les critères figurant dans la hiérarchie ont été déterminées, AHP calcule un score d'évaluation global attaché à chacune des solutions alternatives identifiées.
- On obtient alors un vecteur $P = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}\}$, qui indique l'impact du critère i sur chacune des alternatives.
- Ce vecteur représente le vecteur propre principal de la matrice réciproque de dimension n .

Étape 5 : Cohérence des jugement :

- Les réponses obtenues présentent souvent un certain degré d'incohérence.
- AHP n'exige pas que les jugements soient cohérents ni transitifs, cependant, Saaty a défini un indice de cohérence IC comme suit :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - K}{K - 1}$$

- Plus l'indice de cohérence devient grand et plus les jugements de l'utilisateur sont incohérents et vice versa .

2.6.3.2 La méthode Preference Ranking Organisation METHode for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

PROMETHEE est une méthode de surclassement conçue par J. P. Brans [19]. Elle offre un cadre structuré pour comparer les alternatives en fonction de multiples critères.

1. PROMETHEE repose sur trois étapes :

- a) Enrichissement de la structure de préférence : définition de critères généralisés à partir de fonctions de préférence.
- b) Enrichissement de la relation de dominance : établissement d'un degré de préférence globale entre chaque paire d'actions.
- c) Aide à la décision : utilisation de la relation de surclassement pour fournir un rangement partiel (PROMETHEE I) ou total (PROMETHEE II) des actions.

2. Les trois phases de la méthode PROMETHEE :

- a) La notion de critère généralisé : un critère généralisé dans la méthode PROMETHEE est défini par une fonction de préférence qui traduit l'intensité de préférence entre deux actions a_1 et a_2 sur la base d'un critère donné C_i .

Voici ci-joint le tableau des principales formes de fonctions de préférence utilisées :

Type Critère	Description	Fonction de Préférence	Paramètres
Critère Usuel	Utilisé pour des données discrètes, avec une préférence stricte dès qu'il y a un écart.	$P(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } d = 0 \\ 1 & \text{si } d > 0 \end{cases}$	Aucun
Quasi-Critère	Utilisé lorsque les seuils d'indifférence sont clairement apparents.	$P(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q \\ 1 & \text{si } d > q \end{cases}$	Seuil d'indifférence q
Critère Préférence Linéaire	Utilisé pour des données avec des écarts continus.	$P(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & \text{si } 0 < d < p \\ 1 & \text{si } d \geq p \end{cases}$	Seuil de préférence stricte p
Critère Paliers (Pseudo)	Utilisé pour des cas spécifiques avec indifférence et préférence stricte coexistantes.	$P(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & \text{si } q < d < p \\ 1 & \text{si } d \geq p \end{cases}$	Seuils q et p
Critère Préférence Linéaire avec Zone d'Indifférence	Utilisé pour des seuils d'indifférence et de préférence strictes clairement apparents.	$P(a_1, a_2) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & \text{si } q < d < p \\ 1 & \text{si } d \geq p \end{cases}$	Seuils q et p
Critère Gaußien	Utilisé pour un grand nombre de candidats, souvent dans des distributions continues.	$P((a_1), (a_2)) = 1 - e^{-(\frac{d}{s})^2}$	Écart type s

TABLE 2.2 – Types de critères utilisés dans PROMETHEE

Source : [20]

Explications des paramètres :

- d : Différence entre les évaluations sur le critère C_i , soit

$$d = C_i(a_1) - C_i(a_2)$$
- q : Seuil d'indifférence, au-dessous duquel les actions sont considérées comme indifférentes.
- p : Seuil de préférence stricte, au-delà duquel une préférence forte est déclarée.
- s : Écart type pour le critère gaußien, représentant la distribution de préférence.

b) Procédure de synthèse de surclassement : PROMETHEE utilise un indice de préférence multicritère pour comparer les actions. Voici les étapes détaillées :

Indice de préférence multicritère :

Pour chaque couple d'actions a_1, a_2 et pour chaque critère C_i , un indice de préférence est calculé :

$$\pi(a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i(a_1, a_2)$$

où w_i représente le poids attribué au critère C_i . L'indice de préférence global $\pi(a_1, a_2)$ varie entre 0 (préférence faible) et 1 (préférence forte).

Flux de surclassement :

Type de Flux	Description
Flux sortant (+)	$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x)$ Mesure la puissance d'une action face à toutes les autres.
Flux entrant (-)	$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a)$ Mesure la faiblesse d'une action face à toutes les autres.
Flux net	$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$ Bilan des flux entrants et sortants, une valeur plus élevée indique une meilleure action.

TABLE 2.3 – Flux de surclassement dans la méthode PROMETHEE

Source : [20]

Exploitation de la valeur de la relation de surclassement :

PROMETHEE I (Rangement partiel) : Utilise les flux sortant et entrant pour ranger les actions. Les actions peuvent être :

- *Préférées (P)* : a_1 est préférée à a_2 si $\phi^+(a_1) > \phi^+(a_2)$ et $\phi^-(a_1) < \phi^-(a_2)$.
- *Indifférentes (I)* : a_1 et a_2 sont indifférentes si $\phi^+(a_1) = \phi^+(a_2)$ et $\phi^-(a_1) = \phi^-(a_2)$.
- *Incomparables (R)* : a_1 et a_2 sont incomparables si $\phi^+(a_1) > \phi^+(a_2)$ mais $\phi^-(a_1) > \phi^-(a_2)$, ou vice versa.

PROMETHEE II (Rangement complet) : Utilise le flux net pour fournir un rangement complet. Les actions sont rangées dans l'ordre décroissant de $\phi(a)$. Il est clair qu'il n'y a plus la relation "incomparable" dans ce cas.

Dans la suite de notre étude, nous utiliserons la méthode PROMETHEE II car elle ne laisse pas de place à l'incomparabilité. L'information fournie est complète et plus simple à interpréter. En plus, une utilisation partielle de la méthode AHP afin de calculer les poids des critères dont la méthode PROMETHEE les prennent juste comme entrées.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases théoriques et méthodologiques nécessaires pour aborder les étapes suivantes de notre recherche, où nous appliquerons ces concepts à notre problématique spécifique. Les connaissances acquises ici nous permettront de comprendre les problèmes d'optimisation multiobjectifs et ainsi d'effectuer une analyse multicritère et de développer des solutions optimales pour répondre aux enjeux identifiés dans notre étude.

Chapitre 3

Modélisation mathématique et Résolution

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la modélisation mathématique du problème de recouvrement des ordres de transport par les camions disponibles ainsi que la résolution. Nous commencerons par définir les données et la formulation de la problématique, suivie par les hypothèses de base. Ensuite, nous détaillerons le problème de recouvrement à travers les ensembles, les paramètres, les variables, les contraintes, et les fonctions objectives. Nous avons adopté une démarche en plusieurs étapes : traitement initial des données, analyse multicritère pour prioriser les OTs, utilisation d'une heuristique guidée par une fonction fitness pour générer une solution initiale, et l'amélioration de cette solution avec des métaheuristiques telles que l'algorithme Sonar, 2-opt et la Recherche Tabou.

3.2 Formulation de la problématique

Le problème d'affectation des OTs aux camions disponibles peut être représenté comme un problème de recouvrement sur un graphe. Le graphe est constitué de nœuds représentant les OTs et les camions, et les arcs représentant les trajets entre ces nœuds.

L'objectif consiste à minimiser le coût total de recouvrement des OTs avec les camions disponibles, tout en respectant les contraintes de disponibilité des camions, les fenêtres de temps des OTs, et la séquence des opérations.

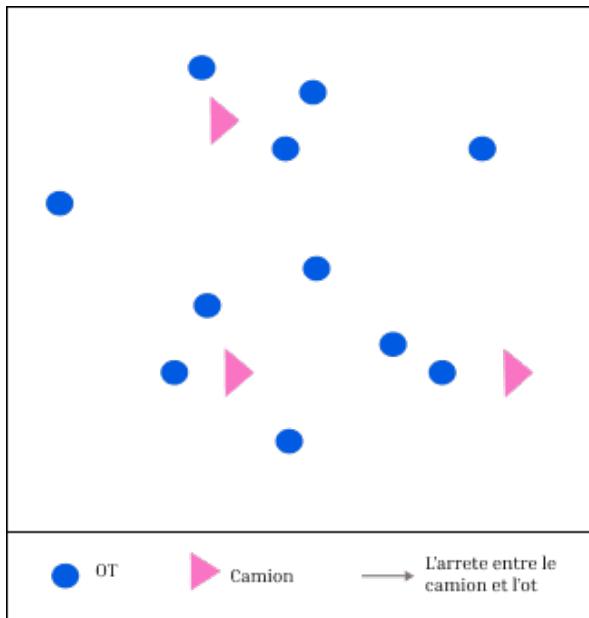


FIGURE 3.1 – illustration de processus d'affectation

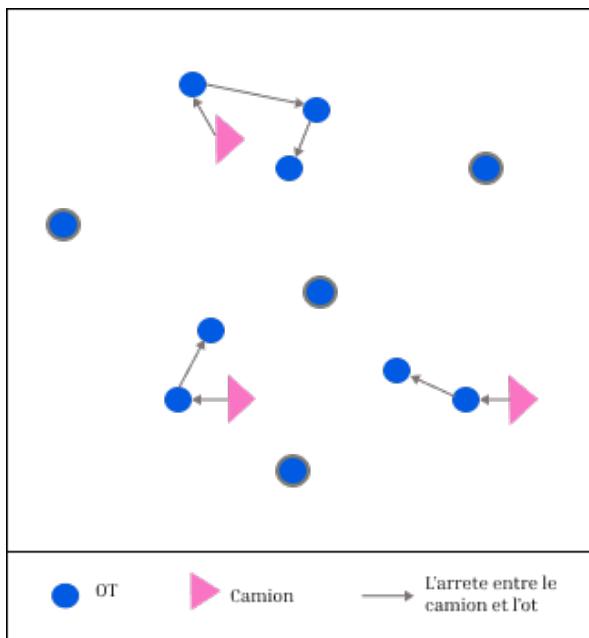
Source : Fait par les étudiantes

FIGURE 3.2 – illustration de processus d'affectation

Source : Fait par les étudiantes

3.2.1 Hypothèses

Les camions ne se déplacent que dans une seule direction, de leur emplacement actuel à l'OT qu'ils sont affectés à couvrir. Le retour à vide n'est pas autorisé, qui est la pratique de retourner à un dépôt ou à un point d'origine après avoir effectué une livraison.

Tous les camions disponibles sont homogènes en termes de capacité et de vitesse.

Les temps de service des OTs et les temps de trajet entre les OTs, sont supposés fixes et connus à l'avance. Cela signifie que le temps nécessaire pour terminer un OT n'est pas affecté par des facteurs externes, tels que la congestion routière ou les conditions météorologiques.

Pas de contrainte de précédence entre les OT. Cela signifie qu'il n'y a pas d'ordre spécifique dans lequel les OTs doivent être complétés. Le modèle est libre d'affecter les OTs aux camions dans n'importe quel ordre qui minimise le coût total de couverture. Par contre, il y a une priorité de certains sur d'autres. Cette priorité est calculée par des méthodes d'analyse multicritère.

3.2.2 Ensembles

O : Ensemble des ordres de transport.

K : Ensemble des camions.

3.2.3 Paramètres

o : Indice de l'ordre de transport

k : Indice de camion

$[e_o, l_o]$: Fenêtre de temps de l'ordre o

f_o : Priorité de l'ordre o

t_o : Temps de service de l'ordre o

d_k : Durée de disponibilité du camion k , durée entre l'horaire de disponibilités et le jour de repos de chauffeur

H_k : Horaire de disponibilité du camion k

t_{ok} : Temps de trajet entre l'ordre o et l'agence de camion k

t_{ko} : Temps de trajet entre le camion k et l'ordre o

$t_{o'o}$: Temps de trajet entre les positions des ordres o' et o

3.2.4 Variables

$$x_{ok} = \begin{cases} 1 & \text{Si le camion } k \text{ est affecté à l'OT } o \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$p_{ok} = \begin{cases} 1 & \text{Si la durée de disponibilité du camion } k \text{ est non respectée s'il est affecté à l'ordre } o \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

T_{ok} = l'heure de début de service de l'OT o par le camion k

T_{ok} = l'heure de début de service de l'OT o par le camion k

3.2.5 Contraintes

Chaque ordre doit être couvert par au plus un camion.

$$\sum_{k \in K} x_{ok} \leq 1, \quad \forall o \in O \quad (3.1)$$

L'heure de début du service de chaque OT se situe dans la fenêtre de temps qui lui est assignée.

$$T_{ok} \geq e_o x_{ok} - (1 - x_{ok})M, \quad \forall o \in O; M \gg 0 \quad (3.2)$$

$$T_{ok} \leq l_o x_{ok} + (1 - x_{ok})M \quad \forall o \in O; M \gg 0 \quad (3.3)$$

Le début de service de chaque OT doit impérativement se faire avant minuit.

$$T_{ok} x_{ok} \leq 24 \quad \forall o \in O, \forall k \in K \quad (3.4)$$

L'heure de début de service d'un OT tient compte des temps de trajet et de service des OTs précédents.

$$T_{ok} x_{ok} = \max \left\{ \max_{\substack{o' \in O \\ o' \neq o}} \{(T_{o'k} + t_{o'} + t_{o'o}) x_{o'k}\}, (H_k + t_{ko}) x_{ok} \right\} x_{ok} \quad \forall o \in O, \forall k \in K \quad (3.5)$$

Ces deux contraintes garantissent que des pénalités seront appliquées en cas de non-respect de la durée de disponibilité des camions.

$$(T_{ok} + t_o + t_{ok} - d_k) x_{ok} \geq (1 - p_{ok})(1 - M)x_{ok} \quad \forall o \in O, \forall k \in K; M \gg 0 \quad (3.6)$$

$$(T_{ok} + t_o + t_{ok} - d_k) x_{ok} \leq M p_{ok} x_{ok} \quad \forall o \in O, \forall k \in K; M \gg 0 \quad (3.7)$$

3.2.6 Fonctions objectifs

Cette fonction vise à minimiser le temps de trajet à vide des camions, le temps entre l'heure de disponibilité de camion et le début de service de premier OT plus le temps du trajet à vide entre les OTs. Cette fonction vise à maximiser la priorité des OTs couverts.

$$\min \sum_{k \in K} \left(\max_{o \in O} \{(T_{ok} + t_o) x_{ok}\} - H_k x_{ok} - \sum_{o \in O} t_o x_{ok} \right) \quad (3.8)$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{o \in O} f_o x_{ok} \quad (3.9)$$

Cette fonction vise à minimiser les pénalités associées au non respect des contraintes de disponibilité des camions.

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{o \in O} p_{ok} x_{ok} \quad (3.10)$$

On remarque qu'on a un problème recouvrement multiobjectif avec des contraintes de disponibilités.

3.3 Description de la démarche globale de résolution

Étant donné la complexité du modèle mathématique, il n'est pas possible de le résoudre par une méthode exacte.

Nous avons opté pour des méthodes approchées. La démarche proposée se décompose en plusieurs étapes :

1. Traitement des Données : Le traitement des données initiales, comprenant le fichier des OTs extrait du TMS et le fichier de disponibilité des camions envoyés par les agences. Le traitement des données inclut la suppression des lignes non pertinentes, la sélection et la transformation des colonnes essentielles.
2. Analyse Multicritère : Afin d'optimiser la gestion des ordres de transport et d'établir un ordre de priorité clair, nous avons réalisé une analyse multicritère pour évaluer chaque OT selon trois critères principaux : destination de l'OT, priorité du client, chiffre d'affaires. Les poids de ces critères sont calculés à l'aide de la méthode AHP. La méthode PROMETHEE II est ensuite utilisée pour calculer le flux net de chaque OT, indiquant sa priorité relative.
3. Heuristique : L'heuristique employée pour proposer une affectation initiale des camions aux OTs suit une approche itérative guidée par une fonction fitness qui combine les 3 objectifs : minimisation de temps de trajet et de pénalités liées aux jours de repos et maximisation des flux net des OTs pour évaluer et choisir la meilleure affectation OT-camion à chaque étape.
4. Métaheuristique : L'heuristique produit une solution initiale, qui sera ensuite améliorée par une métaheuristique, composée de deux étapes : La première étape utilise l'algorithme Sonar pour évaluer et exécuter les permutations possibles entre les ordres de transport affectés aux différents camions, en visant à réduire le kilométrage à vide et les pénalités dues au non-respect des jours de repos des chauffeurs. La seconde étape utilise les métaheuristiques 2-opt et la recherche tabou pour explorer de nouveaux voisinages à partir des solutions générées par Sonar, en intégrant les OTs non couverts.

Algorithm 1 Pseudo-algorithme de la démarche globale

Input : Fichiers Excel des OTs, Disponibilité des camions, Matrice de distances, Priorité des villes, Priorité des clients

Output : Fichiers Excel des affectations des OTs

// Traitement des données //

Supprimer les enregistrements ayant des valeurs spécifiques dans les colonnes "HORAIRES" et "LIEU J+1"

Convertir les jours de la semaine à des valeurs numériques pour "Jour Repos CSR"

Séparer les données en différents types : "MARAICHERS", "CELLULE", "CITERNE", "COTTE"

Ajouter pour le fichier OTs les colonnes : Temps de service, Début Time Window, Fin Time Window, Priorité ville, Priorité client

// Analyse multicritère //

Construire une matrice de décision basée sur les priorités des clients, des villes, et le chiffre d'affaires

Calculer les indices de préférence entre les ordres de transport

Calculer le flux net pour chaque ordre de transport

// Heuristique //

for chaque camion disponible **do**

for chaque OT non affecté **do**

 | Calculer le coût d'affectation

end

 Affecter l'OT avec le coût minimal au camion

 Mettre à jour les horaires et les lieux des camions

 Enrergister les affectations

return L'affectation initiale

end

// Métaheuristique //

L'affectation initiale retournée par l'heuristique

while il y a des permutations améliorantes **do**

for chaque permutation des OTs de 2 camions **do**

 | Évaluer et permutez les OTs pour maximiser la différence de km à vide

end

 Mettre à jour l'ensemble des solutions non dominées

return : Ensemble des solutions non dominées

end

Ensemble des solutions non dominées obtenues à partir de la métaheuristique sonar

while condition de fin non atteinte **do**

for chaque solution non dominée **do**

for chaque permutation possible entre un OT couvert et un OT non couvert **do**

 | Évaluer et permutez les OTs

end

end

 Mettre à jour l'ensemble des solutions non dominées

return : Ensemble final des solutions non dominées

end

// Affichage des résultats //

Calculer et afficher les indicateurs de performance des solutions finales

Enregistrer chaque affectation (solution non dominée) dans un fichier Excel

3.4 Traitement des données

Nos données initiales sont obtenues à partir de deux fichiers Excel (.xlsx) :

- Fichier des ordres de transport : Extrait du TMS, ce fichier contient des informations détaillées sur chaque ordre de transport.
- Fichier de disponibilité des camions : Envoyé par les agences, ce fichier fournit des informations sur la disponibilité des camions.

3.4.1 Fichier de disponibilité

1. Identification des lignes à supprimer

Horaires non spécifiques :

"A CONFIRMER" : indique que l'horaire n'est pas encore confirmé et peut changer.

"EN MISSION" : indique que le camion est en mission et son horaire de retour est incertain.

"ND" : Signifie "Non Disponible".

Lieux de disponibilité non pertinents :

"EN MISSION" : Indique que le camion est en mission.

"DELTA" : le lieu de disponibilité n'est pas encore confirmé.

"EN PANNE" : Indique que le camion est en panne et n'est pas disponible.

2. Sélection des colonnes

Agence : Indique l'agence des chauffeurs.

TYPE : Spécifie le type de véhicule.

IMMAT TR : Numéro d'immatriculation du tracteur.

CSR : nom du chauffeur.

Jour Repos CSR : Jour de repos du chauffeur.

LIEU J+1 : Localisation de disponibilité pour le jour suivant.

HORAIRES : l'horaire de disponibilité du chauffeur.

DATE J+1 : Date de disponibilité.

3. Transformation des données

Convertir les données de la colonne HORAIRE en nombre entier pour un format uniforme et cohérent pour une meilleure manipulation.

Remplacer les noms de jours présents dans la colonne Jour Repos CSR par des représentations numériques permettant une manipulation plus facile des données pour le calcul de la différence entre le jour de livraison et le jour de repos.

Séparer les données en plusieurs fichiers Excel distincts, un pour chaque type de véhicule (Maraîchers, Cellule, Citerne, Cocotte).

3.4.2 Fichier des OTs

1. Sélection des colonnes

N°OT : Numéro d'identification unique de l'ordre de transport.

Réf Cde Client : Code de référence du client associé à l'OT

Client : Nom du client pour lequel l'OT est effectué

Destinataire : Nom du destinataire final de la marchandise
 Ville Départ : Ville de départ de la livraison
 Ville Arrivée : Ville de destination de la livraison
 Km : Distance parcourue entre la ville de départ et la ville d'arrivée
 CA : Chiffre d'affaires de l'OT
 Activité : Type d'activité de transport :
 Normale : Transport conventionnel.
 FRAIS : Transport de produits frais.
 MAD : Mise à disposition de camion.

2. Ajout de colonnes

i. Temps de service :

Calcul du temps de service de chaque OT en fonction de la distance, de la vitesse moyenne et des temps de chargement/déchargement standard :

$$\text{Temps de service} = \frac{\text{Distance}}{\text{Vitesse moyenne (50 km/h)}} + \text{Temps de chargement et déchargement}$$

Si l'activité = MAD alors Temps de service = 48 heures

ii. Début TW, Fin TW :

Les horaires de début et de fin de la fenêtre de temps sont extraites à partir d'un fichier Excel client.

3. Séparer les données en 4 fichiers Excel distincts, selon le type de marchandises transportées.

les données avant et après traitement sont présentées en annexe A.1, A.2, A.3 et A.4.

3.4.3 Matrice des distances

La matrice est essentielle pour évaluer et minimiser les distances parcourues par les camions. Pour construire cette matrice, nous avons collecté les positions géographiques (longitude et latitude) des villes de départ et d'arrivée. Ensuite, à l'aide de ces coordonnées, nous avons calculé les distances euclidiennes entre chaque paire de points à l'aide de la bibliothèque python "geopy". Les distances calculées ont été compilées dans une matrice carrée symétrique avec une diagonale nulle où chaque cellule représente la distance entre deux villes spécifiques. Une partie de cette matrice est présentée en annexe A.8.

3.5 Analyse multicritère

Afin d'optimiser la gestion des ordres de transport et d'établir un ordre de priorité clair, une analyse multicritère est réalisée en utilisant la méthode PROMETHEE II, un flux net est calculé pour chaque OT indiquant sa priorité.

3.5.1 Définition des critères

Trois critères principaux sont identifiés pour évaluer chaque OT :

1. Destination de l'OT : La destination de chaque ordre de transport est importante pour minimiser le kilométrage parcourus à vide après la livraison de l'OT. L'attractivité d'une destination augmente si la probabilité de trouver un autre OT, dont le point de départ est proche de cette destination, est élevée.
2. Priorité du client : Importance du client, qui reflète souvent la fréquence des commandes ainsi que la relation stratégique.
3. Chiffre d'affaires : CA généré par l'OT, ce qui influence la priorité accordée à l'OT en termes de rentabilité directe.

3.5.2 Poids des critères

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) a été utilisée pour calculer les poids des critères. La matrice de comparaison ci-dessous construite en utilisant l'échelle de Saaty représente les jugements relatifs entre les critères Ville d'Arrivée de l'OT, Priorité du client et Chiffre d'affaires (CA) :

Critères\Critères	Ville d'arrivée	Priorité client	Chiffre d'affaires
Ville d'arrivée	1	5	9
Priorité client	$\frac{1}{5}$	1	5
Chiffre d'affaires	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	1

TABLE 3.1 – Matrice des critères.

Cette matrice, basée sur l'importance relative des critères permet de déterminer le poids de chaque critère :

Critères	Ville d'arrivée	Priorité client	Chiffre d'affaire
Poids	0.7230	0.2157	0.0612

TABLE 3.2 – Poids des critères.

3.5.3 Évaluation de la priorité des villes d'arrivée

Les villes sont classées en quatre catégories d'importance, et un score est attribué à chaque catégorie de ville. La matrice de comparaison ci-dessous évalue l'importance relative de chaque catégorie de ville les unes par rapport aux autres :

Ville d'arrivée	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	5	7	9
C_2	$\frac{1}{5}$	1	5	7
C_3	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	1	5
C_4	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	1

TABLE 3.3 – Matrice de comparaison des catégories de clients.

La méthode AHP utilise la matrice de comparaison pour calculer les poids de chaque catégorie de ville :

Ville d'arrivée	C_1	C_2	C_3	C_4
Poids	0.6039	0.2480	0.1082	0.0399

TABLE 3.4 – Matrice des scores des villes d'arrivée .

Les poids sont ensuite utilisés comme scores de catégorie, reflétant l'importance de chaque catégorie de ville.

Chaque ville reçoit un score basé sur sa catégorie. Ce score quantifie la priorité de la ville, en tenant compte de l'importance relative à sa catégorie.

Les poids obtenus à partir de la méthode AHP servent de scores pour chaque catégorie de ville, ces scores reflètent l'importance attribuée à chaque catégorie. Ainsi, Chaque ville d'arrivée reçoit un score basé sur sa catégorie, ce qui permet de quantifier sa priorité.

3.5.4 Évaluation de la priorité des clients

Les clients sont classés en quatre catégories d'importance, et un score est attribué à chaque catégorie de client par la méthode AHP.

La matrice de comparaison ci-dessous évalue l'importance relative de chaque catégorie de client les une par rapport aux autres :

Client	C_1	C_2	C_3	C_4
C_1	1	5	7	9
C_2	$\frac{1}{5}$	1	5	9
C_3	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	1	5
C_4	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	1

TABLE 3.5 – Matrice de comparaison des catégories de clients.

Poids obtenus :

Client	C_1	C_2	C_3	C_4
Poids	0.5963	0.2624	0.1035	0.0377

TABLE 3.6 – Matrice des scores des client .

Les poids obtenus à partir de la méthode AHP sont utilisés comme scores pour chaque catégorie de client, reflétant l'importance attribuée à chaque catégorie. Ainsi, chaque client reçoit un score basé sur la catégorie à laquelle il appartient, ce qui quantifie sa priorité dans l'attribution des ordres de transport.

La répartition et la comparaison des catégories de clients et de Villes d'arrivées sont basées sur les informations recueillies auprès du personnel de l'entreprise.

3.5.5 Le calcul du flux net par PROMETHEE II

Chaque OT est évalué selon les trois critères : Priorité Ville d'Arrivée, Priorité client et CA.

Une matrice de décision est formée où chaque ligne représente un OT et chaque colonne représente un critère. La méthode PROMETHEE II est utilisée pour calculer le flux net de chaque OT, qui est la différence entre le flux positif et le flux négatif.

Nous utilisons des pré-critères (Critère Préférence Linéaire) pour chacun des trois critères. La fonction de préférence pour un pré-critère est définie comme suit :

$$p(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } d \leq 0 \\ \frac{d}{p_j} & \text{si } 0 < d \leq p_j \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

où $d = f(a) - f(b)$ est la différence entre les valeurs des alternatives a et b pour un critère donné, et p_j est le seuil de préférence pour ce critère.

Nous avons utiliser l'écart type des valeurs des alternatives comme seuil de préférence p_j

Nous avons calculer les indices de préférence pour chaque paire d'alternatives et chaque critère en utilisant la fonction de préférence.

Les flux positifs (préférence de l'OT par rapport aux autres) et négatifs (préférence des autres OTs par rapport à cet OT) sont calculés en sommant les indices de préférence pour chaque alternative.

Le flux net est la différence entre le flux positif et le flux négatif pour chaque alternative. Un flux net positif indique qu'une alternative est globalement préférée par rapport aux autres, tandis qu'un flux net négatif indique le contraire.

Une fois les flux nets calculés via l'approche PROMETHEE II, ils sont intégrés dans la table des OTs sous la nouvelle colonne 'Flux net'. Ce processus permet aux gestionnaires de visualiser directement les priorités entre les OTs améliorant ainsi l'efficacité de la prise de décision pour la sélection et l'affectation des OTs.

3.6 Heuristique

3.6.1 Conception de l'heuristique

L'heuristique proposée s'appuie sur une approche itérative guidée par une fonction fitness qui combine les 3 objectifs pour évaluer et choisir la meilleure affectation OT-camion à chaque étape.

Pour chaque combinaison OT-camion, on calcule le coût $\text{cout}(\text{ot}, \text{camion})$ en utilisant la fonction fitness :

$$\alpha \times \text{temps de trajet(OT, camion)} + \beta \times \text{pénalité(OT, camion)} - \gamma \times \text{flux net(OT)} \quad (3.11)$$

Cette fonction prend en compte :

Temps de Trajet : le temps nécessaire au camion pour se rendre de sa position actuelle à la ville de départ de l'OT.

Pénalités Liées aux Jours de Repos : des pénalités sont appliquées si l'affectation d'un OT empêche le camion de retourner à son Agence avant son jour de repos.

Flux net des OTs : les OTs sont classés en fonction de leur importance, les OTs à flux net élevé étant priorisés.

3.6.2 Description de l'Algorithmme

3.6.2.1 Données initiales

1. Fichier OTs : Ce fichier contient des informations détaillées sur chaque OT.
2. Fichier disponibilité des camions : Ce fichier contient des informations détaillées sur chaque camion.
3. Matrice de distance : Cette matrice représente les distances entre chaque paire de villes, permettant de calculer le temps de trajet entre le camion et la ville de départ de l'OT.

3.6.2.2 Déroulement de l'algorithme

1. Initialisation : Tous les OTs et camions sont marqués comme non affectés et tous les camions sont marqués comme disponibles.
2. Calcul du Coût d'Affectation : Pour chaque paire de camion disponible et d'OT non affecté, l'algorithme calcule le coût d'affectation associé.
Le coût d'affectation prend en compte :
 - i. Temps de Trajet : Calculé en fonction de la distance entre la position actuelle du camion et la ville de départ de l'OT, en utilisant la matrice de distance.
 - ii. Pénalités Liées aux Jours de Repos : Évaluées en vérifiant si l'affectation d'un OT empêche le camion de retourner à son Agence avant son jour de repos.
 - iii. Priorité de l'OT : Attribuée en fonction de l'importance de l'OT, les OTs à priorité élevée ayant un coût d'affectation inférieur.
3. Sélection de l'OT : Pour chaque camion disponible et OT non affecté, l'algorithme sélectionne l'OT associé au coût d'affectation le plus bas qui satisfait toutes les contraintes. L'affectation d'un OT à un camion n'est possible que si le camion arrive à la ville de départ de l'OT avant la fin de fenêtre de temps de client.
4. Mise à Jour des Statuts : Après chaque affectation, l'OT est marqué comme affecté et les informations du camion sont mises à jour (position actuelle et heure de disponibilité prévues à la ville d'arrivée de l'OT).
5. Répétition : La procédure est répétée jusqu'à ce que tous les OTs soient affectés ou qu'aucun camion ne soit disponible.

Algorithm 2 Algorithme de l'heuristique**Input :** Fichier OTs, Fichier disponibilité, Matrice distance**Output :** Dictionnaire d'affectation

// Fonction fitness //

Function Cout (*camion, ot*) :

```

if temps_attente(camion, ot) == 0 then
    | coût ←  $\alpha \times \text{temps\_trajet}(\text{camion}, \text{ot}) + \beta \times \text{pénalité}(\text{camion}, \text{ot}) - \gamma \times \text{ot}'\text{Fluxnet}'$ 
else
    | coût ←  $\infty$ 
end
```

// Fonction d'affectation //

Function Affectation (*camion, ot*) :**while** Il reste un OT non affecté **do**

```

if Aucun camion n'est disponible then
    | break
end
```

for Chaque camion disponible **do****for** Chaque ot non affecté **do**Cout (*camion, ot*) : Calculer les coûts d'affectation

cout_min ← Trouver le coût minimum

idx_ot_min ← Trouver l'indice de l'ot avec le coût minimum

```

if cout_min ==  $\infty$  then
    | break
end
```

idx_ot_min ← Affecté

camion ← Mettre à jour les informations du camion

end**end****end****return** Dictionnaire d'affectation

3.7 Métaheuristique

Dans notre démarche, nous proposons une approche en deux étapes pour améliorer la solution initiale fournie par l'heuristique.

3.7.1 Étape 1 : Intensification par la métahéuristique Sonar

L'objectif de cette première étape est de minimiser le kilométrage à vide entre les camions et les OTs inclus dans la solution initiale ainsi que les pénalités dues au non-respect des jours de repos des chauffeurs.

3.7.1.1 Principe de base de l'algorithme sonar

L'algorithme sonar vise à améliorer la détection et la couverture en plaçant de manière optimale les émetteurs et récepteurs dans une zone maritime [13].

Algorithme :

1. Initialisation : Commencez avec une solution initiale quelconque, générée aléatoirement ou par une méthode heuristique constructive, où les positions des émetteurs et récepteurs sont définies.
2. Exploration du voisinage : Explorer les solutions voisines en modifiant les positions des émetteurs et récepteurs.
3. Sélection des mouvements : Identifiez le mouvement qui améliore le plus la solution actuelle en termes de couverture et de coûts.
4. Itération jusqu'à convergence : Répétez les étapes 2 et 3 jusqu'à ce qu'aucune amélioration significative ne soit trouvée. Cela signifie que l'algorithme a convergé vers une solution optimale locale.

Cet algorithme permet de trouver une configuration optimale des émetteurs et récepteurs dans un réseau de sonars multistatiques, en tenant compte des contraintes environnementales, pour maximiser la couverture et minimiser les coûts

3.7.1.2 Adaptation de la métaheuristique à notre problème

L'ensemble des solutions non dominées est initialisé avec la solution retournée par l'heuristique. L'algorithme Sonar est utilisé pour évaluer, pour chaque solution non dominée, les permutations possibles entre les ordres de transport affectés aux différents camions.

Nous cherchons à identifier la permutation qui réduit le plus le kilométrage à vide. Lorsqu'une permutation prometteuse est trouvée, elle est exécutée.

La qualité de la solution résultante est mesurée en tenant compte de deux objectifs ; minimisation du kilométrage à vide et des pénalités dues au non-respect des jours de repos des chauffeurs. La solution est comparée à l'ensemble des solutions non dominées actuelles, si la nouvelle solution apporte une amélioration, elle est intégrée à cet ensemble.

Le processus d'intensification se répète jusqu'à ce qu'aucune amélioration supplémentaire ne soit possible. Cette phase se limite à examiner les permutations possibles entre les ordres de transport déjà pris en compte dans la solution initiale. Aucun nouvel ordre de transport non couvert par la solution initiale n'est introduit.

3.7.2 Étape 2 : Diversification avec les métaheuristiques 2-opt et Recherche Tabou

La seconde étape vise à explorer de nouveaux voisinages à partir des solutions générées par l'algorithme Sonar, en utilisant les métaheuristiques 2-opt et la recherche tabou, afin de découvrir d'autres solutions qui n'ont pas été examinées lors de l'intensification.

Cette phase étend l'exploration à l'ensemble de l'espace de solutions, sans se limiter aux ordres de transport couverts par la solution initiale. Elle vise ainsi à intégrer les OTs non couverts et à reconsidérer l'ensemble des solutions possibles.

3.7.2.1 Principe de base de l'algorithme 2-opt

La métaheuristique 2-opt est une méthode d'optimisation locale qui vise à améliorer une solution existante à un problème NP-complet en échangeant successivement deux arêtes du circuit. Elle fonc-

tionne de manière itérative, en explorant le voisinage de la solution actuelle et en sélectionnant les mouvements qui conduisent à une meilleure solution [22]

Algorithme :

1. Initialisation : Démarrez avec une solution initiale quelconque du problème. Cette solution peut être générée aléatoirement ou par une méthode constructive heuristique.
2. Sélection des arêtes : Sélectionnez deux arêtes du circuit actuel, a et b. Ces arêtes ne doivent pas être adjacentes et ne doivent pas former un cycle avec d'autres arêtes.
3. Inversion des arêtes : Inversez l'ordre des villes situées entre les deux arêtes sélectionnées. Cela crée une nouvelle solution potentiellement meilleure.
4. Évaluation de la solution : Évaluez la longueur du nouveau circuit créé en inversant les arêtes. Comparez cette longueur à la longueur du circuit actuel.
5. Acceptation ou rejet de la solution : Si la nouvelle solution est meilleure (c'est-à-dire plus courte) que la solution actuelle, acceptez-la et remplacez la solution actuelle par la nouvelle solution. Si la nouvelle solution est pire ou égale à la solution actuelle, rejetez-la et passez à l'étape suivante.
6. Répétition : Répétez les étapes 2 à 5 jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne soit possible. Cela signifie qu'aucune paire d'arêtes ne peut être échangée pour créer une solution meilleure que la solution actuelle.

3.7.2.2 Principe de base de l'algorithme Recherche Tabou

La Recherche Tabou est conçue pour guider un processus de recherche locale pour éviter les cycles et échapper aux optimums locaux. Cette méthode utilise une mémoire, souvent sous la forme d'une "liste tabou", qui stocke certaines caractéristiques des solutions récemment visitées (comme les mouvements réalisés pour obtenir ces solutions). Les éléments de cette liste sont interdits temporairement, ce qui empêche la recherche de revenir immédiatement sur ses pas et aident à diversifier la recherche en explorant de nouvelles zones de l'espace de solution et en évitant de rester coincé dans des régions suboptimales [21].

Algorithme :

1. Initialisation : Démarrez avec une solution initiale.
2. Recherche de voisinage : Identifiez un voisin de la solution actuelle en modifiant sa configuration.
3. Évaluation et mise à jour : Évaluez le voisin. Si l'évaluation est positive, mettez à jour la solution actuelle et ajustez la liste tabou.
4. Critère d'acceptation : Acceptez les modifications qui améliorent la solution actuelle
5. Critère d'arrêt : Répétez les étapes 2 à 4 jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, comme un nombre maximum d'itérations ou un temps de calcul maximal.

3.7.2.3 Adaptation de la métahéuristique à notre problème

Pour chaque solution non dominée, l'algorithme 2-opt est utilisé pour permutez entre chaque OT couvert et OT non couvert. La Recherche Tabou permet d'éviter de retomber dans des solutions déjà explorées grâce à la liste Tabou qui enregistre les mouvements récemment effectués et favorise la diversification de la recherche.

Si une permutation améliore le kilométrage à vide, les pénalités, ou le flux net, elle est effectuée.

La solution générée à chaque permutation est évaluée par rapport à l'ensemble de solutions non dominées, si elle apporte une amélioration, elle est intégrée à cet ensemble.

L'objectif est d'affiner progressivement cet ensemble vers le front de Pareto.

L'exploration continue jusqu'à ce que le temps alloué à la recherche soit écoulé.

Algorithm 3 Algorithme de la météuristiche

Input : Solution initiale : Dictionnaire d'affectation

Time Limit : Limite de temps pour la recherche tabou en secondes

Tabou Size : Taille de la liste tabou

Output : Ensemble des solutions non dominées

// Phase d'intensification //

Initialiser l'ensemble des SND avec la solution initiale

for chaque paire de camions (i, j) **do**

 Calculer la différence de kilométrage Δkm en évaluant l'échange des OTs

 Choisit la plus grande valeur de Δkm

if $\Delta km \leq 0$ **then**

break

end

 Échanger les OTs (i, j)

 Mettre à jour l'ensemble des SND

end

// Phase de diversification //

Initialiser l'ensemble des SND avec les solutions retournées de la phase d'intensification

Initialiser *start time* avec le temps courant ;

for chaque solution non dominée **do**

for chaque OT couvert **do**

for chaque OT non couvert **do**

if l'échange n'est pas dans la liste tabou **then**

 Évaluer l'échange ($\Delta km, \Delta flux, \Delta pénalité$)

if Δkm ou $\Delta flux$ ou $\Delta pénalité$ est amélioré **then**

 Effectuer l'échange

 Ajouter l'échange à la liste tabou

 Mettre à jour l'ensemble des SND

 Mettre à jour *last improvement time* avec le temps courant

if *last improvement time* - *start time* $\geq Time limit$ **then**

break

end

 Mettre à jour *start time* avec le temps courant

end

end

end

end

end

3.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation mathématique du problème de recouvrement des ordres de transport par les camions et mis en œuvre une approche structurée pour le résoudre. En définissant

clairement les ensembles, paramètres, variables, contraintes et les fonctions objectifs. Cette base servira de référence pour la résolution du problème, nous avons commencé par le traitement des données, suivi d'une analyse multicritère pour établir la priorité des OTs. Une heuristique guidée par une fonction fitness a ensuite permis de générer une solution initiale améliorée par des métaheuristiques, notamment l'algorithme Sonar, 2-opt et la recherche tabou.

Chapitre 4

Résultats et interprétation

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'outil développé pour optimiser l'affectation des ordres de transport aux camions disponibles, en réponse aux défis spécifiques identifiés dans la planification.

Nous détaillons les principales fonctionnalités de l'outil, le choix des paramètres de réglage pour la fonction fitness, et les résultats obtenus par l'heuristique et la métaheuristique.

4.2 Présentation de l'outil

Après avoir identifié des défis spécifiques dans la planification de l'ensemble des ordres de transport aux camions disponibles, nous avons développé un outil pour illustrer notre approche de résolution.

Cet outil combine notre heuristique, améliorée par la métaheuristique, pour raffiner les résultats et atteindre une efficacité optimale. L'outil a été développé en Python, un choix qui a facilité l'intégration fluide des fonctionnalités back-end et front-end.

L'interface utilisateur de notre outil a été conçue pour être simple et facile à utiliser. Chaque page comporte des instructions claires et des boutons d'action bien définis pour guider l'utilisateur.

4.2.1 Fonctionnalités principales

Page d'accueil : c'est la première interaction de l'utilisateur. Elle sert de point d'introduction. L'utilisateur est invité à débuter son expérience de planification en cliquant sur le bouton "Commencer à planifier".

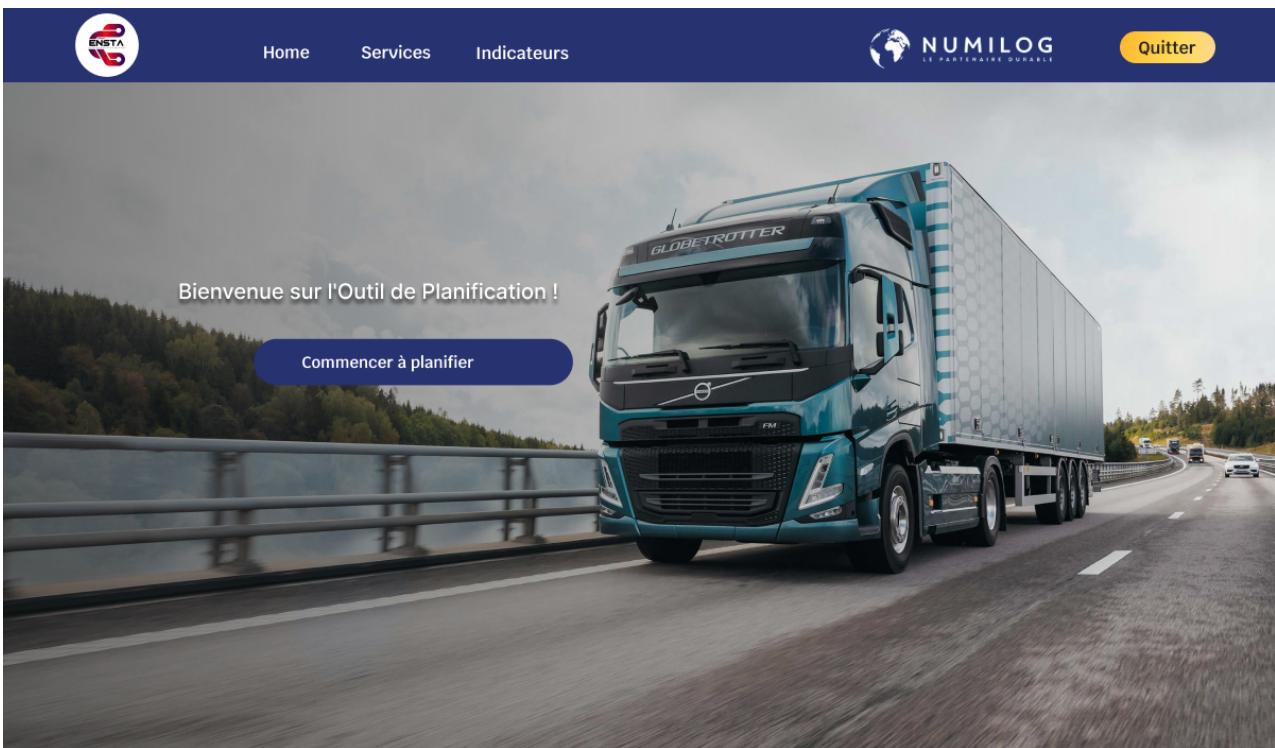


FIGURE 4.1 – La page d'accueil

1. Importation des données : Le bouton "Importer" permet à l'utilisateur de charger deux fichiers d'entrée sous format Excel : le fichier des Ordres de Transport et le fichier de disponibilités des camions. Ces fichiers contiennent les données nécessaires pour démarrer le processus d'affection.



FIGURE 4.2 – L'importation des données



FIGURE 4.3 – L'importation des données

- Traitement : Une fois les fichiers importés, l'utilisateur peut cliquer sur le bouton "Affecter". Cette action lance l'algorithme de l'heuristique qui traite les données importées et commence l'affectation. L'algorithme retourne l'affectation initiale qui serait affichée dans un fichier Excel et les indicateurs de performance de cette affectation sous forme d'un tableau.



FIGURE 4.4 – La page services : Traitement

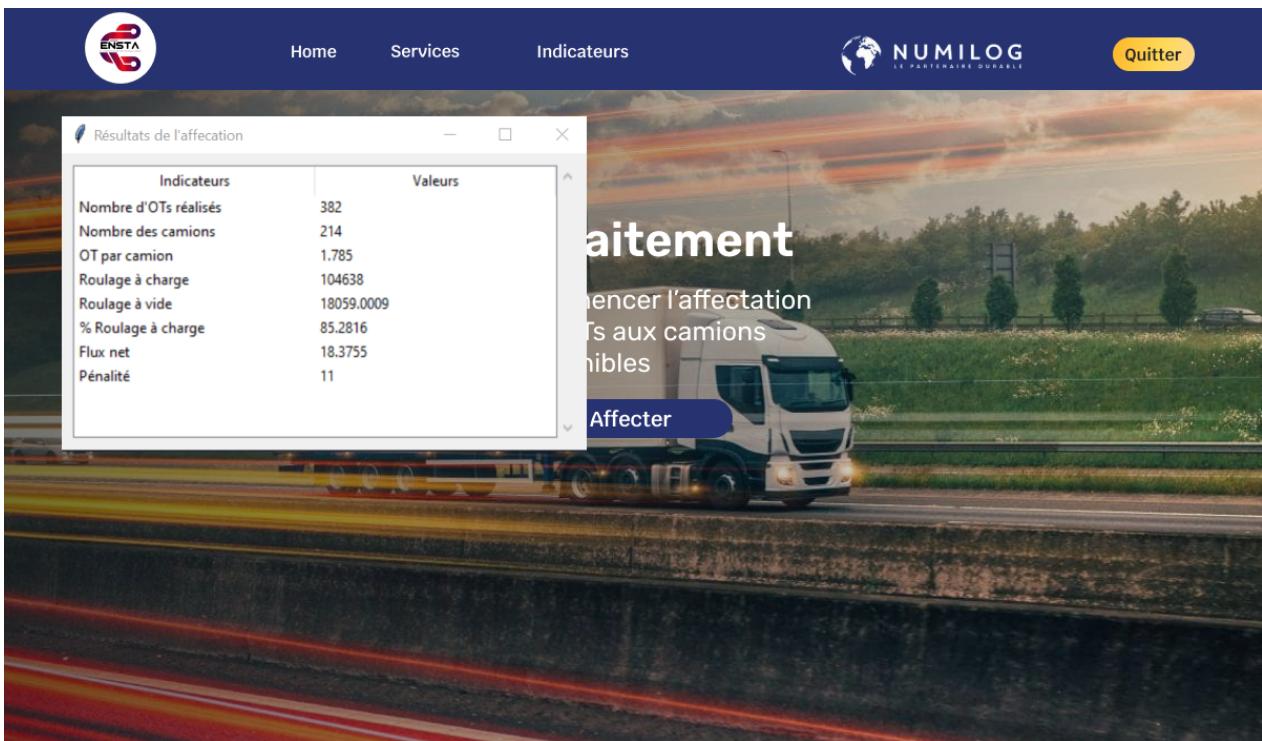


FIGURE 4.5 – La page services : Traitement

3. Optimisation : L'outil propose à l'utilisateur une fonctionnalité d'amélioration des résultats d'affectation générés après une première exécution. En cliquant sur le bouton "Améliorer", une fenêtre s'ouvre permettant de saisir un délai d'optimisation. L'outil active ensuite un algorithme de météahéuristique pour affiner la solution initiale pendant la durée spécifiée. Les résultats finaux, après optimisation, sont présentés sous forme d'un fichier excel ainsi que les indicateurs de performance dans un tableau, mettant en évidence les améliorations obtenues par rapport à la solution initiale.



FIGURE 4.6 – La page services : Traitement



FIGURE 4.7 – La page services : L'optimisation

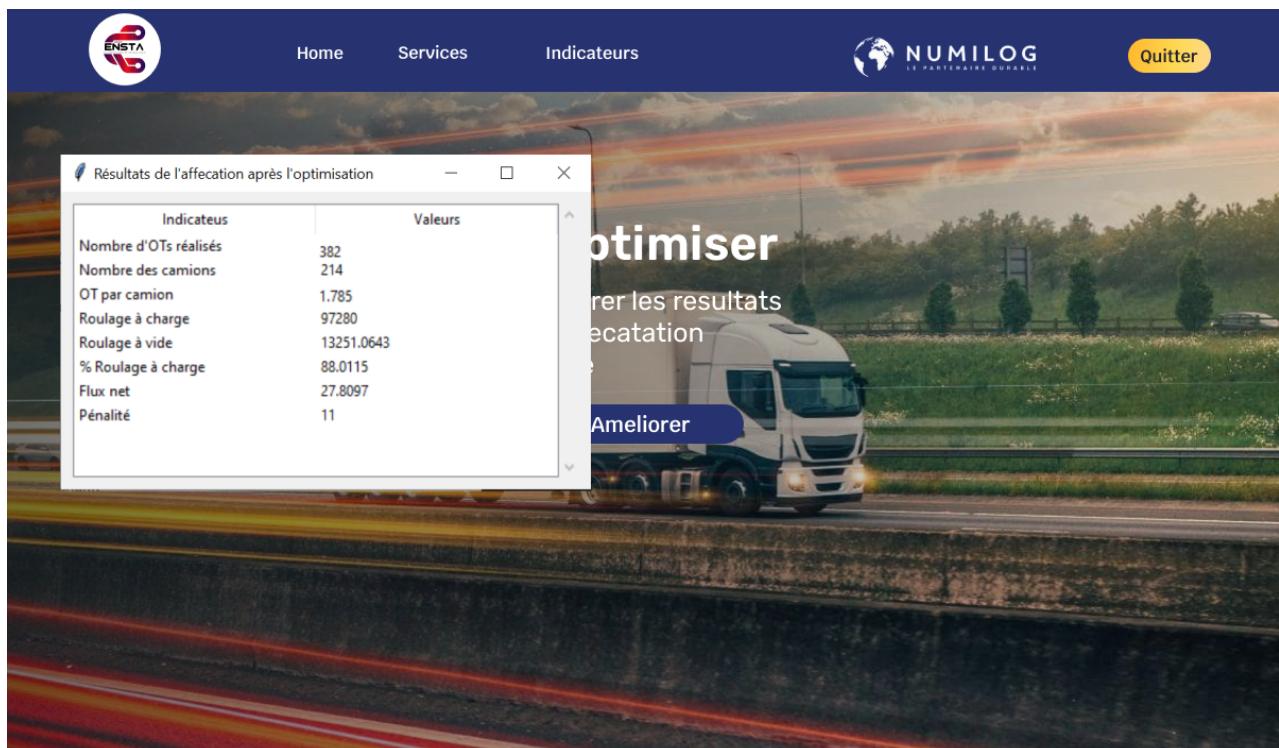


FIGURE 4.8 – La page services : L'optimisation

4.3 Choix des paramètres de réglage pour la fonction fitness

Nous allons détailler le choix des paramètres de réglage de la fonction de coût utilisée dans l'heuristique. Ces paramètres influencent significativement la pondération relative des différents facteurs

pris en compte dans l'évaluation des affectations possibles et, par conséquent, la qualité des solutions générées par l'heuristique.

4.3.1 Présentation des paramètres de réglage

La fonction de coût utilise trois paramètres de réglage :

α : contrôle le poids du temps de trajet dans le calcul du coût.

β : contrôle le poids de la pénalité associée au non-respect des jours de repos des chauffeurs.

γ : contrôle le poids du flux net de l'OT, il permet de différencier les ordres de transport (OTs) ayant un temps de trajet et une pénalité égaux

4.3.2 Justification des valeurs choisies

Le choix des valeurs des paramètres α , β et γ a fait l'objet de plusieurs tests afin d'identifier la combinaison qui offre les meilleurs résultats en termes de qualité des solutions.

Nous avons testé toutes les combinaisons possibles de ces paramètres sous contraintes :

$$\alpha + \beta + \gamma = 1, \quad \text{avec } \alpha \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$$

Les valeurs possibles pour chaque paramètre sont : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 et 0.8.

Les résultats des simulations pour chaque combinaison de α , β et γ sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les critères d'évaluation incluent le pourcentage de roulage à charge, le flux net et les pénalités.

Cependant, le point ($\alpha = 0.5, \beta = 0.2, \gamma = 0.3$) a donner le meilleur compromis entre les trois objectifs avec :

- %Roulage à charge : 85.28
- Flux net : 18.38 (le plus élevé)
- Pénalité : 11 (le plus faible)

α	β	γ	% Roulage à charge	Flux net	Pénalité
0.1	0.1	0.8	82.68	14.13	16
0.1	0.2	0.7	82.88	14.42	13
0.1	0.3	0.6	83.26	13.92	15
0.1	0.4	0.5	84.32	14.79	13
0.1	0.5	0.4	84.07	13.6	11
0.1	0.6	0.3	84.17	14.15	15
0.1	0.7	0.2	83.41	13.64	14
0.1	0.8	0.1	84.97	12.62	11
0.2	0.1	0.7	84.77	17.75	11
0.2	0.2	0.6	84.35	17.15	16
0.2	0.3	0.5	84.54	18.16	16
0.2	0.4	0.4	83.41	16.64	14
0.2	0.5	0.3	84.49	15.24	16
0.2	0.6	0.2	84.97	14.62	11
0.2	0.7	0.1	85.01	13.85	14
0.3	0.1	0.6	83.55	17.19	17
0.3	0.2	0.5	83.58	16.76	16
0.3	0.3	0.4	84.13	16.29	11
0.3	0.4	0.3	84.97	15.62	12
0.3	0.5	0.2	85.00	15.21	14
0.3	0.6	0.1	84.25	14.96	15
0.4	0.1	0.5	83.90	17.63	11
0.4	0.2	0.4	85.38	17.60	14
0.4	0.3	0.3	85.20	17.03	14
0.4	0.4	0.2	85.01	17.15	13
0.4	0.5	0.1	84.98	16.91	12
0.5	0.1	0.4	84.75	17.52	11
0.5	0.2	0.3	85.28	18.38	11
0.5	0.3	0.2	85.05	17.18	15
0.5	0.4	0.1	85.29	17.11	15
0.6	0.1	0.3	85.23	17.19	14
0.6	0.2	0.2	84.25	17.96	13
0.6	0.3	0.1	85.30	17.11	14
0.7	0.1	0.2	85.16	17.13	13
0.7	0.2	0.1	85.30	17.11	14
0.8	0.1	0.1	85.13	16.71	14

TABLE 4.1 – Tableau des résultats des test des paramètres α , β et γ .

4.4 Résultats

4.4.1 Résultat de l'heuristique (Solution initiale)

Nous présentons les résultats obtenus par l'heuristique appliquée à la journée du 27 mars 2024 comparés aux résultats réalisés par l'entreprise pour la même journée. Ces résultats ont été obtenus après l'affectation de 214 camions disponibles, permettant de réaliser 383 ordres de transport.

L'heuristique a permis d'atteindre des résultats significatifs sur les 3 fonctions objectifs dans un temps d'exécution 20,67 seconds :

- %Roulage à charge : 85.28
- Flux net : 18.38
- Pénalité : 11

Indicateurs	Entreprise	Heuristique	Taux d'amélioration
Roulage à charge (%)	75,3	85,28	13,25%
Flux net	13,23	18,38	38,93%
Pénalités	17	11	35,29%

TABLE 4.2 – Tableau de comparaison des résultats de l'entreprise et l'Heuristique

Étant donné le nombre important d'OTs, les détails des résultats sont disponibles dans le tableau accessible via ce lien : <https://tinyurl.com/39axpe4n>

4.4.2 Résultat de la mét-heuristique

Lors de la première phase d'intensification, deux solutions non dominées sont identifiées avec les résultats :

Solution 1 :

- % Roulage à charge : 85.80
- flux net : 18.3755
- Pénalité : 11

Solution 2 :

- % Roulage à charge : 85.90
- flux net : 18.3755
- Pénalité : 12

Lors de la deuxième phase de diversification, avec une liste tabou de taille 5 et un temps limite entre deux solution non dominées de 120 secondes, les résultats finaux obtenus sont les suivants :

- % Roulage à charge : 88.01
- flux net : 27.81
- Pénalité : 11

Le temps d'exécution total de la métaheuristique a été de 9 minutes et 84 secondes. Cette solution représente les meilleurs compromis possibles entre les trois objectifs considérés : le roulage à charge, le flux net et les pénalités.

Indicateurs	Entreprise	Méta-heuristique	Taux d'amélioration
Roulage à charge (%)	75,3	88,01	16,88%
Flux net	13,23	27,81	110,2%
Pénalités	17	11	35,29%

TABLE 4.3 – Tableau de comparaison des résultats de l'entreprise et la Métaheuristique

L'application de la métaheuristique a démontré des améliorations significatives sur tous les indicateurs de performance par rapport aux résultats actuels de l'entreprise. Ces améliorations se traduisent par une meilleure utilisation des ressources, un choix plus efficace des OTs à réaliser et une réduction des pénalités.

Les résultats détaillés peuvent être consultés via le lien suivant : <https://tinyurl.com/47y8d6wu>

4.5 Recommendations pour l'entreprise

4.5.1 Refaire un zoning des départs et arrivées des clients

Actuellement, les villes de départs et d'arrivées des clients ne fournissent pas une information précise sur les points exacts de départ et d'arrivée. Il existe des villes avec plusieurs points de départ et d'arrivée possibles, ce qui complique le choix du camion le plus proche.

Il est recommandé de :

- Recenser tous les points de départ et d'arrivée spécifiques des clients, incluant chaque site de chargement et de déchargement.
- Attribuer un nom unique et précis à chaque point d'intérêt pour éviter les confusions.
- Intégrer ce nouveau zoning dans le TMS et les fichiers de disponibilité des camions pour :
 - o Améliorer la précision des affectations : Une nomenclature précise des points de départ et d'arrivée permet de mieux identifier les lieux exacts, facilitant ainsi le choix du camion le plus proche.
 - o Optimiser les itinéraires : En ayant des points d'intérêt clairement définis, il devient plus facile d'optimiser les trajets en minimisant les détours, les coûts de carburant et de temps de trajet .
 - o Améliorer la satisfaction des clients : Une meilleure organisation et planification des zones de service permettent de respecter les délais de livraison et d'améliorer la ponctualité.

4.5.2 Analyse des données historiques pour prévoir les temps de service

Le temps de service des OTs ne tient pas compte de la variabilité des temps de chargement, de déchargement et d'immobilisation à chaque point d'intérêt. Ces temps peuvent varier en fonction du nombre de quais disponibles chez le client, de l'intensité de la demande, et d'autres facteurs opérationnels pour prévoir plus précisément les temps de service des OTs, il est recommandé de :

- Recueillir des données sur les temps d'immobilisation, de chargement et de déchargement à chaque point d'intérêt sur une période significative.
- Utiliser des méthodes statistiques pour déterminer les temps moyens et les variabilités pour chaque opération.
- Intégrer les nouvelles estimations de temps de service dans le TMS pour améliorer la précision de la planification.

En utilisant des données historiques, il est possible de prévoir plus précisément le temps nécessaire pour chaque opération à chaque point d'intérêt, permettant une meilleure planification des trajets, une utilisation optimale des ressources, et une meilleure gestion des attentes contribuent à une plus grande satisfaction des clients.

En connaissant les temps d'immobilisation, il est aussi possible de considérer le temps d'immobilisation comme un critère pour prioriser les OTs de manière à minimiser les temps d'attente et à améliorer l'efficacité globale.

4.5.3 Analyse des destinations fréquentes pour réduire les kilomètres à vide

Certaines destinations fréquentes des OTs entraînent des kilomètres à vide après la livraison, en raison de l'absence de clients avec des points de départ dans ces destinations.

il recommandé de :

- Analyser les données pour identifier les destinations fréquentes des OTs qui entraînent des kilomètres à vide après la livraison.
- Utiliser cette analyse pour orienter le service de relation client vers la recherche de nouveaux clients dans ces destinations.
- Établir des partenariats avec de nouveaux clients dans les destinations identifiées

pour assurer des trajets retour avec charge et réduire les kilomètres à vide, ce qui conduit à une efficacité globale du système de transport améliorée, des opérations plus durables et économiquement viables.

4.6 Perspectives pour des améliorations futures

4.6.1 Amélioration de l'analyse multicritère pour la priorisation des ordres de transport

L'analyse multicritère actuelle pour prioriser les ordres de transport (OT) pourrait être améliorée en prenant en compte les priorités des villes d'arrivée en fonction des données du même jour, cela inclut l'évaluation de la concentration des OT avec des départs et des arrivées dans les mêmes villes.

L'utilisation de ces priorités permet d'optimiser les affectations des camions, en minimisant les kilomètres à vide entre les OT consécutifs.

Cette approche dynamique améliore l'efficacité opérationnelle et s'adapte aux variations quotidiennes des demandes de transport, garantissant une meilleure performance globale.

4.6.2 Prise en compte de la variabilité du trafic

Le temps de trajet est extrait directement d'une matrice statique importée depuis un fichier Excel. Bien que l'intégration de données de trafic permettrait de mieux refléter la réalité du temps de trajet, qui varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment :

- L'heure de la journée : Les conditions de circulation diffèrent entre les heures de pointe et les heures creuses.
- Le jour de la semaine : Le trafic peut être plus dense en semaine par rapport aux weekends.
- Les conditions météorologiques : La météo peut affecter la fluidité du trafic.

En prenant en compte ces facteurs de variabilité du trafic, l'heuristique pourrait :

- Mieux prévoir les temps de trajet en fonction des conditions actuelles et prévues.
- Optimiser la planification des OTs, en ajustant les affectations en fonction des tendances du trafic.
- Réduire les délais imprévus et améliorer la ponctualité des livraisons.

4.6.3 Amélioration des paramètres de réglage de la fonction fitness

Une analyse plus approfondie des paramètres de réglage de la fonction fitness pourrait améliorer les résultats de l'heuristique.

Une optimisation plus fine de ces paramètres, en utilisant une grille de valeurs plus précise avec des incrémentations de 0.01 ou 0.05 au lieu de 0.1, permettrait d'identifier des combinaisons de paramètres plus précises.

L'évaluation des performances de ces paramètres sur des ensembles de données variés permettra de sélectionner la combinaison la plus performante pour un large éventail de scénarios.

4.7 Conclusion

Le développement de cet outil a permis de répondre efficacement aux défis de la planification en améliorant la qualité des affectations OT-camion. Les résultats obtenus démontrent des améliorations significatives par rapport aux pratiques actuelles de l'entreprise, notamment en termes de roulage à charge, de flux net, et de pénalités. Ces résultats confirment la pertinence et l'efficacité de l'approche adoptée, tout en ouvrant des perspectives pour des améliorations futures.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de répondre aux défis rencontrés par Numilog Algérie dans la planification et l'affectation des ordres de transport aux camions disponibles. L'analyse de la situation actuelle a révélé plusieurs dysfonctionnements entravant l'efficacité des opérations de transport, tels que l'absence d'outils scientifiques pour la prise de décision, le choix non optimal des OTs à affecter, le manque d'optimisation des tournées, et le non-respect des règles sociales. Pour adresser ces problématiques, nous avons exploré des approches d'optimisation multiobjectif et d'analyse multicritère pour trouver des solutions qui répondent aux multiples objectifs concurrents.

Nous avons ensuite présenté une modélisation mathématique du problème de recouvrement des ordres de transport par les camions disponibles, définissant clairement les ensembles, paramètres, variables, contraintes et fonctions objectives, ce qui a servi de base pour l'implémentation et la résolution pratique du problème. Une approche structurée a été mise en œuvre pour résoudre le problème d'affectation des OT, en commençant par le traitement des données, suivi d'une analyse multicritère et de l'application d'une heuristique guidée par une fonction fitness. Cette solution initiale a été améliorée par des métaheuristiques telles que l'algorithme Sonar, 2-opt et la recherche tabou.

Le développement d'un outil basé sur cette méthodologie a permis d'améliorer de manière significative la qualité des affectations OT-camion, avec des gains notables en termes de roulage à charge, de flux net et de réduction des pénalités. Les résultats obtenus confirment la pertinence et l'efficacité de l'approche adoptée.

Bibliographie

- [1] Christos H. Papadimitriou and Kenneth Steiglitz. *Combinatorial Optimization : Algorithms and Complexity*. Dover Publications, 1982.
- [2] Vangelis Th. Paschos. *Concepts of Combinatorial Optimization*. Wiley-ISTE, France, 2010.
- [3] Hamdy A. Taha. *Operations Research : An Introduction*. Pearson, 10th edition, 2016.
- [4] El-ghazali Talbi. Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire multi-objectif : Etat de l'art. *Rapport CNET (France Telecom) Octobre*, 1999.
- [5] Kalyanmoy Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Wiley, New York, 2001.
- [6] Carlos A Coello Coello, Gary B Lamont, and David A Van Veldhuizen. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer, 2007.
- [7] Jacques Teghem. *Recherche opérationnelle. 1, Méthodes d'optimisation*. Ellipses, Paris, 2012.
- [8] Damien Vergnet, Ely Kaddoum, Nicolas Verstaevel, and Frederic Amblard. Recherche coopérative d'optimum global. In *20èmes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA 2022)*, number Session "IA distribuée", pages 92–98, 2022.
- [9] Jean-Charles Boisson. *Modélisation et résolution par métahéuristiques coopératives : de l'atome à la séquence protéique*. PhD thesis, Université Lille 1, 2008.
- [10] Rafael Martí and Gerhard Reinelt. Exact and heuristic methods in combinatorial optimization. *Applied Mathematical Sciences*, 2022.
- [11] C. Dhaenens, M. L. Espinouse, and Bernard Penz. *Problèmes combinatoires classiques. Recherche opérationnelle et réseaux : méthodes d'analyse spatiale*. Hermès, Science Publications, 2002.
- [12] François-Xavier Irisarri. *Stratégies de calcul pour l'optimisation multiobjectif des structures composites*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [13] Owein Thuillier, Nicolas Le Josse, Alexandru L. Olteanu, Marc Sevaux, and Hervé Tanguy. Optimisation d'un réseau de sonars multistatiques. In *Proceedings of the Conference on Sonar Networks*, 2022.
- [14] Philippe Vincke. *L'aide multicritère à la décision*. Ed de l'université de Bruxelles, Belgique, 1 edition, 1989.
- [15] Denis Bouyssou. Décision multicritère ou aide multicritère ? *Newsletter of the European Working Group*, page 2, 1993.
- [16] Philip L. Saaty. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*, pages 345–405. Springer, 2005.
- [17] Jean Pierre Brans, Bertrand Mareschal, and Philippe Vincke. Promethee methods. In *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the Art Surveys*, pages 163–186. Springer, 2005.
- [18] Thomas L Saaty. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *Multiple criteria decision analysis : State of the art surveys*, 78 :345–405, 2006.
- [19] Jean-Pierre Brans and Yves De Smet. Promethee methods. *Multiple criteria decision analysis : state of the art surveys*, pages 187–219, 2016.

- [20] Taibi Boumedyen. La méthode promethee comme outil d'aide à la décision multicritère. *Revue Algérienne d'Economie et de Management*, (09), Jan 2017.
- [21] Fred Glover and Manuel Laguna. *Tabu Search Principles*, pages 125–151. January 1997.
- [22] P. H. Gunawan and I. Iryanto. Simulated annealing – 2 opt algorithm for solving traveling salesman problem. *International Journal of Computing*, 22(1) :43–50, Mar 2023.

Annexes

Annexe A

A.1 Fichiers des OTs

N° OT	Dt Chgt Cde	N° Dossier	Réf Cde Client	Client	Etat Log	Expéditeur	Ville Départ	Destinataire	Ville Arrivée	March	Qté	Unité	Activité	Km	CA
240036984	27/3/2024	N° Dossier 122	Réf Cde Client 152	1	A affecter	Expéditeur 24	BEJAIA	Destinataire 31	BOUIRA	DIVERS	20	T	NORMAL	145	
240036991	27/3/2024	N° Dossier 129	Réf Cde Client 159	1	A affecter	Expéditeur 24	BEJAIA	Destinataire 2	EL KSEUR	DIVERS	20	T	NORMAL	40	
240037011	27/3/2024	N° Dossier 137	Réf Cde Client 167	1	A affecter	Expéditeur 24	BEJAIA	Destinataire 49	SETIF	DIVERS	20	T	NORMAL	110	
240037600	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 326	4	A affecter	Expéditeur 27	BLIDA	Destinataire 18	TASSALA EL MERDJA	DIVERS	20	T	NORMAL	24	
240037093	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 331	16	A affecter	Expéditeur 29	BOUIRA	Destinataire 84	ALGER	DIVERS	20	T	NORMAL	131	
240034781	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 331	16	A affecter	Expéditeur 29	BOUIRA	Destinataire 84	ALGER	DIVERS	20	T	NORMAL	131	
240029199	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 331	16	A affecter	Expéditeur 29	BOUIRA	Destinataire 84	ALGER	DIVERS	20	T	NORMAL	131	
240037654	27/3/2024	N° Dossier 351	Réf Cde Client 427	17	A affecter	Expéditeur 30	BOUIRA	Destinataire 108	BAB EZZOUAR	DIVERS	20	T	FRAIS	91	
240037199	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 93	5	A affecter	Expéditeur 19	AIN OUASSARA	Destinataire 20	GUELMA	DIVERS	20	T	NORMAL	521	
240037569	27/3/2024	N° Dossier 378	Réf Cde Client 454	19	A affecter	Expéditeur 31	BOUMERDES (KHEMIS EL KHECHNA)	Destinataire 85	CONSTANTINE	DIVERS	20	T	NORMAL	396	
240036810	27/3/2024	N° Dossier 617	Réf Cde Client 778	26	A affecter	Expéditeur 68	ORAN	Destinataire 124	BOUMERDES	DIVERS	20	T	NORMAL	426	
240037306	27/3/2024	N° Dossier 623	Réf Cde Client 784	21	A affecter	Expéditeur 68	ORAN	Destinataire 121	AIN TAGHROUT	DIVERS	20	T	NORMAL	631	
240036817	27/3/2024	N° Dossier 697	Réf Cde Client 875	30	A affecter	Expéditeur 80	SETIF	Destinataire 155	BARAKI	DIVERS	20	T	NORMAL	269	
240037206	27/3/2024	N° Dossier 7	Réf Cde Client 329	15	A affecter	Expéditeur 28	TIPAZA	Destinataire 25	ORAN	DIVERS	20	T	NORMAL	393	

TABLE A.1 – Fichier des OTs avant datacleaning

N° OT	Client	Priorité client	Début TW	Fin TW	Ville Départ	Ville Arrivée	Priorité ville	Activité	Km	temps service	CA
240036984	1	0,5963	0	24	BEJAIA	BOUIRA	0,6039	NORMAL	145	6,90	
240036991	1	0,5963	0	24	BEJAIA	EL KSEUR	0,6039	NORMAL	40	4,80	
240037011	1	0,5963	0	24	BEJAIA	SETIF	0,6039	NORMAL	110	6,20	
240037600	4	0,2624	8	16	BLIDA	TASSALA EL MERDJA	0,6039	NORMAL	24	4,48	
240037093	16	0,2624	0	24	BOUIRA	ALGER	0,6039	NORMAL	131	6,62	
240034781	16	0,2624	0	24	BOUIRA	ALGER	0,6039	NORMAL	131	6,62	
240029199	16	0,2624	0	24	BOUIRA	ALGER	0,6039	NORMAL	131	6,62	
240037654	17	0,5963	0	24	BOUIRA	BAB EZZOUAR	0,6039	FRAIS	91	5,82	
240037199	5	0,1035	8	16	AIN OUASSARA	GUELMA	0,1082	NORMAL	521	14,42	
240037569	19	0,2624	8	16	BOUMERDES (KHEMIS EL KHECHNA)	CONSTANTINE	0,248	NORMAL	396	11,92	
240036810	26	0,1035	0	24	ORAN	BOUMERDES	0,6039	NORMAL	426	12,52	
240037306	21	0,2624	0	24	ORAN	AIN TAGHROUT	0,1082	NORMAL	631	16,62	
240036817	30	0,2624	8	16	SETIF	BARAKI	0,6039	NORMAL	269	9,38	
240037206	15	0,0377	8	14	TIPAZA	ORAN	0,248	NORMAL	393	11,86	

TABLE A.2 – Fichier des OTs après datacleaning

A.2 Fichier de disponibilités

Agence	TYPE	IMMAT TR	RM	CSR	Jour Repos CSR	DATE J+1	LIEU J+1	HORAIRES	Wilaya J+1	REGION J+1	ZONE J+1
SETIF	MARAICHER	IMMAT TR 1	RM 1	CSR 1	Samedi	27/3/2024	CHLEF	07h	Chlef	O3	Ouest
LLK	MARAICHER	IMMAT TR 2	RM 2	CSR 2	MERCREDI	27/3/2024	EN MISSION	EN MISSION	EN MISSION	EN MISSION	
SETIF	MARAICHER	IMMAT TR 3	RM 3	CSR 3	Samedi	27/3/2024	HASSI AMEUR	07h	Oran	O1	Ouest
BOUIRA	MARAICHER	IMMAT TR 4	RM 4	CSR 4	VENDREDI	27/3/2024	BARAKI	10:00	Alger	C1	Centre
BOUIRA	MARAICHER	IMMAT TR 5	RM 5	CSR 5	VENDREDI	27/3/2024	TR EN PANNE				
partenaire bouira	Maraicher	IMMAT TR 6	RM 6	CSR 6	laghouat-bejai-oran-bejaia-el biadh-alger	27/3/2024	BEJAIA	08h	Bejaia	E1	BEJAIA
partenaire bouira	Maraicher	IMMAT TR 7	RM 7	CSR 7	bejaia-mascara-alge-bejaia-mechria	27/3/2024	ROUIBA	10H	Alger	C1	Centre
BEJAIA	MARAICHER	IMMAT TR 8	RM 8	CSR 8	LUNDI	27/3/2024	ALGER	A CONFIRMER	Alger	C1	Centre
BEJAIA	MARAICHER	IMMAT TR 9	RM 9	CSR 9	DIMANCHE	27/3/2024	BARAKI	11H00	Alger	C1	Centre
BEJAIA	MARAICHER	IMMAT TR 10	RM 10	CSR 10	JEUDI	27/3/2024	BEJAIA	08h00	Bejaia	E1	Est

TABLE A.3 – Fichier de disponibilité avant datacleaning

Agence	TYPE	IMMAT TR	CSR	Jour Repos CSR	LIEU J+1	HORAIRES	DATE J+1
SETIF	MARAICHER	IMMAT TR 1	CSR 1	7	CHLEF	7	2024-03-27
SETIF	MARAICHER	IMMAT TR 3	CSR 3	7	HASSI AMEUR	7	2024-03-27
BOUIRA	MARAICHER	IMMAT TR 4	CSR 4	6	BARAKI	10	2024-03-27
partenaire bouira	Maraicher	IMMAT TR 6	CSR 6	10	BEJAIA	8	2024-03-27
partenaire bouira	Maraicher	IMMAT TR 7	CSR 7	10	ROUIBA	10	2024-03-27
BEJAIA	MARAICHER	IMMAT TR 9	CSR 9	1	BARAKI	11	2024-03-27
BEJAIA	MARAICHER	IMMAT TR 10	CSR 10	5	BEJAIA	8	2024-03-27

TABLE A.4 – Fichier de disponibilité après datacleaning

A.3 Fichier clients

Client	Priorité_client	Début TW	Fin TW
1	0.5963	0	24
2	0.5963	0	24
3	0.5963	0	24
4	0.2624	8	16
5	0.1035	8	16
6	0.1035	8	16
7	0.1035	8	16
8	0.2624	0	24
9	0.1035	8	16
10	0.1035	8	14
11	0.1035	8	16
12	0.2624	0	24

TABLE A.5 – Fichier des clients

A.4 Fichier villes

Ville Arrivée	Wilaya	Région	Zone	Priorité_ville
AIN BENIANE	Alger	C1	Centre	0.6039
BARAKI	Alger	C1	Centre	0.6039
BIRTOUTA	Alger	C1	Centre	0.6039
AKBOU	Bejaia	E1	Est	0.6039
EL KSEUR	Bejaia	E1	Est	0.6039
EL EULMA	Setif	E2	Est	0.6039
ADRAR	Adrar	S1	Sud	0.0399
EL ATTAFAF	Ain defla	C1	Centre	0.1082
AIN TAGHROUT	BBA	E2	Est	0.1082
ANNABA	Annaba	E5	Est	0.2480
BISKRA	Biskra	S3	Sud	0.2480
EL KHROUB	Constantine	E3	Est	0.2480
HASSI AMEUR	Oran	O1	Ouest	0.2480
IN AMENAS	Illizi	S3	Sud	0.0399
TIMIMOUN	Bechar	S1	Sud	0.0399

TABLE A.6 – Fichier des villes

A.5 Fichier des coordonnées géographiques

Name	Longitude	Latitude
CHELGHOUUM LAID	36.16583081955939	6.1859771734496505
OULED MOUSSA	36.689201422872635	3.377153133706537
BOUFARIK	36.58331838388886	2.9121729668729164
AIN BENIANE	36.80154772193964	2.9179331276877964
EL OUED	33.370120322721625	6.854918278650007
SETIF	36.06624346806699	5.513179473018577

TABLE A.7 – Les coordonnées géographiques

A.6 Matrice des distances

name	CHELGHOUUM LAID	OULED MOUSSA	BOUFARIK	AIN BENIANE	EL OUED	SETIF
CHELGHOUUM LAID	0	317,664471	366,9591856	370,1570623	317,6864229	75,61837572
OULED MOUSSA	317,664471	0	53,02307354	52,56434639	533,5049745	247,3508197
BOUFARIK	366,9591856	53,02307354	0	24,24305821	564,7006051	294,8471842
AIN BENIANE	370,1570623	52,56434639	24,24305821	0	579,7553051	299,8752333
EL OUED	317,6864229	533,5049745	564,7006051	579,7553051	0	333,299929
SETIF	75,61837572	247,3508197	294,8471842	299,8752333	333,299929	0

TABLE A.8 – Matrice des distances