



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel

Spécialité : Management industriel et logistique

Présenté par :

Hind BEKHECHI
Anes BENAYAD

Thème

**Optimisation des tournées et plannings de
distribution des produits pétroliers
Cas de l'entreprise : NAFTAL**

Soutenu publiquement, 16 juin 2026, devant le jury composé de :

- | | | | |
|----------------------------|------------|---------------|--------------------------|
| - M. Mohammed BENNEKROUF | MCA | ESSA. Tlemcen | Président |
| - M. Fouad MALIKI | MCA | ESSA. Tlemcen | Directeur de mémoire |
| - M. Djamel BENNACER | Docteur | NAFTAL | Co- Directeur de mémoire |
| - M. Mehdi SOUIER | Professeur | Univ. Tlemcen | Examineur |
| - M. Mohamed Amine CHERIER | MCB | ESSA. Tlemcen | Examineur |

Année universitaire : 2025/2026

Résumé

Ce mémoire d'ingénieur présente une solution d'optimisation dédiée à la logistique de distribution des carburants pour l'entreprise Naftal. L'objectif central est la conception d'un système d'aide à la décision (SAD) visant à rationaliser les tournées des camions-citernes afin de minimiser les coûts de transport et les distances parcourues. Pour répondre à la complexité du compartimentage des véhicules et à la variabilité de la demande, une approche par programmation linéaire a été développée. Le système intègre un moteur d'optimisation couplé à une application de visualisation. Les résultats démontrent une gestion dynamique de la flotte, garantissant le respect des protocoles de sécurité et l'optimisation du remplissage des citernes.

Mots-clés : Optimisation, Tournées de véhicules (VRP), Naftal, Logistique pétrolière, système aide à la décision.

Abstract

This engineering thesis presents an optimization solution dedicated to fuel distribution logistics for the company Naftal. The central objective is the design of a Decision Support System (DSS) aimed at streamlining tanker truck routes to minimize transportation costs and distances traveled. To address the complexity of vehicle compartmentalization and demand variability, a linear programming approach was developed. The system integrates an optimization engine coupled with a visualization application. The results demonstrate dynamic fleet management, ensuring compliance with security protocols and optimization of tank filling.

Keywords: Optimization, Vehicle Routing Problem (VRP), Naftal, Petroleum logistics, Decision support system.

ملخص

تقدم مذكرة المهندس هذه حلاً لتحسين لوجستيات توزيع الوقود لشركة نفطال. الهدف المركزي هو تصميم نظام لدعم القرار (SAD) يهدف إلى ترشيد جولات الشاحنات الصهرية لتقليل تكاليف النقل والمسافات المقطوعة. لمواجهة تعقيد تقسيم المركبات وتقلب الطلب، تم تطوير نهج يعتمد على البرمجة الخطية. يشمل النظام على محرك تحسين متصل بتطبيق للعرض المرئي. تظهر النتائج إدارة ديناميكية للأسطول، مما يضمن احترام بروتوكولات السلامة وتحسين ملء الصهاريج. **كلمات مفتاحية :** التحسين، جولات المركبات، (VRP) نفطال، اللوجستيات النفطية، نظام دعم القرار.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur Fouad MALIKI, chef de filière et directeur de ce mémoire, pour son accompagnement constant et son encadrement de qualité tout au long de ce projet. Sa disponibilité exemplaire, sa patience, et la pertinence de ses remarques nous ont permis de progresser avec confiance dans la réalisation de ce travail. Sa bienveillance, son exigence constructive et son sens pédagogique ont constitué un véritable soutien, tant sur le plan technique que personnel. Ce mémoire n'aurait pu aboutir sans ses conseils avisés et son engagement sincère dans notre évolution académique.

Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent également à notre encadrante, Madame Zoulikha KOUDAD, pour son suivi rigoureux et sa précieuse contribution à la réussite de ce projet. Nous la remercions pour la générosité de son encadrement, sa grande disponibilité et pour nous avoir transmis son savoir avec autant de bienveillance. Ses encouragements et sa vision éclairée ont été des éléments moteurs dans l'avancement de nos recherches.

Nous tenons à exprimer notre gratitude particulière à Monsieur Djamel BENNACER, notre encadrant au sein de l'entreprise NAFTAL, qui nous a ouvert les portes de l'institution et a grandement facilité notre intégration. Sa rigueur professionnelle, son sens de l'analyse et les éclairages concrets qu'il nous a apportés sur le terrain nous ont permis de mieux adapter notre démarche aux exigences réelles de l'entreprise. Qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect pour son accueil et son soutien technique inestimable.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Mohammed BENNEKROUF, qui nous fait l'honneur de présider ce jury. Nos remerciements s'adressent également à Messieurs Mehdi SOUIER et Mohamed Amine CHERIER, pour avoir accepté de siéger en qualité d'examinateurs. Nous leur sommes particulièrement reconnaissants pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'ils y ont porté. Leurs remarques et leurs

critiques constructives contribueront sans doute à enrichir notre réflexion et à améliorer la qualité de ce travail.

Nous remercions nos familles respectives et nos amis les plus proches pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Leur présence bienveillante et leurs encouragements ont été une source de force précieuse, notamment durant les périodes de doute et de fatigue. Ce mémoire leur est dédié, en reconnaissance de tout ce qu'ils ont fait pour nous permettre d'arriver jusqu'ici.

Enfin, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'ensemble du département de Génie Industriel pour l'excellence de la formation dispensée et la qualité de l'encadrement dont nous avons bénéficié tout au long de notre parcours. Nous saluons l'engagement constant du corps enseignant, qui, par la diversité des enseignements et une approche résolument tournée vers le monde professionnel, nous a permis d'acquérir des compétences solides tout en forgeant notre esprit critique et notre rigueur scientifique. La bienveillance et le soutien de l'ensemble du personnel administratif et pédagogique ont été des piliers essentiels de notre progression, transformant ces années d'études en une expérience humaine et intellectuelle profondément formatrice et mémorable.

Hind & Anes

Dédicace

C'est avec une émotion profonde et une immense fierté que je dédie ce modeste fruit de plusieurs années d'études à ceux qui ont été les piliers de ma vie :

À mes très chers parents,

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. Vous avez été mon premier soutien, sacrifiant tant pour ma réussite et veillant toujours à ce que je ne manque de rien. Vos prières ont été mon bouclier, et votre confiance inébranlable a été le moteur de ma persévérance. Que ce travail soit le reflet de votre éducation et le témoignage de ma gratitude éternelle.

À mon cher frère et ma chère sœur,

Pour votre complicité irremplaçable et votre soutien sans faille au quotidien. Vous avez su partager mes moments de doute comme mes plus grandes joies, m'encourageant toujours à aller au bout de mes rêves. Ce mémoire est aussi le vôtre, symbole de notre lien fraternel indéfectible et de l'affection infinie que je vous porte.

À ma famille adorée,

À mes grands-parents, mes oncles, mes tantes et mes cousins, qui forment le socle de mes racines. Merci pour votre affection, vos conseils précieux et pour avoir toujours célébré mes réussites avec autant de ferveur. Votre présence chaleureuse et constante à mes côtés est une source de motivation et une immense fierté pour moi.

À mon binôme, Anes,

Avec qui j'ai partagé les longues heures de travail, les défis techniques et les réussites de ce projet. Merci pour ta patience, ton esprit d'équipe et pour avoir transformé ce défi académique en une aventure humaine inoubliable. Ta rigueur et ton amitié ont rendu ce parcours bien plus enrichissant et merveilleux.

À mes amis les plus proches,

À vous qui avez rendu ce parcours universitaire plus léger, plus beau et rempli de souvenirs précieux. Merci pour vos rires, votre écoute et votre fidélité dans les moments les plus intenses de ce projet. Je suis chanceuse de vous avoir à mes côtés pour célébrer aujourd'hui cette étape cruciale de ma vie.

Hind BEKHECHI

Dédicace

À mes très chers parents,

Vous êtes la raison pour laquelle je me suis relevée à chaque fois que je tombais. Sans un mot de trop, sans une plainte, vous avez porté mes rêves comme s'ils étaient les vôtres. Ce diplôme, c'est autant le vôtre que le mien — vous en avez payé le prix en silence, avec amour et dignité. Je vous dois tout.

À mon cher frère et ma chère sœur,

Vous avez été mes premiers confidents et mes plus fidèles alliés. Dans les moments où tout semblait lourd, votre simple présence suffisait à alléger le poids. Grandir à vos côtés est la chance la plus belle que la vie m'ait offerte. Cette réussite, je la partage avec vous de tout cœur.

À ma famille,

À ceux qui ont toujours gardé une place pour moi autour de la table, une pensée douce dans leurs prières et un mot d'encouragement au bon moment. Vous m'avez appris que les racines ne retiennent pas — elles donnent la force de s'élever. Je vous porte en moi où que j'aille.

À ma binôme, Hind,

Tu es bien plus qu'une coéquipière — une amie sincère et un miroir de passion pour le travail bien fait. Ta rigueur et ton esprit collaboratif ont été une source de motivation tout au long de ce parcours. C'est avec respect et fierté que j'ai partagé cette aventure à tes côtés. Merci pour ton amitié et pour avoir rendu ce parcours inoubliable.

À mes amis,

À vous qui avez su être là sans que j'aie besoin de demander. Vous avez coloré ces années d'université de moments que je n'échangerais pour rien au monde. Merci d'avoir été mon équilibre, ma légèreté et ma joie dans ce long chemin. Cette page se tourne avec vous, et les prochaines aussi.

Anes BENAYAD

Table des matières

Table des figures	v
Liste des tableaux	vi
Liste des sigles et acronymes	vii
Introduction générale	1
1 Approches théoriques et méthodologiques de la distribution logistique et des tournées de véhicules	3
1.1 Introduction	3
1.2 Positionnement scientifique et enjeux structurels de la logistique de distribution	4
1.2.1 Définition de la distribution	4
1.2.2 Structure de la chaîne logistique	4
1.2.3 Importance stratégique dans la chaîne logistique	5
1.3 La Supply Chain 4.0 : Structures, Intelligence et Performance	6
1.3.1 Définition de la supply chain 4.0	6
1.3.2 Rôle dans la chaîne de valeur (Supply Chain)	7
1.3.3 Enjeux et Contraintes de la Performance Opérationnelle dans la Supply Chain	7
1.4 Les problèmes liés à la distribution	8
1.5 Types de problèmes de la tournée de Véhicule (VRP)	8
1.5.1 PTVC (Problème de tournées de véhicules avec capacité)	9
1.5.2 PTVD (Problème de tournées de véhicule dynamique)	9
1.5.3 VRPB (Prolongation du VRP classique)	9
1.5.4 PTVMP (Problème de tournées de véhicules multi périodique)	9
1.5.5 PTVS (Problème de tournée des véhicule stochastique)	9
1.6 Les méthodes de résolution	10
1.6.1 Les méthodes exactes (Ismail, Legras, Coppin, 2011)	10

1.6.2	Procédure par séparation et évaluation	11
1.6.3	L'évaluation : (Ismail, Legras, Coppin, 2011)	11
1.6.4	Séparation	12
1.6.5	Le parcours de l'arbre	12
1.6.6	Back-Tracking (Ismail, Legras, Coppin, 2011)	12
1.6.7	Les méthodes approchées	12
1.7	Les solveurs utilisés dans la résolution des problèmes de tourner de véhicules	16
1.7.1	CPLEX	16
1.7.2	LINGO	16
1.7.3	GUROBI	16
1.8	Les technologies transformatrices de la supply chain	17
1.8.1	Technologies clés de la Supply Chain 4.0 : IoT, Big Data et Intelligence Artificielle	17
1.8.2	Impacts de la Supply Chain 4.0 sur les différents niveaux décisionnels	18
1.9	Variabilité de la demande et impacts logistiques	19
1.9.1	Définition de la Variabilité de la demande	19
1.9.2	Impact sur les coûts et le service	20
1.9.3	Augmentation des coûts logistiques et financiers :	20
1.10	Conclusion	22
2	Présentation de l'entreprise	23
2.1	Introduction	23
2.2	Historique et évolution de l'entreprise NAFTAL	23
2.3	Principales tâches et responsabilités de NAFTAL	24
2.3.1	Identification et Organisation des Moyens	24
2.3.2	Gestion Opérationnelle et Approvisionnement	25
2.3.3	Maintenance, Sécurité et Liaisons Externes	25
2.3.4	Organisation de naftal	25
2.3.5	Réseau de distribution et moyens de transport	31
2.4	Présentation du centre «Enfuteur» NAFTAL Tlemcen	31
2.4.1	Présentation de la canalisation multiproduit ASR	32
2.4.2	Process du Terminal d'Arrivée REMCHI	34
2.4.3	Gestion des Stocks de Carburants	36
2.4.4	Les opérations de chargement	37
2.4.5	Laboratoire de contrôle de qualité	38
2.5	Conclusion	38

3 Optimisation et Modélisation Mathématique de la Distribution de Carburants : Cas de Naftal Tlemcen	39
3.1 Introduction	39
3.2 Problématique	40
3.3 Objectifs du projet	41
3.4 Présentation des données de Naftal	42
3.4.1 Caractérisation de la flotte de camions-citernes	42
3.4.2 Configuration du réseau de distribution	42
3.5 Modélisation mathématique du problème de distribution	49
3.6 Approche de résolution	52
3.6.1 Pré-traitement des quotas physiques : le module BFS	52
3.6.2 Post-traitement : gestion des manques et équité kilométrique	53
3.6.3 Choix de l'outil de résolution	54
3.6.4 Stratégie de résolution hybride	54
3.6.5 Implémentation de la solution logicielle et résultats	55
3.6.6 Analyse et interprétation des résultats journaliers	61
3.7 Synthèse des résultats opérationnels hebdomadaires	70
3.7.1 Tableau de bord global de l'application	70
3.7.2 Focus sur l'utilisation individuelle de la flotte	71
3.7.3 Récapitulatif hebdomadaire des livraisons	72
3.7.4 Suivi des manques et justifications opérationnelles	73
3.8 Proposition d'un plan d'optimisation des reliquats	74
3.9 Conclusion	76
Conclusion générale	77

Table des figures

1.1	Structure générale d'une chaîne logistique	5
1.2	Classification de méthodes d'optimisation	11
2.1	Logo NAFTAL	24
2.2	Organigramme	32
2.3	Pipelines de canalisation	32
2.4	Chaîne de valeur du carburant	33
2.5	Carburant arrivé par le pipeline	36
3.1	Architecture visuelle et opérationnelle de l'application.	56
3.2	a) Sélection des stations	56
3.3	b) Choix de la journée	56
3.4	Tableau de bord de synthèse et indicateurs de performance globale. . . .	57
3.5	Plan de distribution détaillé par point de vente et compartimentage. . . .	58
3.6	Identification et gestion capacitive de la flotte mobilisée.	59
3.7	Structuration des rotations et indicateurs de performance des tournées. . .	59
3.8	Visualisation spatiale des points de livraison et des trajectoires sous OpenS- treetMap.	60
3.9	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du dimanche	61
3.10	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du lundi	63
3.11	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du mardi	64
3.12	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du mercredi	65
3.13	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du jeudi	67
3.14	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du vendredi	68
3.15	Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du samedi	69

3.16	Récapitulatif hebdomadaire des indicateurs clés (KPI)	70
3.17	Comparaison des fiches d'activité hebdomadaire pour les camions C21 et C23	71
3.18	Résumé hebdomadaire consolidé des performances de livraison.	73
3.19	Exemple sur les suivis des manques.	73
3.20	Plan de chargement optimisé pour la résorption des reliquats	75
3.21	Analyse comparative des manques	75

Liste des tableaux

3.1	Configuration technique de la flotte de transport Naftal.	42
3.2	Demandes enregistrées le Dimanche 15/02/2026.	43
3.3	Demandes enregistrées le Lundi 16/02/2026.	43
3.4	Demandes enregistrées le Mardi 17/02/2026.	44
3.5	Demandes enregistrées le Mercredi 18/02/2026.	45
3.6	Demandes enregistrées le Jeudi 19/02/2026.	46
3.7	Demandes enregistrées le Vendredi 20/02/2026.	47
3.8	Demandes enregistrées le Samedi 21/02/2026.	47
3.9	Architecture hybride en trois phases : BFS, MILP et post-traitement . . .	54

Liste des sigles et acronymes

Abréviation	Signification
MILP	Mixed Integer Linear Programming
NP	Non-Polynomial (classe de complexité algorithmique)
OSM	OpenStreetMap
PSE	Procédure par Séparation et Évaluation (Branch-and-Bound)
SAD	Système d'Aide à la Décision
AGV	Automated Guided Vehicles (véhicules guidés automatisés)
AMR	Autonomous Mobile Robots (robots mobiles autonomes)
API	American Petroleum Institute
CBC	Coin Branch-and-Cut (solveur open-source couplé à PuLP)
DSS	Decision Support System
IoT	Internet of Things (Internet des Objets)
KPI	Key Performance Indicators (Indicateurs clés de performance)
OPC DA	OLE for Process Control – Data Access
PuLP	Python Linear Programming library
FIFO	First In – First Out (Premier Entré, Premier Sorti)
AMG	Administration et Moyens Généraux
ASR	Arzew – Sidi Bel Abbès – Remchi (canalisation multiproduit)
BIU	Bordereau Inter-Unités
CLP	Carburants, Lubrifiants et Pneumatiques
ERDP	Entreprise Nationale de Raffinage et Distribution de Produits pétroliers
GD	Gestion Directe (station gérée par NAFTAL)
GL	Gestion Libre (station confiée à un gérant privé)
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
GS	Gasoil (Gazole / Diesel)
HV	Hand Valve (vanne manuelle ou motorisée)
PCV	Pressure Control Valve (vanne de régulation de pression)
PSV	Pressure Safety Valve (soupape de sécurité)
PVA	Points de Vente Agréés
RO	Revendeurs Ordinaires
SNTR	Société Nationale de Transport Routier
SP	Sans Plomb (Essence sans plomb)
SPA	Société Par Actions
BFS	Best-Fit Search (Recherche par meilleure correspondance)

Introduction générale

Le problème de tournée des véhicules a été le sujet d'une recherche intensive durant plus de cinquante ans, liée à son importance dans le domaine de la logistique, et à sa grande difficulté. Il implique la planification de routes de livraison à moindre coût, afin de servir un ensemble de clients dispersés géographiquement, tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules. Ce problème d'optimisation combinatoire présente à la fois des caractéristiques d'allocation de ressources (répartition des charges dans les camions), et de construction de séquence (problème du voyageur de commerce). Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver la ou les meilleures solutions vérifiant un ensemble de contraintes et d'objectifs définis par l'utilisateur. Pour déterminer si une solution est meilleure qu'une autre, il est nécessaire que le problème introduise un critère de comparaison. Ainsi, la meilleure solution, appelée aussi solution optimale, est la solution ayant obtenu la meilleure évaluation au regard du critère défini. Le problème de tournées de véhicules est classé par la littérature parmi les problèmes de classe NP-difficile, c.-à-d. on ne peut pas obtenir la solution optimale dans un temps raisonnable surtout dans le cas où la taille du problème augmente, ce qui dirige vers la recherche d'une solution proche de l'optimale en utilisant des méthodes dites approchées et en particulier les métaheuristiques.

Les métaheuristiques sont des méthodes génériques de résolution approchée de problèmes d'optimisation. Elles permettent d'envisager une résolution approchée de nombreux problèmes d'optimisation différents, avec un minimum d'adaptation réalisée pour chaque problème. Parmi ces méthodes on trouve les algorithmes génétiques. Ces derniers sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. À chaque génération, un nouvel ensemble de créatures artificielles (codées sous forme de chaînes de caractères) est construit à partir des meilleurs éléments de la génération précédente.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons au transport par Véhicules Routiers de Produits Dangereux (VRPD). Notre objectif est de concevoir un outil permettant de développer une solution intelligente pour **Naftal**, visant à optimiser les coûts de transport et la planification de la distribution du **Gazole (GS)** et de l'**Essence Sans Plomb (SP)** vers les stations-service régionales.

L'objectif final est de proposer un système d'aide à la décision capable de réduire les distances parcourues et les coûts logistiques tout en respectant les strictes contraintes de sécurité liées au compartimentage des camions-citernes.

Chapitre 1

Approches théoriques et méthodologiques de la distribution logistique et des tournées de véhicules

1.1 Introduction

La croissance rapide du nombre d'entreprises et la diversification des produits ont entraîné une intensification de la concurrence sur le marché. Face à cette situation, les entreprises doivent mettre en œuvre des moyens efficaces pour s'adapter à la dynamique du marché et répondre aux attentes des clients. Cela implique la mise en place d'infrastructures logistiques adaptées et l'optimisation des processus de distribution.

Cette évolution a conduit au développement de nouveaux services au sein de la chaîne logistique et à l'émergence de méthodes de modélisation des entreprises et des processus, visant à améliorer la production et la livraison des produits. Les entreprises cherchent ainsi à concevoir leurs infrastructures logistiques de manière à offrir des services plus rapides, plus fiables et plus rentables.

1.2 Positionnement scientifique et enjeux structurels de la logistique de distribution

1.2.1 Définition de la distribution

La distribution est l'un des enjeux les plus importants pour la réussite de l'entreprise. Elle prend place au rang des orientations stratégiques. Il faut disposer de circuits de distribution performants afin que les produits et services soient à la portée des clients visés, intégrant toute la chaîne d'approvisionnement en amont et en aval, depuis les matières premières, les composants et les produits manufacturés jusqu'à la livraison des produits aux clients finaux.

Les entreprises utilisent tous les moyens pour que cette distribution ait une influence sur la performance commerciale qui exprime le degré d'accomplissement des objectifs poursuivis par une organisation.

1.2.2 Structure de la chaîne logistique

La structure de la chaîne logistique se définit par l'agencement des différents maillons d'une chaîne logistique. Elle est représentable par un graphe dont les sommets représentent les unités de production, de stockage ou de vente, et les arcs, les flux physiques et informationnels reliant ces mêmes unités. Cette structure contraint la circulation des flux de biens et d'informations et conditionne la complexité des représentations, modélisations et instrumentation mobilisables mais aussi la validité des descriptions et prescriptions. Cinq structures sont habituellement retenues pour représenter la chaîne logistique.

- **Structure dyadique.** Cette structure simple relie un client unique à un fournisseur unique.
- **Structure en série.** Cette structure est obtenue par la concaténation de plusieurs structures dyadiques, dans laquelle un maillon a au plus un client et au plus un seul fournisseur. Elle correspond généralement à tout ou partie de la séquence simplifiée suivante : fournisseur $\rightarrow$ fabricant $\rightarrow$ grossiste $\rightarrow$ détaillant $\rightarrow$ client final.
- **Structure divergente.** Cette structure arborescente est souvent utilisée pour modéliser les réseaux de distribution à partir d'une usine de fabrication, dans laquelle un maillon est le client d'un unique maillon et le fournisseur de plusieurs maillons, le premier maillon pouvant correspondre à l'usine de fabrication des produits finis.
- **Structure convergente.** Cette structure arborescente, symétrique de la précédente, est généralement utilisée pour modéliser la partie productive d'une chaîne logis-

tique où un maillon est le fournisseur d'un seul maillon et le client de plusieurs maillons, le dernier maillon correspondant à l'usine de fabrication des produits finis.

- **Structure en réseau.** C'est le graphe le plus complexe dans lequel un maillon peut être fournisseur de plusieurs maillons et client de plusieurs autres maillons ; a priori ce graphe est sans cycle. Cette structure est la seule susceptible de décrire correctement les grandes chaînes logistiques mondiales. La prise en compte des interdépendances temporelles et spatiales y est la plus difficile.

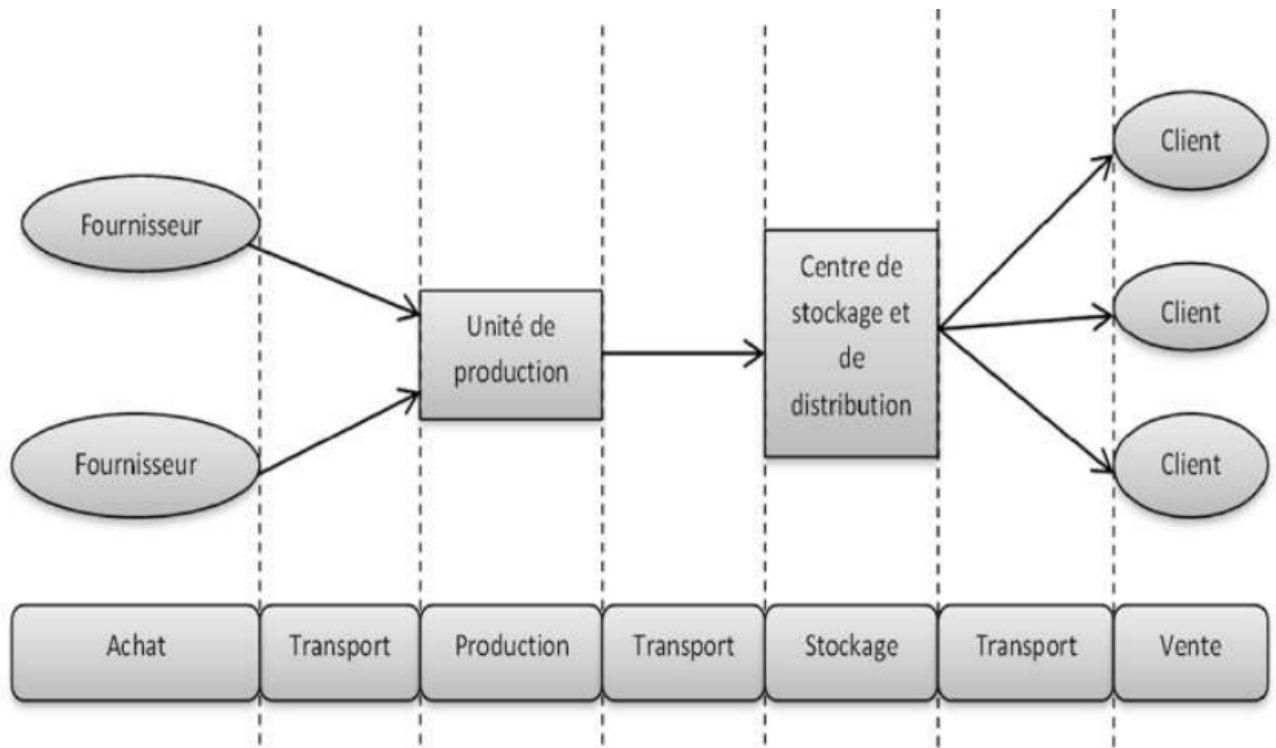


Fig. 1.1 : Structure générale d'une chaîne logistique

1.2.3 Importance stratégique dans la chaîne logistique

La logistique peut être vue comme une compétence stratégique reposant sur une gestion stratégique des flux, sur une gestion stratégique découlant d'une approche de l'organisation par les flux, mais aussi comme une capacité d'analyse de l'environnement innovante pour le diagnostic stratégique et une source de construction de connaissances inter-organisationnelle difficile à imiter. La logistique n'est pas qu'une affaire de logisticiens, mais bien un domaine de la stratégie, centrée sur les flux et bien sur un angle d'attaque spécifique, porteur de sens, pour les chercheurs, véritable stratégie de recherche.

Optimisation économique et efficacité

L'importance de l'optimisation des coûts dans le secteur logistique est devenue une priorité pour les entreprises souhaitant rester compétitives dans l'environnement économique mondial actuel. Cette importance ne se limite pas uniquement à la réduction des dépenses, mais englobe également la recherche d'un équilibre optimal entre les coûts, la qualité, la rapidité de service et la flexibilité opérationnelle. Cette analyse documentaire approfondit les différentes stratégies et méthodologies visant à améliorer la performance globale de la chaîne d'approvisionnement, s'appuyant sur des théories clés telles que la théorie de l'agence, la théorie des coûts de transaction, la théorie de la contingence, et la théorie des capacités dynamiques pour approfondir la compréhension de ces optimisations. Elle identifie les principaux facteurs influençant l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement, tels que les conditions environnementales, les ressources et infrastructures disponibles, et l'expertise des équipes. La flexibilité et l'adaptabilité des outils de contrôle de gestion sont mises en avant comme essentielles pour répondre aux fluctuations du marché.

De plus, l'étude examine comment les instruments de gestion financière, tels que l'analyse des coûts et les indicateurs de performance, peuvent non seulement contribuer à une meilleure gestion des coûts logistiques, mais aussi stimuler l'innovation dans les pratiques logistiques. Cette revue offre des perspectives sur les pratiques exemplaires, les innovations récentes et les tendances émergentes dans le secteur logistique, proposant un cadre pour formuler des stratégies d'optimisation des coûts. Elle sert de fondement pour la conduite d'études empiriques futures, enrichissant ainsi la littérature existante sur la gestion logistique et l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement.

1.3 La Supply Chain 4.0 : Structures, Intelligence et Performance

1.3.1 Définition de la supply chain 4.0

La Supply Chain 4.0 désigne l'évolution de la chaîne d'approvisionnement à l'ère de la quatrième révolution industrielle, également appelée Industrie 4.0. Elle repose sur l'intégration de technologies avancées. Cette nouvelle génération de chaîne logistique se caractérise par une digitalisation complète, une connectivité en temps réel et une interopérabilité entre les différents maillons du système. Elle permet de concevoir, planifier, gérer et optimiser les flux (physiques, financiers et informationnels) de manière intelligente et intégrée.

1.3.2 Rôle dans la chaîne de valeur (Supply Chain)

Le concept de Supply Chain Management, apparu au début des années 80 (Hugos M.2003), s'est vite popularisé durant les années 90, Son déploiement rapide a été surtout appuyé par l'évolution rapide des nouvelles technologies.

Le SCM s'est vite imposé comme une réponse à un marché qui se globalise en déployant de fortes pressions concurrentielles et une complexité croissante des clients. Il s'inscrit ainsi comme un vecteur majeur de compétitivité industrielle et commerciale.

Le SCM permet aux entreprises de conquérir des avantages compétitifs qui reposent moins sur le produit lui-même et davantage sur les valeurs liées à sa mise à disposition, ces avantages peuvent être résumés en quatre facteurs principaux :

- **Le coût** : Contrairement à l'approche analytique qui perçoit le coût total comme une simple agrégation de coûts individuels, le SCM insiste sur le coût intégré. Celui-ci ne dépend pas uniquement de la structure des coûts, mais également des coûts de coordination des différents maillons de la chaîne logistique.
- **La qualité** : Ce concept renvoie à la qualité du produit et à la qualité des processus. La qualité du produit reflète le niveau de valeur attendu par le marché, tandis que la qualité des processus constitue un déterminant incontournable de la fiabilité.
- **La livraison** : La performance de la livraison dépend de sa rapidité. Livrer plus rapidement que les concurrents renforce la compétitivité. Elle dépend également de sa fiabilité, c'est-à-dire du strict respect des délais de livraison et de leur régularité. Ignorer ce facteur peut mettre une entreprise en difficulté.
- **La flexibilité** : Elle indique la capacité de l'entreprise à modifier, dans des délais raisonnables, ses produits ou ses processus pour répondre aux exigences des clients "La flexibilité d'une Supply Chain est réalisée en réduisant la durée de son cycle tout en mettant en œuvre un processus de flux tirés en matière de réapprovisionnement".

1.3.3 Enjeux et Contraintes de la Performance Opérationnelle dans la Supply Chain

Les enjeux liés à la performance opérationnelle sont aujourd'hui clairement identifiés par les responsables de la Supply Chain. Cette performance repose principalement sur trois axes :

- **L'efficacité** : elle traduit la capacité de la chaîne logistique à atteindre les objectifs d'approvisionnement de l'entreprise en termes de qualité, de coûts et de délais.

- **L'efficience** : elle concerne l'aptitude du dispositif d'approvisionnement à obtenir les meilleurs résultats tout en optimisant les ressources mobilisées.
- **La résilience** : elle renvoie à la capacité de la Supply Chain à faire face aux risques opérationnels pouvant provoquer des défaillances ou des ruptures d'approvisionnement.

À l'heure actuelle, la mondialisation intensifie les échanges et implique des fournisseurs géographiquement très dispersés. Cette situation accroît la probabilité d'aléas affectant la production, le transport ou encore le prix des biens échangés, avec des répercussions directes sur l'approvisionnement.

Par ailleurs, les chaînes d'approvisionnement tendent à se ramifier et à intégrer un nombre croissant d'acteurs : les fournisseurs s'appuient sur des sous-traitants, qui eux-mêmes collaborent avec d'autres partenaires, générant ainsi un réseau complexe d'interdépendances.

Dans ce contexte, il devient difficile pour les responsables de la Supply Chain de maîtriser l'ensemble des informations, des coûts et des risques liés à la gestion des approvisionnements. Toutefois, cette maîtrise demeure essentielle pour garantir la performance globale de l'entreprise, en particulier dans un environnement marqué par une forte intensité concurrentielle.

Ces contraintes rendent la distribution un problème complexe d'optimisation, qui nécessite l'utilisation de méthodes mathématiques, d'algorithmes avancés et de technologies modernes pour planifier les tournées de manière efficace et rentable.

1.4 Les problèmes liés à la distribution

La logistique du transport et de la distribution de la marchandise efficace est suivie de plusieurs enjeux qui rendent la tournée planifiée plus complexe et qui peuvent impacter la logistique de l'entreprise. Ceux-ci touchent principalement la gestion des itinéraires et des ressources, et de la demande et qui doivent être considérés pour assurer un certain niveau de service dans la gestion des coûts.

1.5 Types de problèmes de la tournée de Véhicule (VRP)

Durant des années de recherche sur le VRP d'autres dérivées de ce problème sont apparues. Ces apparitions sont dues essentiellement aux activités des chercheurs qui travaillent de plus sur les problèmes de transport et de distribution que rencontrent les sociétés. Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux problèmes dérivés du PTVFT :

1.5.1 PTVC (Problème de tournées de véhicules avec capacité)

Comme défini précédemment, un problème PTVC consiste à affecter chaque client à une tournée effectuée par un seul véhicule de capacité finie. Ce véhicule commence et termine sa tournée au dépôt.

1.5.2 PTVD (Problème de tournées de véhicule dynamique)

Contrairement au VRP classique où toutes les demandes des clients sont connues et planifiées à l'avance, le PTVD illustre mieux la réalité. Dans les problèmes de transports réels dans la société d'aujourd'hui la composante dynamique est très importante, ou de pannes des véhicules de transport. Dans ce genre de situation, le décideur doit réorganiser, en un temps acceptable, la planification des itinéraires de sa flotte de véhicules pour répondre aux nouvelles demandes urgentes.

1.5.3 VRPB (Prolongation du VRP classique)

Ce problème est une prolongation du VRP classique. Il comporte des clients auxquels des produits doivent être livrés et des fournisseurs dont les marchandises doivent être amenées au dépôt. Donc, pour éviter de réarranger les produits transportés dans le véhicule sur une tournée, les clients doivent être visités avant les fournisseurs.

1.5.4 PTVMP (Problème de tournées de véhicules multi périodique)

Le problème de tournées de véhicules multi périodique (PTVMP) consiste à livrer pour un ensemble de clients, la quantité demandée d'un ou de plusieurs produits sur un horizon de temps donné. Dans ce problème, la quantité de produits livrée à un client, permet à ce dernier de subvenir à ses besoins en attendant la prochaine visite du véhicule. Le but principal de ce problème se divise en deux parties : la première consiste à planifier les horaires de livraison de chaque client sur un horizon de temps prédéterminé ; la deuxième consiste à organiser les tournées des véhicules afin d'effectuer les livraisons nécessaires tout en optimisant le coût total de transport. Outre la connaissance et l'utilisation des contraintes connues d'un problème de transport, le PTVMP nécessite l'intégration des éléments de gestion de stock afin de respecter les besoins en quantité et en temps des clients.

1.5.5 PTVS (Problème de tournée des véhicule stochastique)

Un problème VRP est dit stochastique si au moins un de ses éléments est aléatoire, c'est à dire avec une certaine incertitude. Ces éléments peuvent être une ou plusieurs

demandes des clients, les temps ou les couts de transport. Le problème avec les demandes stochastique est celui le plus étudié dans la littérature. La majorité des recherches suppose que les demandes aléatoires suivent une loi de distribution « normale ».

1.6 Les méthodes de résolution

Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation NP-difficiles tels que les problèmes de tournées de véhicules sont classés en deux catégories : les méthodes exactes et les méthodes heuristiques. Les méthodes exactes sont conçues pour trouver un optimum du problème. Toutefois, leurs durées de calcul tendent à augmenter exponentiellement avec la taille des instances des problèmes NP-difficiles qu'elles essaient de résoudre. Elles doivent donc être arrêtées prématurément lors de la résolution d'instances de grandes tailles, et ne produisent alors que des minorants appelés bornes inférieures ou des majorants appelés bornes supérieures du cout optimal.

A l'inverse, les méthodes heuristiques sont des algorithmes conçus pour produire une solution réalisable du problème traité, de bonne qualité mais pas forcément optimale, sans nécessiter des temps de calcul importants. Elles comprennent les heuristiques constructives, qui construisent une solution, les recherches locales, qui génèrent une suite de solution de coûts décroissants jusqu'à l'optimum local, et les métaheuristiques, qui contiennent divers mécanismes pour se sortir des optima locaux. Les méthodes exactes et les méthodes heuristiques sont complémentaires, car leurs résultats permettent de s'évaluer mutuellement : un faible écart entre les meilleures bornes inférieures et bornes supérieures signifie que l'optimum est proche, un écart nul prouve que les valeurs sont déjà optimales. Enfin, il est courant d'utiliser les résultats d'une de ces approches pour améliorer la performance de l'autre.

1.6.1 Les méthodes exactes (Ismail, Legras, Coppin, 2011)

Appelées aussi programmation linéaire, et sont utilisées uniquement quand la fonction objective et les contraintes sont des fonctions linéaires, où la fonction objective est la fonction qui minimise ou maximise la variable de décision, et les contraintes sont représentées sous forme d'égalités ou d'inégalités. L'optimum est trouvé lorsqu'il n'y a pas de meilleure solution adaptable aux contraintes.

Les méthodes exactes les plus connues sont appelées (Mixed interger programming) (Wolsey L. A., 2007) , La programmation linéaire des variables mixtes comme la méthode Branch-and-Bound (Ismail, Legras, Coppin, 2011), les plus connues appartiennent aux méthodes dites du type SIMPLEX (Finel, Structuration de lignes d'usinage : méthodes exactes et heuristiques, 2004) et elles doivent être complétées par des procédures

de séparation et évaluation (PSE).

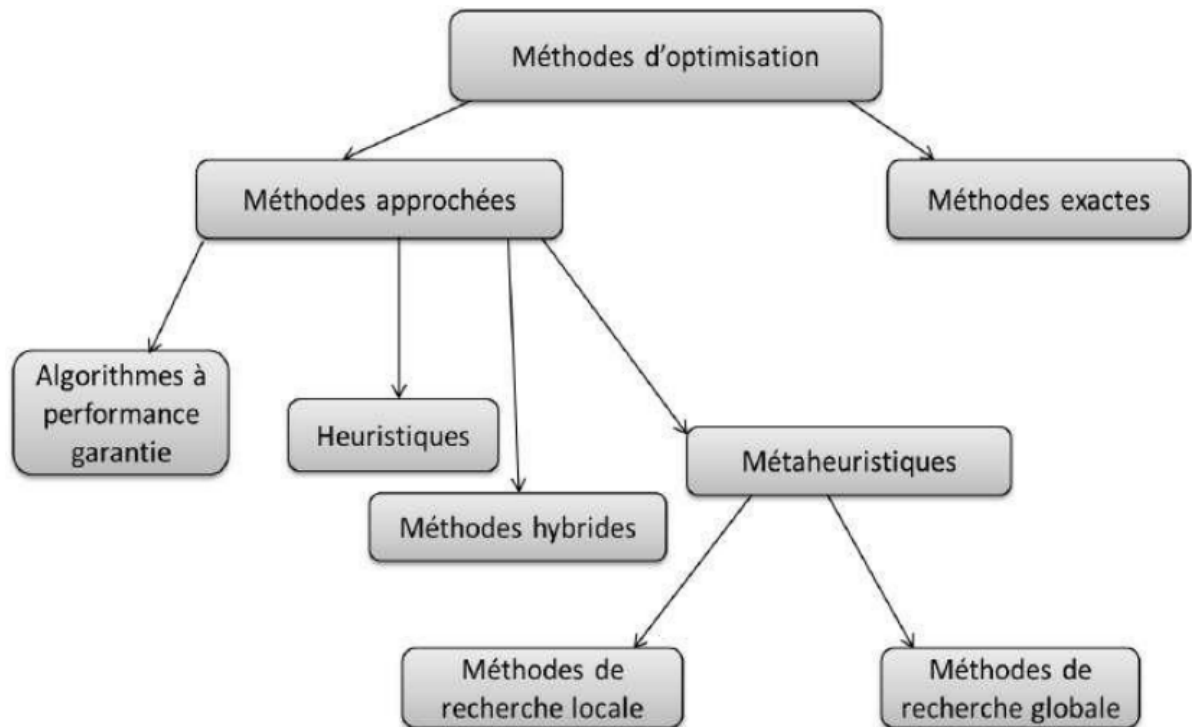


Fig. 1.2 : Classification de méthodes d'optimisation

1.6.2 Procédure par séparation et évaluation

Une PSE est une méthode qui évite de parcourir toutes les solutions, plus connue sous le nom de Branch-and-Bound. L'ensemble est divisé en sous-ensembles qui sont à leur tour redécoupés (Finel, Structuration de lignes d'usinage : méthodes exactes et heuristiques, 2004) qui va finir avec une représentation des résultats par un arbre de solutions.

1.6.3 L'évaluation : (Ismail, Legras, Coppin, 2011)

Nécessaire pour vérifier l'ensemble des solutions et éliminer les ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. Elle est située entre deux bornes. Dans le cas de la minimisation le programme doit calculer la borne supérieure. Si, lors du calcul, une solution meilleure est trouvée, elle écrase la borne supérieure. La borne inférieure est calculée à chaque étape, si on obtient une borne inférieure qui est plus importante que la borne supérieure, le nœud sera supprimé. L'efficacité de cette méthode dépend des bornes : elle est plus rapide et plus exacte si ces bornes sont proches de la solution optimale.

1.6.4 Séparation

Diviser le problème en sous problèmes en évaluant chaque solution et garder la meilleure d'entre-elles. Ceci permet d'avancer dans l'arbre et d'énumérer toutes les solutions.

1.6.5 Le parcours de l'arbre

C'est de choisir entre trois manières différentes de déplacement dans l'arbre :

Soit en profondeur, ce qui emmène rapidement à la solution optimale, le nœud de départ dans ce cas est le dernier nœud créé.

Soit en largeur, ce qui favorise les sommets les plus proche du problème initial. Les nœuds d'un niveau ne sont pas parcourus jusqu'à la fin du nœud actuel.

Soit en prenant le meilleur nœud en se basant sur la fonction objective, ce qui permet de parcourir les problèmes avec les meilleures bornes possibles. Cette solution évite de parcourir tout l'arbre.

1.6.6 Back-Tracking (Ismail, Legras, Coppin, 2011)

Dans le cas de blocage où le branchement ne peut pas être fait, cette méthode propose de revenir au nœud précédent. Cette action est effectuée lorsqu'une contrainte est violée, cet algorithme parcourt toutes les solutions possibles. Dans le cas de programmation, une nouvelle valeur x peut être affectée dans le domaine de définition. Ce processus est répété à chaque itération jusqu'à l'aboutissement à la solution optimale. Si tout le domaine a été parcouru sans que des solutions émergent de ce processus, alors le problème est irréalisable.

Avantage : Cette méthode garantit le résultat en cas où le problème est réalisable.

Inconvénient : l'algorithme est lent : si nous avons un problème de n variables dont chacune a un domaine de définition D , alors il existe D^n combinaisons possibles.

1.6.7 Les méthodes approchées

Les problèmes d'optimisation du monde industriel sont généralement de grandes tailles et disposent de nombreuses contraintes, donc les méthodes exactes ne sont pas utilisables. Dans ce cas, on doit chercher une bonne solution en un temps raisonnable au lieu d'attendre l'obtention d'une solution optimale après des années de calcul ! [GHERBOUDJ. 2013]. Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes approchées (ou méthodes heuristiques) ne garantissent pas l'optimalité de la solution mais, elles permettent de trouver des solutions de très bonne qualité en un temps d'exécution raisonnable, c'est-à-dire, elles cherchent un bon compromis entre la qualité de la solution et le temps de

calcul. Dans la littérature, de nombreuses méthodes approchées ont été proposées. Nous pouvons diviser ces méthodes en 4 catégories : des heuristiques, des métaheuristiques, des algorithmes à performance garantie et des algorithmes hybrides. Par la suite nous présentons chaque catégorie.

Les heuristiques

Le mot heuristique vient du grec *eurisko* εὕρισκω qui signifie «je trouve» d'où le célèbre Eureka d'Archimède. Dans la littérature, il existe plusieurs définitions d'une heuristique, ici nous présentons celle de Feigenbaum et Feldman (1963) [E. A Feigenbaum and j. Feldman 1963.] : "Une heuristique (règle heuristique, méthode heuristique) est une règle d'estimation, une stratégie, une astuce, une simplification, ou tout autre type de dispositif qui limite considérablement la recherche de solutions dans des espaces problématiques importants. Les heuristiques ne garantissent pas des solutions optimales. En fait, elles ne garantissent pas une solution du tout. Tout ce qui peut être dit d'une heuristique utile, c'est qu'elle propose des solutions qui sont assez bonnes la plupart du temps". En outre, dans le domaine de l'optimisation combinatoire on peut dire qu'une heuristique est une méthode approchée développée pour résoudre un problème particulier et elle nécessite des connaissances approfondies sur le problème traité. Une heuristique, ou méthode approximative, est un algorithme qui fournit rapidement (en temps polynomial) une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation NP-difficile. On oppose les méthodes approchées aux méthodes exactes, qui trouvent toujours l'optimum si on leur en laisse le temps (énumération complète, méthodes arborescentes, programmation dynamique). Les approches heuristiques, contournent le problème de l'explosion combinatoire en faisant délibérément des impasses et n'explorent qu'une partie de l'espace des combinaisons. Une méthode heuristique est généralement conçue pour un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre. On parle de métaheuristique pour les méthodes approximatives générales, pouvant s'appliquer à différents problèmes.

Les métaheuristiques

Le mot métaheuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs : méta, du grec *μετα* signifiant «au-delà» (ou «à un plus haut niveau») et heuristique. Les métaheuristiques sont en général des problèmes aux données incomplètes, incertaines, bruitées ou confrontés à une capacité de calcul limitée mais c'est des algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace ou plus robuste. Ces méthodes sont,

pour la plupart, inspirées de la physique (recuit simulé), de la biologie (algorithmes évolutionnaires) ou de l'éthologie (essais particuliers, colonies de fourmis). Le but d'une métaheuristique est de résoudre un problème d'optimisation donné : elle cherche un objet mathématique (une permutation, un vecteur, etc.) minimisant (ou maximisant) une fonction objectif, qui décrit la qualité d'une solution au problème.

- **Les métaheuristiques à population** L'ensemble des solutions possibles forme l'espace de recherche. L'espace de recherche est au minimum borné, mais peut être également limité par un ensemble de contraintes.

Dans certains cas, le but recherché est explicitement de trouver un ensemble d'optima "satisfaisants". L'algorithme doit alors trouver l'ensemble des solutions de bonne qualité, sans nécessairement se limiter au seul optimum : on parle de méthodes multimodales.

Les métaheuristiques manipulent une ou plusieurs solutions, à la recherche de l'optimum, la meilleure solution au problème. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée.

D'une manière générale, les métaheuristiques s'articulent autour de ces notions :

a) Voisinage : Le voisinage d'une solution est un sous-ensemble de solutions qu'il est possible d'atteindre par une série de transformations données. Par extension on désigne parfois par le terme «voisinage» l'ensemble des transformations considérées. Un voisinage simple pour le problème du voyageur de commerce sera, par exemple, l'ensemble des solutions qu'il est possible de construire en permutant deux villes dans une solution donnée.

b) Diversification : La diversification (ou exploration) désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème optimisé.

c) Intensification : L'intensification (ou exploitation) vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.

d) Apprentissage : La mémoire est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optima locaux.

Une solution ou un ensemble de solutions est parfois appelé un état, que la métaheuristique fait évoluer via des transitions ou des mouvements en progressant de

façon itérative et alternant des phases d'intensification, de diversification et d'apprentissage, ou en mêlant ces notions de façon plus étroite. Si une nouvelle solution est construite à partir d'une solution existante, elle est sa voisine. Le choix du voisinage et de la structure de donnée le représentant peut être crucial. L'état de départ est souvent choisi aléatoirement, l'algorithme se déroulant ensuite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Lorsqu'une solution est associée à une seule valeur, on parle de problème mono-objectif, lorsqu'elle est associée à plusieurs valeurs, on parle de problème multi-objectifs (ou multi-critères). Dans un numéro spécial de la revue scientifique *European Journal of Operational Research*, consacré aux applications des métaheuristiques, les éditeurs ont constaté que la majorité des 20 articles publiés le furent dans deux domaines : les problèmes d'ordonnancement et de logistique. Les méthodes les plus utilisées appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnaires, souvent hybridés avec des méthodes de recherche locale.

Quelques exemples de problèmes concrets, optimisés via des métaheuristiques :

Problèmes de tournée de véhicules.

Optimisation de réseaux mobiles.

Gestion du trafic aérien.

Optimisation des plans de chargement des cœurs de réacteurs nucléaires.

- **Les métaheuristiques à solution unique**

Les méthodes à solution unique, plus connues sous le nom de méthodes de recherche locale ou encore méthodes de trajectoire, sont basées sur l'évolution d'une seule solution dans l'espace de recherche. Typiquement, les méthodes de recherche locale démarrent d'une solution unique, puis à chaque itération, la solution courante est déplacée dans un voisinage local en espérant améliorer la fonction objectif. Les méthodes à solution unique englobent principalement la méthode de descente, la recherche locale itérée, la recherche à voisinage variable, la méthode du recuit simulé et la recherche tabou. Ces méthodes diffèrent essentiellement dans leur manière d'exploiter le voisinage local, choix des candidats et critères de déplacement.

1.7 Les solveurs utilisés dans la résolution des problèmes de tourner de véhicules

1.7.1 CPLEX

ILOG CPLEX (plus communément appelé "CPLEX") est un outil informatique d'optimisation. Son nom fait référence au langage C et à l'algorithme du simplexe. Il est composé d'un exécutable (CPLEX Interactif) et d'une bibliothèque de fonctions pouvant s'interfacer avec différents langages de programmation (CPLEX Callable Library) : C, C++, Java et Python.

1.7.2 LINGO

LINGO est un outil complet conçu pour formuler rapidement, facilement et efficacement les problèmes d'optimisation de modèles linéaires et non linéaires. Il dispose d'un environnement complet d'un langage puissant et d'un large panel de commande pour construire et éditer les modèles. Ce moyen d'optimisation permet de trouver le meilleur résultat, par exemple le meilleur profit, le coût le plus faible ...etc, tout en présentant les valeurs des différents paramètres pour obtenir ces solutions. Ceci peut être illustré à travers une interface flexible qui offre aux développeurs une variété de façon d'interagir avec lui pendant le développement et le déploiement de leurs applications.

1.7.3 GUROBI

Dans un problème d'optimisation multi-objectifs, nous avons plusieurs objectifs que nous souhaitons optimiser simultanément. Chaque objectif peut représenter un aspect ou un but différent du problème, et souvent ces objectifs sont conflictuels ou en concurrence.

Dans notre problème, nous avons deux objectifs, comme mentionné précédemment : le premier objectif représente l'aspect économique, c'est-à-dire les coûts d'ouverture et de distribution, tandis que le deuxième objectif représente l'aspect environnemental, c'est-à-dire les émissions de gaz.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé le solveur Gurobi et employé la fonction :

`setObjectiveN(expr, index, priority)`

Cette fonction nous permet de résoudre un modèle multi-objectifs où :

expr : `expr` : représente l'expression de notre objectif (Z1 ou Z2 dans notre cas)

index : `index` : représente l'indexation des objectifs. Cela permet de distinguer les différents objectifs lors de la définition ou de la modification des objectifs alternatifs.

priority : priority : sert à établir l'importance ou la priorité de l'objectif alternatif par rapport aux autres objectifs. Dans notre modèle, les deux objectifs sont importants, c'est pourquoi ils ont tous les deux la même priorité (priority = 1).

Dans notre modèle, nous avons donc :

setObjectiveN(Z1, 0, 1) setObjectiveN(Z2, 1, 1)

1.8 Les technologies transformatrices de la supply chain

La transformation de la gestion de la chaîne d'approvisionnement vers le paradigme 4.0 est intrinsèquement liée à l'intégration d'un ensemble de technologies avancées. Les catégories technologiques suivantes représentent les principaux moteurs de cette métamorphose structurelle de la supply chain .

1.8.1 Technologies clés de la Supply Chain 4.0 : IoT, Big Data et Intelligence Artificielle

- **Internet des Objets (IoT) :** L'IoT englobe les dispositifs physiques embarqués (capteurs, microprocesseurs, logiciels) permettant la connexion et l'échange de données avec d'autres systèmes via Internet. Dans la supply chain, il permet la collecte en temps réel d'informations critiques telles que l'état, la localisation, la température ou le niveau de stockage des marchandises, équipements et infrastructures.
- **Big Data et Analytics :** Le Big Data désigne les ensembles massifs de données générés par les opérations logistiques, caractérisés par les « 3V » : *volume, vitesse et variété*. L'analytique regroupe les méthodes statistiques, algorithmiques et d'intelligence artificielle visant à extraire des informations pertinentes, détecter des tendances et réaliser des prévisions.
- **Intelligence Artificielle (IA) et Machine Learning (ML) :** L'IA vise à concevoir des agents intelligents capables d'analyser leur environnement et d'agir de manière optimale.

Le machine learning, quant à lui, permet d'identifier des motifs complexes dans les données pour réaliser des tâches telles que :

- la *classification* (détection d'anomalies),
- la *régression* (prévision de la demande),
- le *clustering* (segmentation des clients).

- **Robotique et Automatisation** : Elle concerne l'utilisation de systèmes mécatroniques autonomes ou semi-autonomes intégrant capteurs, actionneurs et contrôleurs programmables. Cela inclut les robots mobiles autonomes (AMR), les véhicules guidés automatisés (AGV), ainsi que les systèmes de manutention intelligents (convoyeurs, trieurs, etc.).
- **Blockchain** : La blockchain est une structure distribuée et chronologique composée de blocs de transactions liés cryptographiquement. Elle offre un moyen transparent et sécurisé de traçabilité des flux d'information et de marchandises tout au long de la supply chain.
- **Jumeaux Numériques (Digital Twins)** : Un jumeau numérique est une réplique virtuelle dynamique d'un actif physique, d'un processus ou d'un système. Alimenté par des données en temps réel, il permet de simuler, surveiller et prédire les performances logistiques tout au long du cycle de vie.

1.8.2 Impacts de la Supply Chain 4.0 sur les différents niveaux décisionnels

L'intégration des technologies de la Supply Chain 4.0 déploie un éventail d'avantages et d'impacts qui transforment profondément la manière dont les entreprises conçoivent, gèrent et optimisent leurs chaînes d'approvisionnement, en touchant l'ensemble des niveaux de décision et d'activité.

- **Au niveau stratégique** : À ce niveau, la Supply Chain 4.0 constitue un levier majeur pour accroître l'agilité et la résilience des entreprises dans un environnement incertain et dynamique. La capacité de collecter et d'analyser en temps réel des données issues de l'ensemble de l'écosystème permet d'identifier précocement les perturbations potentielles, qu'il s'agisse de risques fournisseurs, d'événements géopolitiques ou de catastrophes naturelles. Cette visibilité globale favorise une gestion proactive des stratégies d'approvisionnement et de distribution, tout en optimisant la configuration du réseau logistique.
- **Au niveau tactique** : La Supply Chain 4.0 améliore la planification et la collaboration en rendant les prévisions de la demande et de l'offre plus précises grâce à l'analyse avancée des données. Cette meilleure visibilité facilite l'optimisation de la gestion des stocks, réduisant à la fois les ruptures et les surstocks, ce qui limite les coûts et l'immobilisation de capital. Le partage d'informations en temps réel avec les partenaires renforce également la coordination des activités et facilite la

résolution conjointe des problèmes. Enfin, l'optimisation des itinéraires et la gestion dynamique des entrepôts contribuent à diminuer les coûts de transport tout en améliorant l'efficacité de la distribution.

- **Au niveau opérationnel** : La Supply Chain 4.0 renforce l'efficacité et réduit les coûts grâce à l'automatisation des tâches répétitives, libérant ainsi les ressources humaines pour des missions à plus forte valeur ajoutée. L'analyse en temps réel des données permet d'optimiser les flux logistiques et de production, réduisant les délais, les gaspillages et maximisant l'utilisation des ressources. Cette optimisation est renforcée par la maintenance prédictive, qui anticipe les pannes et limite les arrêts imprévus, assurant une meilleure disponibilité des équipements. De plus, la traçabilité accrue des produits facilite la gestion de la qualité et réduit les risques liés aux défauts, contribuant à une chaîne d'approvisionnement plus agile et résiliente.

1.9 Variabilité de la demande et impacts logistiques

La demande évolue continuellement en fonction de nombreux facteurs, ce qui peut engendrer des déséquilibres au sein de la chaîne d'approvisionnement. Cette section présente la définition des fluctuations de la demande, les facteurs internes et externes qui les influencent, ainsi qu'une typologie de ces variations.

1.9.1 Définition de la Variabilité de la demande

Les fluctuations de la demande se rapportent aux modifications des besoins des clients concernant un produit ou un service sur une période déterminée. Ces variations peuvent être attribuées à divers facteurs internes ou externes, et elles peuvent se manifester de plusieurs façons.

Ces facteurs peuvent affecter soit la quantité nécessaire, soit le caractère provisoire de la demande elle-même. Des facteurs saisonniers, économiques, technologiques ou des événements imprévus peuvent avoir un impact sur les fluctuations de la demande. Ils peuvent être classés en deux grandes catégories : les variations anticipables et les variations non anticipables.

Ces variations constituent un enjeu crucial pour les entreprises, car elles ont un impact direct sur l'organisation de la production, la gestion des inventaires et le plan de distribution. Une gestion inappropriée des variations peut conduire à des pénuries de stock, des excédents de stock et des pertes économiques.

1.9.2 Impact sur les coûts et le service

Les fluctuations de la demande ont des conséquences directes sur la gestion des achats et des approvisionnements. Elles peuvent notamment entraîner une augmentation significative des coûts, affectant ainsi la performance globale de l'entreprise.

1.9.3 Augmentation des coûts logistiques et financiers :

Les variations de la demande, qu'elles soient saisonnières, liées à la conjoncture ou structurelles, entraînent une succession d'irrégularités dans les systèmes logistiques et financiers des sociétés. Ces déséquilibres engendrent des coûts supplémentaires significatifs qui influent sur la rentabilité, la flexibilité et la compétitivité de la chaîne d'approvisionnement. La littérature sur la gestion de la chaîne d'approvisionnement met en évidence que les entreprises les plus efficaces ne sont pas forcément celles qui ont les coûts de production les plus bas, mais plutôt celles qui gèrent le mieux l'incertitude et la variabilité.

Coûts liés à la gestion des stocks : entre risques de pénurie et excédents coûteux

La gestion des stocks est centrale dans les systèmes de logistique. Lorsqu'une entreprise est confrontée à une variation imprévue de la demande, elle doit ajuster ses niveaux d'inventaire, ce qui peut conduire à :

- **Des pénuries de stocks** : entraînent des pertes commerciales directes, mais également des coûts dissimulés : perte de la fidélité client, détérioration de l'image de marque, retards dans la chaîne d'approvisionnement en cas de production en flux tendu. Dans des domaines tels que l'automobile ou la grande distribution, ces interruptions peuvent entraîner des pertes de plusieurs millions d'euros.
- **Des excédents de stock** : paralysant le capital, encombrant les dépôts et amplifient les risques de détérioration ou d'obsolescence (surtout dans le domaine de l'électronique et des articles saisonniers). Le coût de détention d'un inventaire peut atteindre jusqu'à 25% de sa valeur annuelle. Bien que les systèmes Just-in-Time soient efficaces en période de stabilité, ils démontrent une certaine vulnérabilité lors des fluctuations importantes de la demande, car ils offrent peu de flexibilité pour gérer les chocs.

Coûts liés au transport et à la distribution

Les variations inattendues de la demande forcent souvent les entreprises à ajuster leurs modèles logistiques de distribution :

- Recours à des moyens de transport urgents (tels que l'aérien ou les livreurs spécialisés), nettement plus coûteux que les transports par cargo ou maritimes traditionnels.
- Augmentation de la fréquence des livraisons pour répondre à la demande en temps réel, ce qui entraîne plus de déplacements, une sous-exploitation des capacités et une hausse du coût par unité transportée. Bien que les systèmes Just-in-Time soient efficaces en période de stabilité, ils démontrent une certaine vulnérabilité lors des fluctuations importantes de la demande, car ils offrent peu de flexibilité pour gérer les chocs.
- Perturbation des contrats avec les fournisseurs logistiques, qui peuvent parfois comporter des sanctions en cas de modifications trop régulières des quantités anticipées. Dans certains domaines, les frais de transport peuvent constituer jusqu'à 50% des dépenses logistiques totales, dont la variation selon la demande, reste un facteur majeur d'instabilité.

Coûts financiers et économiques indirects

Les impacts financiers sont également importants :

- Les surplus de stock entraînent une immobilisation de capital non générateur de profits et un accroissement du besoin en fonds de roulement.
- Les achats non prévus ou en urgence sont fréquemment effectués à des tarifs plus élevés, les fournisseurs augmentant leurs prix dans des situations tendues.
- L'utilisation de financements à court terme pour répondre à des pics de demande soudains peut entraîner des coûts d'intérêts significatifs. Finalement, à moyen terme, une gestion inadéquate des variations peut conduire à une diminution de la compétitivité, à un rétrécissement des marges et parfois même à des pénalités contractuelles en B2B.

Coûts administratifs et coûts de coordination

L'augmentation de l'incertitude due aux fluctuations de la demande contraint les entreprises à instaurer des processus internes onéreux :

- Revue régulière des projections de vente et des stratégies d'approvisionnement. Engagement de ressources humaines additionnelles pour la planification, les interventions d'urgence en logistique ou la coordination avec les fournisseurs
- L'établissement de réunions de crise exceptionnelles, des bilans de performance et la gestion des anomalies sont mis en place.

1.10 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de dresser un panorama complet des fondements théoriques et méthodologiques qui régissent la distribution logistique et l'optimisation des tournées de véhicules (VRP). Nous avons établi que la logistique ne se limite plus à une simple fonction de transport, mais constitue un levier stratégique de performance globale, particulièrement dans le secteur sensible des produits pétroliers où les contraintes de sécurité et de délais sont critiques.

L'étude des différentes variantes du Vehicle Routing Problem nous a permis d'identifier la complexité mathématique inhérente à ces problématiques, classées comme des problèmes NP-difficiles. L'exploration des méthodes de résolution, allant des algorithmes exacts (Dijkstra, A*) aux métaheuristiques et approches par Intelligence Artificielle, a mis en évidence la nécessité de choisir des outils capables de concilier précision mathématique et temps de réponse opérationnel.

En conclusion, la compréhension de ces mécanismes théoriques constitue le socle indispensable à la conception de notre solution. Elle nous permet de passer d'une gestion empirique à une approche scientifique de la distribution. Ces concepts seront mis à l'épreuve dans les chapitres suivants, où ils serviront de base à la modélisation et au développement de l'outil d'aide à la décision dédié à l'optimisation des flux de carburant pour le compte de Naftal.

Chapitre 2

Présentation de l'entreprise

2.1 Introduction

L'entreprise NAFTAL est une filiale de la compagnie nationale algérienne des hydrocarbures SONATRACH. Elle a été créée en 1981 et est spécialisée dans la distribution et la commercialisation de produits pétroliers et gaziers en Algérie.

2.2 Historique et évolution de l'entreprise NAFTAL

Issue de la sonatrach (Société Nationale pour la recherche, le transport, la production, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures), l'Entreprise Nationale de Raffinage et de Distribution de Produits Pétroliers (erdp) a été créée par le décret N°80-101 datant du 06 avril 1980.

Entrée en activité le 01^{er} janvier 1982, elle fut chargée de l'industrie de raffinage et de la distribution de produits pétroliers. Le 04 mars 1985, les districts suivants : carburants, lubrifiants, pneumatiques et bitumes, ont été regroupés sous le nom und (Unité naftal de Distribution).

Durant l'année 1987, l'activité de raffinage est séparée de la distribution, conformément au Décret N°87-189 du 25 août 1987. Modifiant ainsi le décret N°80-101 du 06 avril 1980, ce texte donne naissance à une nouvelle entreprise nationale dénommée : « Entreprise nationale de commercialisation et de distribution de produits pétroliers » sous le sigle de “naftal”.

Dès l'année 1998, elle change de statut et devient une société par action (spa), filiale de la sonatrach à 100 %. Elle interviendra par la suite dans les domaines suivants :

- Dans l'enfûtage gpl.
- Dans la formulation des bitumes.

- Dans la distribution, le stockage et la commercialisation des carburants, gpl, lubrifiants, bitumes, pneumatiques et gpl/produits spéciaux.
- Dans le transport des produits pétroliers.

Le 01^{er} janvier 2000, l'activité gpl enfûtage est séparée de l'activité clp. Par décision N°S554 du 29 mars 2000, il a été procédé à l'organisation générale de la division clp et l'identification des zones de distribution "clp"(Carburants, Lubrifiants et Pneumatiques).

Par décision N°S555 du 29 mars 2000, il a été procédé à la création des zones de distribution clp. Par décision N°S606 du 10 février 2001, il a été procédé à l'organisation et la classification des centres Bitumes de la division Bitume.

Par décision N°S705 du 17 juin 2002, il a été procédé à la renominations des zones de distribution clp et gpl en "District". Par décision N°S766 du 22 décembre 2003, il a été procédé à la dissolution de la branche clpb. Par la décision N°S770 du 03 janvier 2004, il a été procédé à la dissolution des districts clp et à la création des districts commercialisation.

À partir du 01^{er} décembre 2006, l'activité carburant est séparée de l'activité commercialisation. L'activité carburants est chargée du stockage et du déstockage des carburants, tandis que l'activité commercialisation s'occupe essentiellement des achats, des ventes, du bilan annuel et des projets.



Fig. 2.1 : Logo NAFTAL

2.3 Principales tâches et responsabilités de NAFTAL

L'activité carburants du district repose sur une gestion rigoureuse des moyens matériels, humains et organisationnels. Ses principales missions se déclinent comme suit :

2.3.1 Identification et Organisation des Moyens

- **Moyens matériels et infrastructures :** Identification des équipements relevant de l'activité (camions-citernes, réseaux de canalisations), ainsi que des installations

fixes de stockage.

- **Structures d'organisation** : Mise en place et suivi des services de maintenance, de la surveillance et de l'entretien des canalisations, ainsi que des laboratoires de reconnaissance des produits.
- **Moyens humains** : Gestion et coordination du personnel œuvrant spécifiquement pour l'activité carburants au sein du district.

2.3.2 Gestion Opérationnelle et Approvisionnement

- **Suivi des flux** : Suivre les plans établis par la branche carburant pour l'approvisionnement et le ravitaillement des dépôts. Un compte-rendu régulier des états d'exécution est transmis aux structures concernées.
- **Distribution et livraison** : Exécuter les programmes de distribution définis par les districts commercialisation afin d'assurer la livraison fluide de la clientèle.
- **Gestion des stocks** : Administrer les niveaux de carburants dans les dépôts et communiquer les points de situation périodiques à la branche.

2.3.3 Maintenance, Sécurité et Liaisons Externes

- **Exploitation et entretien** : Assurer le suivi technique des infrastructures de stockage, des parcs de camions et des canalisations rattachés au district.
- **Sûreté interne** : naftal assure, en concertation avec les responsables des centres et des canalisations, la protection et la sécurité des installations et des moyens de transport.
- **Relations inter-entreprises** : Gérer les relations avec les partenaires stratégiques tels que les raffineries naftec, ainsi que les prestataires de transport (sntr), et assurer la transmission des dossiers aux structures de la branche pour règlement.
- **Gestion administrative** : Approuver les Bordereaux Inter-Unités (biu) émis par les districts commercialisation vers le district carburant.

2.3.4 Organisation de naftal

Comme toute grande entreprise, naftal possède sa propre structure organisationnelle. Nous illustrons ici les principaux services et leurs missions respectives :

[Image of organizational chart of a petroleum company]

Service Informations de Gestion

Sa mission consiste à :

- Collecter, vérifier et analyser les informations de gestion du district.
- Élaborer les tableaux de bord et les rapports d'activité du District.
- Assurer l'installation, l'exploitation et la sauvegarde des logiciels de gestion et des données afférentes.
- Prêter assistance aux structures en matière d'exploitation des applications informatiques opérationnelles.

Département Administration et Moyens Généraux

Les missions du département amg sont :

- Assurer la gestion des moyens généraux du district.
- Assurer la gestion des ressources humaines .
- Assurer la gestion de l'administration générale.
- Assurer la gestion des œuvres sociales et culturelles.

Département Finance et Comptabilité

Ce département a pour mission de :

- Coordonner et suivre toutes les activités de comptabilité, de trésorerie, de budget et de patrimoine.
- Consolider, analyser les états comptables et veiller à la sincérité des comptes du District.
- Veiller à la concordance des écritures comptables avec les flux physiques et financiers.

Service Trésorerie

Il est composé de deux sections : la **Section Recettes** et la **Section Dépenses**. Sa mission est de :

- Suivre et contrôler les flux, les recettes et les dépenses de trésorerie.

- Traiter les dossiers de paiement d'investissement, des fournisseurs et autres dépenses.
- Établir les situations de rapprochement des comptes (recettes et dépenses).
- Contrôler et effectuer les comptabilisations des comptes et grands livres de trésorerie.
- Établir des rapports d'activités périodiques.

Service Comptabilité Générale

Il est composé de deux sections : la **Section Vérification et Contrôle des Dossiers** et la **Section Comptabilité**. Sa mission est de :

- Procéder aux écritures comptables conformément aux préconisations du Plan Comptable National.
- Élaborer les documents comptables réglementaires (Bilans, balances et livres).
- Contrôler les arrêtés de comptes et préparer les inventaires et bilans.
- Élaborer les analyses et synthèses comptables.
- Procéder aux opérations de clôtures et de réouvertures des comptes.

Service Budgets et Coûts

Ses diverses missions sont :

- Élaborer les budgets prévisionnels d'investissement et de fonctionnement du District.
- Consolider l'ensemble des charges nécessaires à la détermination des coûts.
- Contrôler et traiter les situations financières du District.
- Procéder aux ajustements des budgets et des crédits.
- Assurer le suivi régulier de la comptabilité analytique.

Département Transport & Technique

Il a pour mission :

- Élaborer les plans de maintenance préventive et curative des équipements, des dépôts et des canalisations, et en suivre l'exécution.
- Élaborer les plans annuels et pluriannuels de transport, en prenant en charge les besoins de distribution et de ravitaillement des produits commercialisés.
- Assurer le suivi de la réalisation des travaux sur site.
- Élaborer les plans et budgets d'investissement (rénovation, extension, remise à niveau, remplacement) des installations fixes, des canalisations et du réseau de stations-service.
- Établir un rapport d'activité périodique.

Ce département comporte les services suivants :

1. Service Exploitation et Maintenance :

- Vérifier l'application des prescriptions du règlement d'exploitation et de sécurité des équipements.
- Établir les indicateurs de performance de maintenance.
- Assurer la maintenance des installations au niveau des dépôts carburants.

2. Service Études et Réalisation :

- Établir la partie technique des cahiers des charges.
- Contrôler et diriger les différents travaux sur le terrain.
- Suivre les travaux programmés ayant trait aux projets de développement.

Les produits commercialisés par l'entreprise naftal

L'entreprise naftal propose une large gamme de produits pétroliers et dérivés adaptés aux besoins du marché national :

1. Les carburants :

- **Essence Normale :** Carburant avec plomb utilisé pour les anciens véhicules. Sa teneur en octane est inférieure à celle du super. Étant très polluant, sa commercialisation a fortement diminué.

- **Essence Super** : Utilisée pour les moteurs automobiles, elle se caractérise par un indice d'octane plus élevé que l'essence normale.
 - **Essence sans Plomb** : Combustible issu du raffinage, exempt de plomb pour limiter l'impact environnemental et préserver la santé publique.
 - **Gasoil** : Aussi appelé Diesel, ce carburant issu du raffinage est destiné aux moteurs diesel routiers et non routiers.
2. **Les lubrifiants (huiles et graisses)** : Un lubrifiant est une matière onctueuse (liquide ou solide) ayant pour propriété d'atténuer le frottement et l'usure des pièces mécaniques, d'évacuer la chaleur et de prévenir la corrosion . On distingue :
- Huiles pour moteurs.
 - Huiles isolantes pour transformateurs électriques.
 - Huiles pour transmissions hydrauliques.
 - Graisses pour les rouages.
3. **Les pneumatiques** : Accessoires indispensables assurant le contact entre le véhicule et le sol. Formés d'un tube de caoutchouc gonflé d'air, ils amortissent les chocs et sont des éléments capitaux de sécurité.
4. **Le bitume** : Substance hydrocarburée très visqueuse, solide à température ambiante. Il est obtenu par distillation du pétrole brut. C'est le produit le plus lourd, principalement utilisé dans les travaux publics (routes, autoroutes, pistes d'aéroports).
5. **Fuel (léger et lourd)** : Huile industrielle dérivée du pétrole (distillation au-dessus de 275 °C). Utilisé dans les chaudières et certains moteurs diesel, il est classé parmi les ressources énergétiques fossiles.

Le marché de l'entreprise

La clientèle de naftal est classée en deux grandes catégories :

- **Clientèle Réseaux** : Elle se divise selon le lien juridique avec l'entreprise :
 - **Gestion Directe (gd)** : Stations gérées directement par naftal avec son propre personnel.
 - **Gestion Libre (gl)** : Stations appartenant à naftal mais dont l'exploitation est confiée à des gérants privés.

- **Revendeurs Ordinaires (ro)** : Points de vente de faible capacité liés par contrat commercial.
- **Points de Vente Agréés (pva)** : Stations-service réalisées par des investisseurs privés.
- **Gros consommateurs** : Clients disposant de leurs propres capacités de stockage (bacs ou réservoirs) :
 - Entreprises publiques et privées.
 - Administrations et collectivités locales.
 - Hôpitaux et Défense Nationale.
 - Secteurs agricole et domestique.

Moyens et infrastructures de Naftal

Avec un effectif de 30 000 agents, naftal est le premier distributeur en Algérie . Elle fournit 10 millions de tonnes de produits par an (carburants, gpl, bitumes et lubrifiants).

Pour assurer cette mission, elle dispose d'un patrimoine matériel important :

1. Dépôts et centres

- **47** dépôts carburants terrestres.
- **42** centres et minicentres GPL.
- **9** centres GPL vrac.
- **47** dépôts relais.
- **30** dépôts aviation.
- **6** centres marins.
- **15** centres bitumes.
- **24** centres lubrifiants & pneumatiques.

2. Stations-service

- Environ **2 010** stations-service à l'échelle nationale.
- Selon certaines sources, ce chiffre peut varier légèrement (jusqu'à **2 300** stations), notamment en fonction des stations en gestion directe ou privée.

3. Parc roulant et logistique

- Environ **3 300** véhicules pour assurer le transport et la distribution.
- Un réseau de dépôts et relais bien maillé pour garantir la distribution finale des produits.

4. Modernisation et Digitalisation

- Naftal développe activement le paiement électronique (**e-paiement**) dans ses stations.
- On enregistre environ **42 000** transactions par mois, marquant un progrès significatif dans la modernisation des services clients.

2.3.5 Réseau de distribution et moyens de transport

Le réseau national de distribution repose sur trois étapes essentielles :

- **L'approvisionnement** : Acheminement des produits depuis la raffinerie vers un **centre primaire** (ex : centre de stockage de Remchi). Ce transfert s'effectue par pipeline ou par cabotage (navire).
- **Le ravitaillement** : Transport des produits depuis les centres primaires vers les **centres secondaires** (dépôts). Ce transfert se fait par rail (train) ou par camions citerne (wagon-citerne).
- **La livraison** : Phase finale assurant la disponibilité des produits en zones de consommation (stations-service). Elle s'effectue de deux manières :
 - **Livraison directe** : Utilisation des camions propres à naftal pour livrer les clients depuis un centre secondaire.
 - **Livraison en droiture** : Livraison directe depuis un centre primaire vers les gros consommateurs (industries, aéroports, chantiers) via des camions privés loués par l'entreprise.

2.4 Présentation du centre « Enfuteur » NAFTAL Tlemcen

Le centre de stockage et de distribution des carburants de remchi est implanté au sein de la zone industrielle de Tlemcen sur une superficie de 10 hectares. Il constitue un pôle stratégique pour le stockage et le conditionnement.

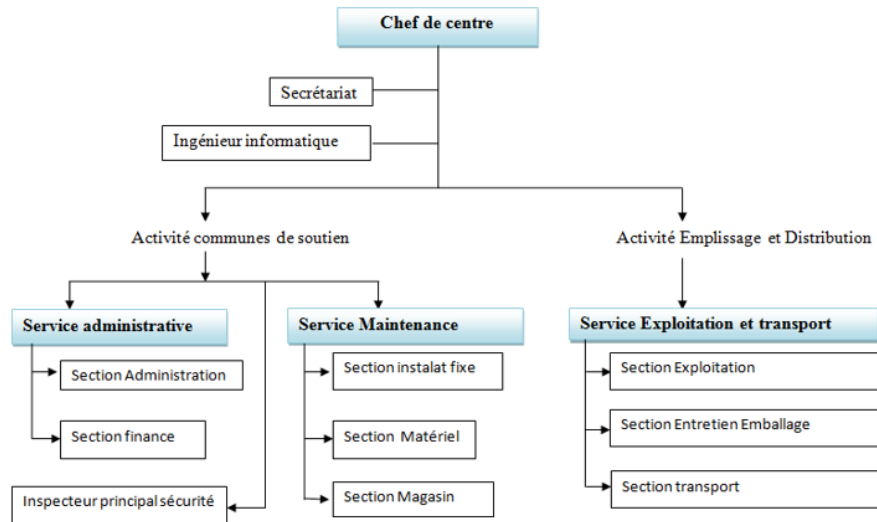


Fig. 2.2 : Organigramme

2.4.1 Présentation de la canalisation multiproduit ASR

Description générale de l'oléoduc multiproduit ASR :

La canalisation multiproduit ASR relie la raffinerie d'Arzew à la station finale de Remchi, en passant par Sidi Bel Abbés.



Fig. 2.3 : Pipelines de canalisation

Elle alimente les centres de stockage de Sidi Bel Abbés et de Remchi et constitue un maillon logistique central pour l'approvisionnement régional.

La longueur totale du tracé est d'environ 168 km :
(Arzew → Sidi Bel Abbés → Sidi Abdelli → Remchi).

La capacité totale de transport du pipeline est d'environ 10 100 m³, répartie comme suit :

6 200 m³ sur le tronçon Arzew → Sidi Bel Abbès, Et 3 900 m³ sur le tronçon Sidi Bel Abbès → Remchi. Cette capacité permet d'assurer un flux régulier et sécurisé des produits pétroliers vers les zones desservies.

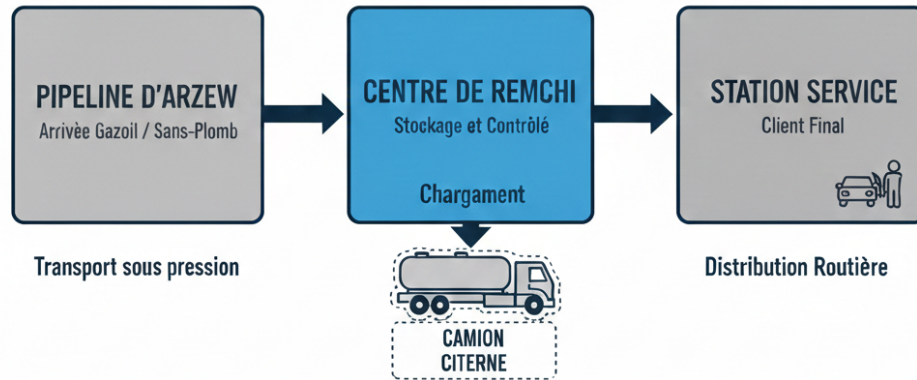


Fig. 2.4 : Chaîne de valeur du carburant

Configuration et caractéristiques techniques :

Le pipeline ASR est composé de trois tronçons aux diamètres et épaisseurs différenciés, ce qui permet d'optimiser le transport multiproduit selon les débits et les pressions :

- **Tronçon 1** : 12", épaisseur 9,52 mm : Raffinerie d'Arzew → Sidi Bel Abbès (~ 85 km).
- **Tronçon 2** : 10", épaisseur 6,35 mm : Sidi Bel Abbès → Sidi Abdelli (~ 56 km).
- **Tronçon 3** : 8", épaisseur 6,40 mm : Sidi Abdelli → Remchi (~ 27 km).

Analyse scientifique et hydraulique

D'un point de vue scientifique, la diminution progressive du diamètre le long du tracé permet de maintenir une pression et une vitesse d'écoulement adaptées, malgré les pertes de charge naturelles dues à la longueur du pipeline. En réduisant le diamètre, on compense la baisse de pression et on évite la décélération excessive du fluide, ce qui améliore la stabilité hydraulique et l'efficacité énergétique du transport.

Ces caractéristiques techniques permettent la **circulation séquentielle** et sécurisée de différents produits (*Essence Sans Plomb, Gazoil*), avec des dispositifs de séparation et d'exploitation adaptés aux profils des produits transportés.

Le parc et le centre de stockage (site de Remchi) :

Le centre carburant de Remchi constitue un maillon terminal du système ASR. Il reçoit les produits via l'oléoduc multiproduit et assure le stockage, la décantation, le contrôle qualité et l'expédition du Gasoil (GS) et de l'Essence Sans Plomb (SP).

Le site comprend généralement plusieurs zones fonctionnelles :

- **Réception Pipeline** : Contrôle de pression par vannes et débitmètres, avec suivi rigoureux des « batches » (lots) pour garantir l'intégrité des produits.
- **Parc de Cuves** : Réservoirs cylindriques équipés de détecteurs de niveau (radar/ultrason), de dispositifs anti-débordement et d'événements anti-surpression.
- **Chargement Camion** : Expédition via des bras de chargement avec compteurs volumétriques, filtres anti-pollution et systèmes de mise à la terre.
- **Sécurité & HSE** : Protection garantie par un réseau incendie (eau/mousse), des détecteurs de gaz et un plan d'intervention conforme aux normes NAFTAL.

2.4.2 Process du Terminal d'Arrivée REMCHI

Le terminal d'arrivée est le point où le pétrole raffiné (Gasoil ou Sans-plomb) arrive depuis le pipeline principal. Le rôle de ce terminal est de recevoir le produit, le mesurer, le contrôler, puis l'orienter vers les cuves de stockage.

Arrivée du produit depuis le pipeline

Le produit est acheminé sous pression depuis l'axe *Arzew → Sidi Bel Abbès* avec un suivi rigoureux de la pression (env. 3,5 bars) et de la température (env. 25 °C). Ces paramètres sont fondamentaux pour l'exploitation car ils déterminent la densité, la précision du calcul du volume réel et permettent la détection d'éventuels mélanges entre les lots. Enfin, l'intégrité du système est assurée par une gare de racleur (*Pigging Station*) située en amont de l'entrée du terminal.

Traversée des organes de sécurité

Avant son admission dans les unités du terminal, le carburant transite par un système de contrôle et de sécurité multicouche. Ce dispositif comprend des vannes manuelles (HV) et motorisées permettant l'isolation de la conduite en cas d'urgence ou l'orientation du flux selon le produit (Gasoil, Sans Plomb ou retour). La stabilité du débit est assurée par des vannes de régulation de pression (PCV), tandis que l'intégrité structurelle des équipements est garantie par des soupapes de sécurité (PSV). Ces dernières interviennent

pour évacuer tout excès de pression, prévenant ainsi les risques de surpression avant le traitement final du produit.

Système de comptage

traverse un dispositif de sécurité et de contrôle essentiel. Ce système repose sur des vannes manuelles (HV) et motorisées permettant l'isolation de la conduite ou l'aiguillage du flux (Gasoil, Sans Plomb ou retour). La régulation du débit et la stabilité opérationnelle sont assurées par des vannes de contrôle de pression (PCV), tandis que des soupapes de sécurité (PSV) protègent les installations contre tout risque de surpression accidentelle. Cet ensemble garantit une gestion sécurisée et un contrôle optimal du produit avant son admission définitive dans le terminal.

Séparation, direction et contrôle des lignes

Une fois les mesures effectuées, le produit est orienté vers sa ligne de destination spécifique (Gasoil ou Sans-plomb) via un réseau de vannes manuelles (HV). Ce système d'aiguillage permet de sélectionner avec précision la conduite adéquate, d'éviter toute erreur d'orientation et de basculer le flux entre les différentes cuves de stockage (A ou B). En complément de l'aiguillage, l'installation assure un monitoring continu de la pression interne, de la température, ainsi que de l'état d'encrassement des filtres et de la performance des pompes.

D'un point de vue historique, bien que le centre traitait initialement quatre produits (Gasoil, Sans-plomb, Kérosène et Super), le transport par pipeline est aujourd'hui rationalisé autour du Gasoil et du Sans-plomb. Les infrastructures et cuves autrefois dédiées au Kérosène et au Super ont été réaffectées pour augmenter la capacité de stockage du Sans-plomb.

Stockage dans les cuves

La zone de stockage du terminal se concentre sur la gestion des mélanges (interfaces) via les cuves A et B, équipées d'une instrumentation complète (niveaux, températures, sécurité trop-plein). La séparation s'effectue par analyse de densité : la cuve A reçoit les contaminations lourdes et la cuve B les légères.

Historiquement, les capacités autrefois dédiées au Kérosène et au Super ont été réaffectées au Sans-plomb pour répondre à l'évolution de la demande. Il est à noter que les cuves de produits purs ne sont pas représentées sur ce schéma technique simplifié.

Gare de Racleur (Pigging Station)

La gare de racleur se situe avant le terminal, sur la ligne d'arrivée. Elle est indispensable pour nettoyer le pipeline, séparer les produits et inspecter la conduite.

Citerne de purge

La citerne de purge, reliée à la gare de racleur par des lignes de collecte (représentées en orange), recueille les excédents de produit évacués lors des ouvertures de soupapes. Cet équipement assure la protection de l'environnement, la sécurité des opérateurs lors des opérations de raclage et le maintien de la propreté du système. Une fois collectés, ces résidus sont réorientés par pipeline vers les cuves de contamination A ou B en fonction de leur densité (lourde ou légère).

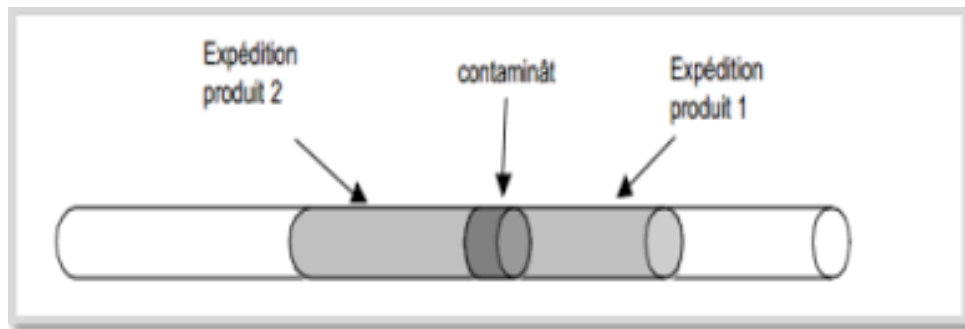


Fig. 2.5 : Carburant arrivé par le pipeline

2.4.3 Gestion des Stocks de Carburants

La gestion des stocks de carburants est un aspect essentiel du fonctionnement de l'entreprise, car elle permet d'assurer la disponibilité des produits, de préserver leur qualité et d'optimiser l'utilisation des capacités de stockage. Durant mon stage, j'ai pu observer le système mis en place pour le stockage, le suivi et la gestion des différents produits pétroliers au sein du centre de stockage.

- **Zones de stockage :** Le centre comporte deux zones de stockage du carburant, chacune équipée de neuf cuves destinées au Gasoil (GS) et à l'Essence sans plomb (SP). La capacité de ces cuves varie entre 500 m^3 et $6\,450 \text{ m}^3$.
- **Gestion du contaminat :** Il existe deux cuves dédiées au stockage de « contaminat », mélange de deux produits au point de contact lors du transport par pipeline, avec une capacité d'environ 500 m^3 chacune.
- **Réinjection et classification :** Le produit contaminé est stocké temporairement, puis réinjecté dans les cuves de produit pur selon sa densité (ρ) :

- $725 \leq \rho \leq 775 \text{ kg/m}^3$: Essence sans plomb (SP)
- $810 \leq \rho \leq 860 \text{ kg/m}^3$: Gasoil (GS)
- $775 \leq \rho < 790 \text{ kg/m}^3$: Contaminat léger (Fraction légère)
- $790 \leq \rho < 810 \text{ kg/m}^3$: Contaminat lourd (Fraction lourde)

Pour connaître en temps réel l'état des cuves, deux méthodes sont utilisées :

Méthode 1 : Système de centralisation des données (Logiciel de supervision)

Ce logiciel centralise les données de terrain (Tank Scanner, Multi Scan, API) via les protocoles Modbus et OPC DA. Conçu pour la gestion à grande échelle (jusqu'à 400 réservoirs), il offre une visualisation en temps réel et des calculs de stock précis. Sa structure modulaire permet une gestion évolutive du site tout en garantissant des mesures certifiées, conformes aux exigences des transactions commerciales.

Méthode 2 : Manuelle

En complément du système automatique, un suivi physique est réalisé via des jauges graduées. Le technicien relève la hauteur du produit (en mètres) et la convertit en volume (m^3) à l'aide de la **fiche de barémage** spécifique à chaque cuve (par exemple : $1,33 \text{ m} \rightarrow 74,914 \text{ m}^3$).

- **Stratégie de gestion (FIFO) :** Le centre applique la méthode *First In, First Out* (Premier Entré, Premier Sorti). Cette approche garantit une rotation régulière des stocks, évitant ainsi la stagnation du carburant et préservant ses propriétés physico-chimiques avant la livraison.

2.4.4 Les opérations de chargement

Le cycle de chargement au dépôt de Remchi repose sur un protocole rigoureux alliant sécurité opérationnelle et supervision informatique :

- **Accueil et Identification :** À son arrivée, le bon d'enlèvement du camion est scanné pour vérifier les informations critiques (capacité, compartiments, destination). Un numéro d'ordre est attribué pour réguler la file d'attente.
- **Supervision par ALMA Ingénierie :** Ce logiciel automatise et sécurise l'opération. L'opérateur y configure la mission (quantité, produit, destination), tandis que le système surveille en temps réel les équipements (bras, vannes, débitmètres) et archive les données de traçabilité (volumes, densités).
- **Sécurité Incendie :** Avant tout transfert, la **mise à la terre** du véhicule est une étape obligatoire. Elle permet de dissiper l'électricité statique et d'éliminer tout risque

d'étincelle en présence de vapeurs inflammables, protégeant ainsi le personnel et les installations.

2.4.5 Laboratoire de contrôle de qualité

Dans ce centre de distribution, les produits stockés sont le gasoil et l'essence sans plomb. Le gasoil est un carburant plus lourd, moins volatil et utilisé principalement dans les moteurs diesel, tandis que l'essence sans plomb est plus légère, plus volatile et destinée aux moteurs à allumage.

Le laboratoire du site réalise des opérations de recertification, bien que les carburants soient déjà certifiés à leur sortie de la raffinerie.

L'objectif est de vérifier que leur qualité n'a pas été altérée pendant le transport par pipeline ou le stockage. Les essais réalisés sont conformes aux exigences de la norme ISO 17025, qui garantit la compétence technique du laboratoire, la fiabilité des méthodes d'essai et la traçabilité des mesures selon un référentiel reconnu internationalement.

2.5 Conclusion

Ce deuxième chapitre nous a permis de situer le cadre opérationnel de notre étude en présentant le centre de distribution de Naftal Remchi. À travers l'analyse de son infrastructure, de sa capacité de stockage et de la gestion de sa flotte de camions-citernes, nous avons pu cerner les enjeux logistiques majeurs auxquels ce centre est confronté quotidiennement.

L'étude de l'organisation actuelle a mis en évidence la complexité de la chaîne de distribution, allant de la réception jusqu'à la livraison finale vers les stations-service. Nous avons constaté que, malgré une infrastructure robuste, l'efficacité globale du centre repose sur une coordination fine entre la disponibilité des ressources mobiles et le respect de contraintes de sécurité strictes.

En somme, cette immersion au cœur de Naftal Remchi constitue une étape charnière. Elle nous a permis de collecter les données réelles et de comprendre les spécificités du terrain indispensables à la phase de modélisation. Ce diagnostic exhaustif prépare ainsi le terrain pour le chapitre suivant, consacré à la conception et à l'implémentation de notre solution d'optimisation, visant à transformer ces défis logistiques en opportunités de performance grâce aux outils de simulation et d'intelligence artificielle.

Chapitre 3

Optimisation et Modélisation Mathématique de la Distribution de Carburants : Cas de Naftal Tlemcen

3.1 Introduction

Le secteur de la distribution des produits pétroliers en Algérie constitue un pilier stratégique de l'économie nationale, où la gestion des flux logistiques représente un défi majeur en termes de coûts et de sécurité. Au cœur de ce dispositif, l'entreprise Naftal assure la continuité de l'approvisionnement d'un vaste réseau de points de vente et de clients industriels à travers le territoire.

L'optimisation du transport des hydrocarbures ne se limite pas à la simple livraison de produits; elle nécessite une planification rigoureuse capable de jongler entre des demandes fluctuantes, une flotte de camions-citernes aux capacités variées et des contraintes de sécurité strictes. La particularité de cette logistique réside dans la gestion du compartimentage, imposant que chaque unité de transport soit utilisée de manière optimale pour éviter les trajets à vide ou les sous-utilisations de capacité.

Ce troisième chapitre constitue le volet pratique et technique de notre travail de fin d'études. Il a pour objectif de détailler la conception d'un Système d'Aide à la Décision (SAD) intelligent appliqué au réseau de distribution de Naftal. Nous y présenterons la modélisation mathématique traitant chaque point de livraison comme une entité de demande spécifique, l'environnement technologique utilisé pour la simulation et la résolution, ainsi qu'une analyse approfondie des résultats obtenus sur une semaine complète d'exploitation.

Cette approche, combinant la Programmation Linéaire et le développement d'une application dédiée à la visualisation cartographique, vise à proposer des tournées optimisées. Elle permet de minimiser les distances parcourues tout en garantissant un taux de satisfaction de la demande maximal, tout en offrant une interface intuitive pour visualiser le trajet parcouru par chaque véhicule sur le réseau routier réel.

3.2 Problématique

La gestion de la distribution des carburants par l'entreprise **Naftal** repose sur une logistique complexe où chaque décision d'affectation influe directement sur les coûts opérationnels et la qualité de service. Le problème central de cette étude s'articule autour de trois axes critiques :

- **La complexité combinatoire du problème de tournées (VRP) :** Le réseau de distribution à optimiser comprend jusqu'à 28 stations par jour, chacune exprimant des besoins spécifiques et fluctuants en Essence (SP) et Gazole (GS). Mathématiquement, cela correspond à un *Vehicle Routing Problem* (VRP) de grande taille. La planification manuelle actuelle, bien qu'opérationnelle, se heurte à l'explosion combinatoire des routes possibles. Sans outil d'optimisation, il est extrêmement difficile d'identifier la combinaison de trajets qui minimise la distance totale tout en respectant les fenêtres de travail des chauffeurs.
- **La contrainte de sécurité liée au compartimentage :** C'est la contrainte la plus structurante du modèle. Contrairement au transport de marchandises solides, les hydrocarbures sont transportés dans des citernes divisées en compartiments. Pour des raisons de sécurité routière (limitation de l'effet de balant du liquide) et de prévention de la dégradation des cuves, Naftal impose que tout compartiment sollicité soit rempli à **100 % de sa capacité nominale**. Cela transforme le problème de livraison classique en un problème de "bin-packing" complexe : la demande d'une station (par exemple 22 m^3) doit impérativement être satisfaite par une somme exacte de volumes fixes (ex : $8 + 8 + 7 \neq 22$). Ce décalage entre la demande réelle et la capacité discrète des compartiments génère souvent des manques résiduels ou des surplus qu'il faut minimiser.
- **L'optimisation d'une flotte hétérogène et multi-produits :** Le modèle doit orchestrer une flotte mixte de 26 camions-citernes possédant des configurations distinctes (27 m^3 répartis en $3 \times 7 \text{ m}^3 + 6 \text{ m}^3$, ou 30 m^3 répartis en $2 \times 7 \text{ m}^3 + 2 \times 8 \text{ m}^3$). La difficulté réside dans l'affectation optimale :

Comment concevoir un modèle intelligent capable d'automatiser la planification des tournées quotidiennes de Naftal, afin de minimiser les distances parcourues tout en garantissant une saturation optimale des camions et le respect strict des contraintes de sécurité liées au compartimentage ?

La problématique de ce projet est de concevoir un moteur d'optimisation capable de résoudre ce puzzle logistique quotidien, en garantissant un équilibre entre la satisfaction totale des stations et l'utilisation minimale des ressources de transport.

3.3 Objectifs du projet

La finalité de ce travail est de transformer la gestion logistique de **Naftal** d'une planification empirique vers une optimisation automatisée et rigoureuse. Pour atteindre cet état, nous avons défini des objectifs articulés autour de la performance opérationnelle et de la validation technologique :

- **Optimisation des ressources et réduction des coûts** : Le premier enjeu est de minimiser la distance totale parcourue par la flotte de camions-citernes. En optimisant les itinéraires, nous visons une réduction directe de la consommation de carburant et de l'usure des véhicules, tout en diminuant l'empreinte carbone de l'activité de distribution.
- **Respect rigoureux des contraintes de sécurité** : Un objectif central est d'intégrer la contrainte de compartimentage à 100 %. Le modèle doit garantir que chaque compartiment sollicité (3, 4, 6, 7 ou 8 m³) soit totalement rempli, assurant ainsi la stabilité des véhicules durant le transport et le respect des procédures de sécurité de l'entreprise.
- **Arbitrage entre méthodes de résolution (Python vs IA)** : Avant de figer le système, nous cherchons à comparer les performances de la programmation linéaire classique avec des approches issues de l'Intelligence Artificielle. L'objectif est de déterminer quelle méthode offre le meilleur compromis entre la qualité de la solution (volume livré) et le temps de calcul.
- **Maximisation du taux de service client** : Cet objectif vise à répondre de manière optimale aux besoins du réseau de distribution. Le modèle est conçu pour respecter la priorité de Naftal qui consiste à livrer un mix de produits composé de 70% de Gasoil (GS) et 30% de Sans Plomb (SP). En garantissant le respect de ces proportions, l'approche permet d'assurer un taux de satisfaction de la demande maximal tout en minimisant les distances parcourues pour chaque tournée.

- **Conception d'une solution d'optimisation et de visualisation :** Le processus de résolution repose sur un Système d'Aide à la Décision (SAD). Cette approche a été conçue afin d'automatiser l'analyse des données de terrain et de garantir une planification logistique optimisée pour Naftal, tout en permettant une restitution précise des tournées sur un support cartographique.

3.4 Présentation des données de Naftal

La performance du modèle d'optimisation repose sur la précision des données d'entrée. Celles-ci concernent principalement la flotte de transport et la configuration du réseau de distribution.

3.4.1 Caractérisation de la flotte de camions-citernes

Le parc de camions utilisé pour cette étude se compose de 26 véhicules appartenant à **Naftal**. L'hétérogénéité de cette flotte, détaillée dans le tableau ci-dessous, constitue un paramètre majeur de notre modèle d'optimisation :

Identification	Nombre	Capacité Totale	Détail des Compartiments (m^3)
Camion 01 à 04	4	12 m^3	3 – 3 – 3 – 3
Camion 05 à 06	2	15 m^3	4 – 2 – 3 – 6
Camion 07 à 16	10	27 m^3	6 – 7 – 7 – 7
Camion 17 à 26	10	30 m^3	7 – 7 – 8 – 8

Tab. 3.1 : Configuration technique de la flotte de transport Naftal.

Cette hétérogénéité impose une contrainte de sélection rigoureuse : le moteur d'optimisation doit choisir le véhicule dont la configuration de compartiments correspond le mieux à la demande combinée en GS et SP de la station cible.

3.4.2 Configuration du réseau de distribution

Le réseau logistique étudié s'articule autour d'un point central unique, le dépôt de **Remchi**, qui assure l'approvisionnement d'un ensemble de stations-service réparties sur un large périmètre géographique.

La complexité de ce réseau réside dans l'hétérogénéité des distances à parcourir, qui impactent directement le temps de rotation des camions et les coûts de transport.

Présentation des données de demande quotidienne

L'efficacité de notre modèle d'optimisation est testée sur une période réelle d'exploitation au niveau du dépôt de Remchi. Pour chaque journée, les demandes des stations-service en Essence Sans Plomb (SP) et en Gazole (GS) sont détaillées ci-après.

Demandes du Dimanche 15/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	14	16	1
02	GD MAGHNIA	14	16	49
03	GD NEDROMA	14	16	46
04	GD KOUDIA	13	14	20
05	GD SEBRA	13	14	40
06	GHORZI MED	6	—	3
07	KHEMMAR	8	22	16
08	SALAH	13	14	22
09	KOLOUGHLI	7	20	14
10	DAHOU	7	20	55
11	BELHAMIDI	16	14	65
12	TAHIR ST	7	20	58

Tab. 3.2 : Demandes enregistrées le Dimanche 15/02/2026.

Demandes du Lundi 16/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	16	22	1
02	GD MAGHNIA	7	20	49
03	GD NEDROMA	7	24	46
04	GD HONAIN	6	9	40
05	GD KOUDIA	13	14	20
06	GD O/MIMOUN	7	20	54
07	KIBOU	4	11	8
08	KHEMMAR	8	22	16
09	SARL MADINA	14	16	25
10	SCS IMAMA	16	14	25
11	BELARBI	14	17	25
12	CHOUKCHOU	6	6	30
13	SALAH	30	30	22
14	KOLOUGHLI	14	16	14
15	HANAFI	—	15	81
16	DAHOU	7	20	55
17	BELHAMIDI	14	16	65
18	BOUCHAREB	7	20	65
19	BOUIZEM	7	20	85
20	HDEYLI	7	20	64
21	BELHOUT	6	21	28

Tab. 3.3 : Demandes enregistrées le Lundi 16/02/2026.

Demandes du Mardi 17/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	22	14	1
02	GD MAGHNIA	14	16	49
03	GD NEDROMA	6	21	46
04	GD SOUAHLIA	14	16	64
05	GD ZIANIDES	–	13	39
06	GD KOUDIA	13	14	20
07	GD S/DJILLALI	8	22	95
08	KHERROUSSE	6	7	7
09	KHEMMAR	15	15	16
10	SARL MADINA	14	16	25
11	SCS IMAMA	13	14	25
12	BELARBI	14	17	25
13	CHOUKCHOU	8	3	30
14	BOUDGHENE STAMBOULI	14	13	30
15	SALAH	30	30	22
16	HAMDI	–	10	52
17	PURTEC	8	22	27
18	LACHGUEUR	14	17	63
19	KOULOUGHLI	8	22	14
20	ZIANE	7	20	79
21	DAHOU	7	20	55
22	HAMDOUNE	6	10	75
23	BELHAMIDI	14	16	65
24	TAHIR ST	13	10	58
25	AISSAT	6	6	58
26	DERGAL	–	30	63
27	BELHOUT	–	30	28

Tab. 3.4 : Demandes enregistrées le Mardi 17/02/2026.

Demandes du Mercredi 18/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	16	22	1
02	GD MAGHNIA	8	22	49
03	GD NEDROMA	14	16	46
04	GD SOUAHLIA	14	16	64
05	GD BAB ASSA	7	20	86
06	GD KOUDIA	13	14	20
07	GD BENSEKRANE	6	7	48
08	KIBOU	4	11	8
09	KHEMMAR	8	22	16
10	SARL MADINA	13	14	25
11	GUELLIL	–	12	28
12	BELARBI	14	17	25
13	CHOUKCHOU	6	9	30
14	SALAH	27	30	22
15	KOULOUGHLI	8	22	14
16	DAHOU	7	20	55
17	BELHAMIDI	10	16	65
18	ZEDAZI	7	20	90
19	TAHIR PM	–	15	60
20	PVA SIRIR	7	20	12

Tab. 3.5 : Demandes enregistrées le Mercredi 18/02/2026.

Demandes du Jeudi 19/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	16	22	1
02	GD MAGHNIA	13	14	49
03	GD NEDROMA	10	21	46
04	GD HONAINA	14	13	40
05	GD KOUDIA	13	14	20
06	GD SEBRA	7	20	40
07	GHORZI	6	21	20
08	KIBOU	7	23	8
09	BENBABOUCHE	6	7	20
10	KHEMMAR	15	15	16
11	SARL MADINA	13	14	25
12	GUELLIL	27	–	28
13	BELARBI	14	17	25
14	CHOUKCHOU	6	6	30
15	SALAH	30	30	22
16	GUERMOUCHE	7	7	55
17	KOLOUGHLI	8	22	14
18	HAROUNE RACHID	8	22	27
19	DAHOU	7	22	55
20	BELHAMIDI	14	16	65
21	BOUCHAREB	7	20	36
22	KABBAS	–	27	56
23	REZOUG	6	21	52
24	TAHIR ST	7	20	58
25	SARL SIDIAMAR	15	15	50
26	HEBRI	8	22	35
27	BOUKARABILA	7	23	114
28	ALMANARA	6	21	51

Tab. 3.6 : Demandes enregistrées le Jeudi 19/02/2026.

Demandes du Vendredi 20/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	13	20	1
02	GD SOUAHLIA	8	22	64
03	GD M,B,M'hidi	7	20	111
04	GD Bab Assa	14	13	86
05	GD KOUDIA	13	14	20
06	KHERROUSSE	6	14	7
07	CHOUKCHOU	6	6	30
08	BOUDGHENE STAM	20	7	30
09	SALAH	30	27	22
10	PURTEC	–	27	27
11	KOLOUGHLI	7	20	14
12	SARL EL OUARIT	6	21	50
13	RAHOUI	8	52	63

Tab. 3.7 : Demandes enregistrées le Vendredi 20/02/2026.

Demandes du Samedi 21/02/2026

N°	Nom du client	SP (m^3)	GS (m^3)	Distance (km)
01	GD REMCHI	14	16	1
02	GD MAGHNIA	14	16	49
03	GD NEDROMA	7	20	46
04	GD KOUDIA	7	22	20
05	GD EL ARICHA	–	21	110
06	GD BENSEKRA	13	14	48
07	MAHLIA	7	20	13
08	GHORZI MED	5	10	3
09	KHEMMAR	15	15	16
10	SARL MADINA	14	16	25
11	SCS IMAMA	16	14	25
12	CHOUKCHOU	9	3	30
13	SALAH	14	16	22
14	HAMDI	3	12	67
15	KOLOUGHLI	8	22	14
16	CHARBENE	7	23	42
17	DAHOU	7	20	55
18	AISSANI	6	6	14
19	SARL EL OUARIT	6	21	40
20	TAHIR ST	13	14	58

Tab. 3.8 : Demandes enregistrées le Samedi 21/02/2026.

Analyse et interprétation des données de la période d'étude

L'examen détaillé des demandes enregistrées entre le 15 et le 21 février 2026 met en évidence plusieurs caractéristiques opérationnelles majeures. Ces constats justifient la nécessité d'un moteur d'optimisation intelligent pour la gestion des tournées au dépôt de Remchi.

- **Variabilité de la charge de travail :** Le réseau présente une fluctuation importante de la demande, passant d'un minimum de 12 stations le dimanche à un pic d'activité de 28 stations le jeudi. Cette variation de plus de 130% du nombre de points de livraison impose une gestion dynamique et flexible de la flotte de 26 camions disponible.
- **Complexité du compartimentage :** Plusieurs stations sollicitent des volumes mixtes d'Essence Sans Plomb (SP) et de Gazole (GS) qui ne correspondent pas toujours aux capacités unitaires des compartiments (3, 4, 6, 7 ou 8 m^3).
Par exemple, la station *GD MAGHNIA* le dimanche requiert 14 m^3 de SP et 16 m^3 de GS, ce qui oblige l'algorithme à combiner stratégiquement plusieurs compartiments pour saturer la capacité du véhicule et éviter les retours à vide partiels.
- **Saturation par les gros consommateurs :** La station *SALAH* se distingue par des demandes massives atteignant fréquemment 60 m^3 au total (30 m^3 de chaque produit). Étant donné que la capacité maximale des plus gros porteurs de la flotte est de 30 m^3 , ces commandes saturer systématiquement deux véhicules complets ou nécessitent plusieurs rotations quotidiennes pour un même client.
- **Disparité géographique et contraintes de distance :** Le périmètre de distribution est marqué par une hétérogénéité spatiale importante. Si certains clients comme *GD REMCHI* sont situés à proximité immédiate du dépôt (1 km), d'autres comme *BOUKARABILA* (114 km) impactent lourdement le temps de rotation des chauffeurs et les coûts de carburant.
- **Spécificités des flux de produits :** Certaines livraisons sont exclusivement dédiées au Gazole, notamment pour les stations *HANAFI*, *GD ZIANIDES* ou *DERGAL*. Bien que cela simplifie le chargement technique, cela réduit les opportunités de mutualisation des produits dans un même trajet, à moins d'intégrer ces stations dans des tournées multi-clients optimisées.

L'ensemble de ces paramètres (hétérogénéité de la flotte, diversité des volumes et distances variables) confirme que la planification manuelle des tournées ne peut garantir une minimisation optimale des coûts de transport, justifiant ainsi l'application des algorithmes d'IA présentés dans la suite de ce travail.

3.5 Modélisation mathématique du problème de distribution

Le problème de distribution de Naftal au départ du dépôt de Remchi est modélisé comme un problème de tournées de véhicules (VRP) structuré par des trajets directs «Dépôt-Station-Dépôt». Cette approche, dictée par les impératifs de sécurité du dispatching, repose sur une pré-classification des demandes en quotas fixes selon le compartimentage réel des camions. Le modèle vise à minimiser la distance totale parcourue tout en imposant une optimisation du remplissage (camions pleins) et une gestion fluide du flux de chargement, limitée à six véhicules par rotation.

1. Ensembles

- $J = \{1, \dots, N\}$: ensemble des stations-service.
- $T = \{1, \dots, 26\}$: ensemble des camions disponibles.
- $P = \{GS, SP\}$: ensemble des produits.
- $R = \{1, \dots, N_R\}$: ensemble des rotations.
- $C_t = \{1, 2, 3, 4\}$: compartiments du camion t .
- $\tau = \{1, 2, 3, 4\}$: types de camions (groupes homogènes).
- K_j : nombre de visites nécessaires pour la station j .

2. Paramètres

- d_j^p : demande en produit p à la station j (m^3).
- $cap_{t,c}$: capacité du compartiment c du camion t .
- $Cap_t = \sum_c cap_{t,c}$: capacité totale du camion t .
- $dist_j$: distance dépôt $\rightarrow$ station j (km).
- $T_{j,k}$: ensemble des camions autorisés pour la visite k à la station j .
- $q_{j,k,t}^p$: quotas de produits pour la visite k de la station j par le camion t .

3. Variables de décision

- $x_{j,k,t,c,p,r} \in \{0, 1\}$: égale à 1 si le compartiment c du camion t livre le produit p à la station j lors de la visite k en rotation r .
- $y_{j,k,t,r} \in \{0, 1\}$: égale à 1 si le camion t visite la station j (visite k) en rotation r .
- $u_{t,r} \in \{0, 1\}$: égale à 1 si le camion t est utilisé en rotation r .

4. Fonction Objectif

Minimisation de la distance totale :

$$\text{Min } Z = \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k=1}^{K_j} (\text{dist}_j \cdot y_{j,k,t,r}) \quad (3.1)$$

5. Contraintes

C1 - Satisfaction de la demande : l'obligation de réaliser chaque visite planifiée pour une station par un camion autorisé, garantissant que les besoins en carburant sont satisfaits.

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T_{j,k}} y_{j,k,t,r} = 1 \quad \forall j \in J, k \in \{1, \dots, K_j\} \quad (3.2)$$

C2 - Unicité de destination par rotation : l'interdiction pour une même station de recevoir plus d'un camion durant une seule et même rotation afin de fluidifier les opérations de dépotage.

$$\sum_{k=1}^{K_j} \sum_{t \in T_{j,k}} y_{j,k,t,r} \leq 1 \quad \forall j, r \quad (3.3)$$

C3 - Unicité d'usage du compartiment : un compartiment spécifique d'un camion ne peut être utilisé qu'une seule fois (pour une station et un produit) par trajet.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1}^{K_j} \sum_{p \in P} x_{j,k,t,c,p,r} \leq 1 \quad \forall t, c, r \quad (3.4)$$

C4 - Unicité visite camion : un camion spécifique ne peut effectuer une visite donnée (k) d'une station qu'une seule fois sur l'ensemble de la période.

$$\sum_{r \in R} y_{j,k,t,r} \leq 1 \quad \forall j, k, t \quad (3.5)$$

C5 - Lien livraison-visite : la relation logique imposant qu'une livraison par compartiment ne peut avoir lieu que si le camion est effectivement affecté à la station correspondante.

$$x_{j,k,t,c,p,r} \leq y_{j,k,t,r} \quad \forall j, k, t, c, p, r \quad (3.6)$$

C6 - Règle du trajet direct : la contrainte opérationnelle de Naftal limitant chaque camion à une seule destination par rotation (pas de tournées multi-clients).

$$\sum_{j,k} y_{j,k,t,r} \leq 1 \quad \forall t, r \quad (3.7)$$

C7 - Maximum 6 camions par rotation : la limite physique du centre de chargement de Remchi en restreignant à six le nombre maximum de camions actifs par rotation.

$$\sum_{t \in T} u_{t,r} \leq 6 \quad \forall r \in R \quad (3.8)$$

Lien d'activation du camion : la cohérence entre les visites effectuées et l'état d'activité du camion pour assurer que chaque déplacement est comptabilisé.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1}^{K_j} y_{j,k,t,r} \leq |J| \cdot u_{t,r} \quad \forall t, r \quad (3.9)$$

C8 - Camion plein : l'exigence de rentabilité obligeant chaque camion utilisé à partir avec une charge totale égale à sa capacité maximale.

$$\sum_{j,k,c,p} cap_{t,c} \cdot x_{j,k,t,c,p,r} = Cap_t \cdot u_{t,r} \quad \forall t, r \quad (3.10)$$

C9 - Respect des quotas : l'ajustement précis des volumes livrés par les compartiments par rapport aux quotas calculés dynamiquement selon la demande de la station. La linéarité est assurée en égalant la somme des capacités des compartiments activés directement à la variable de quota $q_{j,k,t}^p$.

$$\sum_{c \in C_t} cap_{t,c} \cdot x_{j,k,t,c,p,r} = q_{j,k,t}^p \quad \forall j, k, t, p, r \quad (3.11)$$

C10 - Équité cumulée inter-camions du même type : Cette contrainte assure une répartition équitable de la charge de travail entre les camions appartenant à la même catégorie de capacité (T_τ). Elle impose qu'à chaque lot de rotation r , l'écart du cumul

des missions entre deux camions t et t' du même groupe ne peut excéder une unité :

$$\left| \sum_{r'=1}^r u_{t,r'} - \sum_{r'=1}^r u_{t',r'} \right| \leq 1 \quad \forall T_\tau, \forall t, t' \in T_\tau, t < t', \forall r \in R \quad (3.12)$$

3.6 Approche de résolution

L'approche de résolution adoptée dans ce travail repose sur la traduction du modèle mathématique en un programme informatique capable de fournir des plannings de distribution optimaux en un temps réduit, tout en offrant une interface de sortie exploitable par les décideurs.

3.6.1 Pré-traitement des quotas physiques : le module BFS

Avant de soumettre le problème au solveur MILP, une étape de pré-traitement détermine, pour chaque station et chaque type de camion, les couples de quotas (q_{GS}, q_{SP}) physiquement réalisables selon la structure en compartiments étanches de la flotte.

Contrainte physique et formulation

Chaque compartiment ne pouvant contenir qu'un seul produit, le **BFS** (*Best-Fit Search*) cherche le couple (q_{GS}, q_{SP}) vérifiant :

$$q_{GS} \in A_\tau, \quad q_{SP} \in A_\tau, \quad q_{GS} + q_{SP} = \text{Cap}_\tau \quad (3.13)$$

où A_τ est l'ensemble des *sommes atteignables* du type τ . Parmi les couples valides, le BFS retient celui qui **maximise** q_{GS} .

Structure algorithmique

Le BFS repose sur trois fonctions :

1. `sommes_atteignables( $t$ )` : calcule A_τ en partant de $\{0\}$ et en ajoutant itérativement chaque compartiment c_i :

$$A_\tau^{(i)} = A_\tau^{(i-1)} \cup \{a + c_i \mid a \in A_\tau^{(i-1)}\} \quad (3.14)$$

Exemple — $T3 [6, 7, 7, 7] : \{0\} \rightarrow \{0, 6\} \rightarrow \{0, 6, 7, 13\} \rightarrow \dots \rightarrow \{0, 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27\}$

2. `quotas_strict( $\text{cap}$ ,  $\text{rgs}$ ,  $\text{rsp}$ )` : sélectionne le couple (q_{GS}, q_{SP}) tel que $q_{GS} + q_{SP} = \text{cap}$, $q_{GS} \leq d_{GS}$, $q_{SP} \leq d_{SP}$, et $q_{GS}, q_{SP} \in A_\tau$.

3. `decomposer_bfs`(d_{GS} , d_{SP}) : recherche en largeur sur les états (d_{GS} , d_{SP}), avec élagage des états déjà visités, retournant le chemin minimisant le nombre de camions.

Pourquoi pas le MILP pour les quotas ?

Avec C_t compartiments, le BFS teste au plus $2^4 = 16$ combinaisons en microsecondes. L'intégrer dans le MILP ajouterait :

$$26 \times 4 \times 2 \times 10 = 2080 \quad \text{variables binaires supplémentaires}$$

provoquant une explosion combinatoire incompatible avec les contraintes opérationnelles. Les quotas produits sont ensuite transmis comme **paramètres fixes** au MILP.

3.6.2 Post-traitement : gestion des manques et équité kilométrique

Après validation du planning par le MILP, la **Phase 3** assure deux responsabilités : la détection des manques et la redistribution équitable des rotations.

Détection des manques

La fonction `collecter_resultats` compare les volumes livrés à la demande initiale et distingue deux types de manques :

- **Manque structurel** : la modularité des compartiments empêche de satisfaire exactement la demande. Par exemple, pour 25 m³ GS et 8 m³ SP, le BFS livre 23 m³ et 7 m³, soit un manque de 2 m³ GS et 1 m³ SP.
- **Manque opérationnel** : si la demande est trop faible ou incompatible avec le chargement plein obligatoire, la station est marquée **NON SERVIE** et exclue du MILP, avec un manque de 100 % enregistré dans l'onglet de suivi.

Redistribution kilométrique : `redistribuer_rotations_par_km`

La contrainte **C10** garantit l'équité sur le *nombre* de rotations, mais le MILP ignore les distances réelles. Sans correction, un même camion pourrait cumuler toutes les stations lointaines, créant un déséquilibre d'usure inacceptable.

Cette fonction réassigne les identités des camions **sans modifier le planning optimal**, en appliquant à chaque slot de rotation :

$$\tau^* = \arg \min_{\tau \in \mathcal{E}} \text{km_cumul}(\tau) \quad (3.15)$$

où $\mathcal{E}$ est l'ensemble des camions éligibles selon C10. Le compteur de τ^* est ensuite mis à jour avec la distance aller-retour de la rotation.

Phase	Responsabilité	Équité assurée
BFS	Calcul des quotas physiques (q_{GS}, q_{SP})	Faisabilité des compartiments
MILP	Planification globale des trajets	Nombre de rotations (C10)
Post-traitement Python	Réassignation des camions	Kilomètres cumulés (arg min)

Tab. 3.9 : Architecture hybride en trois phases : BFS, MILP et post-traitement

3.6.3 Choix de l'outil de résolution

La résolution du modèle a été effectuée en utilisant le langage de programmation **Python**, reconnu pour sa flexibilité et sa richesse en bibliothèques scientifiques. Pour la partie optimisation, nous avons utilisé la bibliothèque **PuLP**.

Définition de PuLP : PuLP est une bibliothèque de modélisation open-source pour la programmation linéaire sous Python. Elle permet de définir des variables, des fonctions objectifs et des contraintes de manière intuitive, puis de les transmettre à des solveurs numériques (tels que CBC) pour trouver la solution optimale.

Le choix de PuLP, de préférence à un outil propriétaire comme CPLEX, se justifie par son accessibilité (open-source), son intégration native avec l'écosystème Python et sa performance adaptée à la taille de notre problème, offrant des temps de résolution quasi-instantanés.

3.6.4 Stratégie de résolution hybride

Étant donné la complexité du compartimentage des camions-citernes, nous avons développé une approche en deux étapes :

1. **Phase de Classification (Pré-optimisation) :** Avant l'appel au solveur, un algorithme de classification analyse la demande brute. Il transforme ces besoins en «quotas» de livraison compatibles avec les capacités réelles des compartiments (ex : 7m^3 , 8m^3), éliminant ainsi les solutions techniquement irréalisables.
2. **Phase d'Optimisation Linéaire :** Le modèle est résolu de manière itérative pour chaque rotation journalière. Le moteur d'optimisation affecte les camions aux stations en minimisant la distance totale, tout en respectant strictement la règle du «camion plein» et la limite de chargement au dépôt de Remchi.

3.6.5 Implémentation de la solution logicielle et résultats

Le passage de la modélisation mathématique théorique à un système d'aide à la décision opérationnel a nécessité une phase d'intégration structurée en langage Python. Dans un premier temps, les équations du modèle de programmation linéaire (MILP) ont été traduites algorithmiquement à l'aide de bibliothèques spécialisées, permettant de définir informatiquement les variables de décision et les contraintes logistiques.

Ce moteur de calcul a ensuite été couplé à un solveur de haute performance pour garantir l'obtention de solutions optimales en un temps réduit. Enfin, l'ensemble de cette logique a été encapsulé au sein d'une interface graphique intuitive, transformant ainsi un modèle abstrait en une application concrète capable de traiter les données réelles et de générer des plannings de distribution directement exploitables.

Interface d'ingestion et de contrôle des flux de données

L'interface de l'application a été conçue pour centraliser les commandes et automatiser l'ingestion des données sources. Elle s'articule autour de trois modules principaux : Flotte, qui répertorie l'ensemble des camions dont dispose Naftal (petit de $12m^3$, moyen de $15m^3$, grand de $27m^3$ et super de $30m^3$) et permet de signaler manuellement les véhicules indisponibles (en cas de panne ou de dysfonctionnement) afin de les exclure de l'optimisation ; Stations, listant les points de vente à livrer ; et Journée, pour la gestion opérationnelle. La grande innovation réside dans le module d'optimisation, qui permet désormais de choisir entre deux moteurs de résolution : le modèle MILP pour une approche mathématique rigoureuse et le modèle MARL (Multi-Agent Reinforcement Learning) pour une approche par intelligence artificielle. Enfin, l'interface propose un mode d'affichage adaptatif (Thème Clair / Sombre) pour garantir un confort visuel optimal lors de l'utilisation en temps réel.

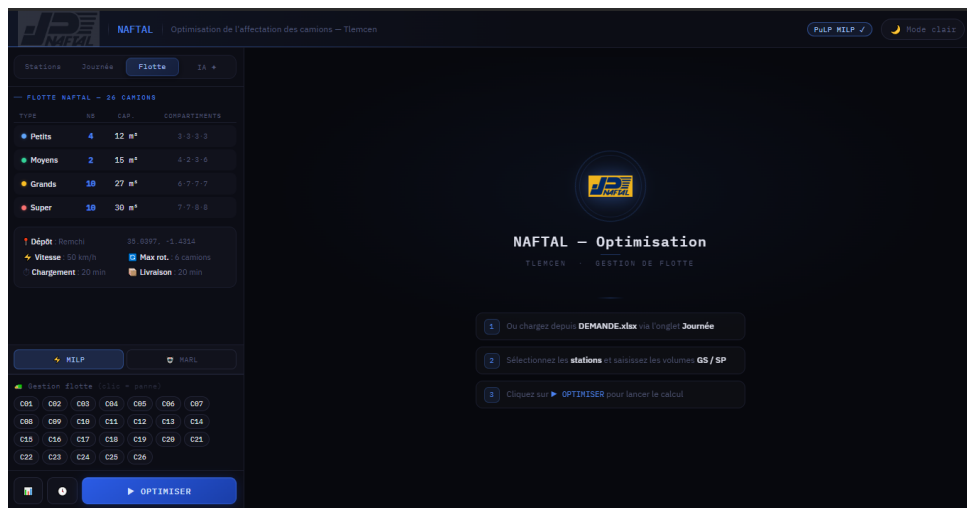


Fig. 3.1 : Architecture visuelle et opérationnelle de l'application.

Le fonctionnement de l'application repose sur une séquence d'actions simplifiée permettant de transformer les données brutes de Naftal en un plan de distribution. Cette procédure se déroule en trois étapes clés :

1. **Exploration et sélection** : L'utilisateur utilise le bouton « Parcourir » pour naviguer dans l'arborescence du poste de travail et sélectionner le document Microsoft Excel contenant les demandes journalières.
2. **Extraction intelligente** : Une fois le fichier chargé, l'application analyse automatiquement le contenu et permet de choisir, via un menu déroulant, la journée spécifique à traiter (ex : Dimanche).

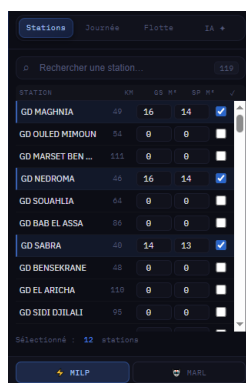


Fig. 3.2 : a) Sélection des stations

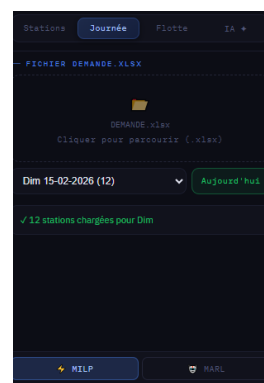


Fig. 3.3 : b) Choix de la journée

Comme illustré l'utilisateur commence par parcourir le répertoire pour charger le document Excel de Naftal. Une fois le fichier validé, l'application extrait automatiquement les périodes disponibles, permettant de définir la journée cible via un menu déroulant.

3. **Exécution du moteur de calcul** : L'activation du bouton « Optimiser » déclenche le moteur de résolution basé sur la programmation linéaire en nombres entiers (MILP) (lance simultanément l'algorithme de résolution mathématique). Les résultats sont immédiatement restitués via un tableau de bord dynamique.

Évaluation des performances et indicateurs globaux

L'interface de l'application fournit une lecture immédiate de l'efficacité de la solution calculée (Figure 3.4). Ce bandeau supérieur regroupe les indicateurs clés de performance (KPI) essentiels à la prise de décision.

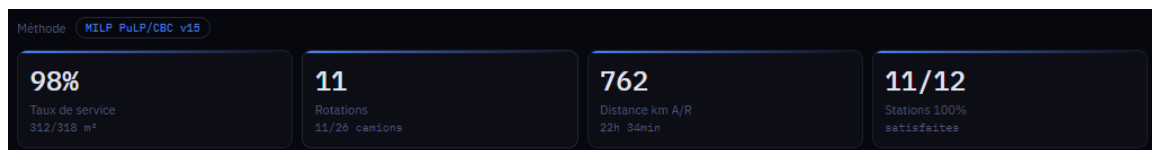


Fig. 3.4 : Tableau de bord de synthèse et indicateurs de performance globale.

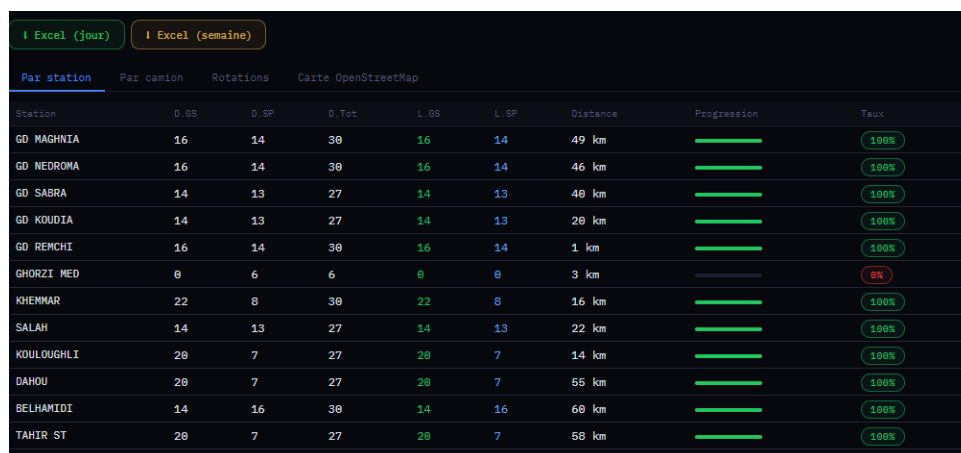
L'interprétation de ces résultats met en évidence la robustesse du modèle :

- **Validation algorithmique** : Le statut « PuLP MILP » garantit que la configuration proposée est l'optimum mathématique global, assurant ainsi à Naftal la solution la plus économique possible.
- **Rationalisation de la flotte** : Le système parvient à satisfaire la demande en n'utilisant que **7 camions sur une flotte de 26 véhicules** disponibles. Cette réduction drastique du nombre de camions engagés permet de minimiser les coûts fixes et l'empreinte carbone du transport.
- **Qualité de service** : Le taux de satisfaction de **98%** atteste que la quasi-totalité des commandes en carburant est honorée, validant la fiabilité de l'algorithme face aux contraintes de compartimentage.
- **Taux de couverture géographique** : Sur les 12 stations ayant formulé une demande, l'algorithme parvient à planifier la livraison de **11 stations**. Ce résultat démontre une excellente capacité de réponse aux besoins du réseau de distribution.
- **Optimisation kilométrique et allers-retours** : Grâce à une gestion intelligente des tournées, le système ne mobilise que **7 camions sur un total de 26** disponibles. Cette réduction drastique limite les allers-retours inutiles vers le dépôt, minimisant le kilométrage total et les coûts de transport associés pour Naftal.

Analyse opérationnelle de l'ordonnancement des tournées

Cette section détaille l'affectation des ressources matérielles et la structuration des flux de livraison générés par le modèle, permettant de passer d'une solution mathématique à une exécution logistique concrète. Le tableau de bord permet une lecture croisée des résultats. L'interprétation doit se faire selon trois axes distincts : par station, camion, par et rotation.

- **Analyse par Station** : Cet onglet permet de contrôler la satisfaction des commandes. Pour chaque station (ex : *GD MAGHNIA*, *GD NEDROMA*), l'interface affiche en temps réel la demande initiale (*D.GS*, *D.SP*, *D.Tot*) et le volume effectivement livré (*L.GS*, *L.SP*). Une barre de **progression verte** associée à un **taux de 100%** confirme visuellement que la demande a été intégralement comblée. En cas d'impossibilité de livraison (ex : station *GHORZI MED*), le système affiche un **taux de 0% en rouge** et une barre de progression vide, signalant immédiatement une anomalie ou une contrainte bloquante.



Station	D.GS	D.SP	D.Tot	L.GS	L.SP	Distance	Progression	Taux
GD MAGHNIA	16	14	30	16	14	49 km		100%
GD NEDROMA	16	14	30	16	14	46 km		100%
GD SABRA	14	13	27	14	13	48 km		100%
GD KOUDIA	14	13	27	14	13	28 km		100%
GD REMCHI	16	14	30	16	14	1 km		100%
GHORZI MED	0	6	6	0	0	3 km		0%
KHEMMAR	22	8	30	22	8	16 km		100%
SALAH	14	13	27	14	13	22 km		100%
KOULOUGHLI	28	7	27	28	7	14 km		100%
DAHOU	28	7	27	28	7	65 km		100%
BELHAMIDI	14	16	30	14	16	68 km		100%
TAHIR ST	28	7	27	28	7	68 km		100%

Fig. 3.5 : Plan de distribution détaillé par point de vente et compartimentage.

- **Analyse par Camion** : Ce module offre une fiche d'identité opérationnelle pour chaque véhicule sollicité (ex : *C07*, *C10*, *C17*). On y retrouve la catégorie de capacité (ex : *27 m³ Grand*, *30 m³ Super*) ainsi que des indicateurs de performance clés : distance parcourue en km, temps de trajet estimé et taux d'utilisation. Cette vue permet de valider visuellement le respect de la **contrainte d'équité C12** : chaque bloc affiche le badge "*1 rot.*" (1 rotation), démontrant que l'algorithme mobilise l'ensemble de la flotte de manière équilibrée avant d'envisager une seconde mission pour un même véhicule.

Fig. 3.6 : Identification et gestion capacitive de la flotte mobilisée.

- Analyse par Rotation :** Cette vue synthétise l'organisation temporelle des départs du dépôt. Le système segmente les livraisons en vagues (ex : *Rotation 1* avec 6 camions pour une distance moyenne de *103 km A/R*, suivie de la *Rotation 2* avec 5 camions pour *29 km A/R*). Ce tableau détaillé liste le couplage précis entre le camion, la station desservie (ex : *C07* vers *TAHIR ST*) et le mix produit transporté (*20 m³ de GS* et *7 m³ de SP*), garantissant une exploitation maximale des compartiments de chaque citerne.

Rotation 1 – 6 camion(s) – dist. moy. 103 km A/R				
Camion	Station	Distance A/R	GS livré	SP livré
C07	TAHIR ST	116 km	20 m ³	7 m ³
C08	DAHOU	110 km	20 m ³	7 m ³
C09	GD SABRA	80 km	14 m ³	13 m ³
C17	GD MAGHNIA	98 km	16 m ³	14 m ³
C18	BELHAMIDI	120 km	14 m ³	16 m ³
C19	GD NEDROMA	92 km	16 m ³	14 m ³
Rotation 2 – 5 camion(s) – dist. moy. 29 km A/R				
Camion	Station	Distance A/R	GS livré	SP livré
C10	SALAH	44 km	14 m ³	13 m ³
C11	GD KOUDIA	40 km	14 m ³	13 m ³
C12	KOULOUGHLI	28 km	20 m ³	7 m ³
C20	KHEMMAR	32 km	22 m ³	8 m ³
C21	GD REMCHI	2 km	16 m ³	14 m ³

Fig. 3.7 : Structuration des rotations et indicateurs de performance des tournées.

Supervision géographique et visualisation cartographique

L'ultime étape de notre système d'aide à la décision consiste en la projection des tournées optimisées sur une interface cartographique dynamique, exploitant les données de *OpenStreetMap*.

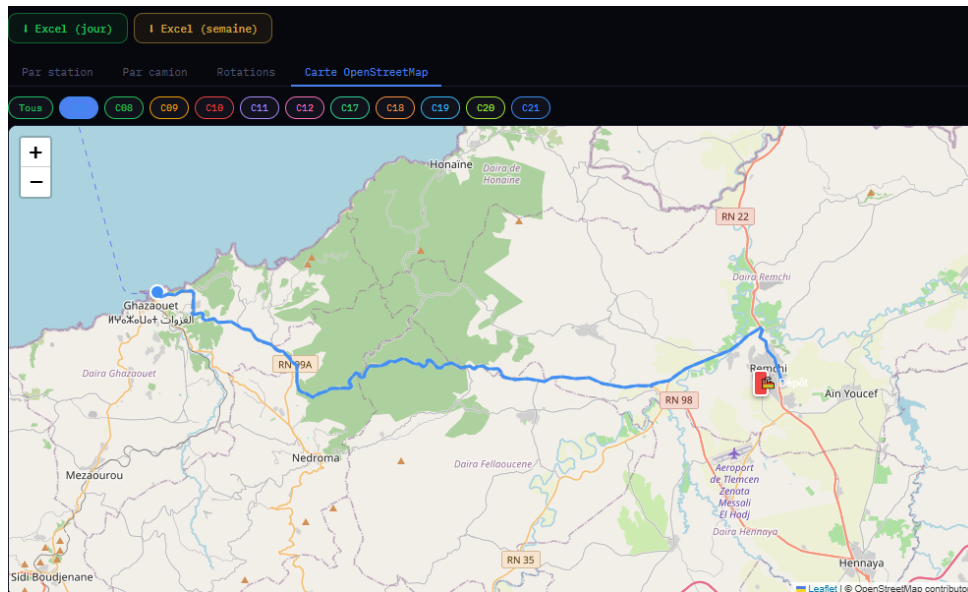


Fig. 3.8 : Visualisation spatiale des points de livraison et des trajectoires sous OpenStreetMap.

L'intégration de cette couche cartographique permet de transformer les coordonnées GPS des stations-service en marqueurs visuels. L'interprétation de la Figure 3.8 met en évidence :

- **La validation spatiale :** Les marqueurs confirment la position réelle des 12 stations de la wilaya de Tlemcen par rapport au dépôt de Remchi.
- **La cohérence du réseau :** On observe que les stations sont réparties le long des axes routiers majeurs, ce qui valide les calculs de distances et de temps de trajet effectués par le solveur.
- **L'aide à l'exploitation :** Cette vue offre au gestionnaire de Naftal une perception immédiate de la zone de couverture géographique pour la journée d'exploitation sélectionnée.

Génération de rapports et export de données

Afin de faciliter l'exploitation des résultats par les services logistiques de Naftal, nous avons intégré une fonctionnalité d'exportation automatique structurée autour de deux leviers décisionnels. Un premier bouton, **Excel (jour)**, permet de générer instantanément les feuilles de route opérationnelles en récapitulant pour chaque véhicule les stations à livrer, les quantités exactes de Gasoil et de Sans Plomb par compartiment, ainsi que les indicateurs de distance et de temps. En complément, un second bouton, **Excel (semaine)**, assure une vision plus globale en exportant un rapport hebdomadaire regroupant l'ensemble des données calculées sur la période pour un suivi statistique à long terme.

Cette transition du numérique vers un format Microsoft Excel exploitable garantit une continuité fluide entre l’optimisation algorithmique et l’exécution opérationnelle sur le terrain.

3.6.6 Analyse et interprétation des résultats journaliers

Afin de valider la performance du système développé, nous avons soumis l’application à des tests sur plusieurs journées types basées sur les variations réelles de la demande chez Naftal. Cette section propose une interprétation détaillée pour chaque journée de test, permettant d’observer comment l’algorithme adapte la configuration des tournées et le remplissage des compartiments. Pour chaque scénario, nous analysons la pertinence géographique des trajets ainsi que la capacité du modèle à prioriser la distribution du Gasoil, conformément aux besoins prédominants de l’entreprise, avant de consolider ces résultats dans une synthèse globale de performance.

Interprétation des résultats du dimanche 15 février 2026

L’analyse de la journée du dimanche se concentre sur l’onglet «Par camion», qui illustre l’affectation optimale de la flotte. Cette vue permet de valider la pertinence du modèle MILP dans la gestion opérationnelle :

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Dim 15-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 762 km Camions : 11 Stations : 11/12 Volume : 312/318 m³ (98.1%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m³)	Dem. SP (m³)	Total (m³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m³)	Livré SP (m³)	Manque (m³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	16	14	30	49	C17★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 38min
S02	GD NEDROMA	16	14	30	46	C19★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 30min
S03	GD SABRA	14	13	27	40	C09/R1(V1)	14	13	0	✓ exact	2h 16min
S04	GD KOUDIA	14	13	27	20	C11/R2(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 28min
S05	GD REMCHI	16	14	30	1	C21★/R2(V1)	16	14	0	✓ exact	42min
S06	GHORZI MED	0	6	6	3	—				⚠ NON SERVI	—
S07	KHEMMAR	22	8	30	16	C20★/R2(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 18min
S08	SALAH	14	13	27	22	C10/R2(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 33min
S09	KOULOUGHLI	20	7	27	14	C12/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	1h 14min
S10	DAHOU	20	7	27	55	C08/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 52min
S11	BELHAMIDI	14	16	30	60	C18★/R1(V1)	14	16	0	✓ exact	3h 04min
S12	TAHIR ST	20	7	27	58	C07/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 59min

Fig. 3.9 : Détail de l’affectation des camions et des rotations pour la journée du dimanche

- **Performance opérationnelle :** Avec un taux de service de **98,1 %**, cette gestion assure une planification rationnelle. Le système a validé la livraison de **312 m³** sur une demande globale de **318 m³**, ne générant que des tournées physiquement réalisables et économiquement optimales.

- **Analyse rigoureuse des manques** : Le système affiche un manque pour la station **Ghorzi Med**, ce qui constitue une validation majeure du respect des contraintes strictes. En effet, cette station présente une demande de seulement **6 m³ de SP**. Or, la flotte disponible pour cette journée ne comporte aucun véhicule de cette capacité, les plus petits camions étant de **12 m³**.
- **Contrainte de remplissage à 100 %** : Couplé à l'absence de petits porteurs, le modèle impose une saturation totale des compartiments pour garantir la rentabilité et la sécurité du transport. Satisfaire une demande de **6 m³** avec un véhicule de **12 m³** (rempli à seulement 50 %) violerait cette contrainte fondamentale. Le modèle a donc logiquement exclu cette livraison.
- **Optimisation de l'équité de la flotte** : L'examen des résultats montre un respect strict de l'équité entre les camions d'une même catégorie. Le modèle mobilise **11 camions différents** (C07 à C12 pour la catégorie Grand et C17 à C21 pour la catégorie Super), réalisant chacun une seule rotation (*1 rot.*). Cette répartition évite la surcharge d'un véhicule spécifique et équilibre l'usure sur l'ensemble du parc disponible.
- **Efficacité logistique et temporelle** : Les livraisons sont organisées en deux vagues distinctes pour optimiser l'usage du dépôt. La **Rotation 1** couvre les destinations les plus éloignées avec une moyenne de **103 km A/R**. La **Rotation 2** prend le relais avec des distances plus courtes (moyenne de **29 km A/R**), incluant la station de Remchi située à proximité immédiate du centre de chargement (**2 km A/R**).

Interprétation des résultats du lundi 16 février 2026

L'analyse de la journée du lundi révèle une montée en charge significative du réseau de distribution, mettant à l'épreuve les capacités d'ordonnancement du modèle.

- **Performance et volume traité** : Le système affiche un taux de service de **98,3 %**, avec **573 m³** livrés sur une demande totale de **583 m³**. Cette légère baisse par rapport au dimanche s'explique par une saturation plus élevée de la flotte disponible face à une demande quasi doublée.
- **Optimisation de l'usage des véhicules** : Contrairement au dimanche, le modèle maximise ici l'usage des ressources en autorisant des rotations successives. Le camion **C06** (catégorie Moyen), par exemple, réalise trois rotations successives pour desservir les stations *GD Honaine* et *Kibou*, prouvant l'efficacité de l'ordonnancement des tournées sur une même journée.

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Lun 16-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 1626 km Camions : 21 Stations : 18/21 Volume : 573/583 m ³ (98.3%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m ³)	Dem. SP (m ³)	Total (m ³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m ³)	Livré SP (m ³)	Manque (m ³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	7	20	27	49	C11/R2(V1)	7	20	0	✓ exact	1h 54min
S02	GD OULED MIMOUN	20	7	27	54	C10/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 01min
S03	GD NEDROMA	24	7	31	46	C18★/R2(V1)	23	7	1	▲ -1m ³	1h 49min
S04	GD HONAINE	9	6	15	40	C06/R2(V1)	9	6	0	✓ exact	1h 40min
S05	GD KOUDIA	14	13	27	20	C14/R3(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 10min
S06	GD REMCHI	22	16	38	1	C25★/R4(V1)	22	8	8	▲ -8m ³	42min
S07	KIBOU	11	4	15	8	C06/R4(V1)	11	4	0	✓ exact	52min
S08	KHEMMAR	22	8	30	16	C19★/R3(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 04min
S09	SARL MADINA	16	14	30	25	C21★/R3(V1)	16	14	0	✓ exact	1h 18min
S10	SCS IMAMA	14	16	30	25	C22★/R3(V1)	14	16	0	✓ exact	1h 18min
S11	BELARBI	17	14	31	25	C23★/R3(V1)	16	14	1	▲ -1m ³	1h 18min
S12	CHOUKCHOU	6	6	12	30	C01/R2(V1)	6	6	0	✓ exact	1h 25min
S13	SALAH	30	30	60	22	C20★/R3(V2)	30	30	0	✓ exact	1h 13min
S14	KOULOUGHLI	16	14	30	14	C24★/R4(V1)	16	14	0	✓ exact	1h 01min
S15	HANAFI	15	0	15	81	C05/R1(V1)	15	0	0	✓ exact	2h 42min
S16	DAHOU	20	7	27	55	C07/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 02min
S17	BELHAMIDI	16	14	30	60	C17★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 10min
S18	BOUCHAREB	20	7	27	36	C12/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	1h 34min
S19	BOUIZEM	20	7	27	85	C09/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 48min
S20	HDEYLI	20	7	27	64	C08/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 16min
S21	ADEL BELHOUT	21	6	27	35	C13/R2(V1)	21	6	0	✓ exact	1h 32min

Fig. 3.10 : Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du lundi

- **Analyse des manques partiels** : On observe des manques stratégiques sur certaines stations (ex : **-1 m³ pour Nedroma**, **-8 m³ pour Remchi**). Ces ajustements sont le résultat d'un arbitrage mathématique : le modèle préfère livrer des quantités exactes correspondant à la capacité totale des camions (camion plein) plutôt que d'effectuer des trajets supplémentaires peu rentables pour des reliquats de commande.
- **Gestion des stations isolées** : Le système démontre sa capacité à gérer des destinations lointaines comme **Hanafi** (81 km) ou **Bouizem** (85 km). Malgré l'éloignement, ces stations reçoivent des livraisons exactes avec des temps de trajet respectifs de **3h54min** et **4h04min**, confirmant la robustesse de la planification géographique.
- **Saturation de la flotte** : Pour répondre à cette demande massive, le modèle a mobilisé **21 camions** effectuant un total de **1626 km A/R**. L'équilibre entre les différentes catégories de camions (Petits, Moyens, Grands et Super) est maintenu pour garantir que chaque station reçoive le mix de produits (GS/SP) approprié à ses cuves.

Interprétation des résultats du mardi 17 février 2026

L'analyse du mardi 17 février révèle une charge de travail assez élevée pour le réseau, avec une demande globale s'élevant à 718 m^3 . Cette journée met en évidence la capacité du modèle à prioriser les flux sous forte pression.

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Mar 17-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 3020 km Camions : 21 Stations : 18/27 Volume : 678/718 m ³ (94.4%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m ³)	Dem. SP (m ³)	Total (m ³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m ³)	Livré SP (m ³)	Manque (m ³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	16	14	30	49	C22★/R2(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 38min
S02	GD NEDROMA	21	6	27	46	C09/R2(V1)	21	6	0	✓ exact	2h 30min
S03	GD SOUAHLIA	16	14	30	64	C19★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	3h 14min
S04	GD SIDI DJILALI	22	8	30	95	C20★/R1(V1)	22	8	0	✓ exact	4h 28min
S05	GD KOUDIA	14	13	27	20	C12/R4(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 28min
S06	GD REMCHI	14	22	36	1	C22★/R5(V1)	14	16	6	⚠ -6m ³	42min
S07	GD ZIANIDE	13	0	13	39	C02/R3(V1)	12	0	1	⚠ -1m ³	2h 14min
S08	KHEROUSSE	7	6	13	7	C03/R5(V1)	6	6	1	⚠ -1m ³	57min
S09	KHEMMAR	15	15	30	16	C24★/R4(V1)	15	15	0	✓ exact	1h 18min
S10	SARL MADINA	16	14	30	25	C24★/R3(V1)	16	14	0	✓ exact	1h 40min
S11	SCS IMAMA	14	13	27	25	C11/R4(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 40min
S12	BELARBI	17	14	31	25	C23★/R4(V1)	16	14	1	⚠ -1m ³	1h 40min
S13	CHOUKCHOU	3	8	11	30	—				⚠ NON SERVI	—
S14	BOUDGHENE STAMBOULI	13	14	27	30	C10/R3(V1)	13	14	0	✓ exact	1h 52min
S15	SALAH	30	30	60	22	C26★/R3(V1)	30	30	0	✓ exact	1h 33min
S16	HAMDI	10	0	10	67	—				⚠ NON SERVI	—
S17	PURTEC	22	8	30	27	C23★/R3(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 45min
S18	LACHGUEUR	17	14	31	63	C18★/R1(V1)	16	14	1	⚠ -1m ³	3h 11min
S19	KOULOUGHLI	22	8	30	14	C26★/R4(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 14min
S20	ZIANE	20	7	27	79	C07/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	3h 50min
S21	DAHOU	20	7	27	55	C08/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 52min
S22	HAMDOUNE	10	6	16	75	C05/R1(V1)	10	5	1	⚠ -1m ³	3h 40min
S23	BELHAMIDI	16	14	30	60	C22★/R2(V1)	16	14	0	✓ exact	3h 04min
S24	TAHIR ST	10	13	23	58	C06/R2(V1)	10	5	8	⚠ -8m ³	2h 59min
S25	AISSAT	6	6	12	58	C01/R2(V1)	6	6	0	✓ exact	2h 59min
S26	ADEL BELHOUT	30	0	30	35	C25★/R3(V1)	30	0	0	✓ exact	2h 04min
S27	DERGAL	30	0	30	63	C20★/R1(V1)	30	0	0	✓ exact	3h 11min

Fig. 3.11 : Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du mardi

- **Optimisation du Taux de Service** : Le système assure la livraison de 678 m^3 , atteignant un taux de service de **94,4 %**. Pour réaliser ce plan, **21 camions** parcourent une distance totale de **2146 km**.
- **Rigueur des contraintes de capacité (Cas Non Servis)** : Les stations **Choukchou (S13)** et **Hamdi (S16)** ne sont délibérément pas servies. Leurs demandes respectives (11 m^3 et 10 m^3) sont inférieures au seuil critique de 12 m^3 , correspondant à la capacité minimale d'un camion de la flotte. Le modèle exclut ces livraisons pour respecter la contrainte de remplissage à 100 %, garantissant la sécurité et la rentabilité du transport.
- **Planification par rotations successives** : L'affectation des ressources est structurée selon un ordre chronologique de départ du dépôt, allant de la première à la

cinquième rotation (*R1* à *R5*). On observe, par exemple, que le camion **C20** est mobilisé dès la première rotation (*R1*) pour desservir la station *Dergal*. À l’opposé, les camions **C24** et **C26** interviennent plus tardivement dans la journée, étant respectivement programmés pour les quatrième (*R4*) et cinquième (*R5*) rotations vers les stations *Salah* et *Remchi*. Cet ordonnancement systématique des rotations permet une gestion fluide et optimisée de la file d’attente au niveau du centre de chargement.

- **Précision géographique et temporelle :** Le modèle gère efficacement des destinations variées comme **Ziane** (79 km) avec un temps A/R de 3h50min ou **Sidi Djilali** (95 km) en 4h28min. La station la plus éloignée de ce scénario est désormais **Sidi Djilali**, traitée avec une livraison exacte de **30 m³**.
- **Gestion des manques résiduels :** Les rares écarts constatés, notamment les **-6 m³** à *Remchi*, résultent de l’optimisation par compartiments. Le modèle sature les capacités de transport disponibles pour éviter les trajets à vide, quitte à laisser un léger reliquat de demande sur les stations à très forte affluence.

Interprétation des résultats du mercredi 18 février 2026

L’analyse de la journée du mercredi révèle une gestion équilibrée du réseau avec une demande globale de **534 m³**, traitée avec une grande efficacité opérationnelle.

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Mer 18-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 1654 km Camions : 19 Stations : 16/20 Volume : 513/534 m ³ (96.1%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m ³)	Dem. SP (m ³)	Total (m ³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m ³)	Livré SP (m ³)	Manque (m ³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	22	8	30	49	C19★/R2(V1)	22	8	0	✓ exact	2h 38min
S02	GD NEDROMA	16	14	30	46	C20★/R2(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 30min
S03	GD SOUAHLIA	16	14	30	64	C17★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	3h 14min
S04	GD BAB EL ASSA	20	7	27	86	C09/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	4h 06min
S05	GD BENSEKRANE	7	6	13	48	C01/R2(V1)	6	6	1	▲ -1m ³	2h 35min
S06	GD KOUDIA	14	13	27	20	C12/R3(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 28min
S07	GD REMCHI	22	16	38	1	C23★/R4(V1)	22	8	8	▲ -8m ³	42min
S08	KIBOU	11	4	15	8	C06/R4(V1)	11	4	0	✓ exact	59min
S09	KHEMMAR	22	8	30	16	C21★/R3(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 18min
S10	SARL MADINA	14	13	27	25	C13/R3(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 40min
S11	GUELLIL	12	0	12	28	C02/R3(V1)	12	0	0	✓ exact	1h 47min
S12	BELARBI	17	14	31	25	C22★/R3(V1)	16	14	1	▲ -1m ³	1h 40min
S13	CHOUKCHOU	9	6	15	30	C05/R2(V1)	9	6	0	✓ exact	1h 52min
S14	SALAH	30	27	57	22	C18★/R2(V1)	30	27	0	✓ exact	1h 33min
S15	KOULOUGHLI	22	8	30	14	C24★/R4(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 14min
S16	DAHOU	20	7	27	55	C10/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 52min
S17	BELHAMIDI	16	10	26	60	C06/R1(V1)	15	0	11	▲ -11m ³	3h 04min
S18	ZEDAZI	20	7	27	90	C07/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	4h 16min
S19	TAHIR PM	15	0	15	60	C05/R1(V1)	15	0	0	✓ exact	3h 04min
S20	PVA SIRIR	20	7	27	58	C08/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 59min

Fig. 3.12 : Détail de l’affectation des camions et des rotations pour la journée du mercredi

- **Performance globale :** Le modèle atteint un taux de service de **96,1 %**, livrant un volume total de **513 m^3** . Cette performance est réalisée avec une flotte de **19 camions** parcourant une distance totale de **1654 km**.
- **Efficacité des rotations successives :** La planification maintient une structure rigoureuse en quatre rotations (*R1* à *R4*). Les camions **C17**, **C09**, **C07** et **C08** sont mobilisés dès la première rotation (*R1*) pour couvrir les destinations les plus lointaines comme *Zedazi* (90 km) ou *Bab El Assa* (86 km). En fin de journée, la quatrième rotation (*R4*) est utilisée pour finaliser les livraisons de proximité comme *Remchi* et *Koulougli*.
- **Gestion des destinations à longue distance :** Le cas de la station **Zedazi (S18)** est exemplaire : située à **90 km** du dépôt, elle reçoit une livraison exacte de **27 m^3** en **4h16min**, démontrant que le modèle ne sacrifie pas les points périphériques malgré l'éloignement.
- **Optimisation par saturation des compartiments :** Fidèle à la contrainte de remplissage à 100 %, le système a généré des manques stratégiques pour préserver la rentabilité. La station **Belhamidi (S17)** affiche un manque de **11 m^3** car le volume résiduel ne permettait pas de remplir un compartiment complet de manière sécurisée. De même, le manque de **8 m^3** à *Remchi* résulte de l'ajustement automatique du modèle à la capacité physique des citernes mobilisées.
- **Fiabilité des livraisons :** Sur les 20 stations programmées, la grande majorité (**16 stations**) reçoivent une livraison *exacte*. Cela prouve que l'algorithme parvient à faire coïncider presque parfaitement l'offre et la demande tout en respectant les fenêtres de temps de trajet (ex : *PVA Sirir* en 2h59min).

Interprétation des résultats du jeudi 19 février 2026

La journée du jeudi se caractérise par une activité logistique record pour répondre à une demande de **792 m^3** .

- **Performance globale sous haute pression :** Le modèle démontre sa capacité de montée en charge en atteignant un taux de service de **97,7 %** sur une demande totale de **792 m^3** . Cette performance a nécessité la mobilisation de la quasi-totalité de la flotte, soit **23 camions**, pour une distance parcourue de **2186 km A/R**.
- **Gestion rigoureuse des livraisons partielles (Optimisation des Manques) :** Le système enregistre un manque total de **18 m^3** réparti sur 6 stations. L'analyse du cas de **GD NEDROMA (S02)** est particulièrement révélatrice : sur une demande de

Chapitre 3. Optimisation et Modélisation Mathématique de la Distribution de Carburants : Cas de Naftal Tlemcen

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Jeu 19-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 2186 km Camions : 23 Stations : 22/28 Volume : 774/792 m³ (97.7%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m³)	Dem. SP (m³)	Total (m³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m³)	Livré SP (m³)	Manque (m³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	14	13	27	49	C10/R2(V1)	14	13	0	✓ exact	2h 38min
S02	GD NEDROMA	21	10	31	46	C13/R2(V1)	21	6	4	⚠ -4m³	2h 30min
S03	GD SABRA	20	7	27	40	C14/R3(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 16min
S04	GD HONAINAINE	13	14	27	40	C15/R3(V1)	13	14	0	✓ exact	2h 16min
S05	GD KOUDIA	14	13	27	20	C14/R4(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 28min
S06	GD REMCHI	22	16	38	1	C25★/R5(V1)	22	8	8	⚠ -8m³	42min
S07	GHORZIAB	21	6	27	20	C16/R4(V1)	21	6	0	✓ exact	1h 28min
S08	KIBOU	23	7	30	8	C26★/R5(V1)	23	7	0	✓ exact	59min
S09	BENBABOUCHE	7	6	13	20	C03/R4(V1)	6	6	1	⚠ -1m³	1h 28min
S10	KHEMMAR	15	15	30	16	C24★/R5(V1)	15	15	0	✓ exact	1h 18min
S11	SARL MADINA	14	13	27	25	C15/R4(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 40min
S12	GUELLIL	0	27	27	28	C16/R3(V1)	0	27	0	✓ exact	1h 47min
S13	BELARBI	17	14	31	25	C23★/R4(V1)	16	14	1	⚠ -1m³	1h 40min
S14	CHOUKCHOU	6	6	12	30	C02/R3(V1)	6	6	0	✓ exact	1h 52min
S15	SALAH	30	30	60	22	C22★/R4(V2)	30	30	0	✓ exact	1h 33min
S16	GUERMOUCHE	7	7	14	55	C01/R1(V1)	6	6	2	⚠ -2m³	2h 52min
S17	KOULOUGHLI	22	8	30	14	C22★/R5(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 14min
S18	HAROUNE RACHID	22	8	30	27	C21★/R3(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 45min
S19	DAHOU	22	7	29	55	C08/R1(V1)	21	6	2	⚠ -2m³	2h 52min
S20	BELHAMIDI	16	14	30	60	C18★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	3h 04min
S21	BOUCHAREB	20	7	27	36	C13/R3(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 06min
S22	KABBAS	27	0	27	56	C09/R1(V1)	27	0	0	✓ exact	2h 54min
S23	REZOUG	21	6	27	52	C12/R2(V1)	21	6	0	✓ exact	2h 45min
S24	TAHIR ST	20	7	27	58	C07/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 59min
S25	SARL SIDIAMAR	15	15	30	50	C20★/R2(V1)	15	15	0	✓ exact	2h 40min
S26	HEBRI	22	8	30	53	C19★/R2(V1)	22	8	0	✓ exact	2h 47min
S27	BOUKARABILA	23	7	30	114	C17★/R1(V1)	23	7	0	✓ exact	5h 14min
S28	ALMANARA	21	6	27	51	C11/R2(V1)	21	6	0	✓ exact	2h 42min

Fig. 3.13 : Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du jeudi

31 m^3 , le modèle livre exactement 27 m^3 . Ce choix s'explique par l'utilisation du camion **C13** dont la capacité maximale est de 27 m^3 . Le modèle refuse d'envoyer un second véhicule pour les 4 m^3 restants, respectant ainsi les contraintes de rentabilité et de saturation des compartiments.

- **Utilisation stratégique de la flotte hétérogène** : Le modèle exploite parfaitement la diversité des véhicules. Les "petits porteurs" sont affectés à des stations comme **GUERMOUCHE**, **CHOUKCHOU** ou **BENBABOUCHE**. À *Benbabouche*, le manque de 1 m^3 (12 m^3 livrés pour 13 m^3 demandés) illustre la contrainte technique de ne pas fractionner les compartiments standards de 12 m^3 .
- **Fiabilité sur les destinations prioritaires** : Malgré la densité du trafic, le système assure un service **exact** (zéro manque) pour des stations stratégiques telles que **GD HONAINAINE**, **GD MAGHNIA** et **GD SABRA**, garantissant ainsi la continuité de l'approvisionnement des zones à fort débit.

Interprétation des résultats du vendredi 20 février 2026

L'analyse de la journée du vendredi 20 février montre une transition vers un volume de demande plus modéré, s'élevant à 379 m^3 , tout en maintenant une efficacité logistique élevée.

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Ven 20-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 1094 km Camions : 14 Stations : 10/13 Volume : 360/379 m³ (95.0%)											
S01	GD MARSET BEN M'HIDI	20	7	27	111	C08/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	5h 06min
S02	GD SOUAHLIA	22	8	30	64	C18★/R1(V1)	22	8	0	✓ exact	3h 14min
S03	GD BAB EL ASSA	13	14	27	86	C10/R1(V1)	13	14	0	✓ exact	4h 06min
S04	GD KOUDIA	14	13	27	20	C13/R2(V1)	14	13	0	✓ exact	1h 28min
S05	GD REMCHI	20	13	33	1	C15/R3(V1)	20	7	6	▲ -6m³	42min
S06	KHEROUSSE	14	6	20	7	C05/R3(V1)	13	2	5	▲ -5m³	57min
S07	CHOUKCHOU	6	6	12	30	C01/R2(V1)	6	6	0	✓ exact	1h 52min
S08	BOUDGHENE STAMBOULI	7	20	27	30	C11/R2(V1)	7	20	0	✓ exact	1h 52min
S09	SALAH	27	30	57	22	C09/R1(V1) C1	27	30	0	✓ exact	1h 33min
S10	PURTEC	27	0	27	27	C12/R2(V1)	27	0	0	✓ exact	1h 45min
S11	KOULOUGHLI	20	7	27	14	C14/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	1h 14min
S12	SARL EL OUARIT	21	6	27	50	C07/R1(V1)	21	6	0	✓ exact	2h 40min
S13	RAHOUI	30	8	38	63	C17★/R1(V1)	30	0	8	▲ -8m³	3h 11min

Fig. 3.14 : Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du vendredi

- **Performance et Taux de Service** : Le modèle assure la livraison de 360 m^3 , atteignant un taux de service de **95,0 %**. Pour cette journée, **14 camions** ont été mobilisés, parcourant une distance totale de **1094 km A/R**.
- **Gestion des destinations stratégiques lointaines** : Le système traite avec succès des stations situées à la périphérie du réseau. La station **GD MARSET BEN M'HIDI (S01)** est desservie par le camion **C08** en première rotation (*R1*) avec une livraison exacte de 27 m^3 , malgré un temps de trajet important de **5h06min**. De même, **GD BAB EL ASSA (S03)** reçoit sa commande complète en **4h06min** via le camion **C10**.
- **Analyse des livraisons partielles et manques** : Un manque total de 19 m^3 est enregistré, principalement dû à des contraintes de compartimentage. Le cas de la station **RAHOUI** est notable : sur une demande de 38 m^3 , seuls 30 m^3 sont livrés (via le camion C19), générant un manque de 8 m^3 . Ce choix algorithmique évite l'envoi d'un second véhicule pour un volume résiduel faible, optimisant ainsi le coefficient de remplissage de la flotte.
- **Ordonnancement des rotations** : La journée est organisée en trois rotations (*R1* à *R3*). La première rotation (*R1*) est dédiée aux longs trajets (Maret Ben M'hidi, Souahlia, Bab El Assa), tandis que les rotations suivantes (*R2* et *R3*) permettent de

couvrir des stations plus proches comme **GD KOUDIA** et **GD REMCHI**, assurant ainsi une rotation rapide des véhicules au dépôt.

- **Flexibilité de la flotte** : L'utilisation de camions aux capacités variées (ex : **C05** de 15 m^3 pour *Kherousse* ou **C01** de 12 m^3 pour *Choukchou*) démontre la capacité du modèle à adapter le contenant au contenu disponible, tout en respectant les seuils de rentabilité par trajet.

Interprétation des résultats du samedi 21 février 2026

La journée du samedi clôture cette période d'étude avec des indicateurs de performance très élevés. Le modèle a assuré la livraison de **498 m³** sur une demande totale de **506 m³**, atteignant un taux de service remarquable de **98,4%**.

NAFTAL · PLAN DE LIVRAISON CARBURANT · Sam 21-02-2026											
Statut : Optimal Distance A/R : 1416 km Camions : 19 Stations : 18/20 Volume : 498/506 m ³ (98.4%)											
N°	Nom Station	Dem. GS (m ³)	Dem. SP (m ³)	Total (m ³)	Dist. (km)	Camion(s) / Rotation(s)	Livré GS (m ³)	Livré SP (m ³)	Manque (m ³)	Résultat	Temps A/R
S01	GD MAGHNIA	16	14	30	49	C17★/R1(V1)	16	14	0	✓ exact	2h 38min
S02	GD NEDROMA	20	7	27	46	C10/R2(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 30min
S03	GD BENSEKRANE	14	13	27	48	C11/R2(V1)	14	13	0	✓ exact	2h 35min
S04	GD EL ARICHA	21	0	21	110	C06/R1(V1)	15	0	6	▲ -6m ³	5h 04min
S05	GD KOUDIA	22	7	29	20	C13/R3(V1)	21	6	2	▲ -2m ³	1h 28min
S06	GD REMCHI	16	14	30	1	C24★/R4(V1)	16	14	0	✓ exact	42min
S07	MAHLIA	20	7	27	13	C12/R3(V1)	20	7	0	✓ exact	1h 11min
S08	GHORZI MED	10	5	15	3	C05/R4(V1)	10	5	0	✓ exact	47min
S09	KHEMMAR	15	15	30	16	C23★/R3(V1)	15	15	0	✓ exact	1h 18min
S10	SARL MADINA	16	14	30	25	C19★/R2(V1)	16	14	0	✓ exact	1h 40min
S11	SCS IMAMA	14	16	30	25	C20★/R2(V1)	14	16	0	✓ exact	1h 40min
S12	CHOUKCHOU	3	9	12	30	C01/R2(V1)	3	9	0	✓ exact	1h 52min
S13	SALAH	16	14	30	22	C21★/R3(V1)	16	14	0	✓ exact	1h 33min
S14	HAMDI	12	3	15	67	C05/R1(V1)	12	3	0	✓ exact	3h 21min
S15	KOULOUGHLI	22	8	30	14	C22★/R3(V1)	22	8	0	✓ exact	1h 14min
S16	CHARBENE	23	7	30	42	C18★/R2(V1)	23	7	0	✓ exact	2h 21min
S17	DAHOU	20	7	27	55	C09/R1(V1)	20	7	0	✓ exact	2h 52min
S18	AISSANI	6	6	12	14	C02/R3(V1)	6	6	0	✓ exact	1h 14min
S19	SARLE OUARIT	21	6	27	50	C08/R1(V1)	21	6	0	✓ exact	2h 40min
S20	TAHIR ST	14	13	27	58	C07/R1(V1)	14	13	0	✓ exact	2h 59min

Fig. 3.15 : Détail de l'affectation des camions et des rotations pour la journée du samedi

- **Performance globale :** Le modèle atteint un taux de service remarquable de **98,4 %**, livrant **498 m^3** sur une demande totale de **506 m^3** . Cette performance est réalisée par **19 camions** pour une distance totale de **1416 km A/R**.
- **Respect strict des contraintes de chargement complet :** Le système gère les manques en priorité par le respect de la contrainte d'intégrité : un véhicule ne peut quitter le dépôt que s'il est chargé à sa pleine capacité. À la station **GD EL ARI-CHA (S04)**, située à **110 km**, le modèle a affecté le camion **C06** de **15 m^3** . Le manque de **6 m^3** (demande de **21 m^3**) est imposé par la capacité physique du camion ; envoyer un second véhicule pour le reliquat est impossible car ce dernier ne serait pas plein, violant ainsi la règle de sortie du dépôt.
- **Exploitation de la flotte hétérogène :** On observe une utilisation pertinente des différents gabarits de camions. Le camion **C05** (Std **15 m^3**) effectue deux rotations successives pour livrer *HAMDI* et *GHORZI MED*. De même, les petits porteurs de **12 m^3** (C01 et C02) assurent des livraisons précises à *CHOUKCHOU* et *AISSANI*, garantissant que chaque rotation respecte le plein chargement.
- **Analyse des écarts résiduels :** Le manque total est extrêmement réduit (**8 m^3**). À la station **GD KOUDIA (S06)**, le manque de **2 m^3** (**27 m^3** livrés pour **29 m^3** demandés) illustre à nouveau la saturation de la citerne du camion **C13**. Le modèle privilégie la conformité du chargement à la satisfaction totale d'une demande qui obligerait à faire circuler des camions partiellement vides.

3.7 Synthèse des résultats opérationnels hebdomadaires

3.7.1 Tableau de bord global de l'application

Le tableau de bord principal de l'application permet de visualiser la performance globale de la stratégie de distribution sur les sept jours simulés.

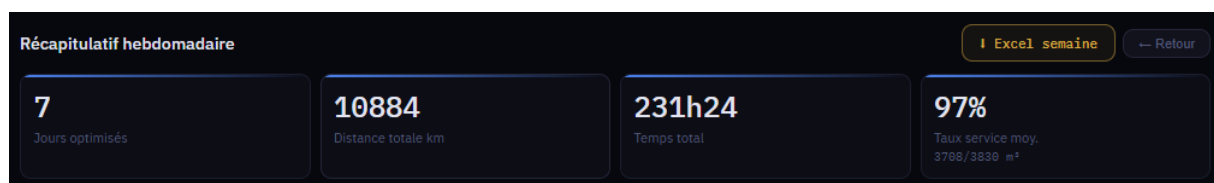


Fig. 3.16 : Récapitulatif hebdomadaire des indicateurs clés (KPI)

L'analyse des indicateurs clés démontre une efficacité opérationnelle élevée, avec un réseau optimisé couvrant un cumul de **10 884 km** parcourus par l'ensemble de la flotte. Sur le plan quantitatif, un volume total de **3 708 m^3** a été livré pour une demande

initiale de **3 830 m³**, ce qui permet d'atteindre un taux de service moyen de **97 %**. Enfin, la gestion temporelle est tout aussi performante, puisque l'ensemble des missions de livraison représente une durée totale de service de **231 h 24 min**.

3.7.2 Focus sur l'utilisation individuelle de la flotte

L'analyse détaillée des porteurs permet d'identifier la charge de travail réelle par unité. Le taux d'utilisation est calculé sur une base de disponibilité journalière divisée en 6 créneaux de rotation.

Note méthodologique sur le calcul de l'utilisation

Le taux d'utilisation affiché dans les fiches camions correspond à la sollicitation des créneaux de livraison sur une capacité journalière théorique de six rotations.

L'équation de calcul est la suivante :

$$U_{jour} = \frac{R_{eff}}{6} \times 100 \quad (3.16)$$

Exemple de calcul :

- Pour **1 rotation** : $\frac{1}{6} \times 100 \approx 17\%$.
- Pour **2 rotations** : $\frac{2}{6} \times 100 \approx 33\%$.

C21 – 30m ²	
Dim	2km · 1rot · 17%
Lun	50km · 1rot · 17%
Mar	122km · 2rot · 33%
Mer	32km · 1rot · 17%
Jeu	54km · 1rot · 17%
Sam	44km · 1rot · 17%
Sem. total	304km · 7rot
Util. moy.	20%

C23 – 30m ²	
Lun	50km · 1rot · 17%
Mar	148km · 2rot · 33%
Mer	2km · 1rot · 17%
Jeu	94km · 2rot · 33%
Sam	32km · 1rot · 17%
Sem. total	326km · 7rot
Util. moy.	23%

Fig. 3.17 : Comparaison des fiches d'activité hebdomadaire pour les camions C21 et C23

Analyse du camion C21 : De son côté, le camion C21 présente une sollicitation moyenne de 20 % sur l'ensemble de la période, avec un total de 304 km au compteur. Contrairement au C23, son activité est plus linéaire : il maintient une cadence d'une rotation par jour (17 %) sur la quasi-totalité de la semaine, y compris le dimanche. Le mardi constitue

l'unique exception avec un pic à deux rotations (33 %), couvrant une distance journalière de 122 km. Cette régularité souligne une affectation optimisée pour des livraisons de fond de cuve constantes vers les stations régionales.

Analyse du camion C23 : Ce véhicule affiche une utilisation moyenne hebdomadaire de 23 % pour un total de 326 km parcourus. Son planning se distingue par une intensité de service variable : le système lui assigne une rotation unique les lundis, mercredis et samedis (17 %), mais double sa charge de travail les mardis et jeudis avec deux rotations complètes, atteignant ainsi 33 % de sa capacité journalière. Cette alternance démontre la capacité du modèle à mobiliser davantage de ressources lors des pics de demande régionale identifiés en milieu de semaine.

3.7.3 Récapitulatif hebdomadaire des livraisons

Le tableau intitulé «NAFTAL · RÉSUMÉ HEBDOMADAIRE DES LIVRAISONS CARBURANT» synthétise les performances du système de distribution sur une période de sept jours. L'analyse des indicateurs de performance (KPI) confirme l'efficacité de la planification optimisée :

- **Efficacité du Service :** Sur une demande totale de **3 830 m^3** , le système a assuré la livraison de **3 708 m^3** , atteignant un taux de service moyen de **97 %**. Le volume manquant hebdomadaire est restreint à **122 m^3** .
- **Couverture du Réseau :** Le modèle a permis de desservir **113 stations sur les 142** initialement programmées. Les pics d'activité logistique ont été observés le mardi et le jeudi, avec respectivement 19 et 22 stations livrées avec succès.
- **Performance Kilométrique :** La flotte a parcouru une distance totale cumulée de **10 884 km** (aller-retour). La journée du mardi 17 février présente l'activité la plus intense avec **2 272 km** parcourus pour satisfaire une demande de **748 m^3** .
- **Utilisation des Ressources :** La mobilisation des camions-citernes s'est adaptée dynamiquement à la charge journalière, variant de 11 camions (dimanche) à 23 camions (jeudi), tout en maintenant un statut d'exploitation «Optimal».
- **Gestion Temporelle :** L'ensemble des missions de livraison représente une charge horaire totale de **231 h 24 min**, validant la robustesse de l'ordonnancement face aux contraintes de temps de trajet.

Ce tableau de bord constitue un outil d'aide à la décision essentiel pour valider la réduction des distances parcourues tout en maximisant le respect des demandes des stations régionales.

NAFTAL · RÉSUMÉ HEBDOMADAIRE DES LIVRAISONS CARBURANT									
Jour	Statut	Stations Servies	Dist. Aller (km)	Dist. A/R (km)	Camions Utilisés	Volume Livré (m³)	Manque (m³)	Demande Totale (m³)	Taux Service
Dim 15-02-2026	Optimal	11/12	381	762	11	312	6	318	98.1%
Lun 16-02-2026	Optimal	18/21	813	1626	21	573	10	583	98.3%
Mar 17-02-2026	Optimal	18/27	1073	2146	21	678	40	718	94.4%
Mer 18-02-2026	Optimal	16/20	827	1654	19	513	21	534	96.1%
Jeu 19-02-2026	Optimal	22/28	1093	2186	23	774	18	792	97.7%
Ven 20-02-2026	Optimal	10/13	547	1094	14	360	19	379	95.0%
Sam 21-02-2026	Optimal	18/20	708	1416	19	498	8	506	98.4%
TOTAL SEMAINE	—	113/141	5442	10884	—	3708	122	3830	96.8%

Fig. 3.18 : Résumé hebdomadaire consolidé des performances de livraison.

3.7.4 Suivi des manques et justifications opérationnelles

Pour compléter cette vue d'ensemble, le fichier « SUIVI DES MANQUES » permet de justifier les 122 m^3 non livrés.

NAFTAL · SUIVI DES MANQUES ET STATIONS NON SERVIES									
Total manque : 122 m³ Non servies : 3 Partielles : 25									
Jour	Station	Dist. (km)	Dem. GS (m³)	Dem. SP (m³)	Total dem. (m³)	Livré GS (m³)	Livré SP (m³)	Manque (m³)	Type
Dim 15-02-2026									
Dim 15-02-2026	GHORZI MED	3	0	6	6	0	0	6	Non servie (FALLBACK)
Lun 16-02-2026									
Lun 16-02-2026	GD NEDROMA	46	24	7	31	23	7	1	Livraison partielle
Lun 16-02-2026	GD REMCHI	1	22	16	38	22	8	8	Livraison partielle
Lun 16-02-2026	BELARBI	25	17	14	31	16	14	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026									
Mar 17-02-2026	GD REMCHI	1	14	22	36	14	16	6	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	GD ZIANIDE	39	13	0	13	12	0	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	KHEROUSSE	7	7	6	13	6	6	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	BELARBI	25	17	14	31	16	14	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	CHOUKCHOU	30	3	8	11	0	0	11	Non servie (FALLBACK)
Mar 17-02-2026	HAMDI	67	10	0	10	0	0	10	Non servie (FALLBACK)
Mar 17-02-2026	LACHGUEUR	63	17	14	31	16	14	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	HAMDOUNE	75	10	6	16	10	5	1	Livraison partielle
Mar 17-02-2026	TAHIR ST	58	10	13	23	10	5	8	Livraison partielle

Fig. 3.19 : Exemple sur les suivis des manques.

- **Respect de la Règle de Pleine Charge** : L'analyse montre que la majorité des manques sont classés comme « Livraison partielle ». Par exemple, le 16/02 à **GD Remchi**, le manque de 8 m^3 s'explique par le fait que le modèle ne déplace pas de compartiments partiellement vides afin de maximiser la sécurité et la rentabilité de chaque rotation.
- **Gestion des Fallbacks (Stations non servies)** : Seules 3 stations sur 142 n'ont pas pu être servies (comme **CHOUKCHOU** le 17/02 avec un manque de 11 m^3).

Cela se produit uniquement lorsque le volume demandé ne permet pas de compléter un camion et qu'aucune autre station à proximité ne peut être groupée dans la même tournée.

3.8 Proposition d'un plan d'optimisation des reliquats

Nous avons intégré un défi majeur de NAFTAL : l'optimisation quotidienne des reliquats afin de minimiser les manques en fin de journée. Pour y répondre, nous avons développé un algorithme en Python basé sur une heuristique gloutonne de type « Best-Fit Matching », structurée autour de deux piliers essentiels. D'une part, le système évalue la réceptivité des stations en vérifiant la capacité de stockage physique disponible en cuve. D'autre part, il planifie le chargement en respectant strictement les contraintes matérielles de la flotte, à savoir la capacité totale des camions-citernes et le découpage fixe de leurs compartiments. Ce processus permet de saturer les véhicules, de regrouper efficacement les livraisons et de réduire le reste à livrer à zéro, éliminant ainsi tout risque de rupture de stock sur le réseau.

Étape 1 (Extraction) : L'algorithme calcule l'écart exact entre le volume commandé et le volume réellement livré lors de la première vague d'optimisation globale.

Étape 2 (Tri) : Il ordonne les stations cibles par volume de reliquat décroissant afin de traiter les demandes les plus critiques et urgentes en priorité absolue.

Étape 3 (Allocation) : Il déploie une **heuristique gloutonne d'ajustement (*Best-Fit*)** pour sélectionner le véhicule optimal au sein de la flotte résiduelle. L'algorithme analyse l'ensemble des camions disponibles et retient en priorité celui dont la capacité globale s'approche au plus près du volume total du manque calculé. Cette sélection gloutonne permet de maximiser le coefficient de remplissage du véhicule dès le départ et de préserver les autres ressources de la flotte pour les demandes suivantes.

Étape 4 (Saturation) : Afin de respecter scrupuleusement les contraintes de sécurité et de cloisonnement de NAFTAL, l'algorithme sature complètement les compartiments physiques du camion-citerne en y affectant un léger surplus négocié ou un *complément* de produit.

Étape 5 (Soldage) : Dès la validation de la tournée opérationnelle, le système met à jour les indicateurs de performance, consigne les données et solde définitivement le reliquat à zéro.

Pour parfaire les résultats obtenus, nous proposons une stratégie complémentaire de gestion des manques techniques, présentée sous la forme d'un second rapport d'aide à la décision. Ce dispositif repose sur la génération de deux feuilles de calcul spécifiques dans l'outil de reporting (étude des trois premiers jours).

1. **Le Plan de Chargement Optimisé** : Cette feuille détaille l'affectation exceptionnelle des compartiments pour résorber les manques. Elle introduit les notions de *Surplus* et de *Complément*. L'objectif ici n'est plus la minimisation de la distance, mais la saturation systématique des capacités de transport pour servir les volumes restants.

NAFTAL - PLAN DE CHARGEMENT OPTIMISÉ						
Jour	Station Destination	Produit	Cap. Comp.	Cap. Camion	N° Comp	Détail Statut
DIMANCHE	--- DIMANCHE ---	SECTION		12 m³		
DIMANCHE	GHORZI MED	SP	3	12 m³	Comp 1	OK
DIMANCHE	GHORZI MED	SP	3	12 m³	Comp 2	OK
DIMANCHE	GHORZI MED	GS/SP	3	12 m³	Comp 3	Complément
DIMANCHE	GHORZI MED	GS/SP	3	12 m³	Comp 4	Complément
LUNDI	--- LUNDI ---	SECTION		12 m³		
LUNDI	GD REMCHI	SP	3	12 m³	Comp 1	OK
LUNDI	GD REMCHI	SP	3	12 m³	Comp 2	OK
LUNDI	GD REMCHI	SP	3	12 m³	Comp 3	SURPLUS (+1.0m³)
LUNDI	GD NEDROMA	GS	3	12 m³	Comp 4	SURPLUS (+2.0m³)
MARDI	--- MARDI ---	SECTION		30 m³		
MARDI	HAMDI	GS	8	30 m³	Comp 1	OK
MARDI	CHOUKCHOU	SP	8	30 m³	Comp 2	OK
MARDI	TAHIR ST	SP	7	30 m³	Comp 3	OK
MARDI	GD REMCHI	SP	7	30 m³	Comp 4	SURPLUS (+1.0m³)

Fig. 3.20 : Plan de chargement optimisé pour la résorption des reliquats

2. **La Comparaison des Manques** : Ce tableau permet de visualiser l'évolution du taux de service. Il met en évidence le passage du statut de « Manque Initial » à celui de « Reste Nul » pour les stations ciblées par le plan de rattrapage.

NAFTAL - COMPARAISON DES MANQUES					
Jour	Station	Produit	Manque Initial	Livré par l'IA	Reste à livrer
DIMANCHE	GHORZI MED	SP	6	6	0
LUNDI	GD NEDROMA	GS	1	3	0
LUNDI	GD REMCHI	SP	8	9	0
LUNDI	BELARBI	GS	1	0	1
MARDI	GD REMCHI	SP	6	7	0
MARDI	GD ZIANIDE	GS	1	0	1
MARDI	KHEROUSSE	GS	1	0	1
MARDI	BELARBI	GS	1	0	1
MARDI	CHOUKCHOU	GS	3	0	3
MARDI	CHOUKCHOU	SP	8	8	0
MARDI	HAMDI	GS	10	8	2
MARDI	LACHGUEUR	GS	1	0	1
MARDI	HAMDOUNE	SP	1	0	1
MARDI	TAHIR ST	SP	8	7	1

Fig. 3.21 : Analyse comparative des manques

La négociation avec les stations : un levier de flexibilité

L'originalité de cette approche réside dans son caractère collaboratif. En effet, l'application de ce plan de chargement n'est pas automatique et nécessite une **phase de né-**

gociation préalable avec les gérants de stations.

L'efficacité du plan de rattrapage est illustrée par l'analyse des trois premières journées de service, où les manques techniques sont convertis en opportunités de livraison optimisées :

- **Dimanche 15-02** : Le manque initial de 6 m^3 est résorbé par une livraison de complément de 6 m^3 , rendant le reliquat final nul.
- **Lundi 16-02** : Pour compenser un manque de 10 m^3 , le plan propose la livraison de 13 m^3 . Ce surplus de 3 m^3 permet de respecter la contrainte de compartiment plein tout en servant totalement les stations.
- **Mardi 17-02** : Face à un reliquat de 40 m^3 , une stratégie de livraison de 29 m^3 est mise en place. Ce volume permet de solder les manques accumulés lors de cette journée de forte demande.

L'efficacité de la résorption des manques est conditionnée par la capacité de stockage résiduelle de la station au moment de la livraison. Par exemple, pour transformer un manque technique de 6 m^3 en une livraison de 7 m^3 (afin de saturer un compartiment), la station doit impérativement disposer d'une marge de réception suffisante.

Cette stratégie démontre que l'optimisation mathématique trouve sa pleine mesure lorsqu'elle est associée à une flexibilité opérationnelle sur le terrain. Bien que certains manques puissent persister en cas de saturation des cuves, ce plan permet d'atteindre un niveau de satisfaction client bien supérieur au schéma de distribution classique.

3.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'environnement de développement et à l'implémentation de notre solution d'optimisation. Nous avons détaillé le processus d'ingestion des données, le paramétrage de la flotte ainsi que la restitution des résultats sous forme de tableaux de bord et de cartes interactives.

Les résultats obtenus valident la pertinence de l'approche retenue pour répondre à la problématique de Naftal. L'interface intuitive permet une prise de décision rapide et fiabilisée, transformant des contraintes complexes en tournées de véhicules optimisées. Cette étape d'implémentation constitue le cœur technique de notre travail et ouvre la voie à une réflexion plus large sur les perspectives d'amélioration du système de transport pétrolier.

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études a été consacré à l'optimisation de la logistique de distribution des produits pétroliers au sein de l'entreprise Naftal. L'objectif principal était de concevoir un système d'aide à la décision capable de rationaliser les tournées de camions-citernes tout en minimisant les coûts de transport et en respectant des contraintes opérationnelles rigoureuses.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons dressé un état des lieux de la chaîne logistique pétrolière et identifié les défis spécifiques au transport des carburants. Cette phase de recherche a permis de modéliser le problème comme une variante complexe du problème de tournées de véhicules, intégrant des paramètres critiques tels que la multi-compatibilité des produits et la gestion technique des compartiments étanches.

La phase de développement a reposé sur l'utilisation de la programmation linéaire pour traduire ces défis logistiques en un modèle mathématique cohérent. L'implémentation de cette solution, couplée à une interface de visualisation cartographique, a permis de transformer des calculs théoriques en plans de transport concrets, offrant une visibilité précise sur l'affectation des ressources et le suivi des livraisons.

La validation expérimentale a confirmé l'efficacité de l'approche proposée. Le modèle a démontré une capacité constante à satisfaire la demande du réseau tout en maximisant l'utilisation de la flotte disponible. L'optimisation a permis non seulement de sécuriser l'approvisionnement des stations régionales, mais aussi de mettre en évidence l'intérêt majeur des rotations multiples pour accroître la productivité de chaque véhicule. L'arbitrage effectué par le solveur garantit que chaque trajet est réalisé avec un remplissage optimal des citernes, évitant ainsi les inefficacités liées au transport de volumes partiels.

En conclusion, dans une perspective de poursuite d'études en Master, ce travail pose des bases solides pour des évolutions futures. Ce modèle sera enrichi par l'intégration de techniques d'Intelligence Artificielle avancées afin d'optimiser davantage les tournées de livraison face aux imprévus. L'objectif sera de mettre en place une comparaison hybride entre les méthodes d'optimisation classiques et les algorithmes d'apprentissage, permettant ainsi de sélectionner la solution la plus performante.

Bibliographie

- [1] G. Hadj Abdelkader et Benrezkallah. *Amélioration des performances du réseau de transport De l'entreprise NAFTAL*. Mémoire de fin d'études, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, [2021].
- [2] C. Rego, C. Roucairol. Le Probleme de tournées de vehicules : etude et resolution approchée. [Rapport de recherche] RR-2197, INRIA. 1994.
- [3] Hamdi Radhoui. Problème de gestion de distribution : Cas du problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison de marchandises dans un réseau multimodal. Economies et finances. Normandie Université, 2020.
- [4] La contribution du système de distribution sur la performance commerciale d'une entreprise. Définition de la distribution. Récupéré le 29 janvier 2026 depuis [https ://dspace.ummto.dz/handle/ummto/16227](https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/16227)
- [5] Christine Belin-Munier. Logistique, chaîne logistique et SCM dans les revues francophones de gestion : quelle dimension stratégique ?. XXIIIème conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique (AIMS), May 2014, Rennes, France.
- [6] Ghoubach, S., El Amine, B. (2024). Le rôle de l'optimisation des coûts logistiques à l'amélioration de l'efficacité des opérations de la chaîne d'approvisionnement. International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics, 5(4), 567-582
- [7] HOUSSAINI A. (2009), Supply Chain Management et Globalisation des Chaînes de Valeurs : La place du Maroc, Colloque, Logistiqua 2009, Université Qadi Ayyad, EST, Asfi.
- [8] Derrouiche, M. E. A. (2018). Les contraintes à l'optimisation de la chaîne logistique internationale. Cas : SPA FLECHE BLEUE ALGERIENNE (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

- [9] Abdelaziz Benantar. Optimisation pour des problèmes industriels de tournées de véhicules : vers une transition énergétique. Autre [cs.OH]. Normandie Université, 2017.
- [10] Ghezali, Y. (2021). Le problème de la tournée de véhicule avec contrainte de capacité par l'algorithme génétique (Doctoral dissertation, Université de Bordj Bou Arreridj Faculty of Mathematics and Computer Science).
- [11] ILLOUL, Y. (2020). Réalisation d'une application pour le contrôle et l'optimisation des coûts du département Logistique Collecte de l'entreprise DDA (Doctoral dissertation, Directeur : Mr. BRAHAMI Mustapha Anwar/Co-directeur : Mr. Maliki Fouad).
- [12] Marsi, L. (2015). Étude de cas d'un problème de tournées des véhicules à la société SNTL (Projet de fin d'études, Licence Sciences et Techniques, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc)
- [13] Merzak, Z., et Abbaz, S. (2016). Problème de tournées de véhicules avec gestion de stock dans un réseau de distribution (Mémoire de Master II, Génie Industriel, Université Abou Bekr Belkaid–Tlemcen, Algérie).
- [14] LOUZIM, H. (2024). Development of a location routing problem model in a physical internet context (Doctoral dissertation, Directeur : Mr Fouad MALIKI/Co-Directeur : Mr Tarik CHARGUI).
- [15] Boudheroua, M. (2025). Impact des fluctuations de la demande sur la gestion d'achat et approvisionnement : Cas SARL CELIA ALGÉRIE (Mémoire de master). École des Hautes Études Commerciales.
- [16] CHAIF, M., & BETAOUAF, M. M. (2023). Développement de tableaux de bord pour le pilotage d'un réseau de distribution (Doctoral dissertation, Directeur : Mr BENNEKROUF Mohamed/Co-Directeur : Mr BENNACER Djamel).
- [17] Hadj Abdelkader, A., & Benrezkallah, K. E. (2021). Amélioration des performances du réseau de transport de l'entreprise NAFTAL [Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen].
- [18] Zeddami, B., & Menaa, Z. (2018). Amélioration des performances d'une entreprise de distribution : Cas d'étude NAFTAL [Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaïd – Tlemcen].

- [19] Kesraoui, M., & Benaoui, S. (2019). Optimisation de la distribution du GPL/C (Gaz de Pétrole Liquéfié/Carburant) : Cas d'étude NAFTAL Tlemcen [Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaïd – Tlemcen].
- [20] Bilek, L., Daid, A. (2015). Optimisation de la distribution des produits pétroliers au sein de l'entreprise NAFTAL (Doctoral dissertation, UMMTO).
- [21] Harrati, A., & Chraa, A. (2023). Développement d'un modèle d'intelligence artificielle pour la classification des poissons tilapia en état de santé ou infectés (Mémoire de master). École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, Algérie.
- [22] Kheta, M., & Tahrat, C. (2025). L'apport de l'intelligence artificielle au contrôle de gestion : Cas de Lafarge Services Algérie (Mémoire de master académique). École Nationale Supérieure de Management (ENSM), Algérie.
- [23] ZERED, I., & CHEIKH SI TAYEB. (2024). Gestion des stocks par l'intelligence artificielle (Mémoire de master, spécialité électrotechnique industrielle). Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Électrique.
- [24] Miraoui, A., Moussaoui, D. (2023). Classification du diabète à l'aide des méthodes du Deep Learning [Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen].
- [25] Bensaid, R., Goual, S. (2018). Utilisation de l'Apprentissage par Renforcement pour le Green Networking dans un Réseau de Radio Cognitive [Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen].
- [26] Sarah Filippi. Stratégies optimistes en apprentissage par renforcement. Mathématiques [math]. Ecole nationale supérieure des telecommunications - ENST, 2010. Français.
- [27] Degris, T. (2007). Apprentissage par renforcement dans les processus de décision markoviens factorisés (Thèse de doctorat, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie).