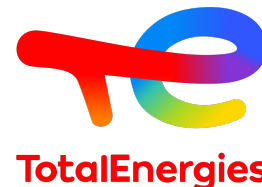


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie Industriel

Mémoire de Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Industriel

Option : Management Industriel

La Conception et la Mise en Place d'un Outil d'Aide à la Décision pour
l'Optimisation de la Planification des Tournées

Application : TotalEnergies

Réalisé par :

AZOUNE Maissa
BENAKOUCHE Mohamed Islam

Sous la direction de :

M. BOUKABOUS Ali

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2023

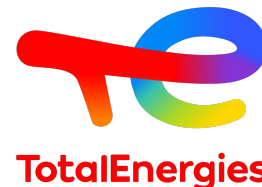
Composition du Jury :

Président	Mme. Sofia AIT BOUAZZA	MAA	ENP
Examineur	Mme. Nadjwa NOUAL	MAA	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	MAA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie Industriel

Mémoire de Projet de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Industriel

Option : Management Industriel

La Conception et la Mise en Place d'un Outil d'Aide à la Décision pour
l'Optimisation de la Planification des Tournées

Application : TotalEnergies

Réalisé par :

AZOUNE Maissa
BENAKOUCHE Mohamed Islam

Sous la direction de :

M. BOUKABOUS Ali

Présenté et soutenu publiquement le 26/06/2023

Composition du Jury :

Président	Mme. Sofia AIT BOUAZZA	MAA	ENP
Examineur	Mme. Nadjwa NOUAL	MAA	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	MAA	ENP

Veni Vidi Vici

Je dédie ce travail à toi, ma chère mère, source inépuisable de joie et de tendresse, dont l'amour a éclairé mon chemin et nourri mon cœur d'une force inébranlable. Toi, qui as tant sacrifié pour me voir réussir, qui m'as toujours soutenu et inculqué des valeurs humaines qui font de moi l'homme que je suis aujourd'hui. Pour toi, ma mère, avec tout mon amour.

À toi, Mohamed, mon bras droit et allié constant. Ta présence est un don précieux qui illumine ma vie. Je te suis infiniment reconnaissant pour ton assistance et ton soutien infaillibles qui m'ont constamment épaulé. Merci, pour tout ce que tu as apporté à ma vie.

À Hadia, pilier inébranlable de notre famille, dont l'amour et le dévouement ont fait de l'impossible, une réalité. Merci pour tout.

À Hmidet, Moussa, Chihab, Hassiba, Lamia, Melissa et Asma, je dédie ce travail. Votre influence et votre amour ont été des piliers dans mon parcours. Votre présence a été mon phare, éclairant ma route et inspirant mon chemin.

À ceux qui ont la chance de m'appeler "ami" et qui savent qui ils sont, cette dédicace est pour vous.

À Maissa, ma binôme inestimable. Ton soutien et ta collaboration ont apporté une dimension précieuse à ce travail. Merci pour tout.

*Au **Mouloudia Club d'Alger** ✨, joyau scintillant depuis 1921, profondément ancré dans la majestueuse Casbah, où une flamme inextinguible brille telle une étoile dans le ciel éternel de Bab El Oued, havre des âmes enflammées. Arborant avec une fierté sans bornes les couleurs vibrantes du **vert** et du **rouge**, je porte en mon cœur la passion et la dévotion des fervents. **Mouloudéen** ✨, aujourd'hui, et pour toutes les éternités à venir!*

*A toute la famille **INDUS-IEC**, particulièrement : Soraya, Kimou, Moncef et Imad.*

À toi, qui illumines mes jours actuels et dont j'aspire à ce que ta lumière guide mes pas pour le reste de mes jours. Ton soutien est le pilier de mes réussites et ton amour, le moteur de mes ambitions. Que chaque jour soit empli de bénédictions, d'amour et de joie, et que notre union soit bénie par Dieu pour l'éternité.

Je tiens à dédier une part de ce projet à la personne la plus méritante, moi-même. J'ai travaillé dur, persisté à travers les épreuves, et trouvé en moi la force de surmonter les obstacles. Je me remercie pour ne jamais avoir renoncé, pour avoir cru en moi et pour avoir poursuivi mes rêves.

À ma plus grande héroïne, je dédie ce travail avec une profonde reconnaissance et des émotions indescriptibles. Tes innombrables sacrifices pour ma réussite ont façonné ma vie de manière inestimable. Chaque renoncement, chaque acte de dévouement désintéressé, a été un témoignage éclatant de ton amour inconditionnel. Ce travail est un hommage à ta force, ta générosité et ta persévérance. Je t'aime infiniment, maman.

À toi Mon papa, qui as toujours cru en moi et m'as encouragé avec une confiance inébranlable. Ton soutien inconditionnel et tes paroles d'encouragement ont été ma source de force et de motivation. Grâce à toi, j'ai surmonté les doutes et les défis, et j'ai pu me surpasser. Tu as été mon plus grand champion, mon guide et mon inspirateur.

À mes chers grands-parents Zizi et Nana, je dédie ce travail en témoignage de ma gratitude pour m'avoir toujours donné une place spéciale en tant que votre propre fille.

Ce projet est dédié spécialement à Nesrine, Mirale et Anes, qui êtes les piliers de ma vie. Votre présence, votre soutien et votre amour ont illuminé chaque instant de mon existence. Vous êtes les meilleurs frères et sœurs qu'on puisse espérer.

À mes oncles chéris, Nono, Louanas, Cherif, Imad et Ramy, cette dédicace est une façon de vous rendre hommage et de vous exprimer toute ma gratitude pour votre présence précieuse dans ma vie.

À mes tantes adorées, Nora, Naima, Mounira, Kahina, Kenza mon ange et source de courage, ma sarouche, notre amitié est un trésor inestimable, et je suis reconnaissante de t'avoir à mes côtés, rima la petite maman des mamans.

À ma Dolly, pour notre amitié sans limite et de la relation spéciale que nous partageons. Tu es la boîte noire de mes secrets, celle en qui je peux me confier en toute confiance.

À mon binôme précieux Islam, cette dédicace est un témoignage de notre collaboration exceptionnelle et de l'amitié solide qui nous lie. En tant que binôme, nous avons parcouru ensemble des chemins parsemés de défis, de réussites.

À sarati, Sarah Djouadi, mon guide et mon idole, tu es la lumière qui éclaire mon chemin et la force qui me pousse à surpasser mes limites. Ta détermination et ton exemple sont une source infinie d'inspiration et de motivation pour moi.

À mes copines merveilleuses, Fifi, Yousra, Kenza, vous êtes ma famille choisie, mes sœurs de cœur. À travers les rires, les pleurs, les fous rires et les confidences, nous avons créé des liens qui resteront gravés dans nos mémoires pour toujours.

À toute la famille INDUS-IEC, particulièrement : Rayane, Soraya, cette dédicace est une déclaration de mon amour et de mon appréciation pour toi, Soraya. Ta présence dans ma vie est un cadeau précieux.

À toi, qui illumines mes jours actuels et dont j'aspire à ce que ta lumière guide mes pas pour le reste de mes jours. Ton soutien est le pilier de mes réussites et ton amour, le moteur de mes ambitions. Que chaque jour soit rempli de bénédictions, d'amour et de joie, et que notre union soit bénie par Dieu pour l'éternité.

À ma chère Bougie, ma ville de naissance, tu es l'éclat qui illumine ma vie, le berceau de mes souvenirs les plus précieux. Je te porte dans mon cœur où que j'aille.

À moi-même, je me dédie ce travail en signe de reconnaissance et d'amour-propre, car j'ai le pouvoir de réaliser mes rêves et de créer ma propre réussite.

Maissa.

Remerciements

D'abord et avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, la source inépuisable de sagesse et de force, qui nous a guidés tout au long de ce parcours académique et a fait que ce travail soit une réalité.

Nous voudrions témoigner une affection particulière et un remerciement chaleureux à nos parents bien-aimés, dont le soutien indéfectible, l'encouragement et l'amour nous ont été des piliers incommensurables.

Nous souhaitons réserver une mention spéciale à notre estimé mentor, M. Ali BOUKABOUS, dont l'accompagnement précieux, le dévouement, l'humour et la bienveillance ont éclairé notre chemin. Sa confiance et son assistance infatigable ont été essentielles dans la réalisation de ce projet. Nous espérons sincèrement que ce travail reflète l'excellence qu'il incarne.

Notre sincère reconnaissance va également à M. Islam Mestrouh, Responsable du transport chez TotalEnergies, pour avoir ouvert les portes de son domaine d'expertise et nous avoir fourni un environnement propice à la réalisation de ce projet. Sa générosité et son soutien ont été inestimables.

Nous sommes également redevables envers M. Abdellah Fekkai et M. Ramdane Bouzegzi pour leur accessibilité, leur engagement et leurs conseils avisés, qui ont enrichi notre compréhension et renforcé notre travail.

Un merci chaleureux est adressé également à toute l'équipe du département Logistique et Transport qui nous a accueilli avec une hospitalité et un soutien sans pareil pendant notre stage.

Nous adressons nos salutations respectueuses et notre gratitude à l'ensemble du corps professoral du Département de Génie Industriel. Leurs enseignements éclairés ont été le socle sur lequel s'appuie ce travail.

En terminant, nous souhaitons exprimer notre profond respect et nos remerciements aux honorables membres du jury, pour le temps et l'expertise qu'ils consacrent à l'évaluation de notre travail. C'est un privilège et un honneur d'avoir notre travail examiné par des personnes aussi éminentes.

Ce travail est le fruit d'un effort collectif, et nous sommes profondément reconnaissants envers chaque personne qui a contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Résumé et mots clés

الملخص : الهدف من هذا العمل هو تحسين وتسهيل تخطيط الطرق داخل قسم اللوجستيات والنقل في توتال إنرجيز و لتحقيق هذا الهدف ، نقترح تحسين عملية تخطيط توصيل البضاعة من خلال نمذجة رياضية تأخذ في عين الاعتبار المعايير المحددة للشركة. بالإضافة إلى ذلك ، نقوم بتطوير أداة آلية لتنفيذ طريقة التخطيط الجديدة هذه.

الكلمات المفتاحية : التخطيط ، النقل ، VRP ، الأدلة العليا ، النمذجة الرياضية ، العمليات.

Abstract: The aim of this work is to improve and facilitate route planning within the Logistics and Transport department of TotalEnergies. To achieve this goal, we propose an improvement of the tour planning process through a mathematical modeling that takes into account the company's specific criteria. In addition, we develop an automated tool to implement this new planning method.

Keywords: Planning, Transport, VRP, Metaheuristics, Mathematical modeling, Processes.

Résumé : L'objectif de ce travail est l'amélioration et la facilité de la planification des tournées au sein du département Logistique et Transport de TotalEnergies. Pour atteindre cet objectif, nous proposons une amélioration du processus de planification des tournées à travers une modélisation mathématique qui prend en considération les critères spécifiques de l'entreprise. De plus, nous développons un outil automatisé qui permettra de mettre en œuvre cette nouvelle méthode de planification.

Mots-clés : Planification, Transport, VRP, Métaheuristiques, Modélisation Mathématique, Processus.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale	12
1 Étude de l'existant	15
1.1 Introduction	15
1.2 Marché des lubrifiants	15
1.3 Présentation de TotalEnergies Monde	17
1.3.1 La branche Marketing et Service de TotalEnergies	18
1.3.2 TotalEnergies Afrique et Moyen-Orient (AMO)	18
1.4 Présentation de TotalEnergies Algérie	18
1.4.1 TotalEnergies Bitumes Algérie (TEBA)	19
1.4.2 TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA)	19
1.4.3 Département Logistique et Transport	21
1.5 Audit des pratiques logistiques	25
1.5.1 Logistique de Transport	25
1.5.2 Logistique de Distribution	26
1.6 Description de la problématique	27
1.6.1 Problématiques détectés	27
1.6.2 Énoncé de la problématique	29
1.7 Conclusion	30
2 État de l'art	32
2.1 Introduction	32
2.2 Définitions et vocabulaire relatifs à la logistique et transport	33
2.2.1 Logistique & Transport	33
2.2.2 La planification en logistique	34
2.2.2.1 Les problèmes de planification	34
2.2.2.2 La planification du transport	34
2.2.2.3 Processus de la planification du transport	35
2.2.2.4 Organisation des tournées	35
2.3 Les modèles de programmation mathématique	35
2.3.1 Le problème de voyageur de commerce TSP	35
2.3.2 Le problème de tournées de véhicules VRP	36
2.3.3 Formulation mathématique	37
2.3.4 Le problème de Bin Packing	43
2.3.5 Formulation mathématique	44
2.4 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation	46
2.4.1 Les méthodes exactes	46
2.4.1.1 La programmation dynamique	46
2.4.1.2 La programmation linéaire	47
2.4.1.3 Les méthodes de recherche arborescente(Branch-and-Bound)	47

2.4.2	Les méthodes approchées	48
2.4.2.1	Les heuristiques	48
2.4.2.2	Les méta-heuristiques	51
2.4.3	Tableau de synthèse	58
2.5	Conclusion	59
3	Contribution à l'Amélioration de la Planification des Tournées	61
3.1	Introduction	61
3.2	Modélisation Mathématique	62
3.2.1	Position du problème	62
3.2.2	Formulation mathématique	62
3.3	Vérification et Validation du modèle	66
3.3.1	Principe	66
3.3.2	Présentation de l'outil de vérification et validation de modèle	66
3.3.3	Modélisation sous CPLEX et les résultats des tests :	67
3.4	Résolution du modèle	71
3.4.1	Détermination de la stratégie de résolution	71
3.4.2	Explication du déroulement de la méthode	71
3.4.3	Test de la méthode avec des données réelles	75
3.4.4	Analyse et comparaison	77
3.5	Mise en place de la solution	79
3.6	Conclusion	84
3.7	Perspectives et recommandations	85
	Conclusion générale	88
	Bibliographie	90
	Annexes	94

Table des figures

1	Étapes de la démarche de résolution	13
2	Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 1	15
3	Croissance du marché des lubrifiants entre 2021-2026 par région	16
4	Croissance des lubrifiants en Afrique 2023-2028	16
5	Présence et répartition du personnel de TotalEnergies dans le monde	17
6	Diagramme positionnant TotalEnergies Algérie	19
7	Cartographie de processus globale TELA	20
8	Organigramme de M&S Algérie	20
9	Hierarchie des différents postes au sein du département Logistique & Transport	21
10	Cartographie du processus logistique et transport	22
11	Flux de Distribution et Répartition des clients	23
12	Déroulement de la planification des tournées	24
13	Temps de traitement (une semaine d'observation)	28
14	Taux de remplissage	28
15	Pourcentage des commandes clients Full et Non Full	29
16	Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 2	32
17	Illustration du problème du voyageur de commerce (TSP) et du problème de tournée de véhicule (VRP)	37
18	Distribution process with MCVs	40
19	Exemple VRPMD	40
20	La hiérarchie des décisions dans un problème VRPMD	41
21	Compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution	48
22	Fonctionnement des algorithmes génétiques	52
23	Le déroulement d'un algorithme de colonie de fourmis.	54
24	Fonctionnement de l'algorithme Recuit Simulé	55
25	Fonctionnement de l'algorithme Tabou.	57
26	Les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation	59
27	Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 3.	62
28	Initialisation des données du modèle	67
29	Définition de la fonction objective et les contraintes d'optimisation.	67
30	Définition de la boucle d'affichage de résultats	68
31	Résultat obtenu lors de l'exécution du programme	68
32	Modèle avec contrainte de deux clients/camion	69
33	Résultat obtenu du programme avec contrainte de deux clients/camion	69
34	Configuration de la tournée des deux camions 1 et 2.	76
35	Configuration de la tournée des deux camions 3 et 4.	76
36	Configuration de la tournée du camion 5 et le coût total.	77
37	Déroulement de l'Outil.	79
38	Insertion du fichier Excel.	80
39	Définition des paramètres	80
40	Données brutes avant la préparation et traitement.	80
41	Données transformées après la préparation et traitement.	81
42	Choix de l'emplacement du rapport final.	82
43	Les informations liées au Camion 01.	82
44	Visualisation des résultats sous forme d'un Tableau de Bord.	84

45	Rapport de validation.	96
----	--------------------------------	----

Liste des tableaux

1	Les jours de livraison	26
2	Les délais de livraisons	26
3	Variante du problème de tournée de véhicules et ses contraintes	43
4	Différence entre les heuristiques et les métaheuristiques	51
5	Tableau de comparaison des métaheuristiques.	58
6	Les résultats obtenus des tests effectués	70
7	Tournée proposée par le planificateur	77
8	Tournée proposée par notre Solution	78
9	Tableau comparatif des résultats	78
10	Personne interviewée lors de l’audit ASLOG.	94

Liste des abréviations

AMO Afrique et Moyen-Orient

ASLOG Association Française pour la Logistique

B2B Business to Business

B2C Business to Consumer

FIFO First-In, First-Out

GC Génie Civil

L&T Logistique & Transport

M&S Marketing & Services

OBC On Board Computer

OEM Original Equipment Manufacturer

OPL Optimization Programming Language

PATROM Programme d'Amélioration du Transport Routier Outre-Mer

PL Programmation Linéaire

RO Recherche Opérationnelle

SA Recuit Simulé

SE Société Européenne

SPA Société Par Actions

TEBA TotalEnergies Bitumes Algérie

TELA TotalEnergies Lubrifiants Algérie

TEQAS TotalEnergies Quartz Auto Service

TMS Transport Management System

TR Taux de Remplissage

Introduction générale

Au cœur d'un monde en constante évolution, où la concurrence est féroce et les exigences des clients ne cessent de s'accroître, les entreprises doivent faire preuve d'innovation et de créativité sans cesse renouvelées pour assurer leur pérennité. Les facteurs traditionnels de distinction - tels que la performance, le coût et le délai - bien qu'essentiels, ne sont plus suffisants. L'ère de la numérisation a créé de nouvelles attentes et une demande accrue de solutions innovantes, poussant les entreprises à se réinventer pour rester compétitives.

Dans ce contexte, le secteur des lubrifiants, avec ses spécificités et ses défis uniques, ne fait pas exception à cette règle. Ce marché dynamique, influencé par de multiples facteurs comme l'évolution technologique et les impératifs environnementaux, exige une réactivité constante. À la croisée de ces enjeux, se trouve TotalEnergies, un acteur majeur du secteur énergétique et l'un des leaders mondiaux dans le domaine des lubrifiants. En dépit de sa position bien établie, la compagnie doit sans cesse chercher à améliorer ses processus pour maintenir son avantage concurrentiel.

Dans ce cadre, notre projet de fin d'études trouve toute sa pertinence. Nous nous sommes concentrés sur un aspect crucial de l'activité de TotalEnergies : la planification des tournées. Cette tâche, qui peut paraître simple à première vue, est en réalité complexe et cruciale pour l'efficacité opérationnelle. Une planification optimale peut non seulement réduire les coûts, mais aussi améliorer la satisfaction des clients et augmenter la flexibilité de l'entreprise face aux fluctuations du marché. Cependant, la mise en place d'un système de planification efficace nécessite une compréhension approfondie de l'entreprise et des défis spécifiques auxquels elle est confrontée.

Dans ce rapport, nous présenterons notre contribution à l'optimisation de la planification des tournées chez TotalEnergies. Nous avons conçu un outil innovant qui a pour but de faciliter la vie des planificateurs, qui sont au cœur des opérations de l'entreprise. Non seulement il simplifie la planification, mais il offre également des visualisations graphiques pertinentes, permettant aux planificateurs d'avoir une vue d'ensemble claire et précise de leurs opérations.

Le présent rapport est structuré autour de trois chapitres essentiels, dont chacun joue un rôle clé dans l'analyse et la résolution de notre problématique relative à l'optimisation du processus de planification des tournées chez TotalEnergies en Algérie.

Le premier chapitre pose les bases en explorant le marché des lubrifiants, un secteur vital pour TotalEnergies. Nous commençons par un aperçu de TotalEnergies dans le monde avant de focaliser sur sa filiale en Algérie, ce qui nous permet de comprendre l'étendue de ses opérations et son empreinte dans l'industrie. Puis, une attention particulière est accordée à l'audit des pratiques logistiques existantes au sein de l'entreprise. Ce chapitre se termine avec une description précise du problème auquel nous sommes confrontés, en mettant en relief son contexte et ses implications.

Le deuxième chapitre constitue le cœur théorique de ce travail. Il débute par des définitions et vocabulaires propres au domaine de la logistique et du transport, essentiels pour une compréhension éclairée de la suite du contenu. Il aborde ensuite les modèles de programmation mathématique pertinents, accompagnés des diverses méthodes de résolution disponibles. Un tableau comparatif est ensuite élaboré afin de juxtaposer les différentes méthodes et modèles selon des critères clés, facilitant ainsi la sélection d'une approche adaptée à notre problématique.

Enfin, le troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre pratique de la solution. Nous commençons par la modélisation mathématique du problème, puis vérifions et validons le modèle développé. Le modèle est ensuite résolu à l'aide de métaheuristiques, et les résultats obtenus sont analysés. Le chapitre se termine par la proposition d'un outil opérationnel basé sur notre modèle, qui pourrait être intégré dans le processus de planification des tournées de TotalEnergies pour une optimisation et une amélioration significative.

Une conclusion générale clôturera notre travail et des perspectives et ouvertures sont proposées.

Le déroulement de notre projet est synthétisé par le schéma logique de ces différentes parties de notre contribution :

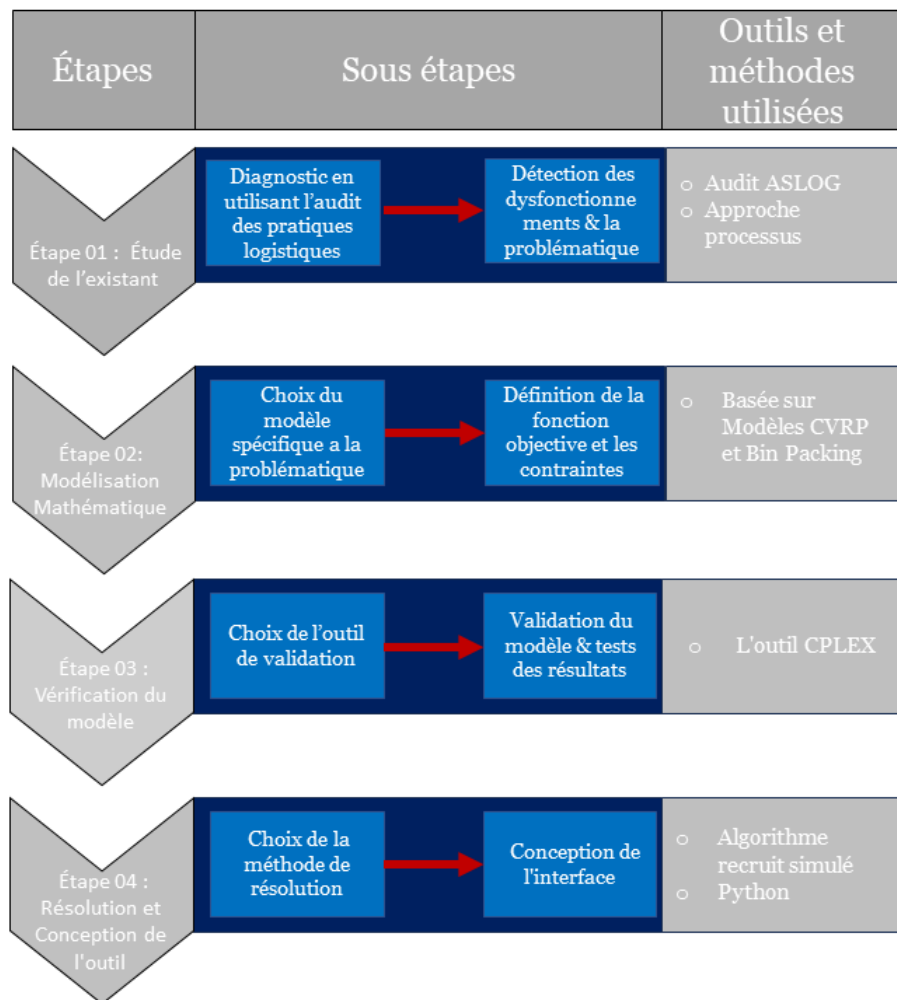


FIGURE 1 – Étapes de la démarche de résolution

Chapitre 01 : Étude de l'existant

1 Étude de l'existant

1.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA). Dans un premier temps, nous effectuons une analyse du groupe TotalEnergies, en nous concentrant sur son environnement et ses divers domaines d'activité, en particulier sur la branche Marketing & Services (M&S) Algérie, ainsi que sur sa filiale TELA. Nous portons une attention particulière à la direction d'exploitation de l'entreprise, en examinant l'organisation de sa chaîne logistique et le département Logistique et Transport, où s'est déroulé notre projet.

La deuxième partie de ce chapitre se penche sur l'audit logistique et le diagnostic des activités logistiques menées au sein du département L&T, en identifiant les dysfonctionnements éventuels. Enfin, la dernière partie de ce chapitre présente les résultats de l'audit réalisé au sein du département Logistique et Transport, qui ont conduit à la formulation de notre problématique de projet.

Voici le schéma récapitulatif de la démarche et structure de cette partie de notre travail ayant comme but de cerner les dysfonctionnements détectés :

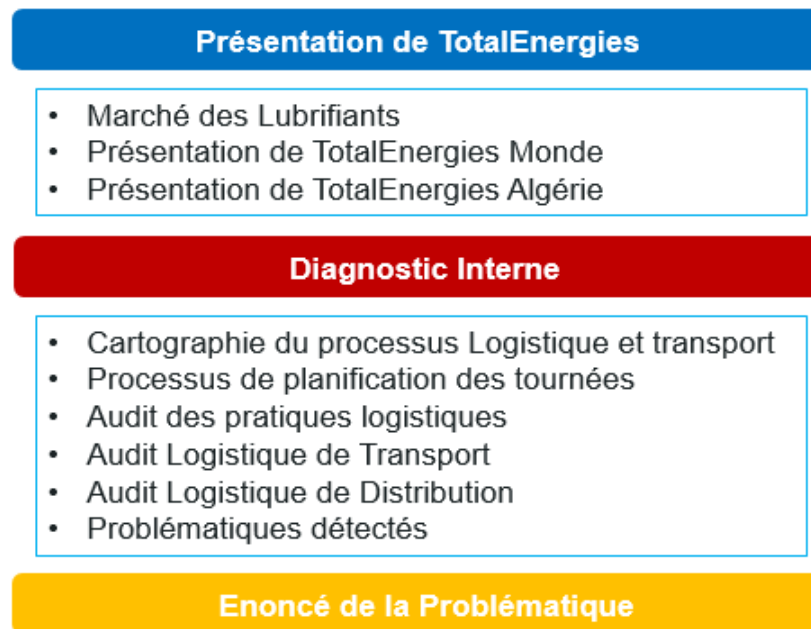
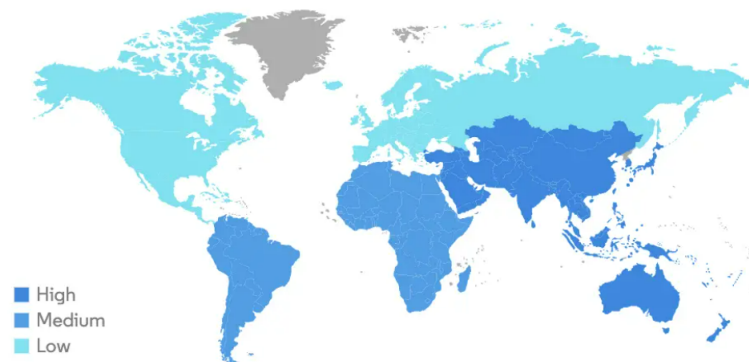


FIGURE 2 – Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 1

1.2 Marché des lubrifiants

Le marché des lubrifiants est une grande industrie mondiale qui englobe la production et la vente de divers types de lubrifiants, notamment les huiles moteur, les huiles pour engrenages, les fluides de transmission, les liquides de frein, les lubrifiants pour équipement lourd et d'autres lubrifiants. Ces lubrifiants sont utilisés dans une variété d'industries, y compris l'automobile, la construction, l'énergie et plus encore. (**Intelligence (a)**)

Le marché mondial des lubrifiants est estimé à 167,1 milliards USD en 2022 et devrait croître à un taux de croissance annuel composé (CAGR) de plus de 3% au cours des prochaines années. La Chine est le pays avec le plus grand marché d'huiles lubrifiantes. (**Statista**)



Source: Mordor Intelligence

FIGURE 3 – Croissance du marché des lubrifiants entre 2021-2026 par région

Le marché des lubrifiants en Afrique connaît une croissance annuelle moyenne (CAGR) de plus de 1,47% au cours des cinq prochaines années, avec des acteurs clés tels que BP PLC, Chevron Corporation, Exxon Mobil Corporation, Royal Dutch Shell PLC et TotalEnergies. (**Intelligence (b)**)



Source: Mordor Intelligence

FIGURE 4 – Croissance des lubrifiants en Afrique 2023-2028

En ce qui concerne spécifiquement l'Algérie, les dernières données disponibles datent de 2022, date à laquelle les revenus du marché des lubrifiants devraient atteindre 55 milliards de dinars en 2022 (**Research (2022)**). Le marché est tiré par la demande croissante de lubrifiants semi-synthétiques et synthétiques, la croissance des industries de la construction et de la production d'énergie et la croissance des ventes de véhicules de tourisme et commerciaux. Le gouvernement algérien investit dans la diversification économique, ce qui a accru la demande de lubrifiants dans les industries et les infrastructures. De plus, la demande de lubrifiants dans l'industrie automobile algérienne est également en croissance. (**6Wresearch**).

La croissance du marché des lubrifiants en Algérie est prévue avec un taux de croissance annuel composé de 2,1% pour la période 2021-2026. (**Intelligence (a)**)

1.3 Présentation de TotalEnergies Monde

TotalEnergies, anciennement Compagnie française des pétroles, puis Total, est une compagnie multi-énergies mondiale de production et de fourniture d'énergies : pétrole et biocarburants, gaz naturel et gaz verts, renouvelables et électricité, fondée en Mars 1924 sous le nom Total SE dont le siège social se situe dans la TotalEnergies Coupole, la Défense, Paris, France. Elle est implantée sur les cinq continents dans 125 pays (41 en Afrique, 31 en Europe, 26 en Asie-Pacifique, 18 en Amérique et 9 en Moyen-Orient) et emploie plus de 101 309 collaborateurs¹ avec près de 160 nationalités à travers 903 filiales¹ et plus de 800 sites industriels. TotalEnergies en tant qu'entreprise responsable, elle intègre le développement durable dans toutes ses dimensions au cœur de ses projets et opérations pour contribuer au bien-être des populations¹.

C'est la première entreprise française en termes de chiffre d'affaires qui représente 200 milliards \$ en 2020², la sixième entreprise d'Europe et la vingt-septième entreprise mondiale en 2022².

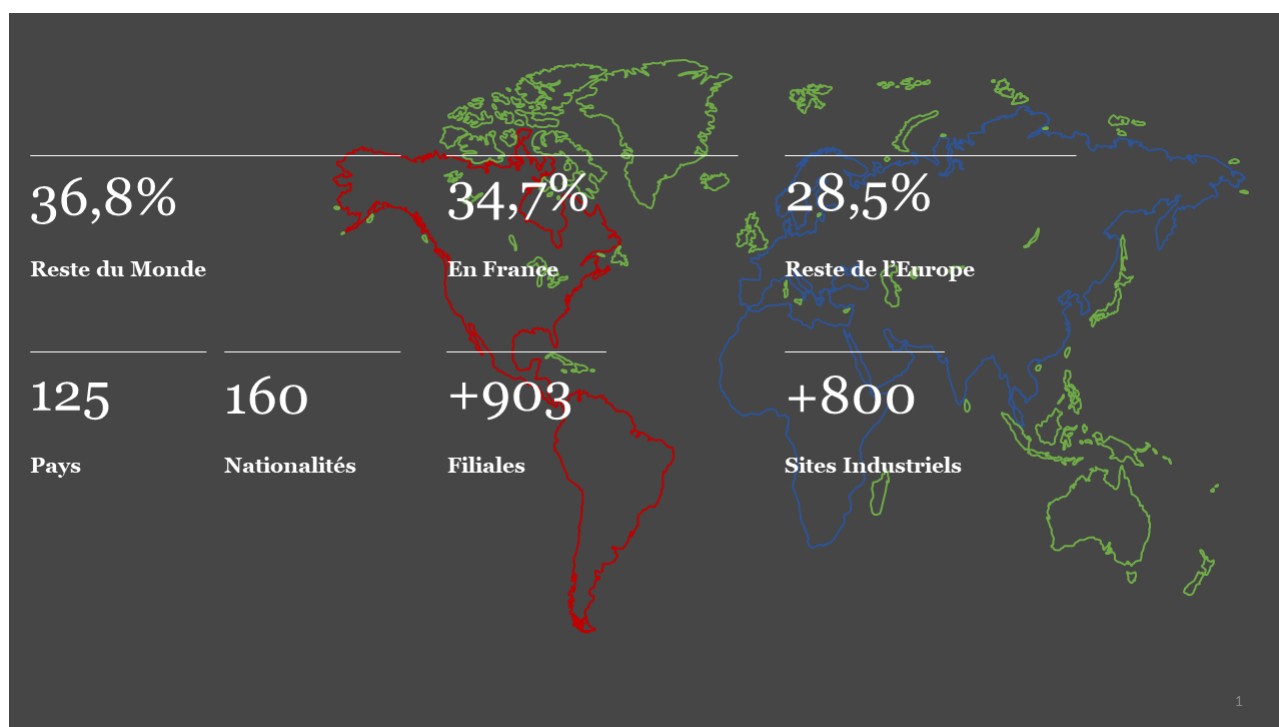


FIGURE 5 – Présence et répartition du personnel de TotalEnergies dans le monde

Les secteurs d'activités du groupe TotalEnergies sont :

- Exploration et Production ;
- Gaz et Nouvelles Energies ;
- Raffinage et Chimie ;
- Marketing et Service.

1. Source : Document d'enregistrement universel 2021 sur totalenergies.com

2. Source : Classement 2022 | Global 500 | Fortune

1.3.1 La branche Marketing et Service de TotalEnergies

Créée en Janvier 2012, elle offre à ses clients, professionnels et particuliers, une vaste gamme de produits et services multi-énergies. Ces produits incluent des produits raffinés tels que des lubrifiants et des bitumes, des biocarburants, des recharges pour véhicules électriques, du gaz pour le transport routier et maritime ainsi que des services associés afin de les accompagner dans leur mobilité et la réduction de leur empreinte carbone.

Avec environ 16 000 stations-service³ dans le monde, la branche M&S est le quatrième acteur mondial du secteur des lubrifiants, et commercialise des produits hautement performants pour l'automobile, l'industrie et la marine. Pour mieux répondre aux besoins des clients B2B, l'entreprise s'appuie sur son réseau de vente, sa logistique mondiale et la diversité de son offre.

Présente dans 107 pays³, la branche emploie 31 000 collaborateurs³ qui se mobilisent partout au plus près de l'ensemble de ses clients. Plus de 8 millions de clients sont accueillis chaque jour, témoignant de l'engagement de l'entreprise à fournir des produits et des services de qualité.

1.3.2 TotalEnergies Afrique et Moyen-Orient (AMO)

La branche M&S est responsable de l'AMO qui est divisée en six (06) zones géographiques distinctes, à savoir l'Océan Indien, l'Afrique Australe, la Méditerranée et le Moyen-Orient, l'Afrique du Centre et de l'Est, l'Afrique de l'Ouest et le Nigeria. Le groupe a connu une croissance significative sur ces marchés en pleine expansion, augmentant la couverture de son réseau de 4 500 stations-service en 2013 à 4 718 en 2014, dont 4 200 en Afrique³.

Dans la région AMO, la branche M&S s'appuie principalement sur l'usine de production de lubrifiants de Dubaï depuis 1954 et a ouvert de nouvelles usines en Égypte, en Arabie Saoudite et en Algérie en 2012, 2013 et 2020 respectivement. En outre, TotalEnergies est présent dans 41 pays d'Afrique et considère ce marché comme une opportunité prometteuse. En 2014, la production d'hydrocarbures de TotalEnergies en Afrique représentait 30% de la production totale du groupe. De plus, M&S est devenu un partenaire de choix pour les clients miniers en Afrique, en leur fournissant des solutions d'approvisionnement et de gestion de carburants et de lubrifiants.

1.4 Présentation de TotalEnergies Algérie

TotalEnergies Algérie opère dans la région Afrique et Moyen-Orient (AMO), qui couvre la zone méditerranéenne et le Moyen-Orient. Présente en Algérie depuis 1952, grâce à sa filiale TotalEnergies Exploitation et Production Algérie, on constate que l'entreprise est un acteur historique du marché pétrolier algérien.

La division M&S Algérie est un modèle intégré qui assure la synergie entre différentes activités pour offrir une solution complète basée sur l'innovation, la complémentarité et la création de valeur. Cette division est composée de deux filiales : TotalEnergies Bitumes Algérie (TEBA) et TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA), qui offrent respectivement des produits de bitumes et de lubrifiants.

3. Source : dz.totalenergies.com

Voici le diagramme que nous avons établi pour démontrer le positionnement de TotalEnergies Algérie :

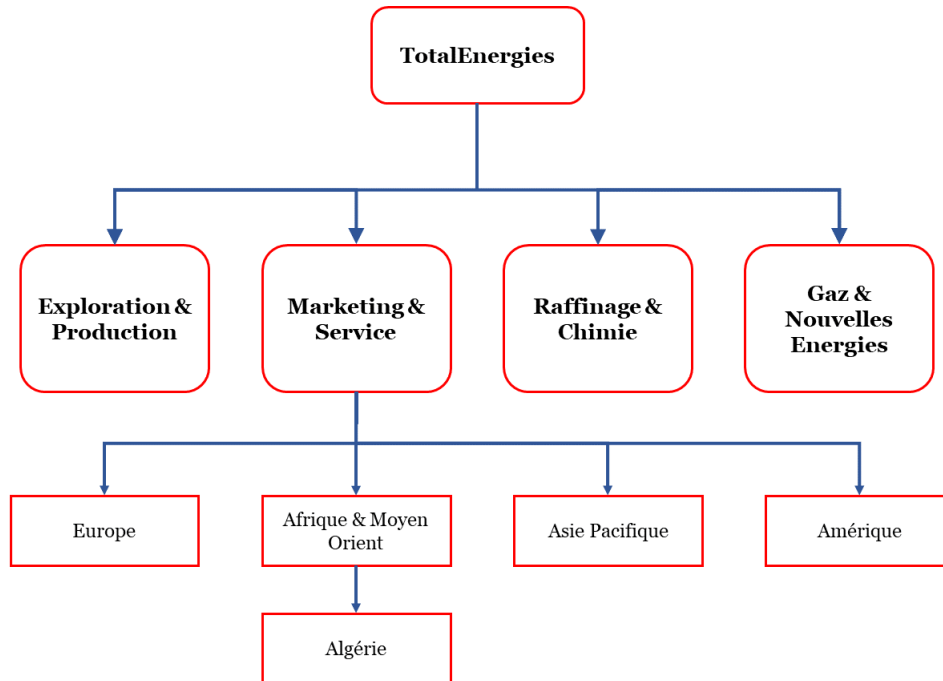


FIGURE 6 – Diagramme positionnant TotalEnergies Algérie

1.4.1 TotalEnergies Bitumes Algérie (TEBA)

TotalEnergies Bitumes Algérie SPA se spécialise dans la production, la distribution et la transformation de bitumes. En outre, parmi les grandes compagnies pétrolières mondiales, seul le groupe TotalEnergies est présent en Algérie.

1.4.2 TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA)

TotalEnergies a établi une présence en Algérie afin de consolider sa position de leader dans les activités Aval en Afrique, dans le cadre de l'expansion de son activité de lubrifiants à l'échelle internationale.

La commercialisation des lubrifiants sous les marques TotalEnergies et ELF a été commencée en juin 2014 par TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA) SPA avec une variété de produits répondant aux différents besoins de ses clients, particuliers et industriels.

TotalEnergies M&S Algérie comme déjà mentionné précédemment est constituée de deux filiales, TotalEnergies Lubrifiants Algérie (TELA) et TotalEnergies Bitumes Algérie (TEBA), qui sont organisées de manière similaire. Les directions Exploitation, Ressources Humaines, Finances et Administration sont communes aux deux filiales. Toutefois, chaque filiale possède sa propre direction commerciale.

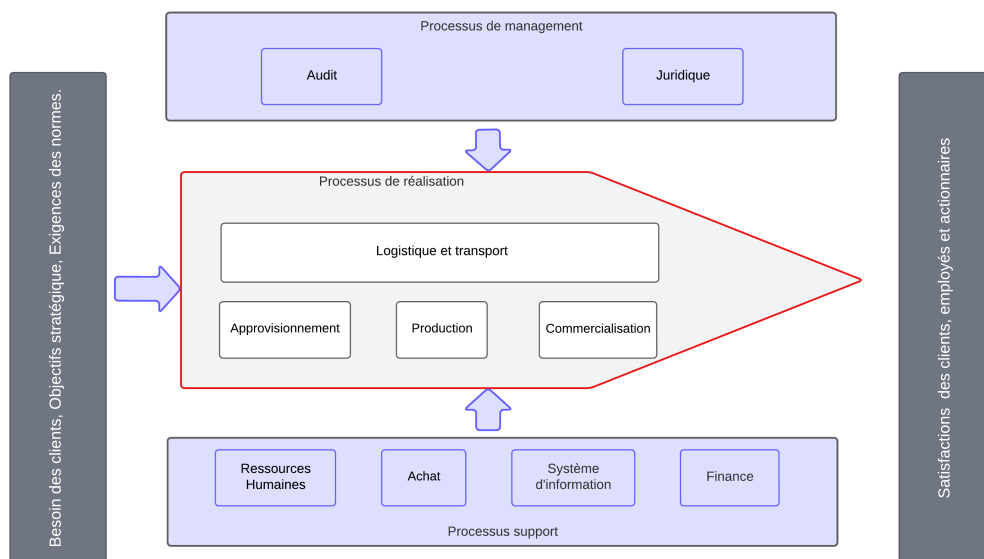


FIGURE 7 – Cartographie de processus globale TELA

Pour clarifier les différents liens hiérarchiques, organisationnels et fonctionnels entre les différentes directions, nous avons élaboré l'organigramme de TotalEnergies M&S Algérie :

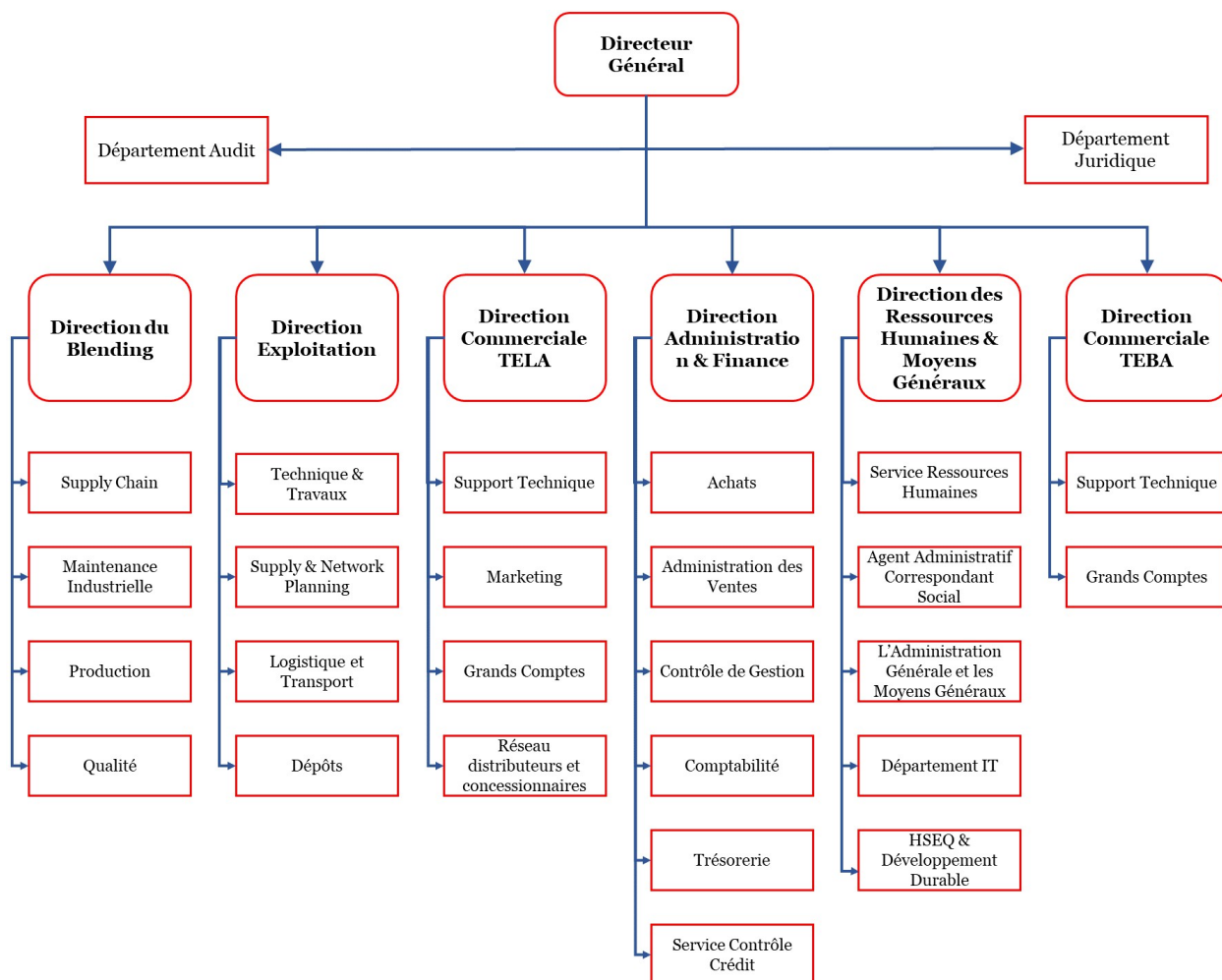


FIGURE 8 – Organigramme de M&S Algérie

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous l'avons effectué au sein de TotalEnergies Lubrifiants Algérie dans la direction d'exploitation dans le département logistique et transport.

1.4.3 Département Logistique et Transport

Le département Logistique et Transport de TotalEnergies est un pilier essentiel de l'entreprise, où chaque employé joue un rôle clé dans la chaîne logistique. Voici l'organigramme ci-dessous (figure 9) qui montre la structure et la hiérarchie des différents postes au sein du département.

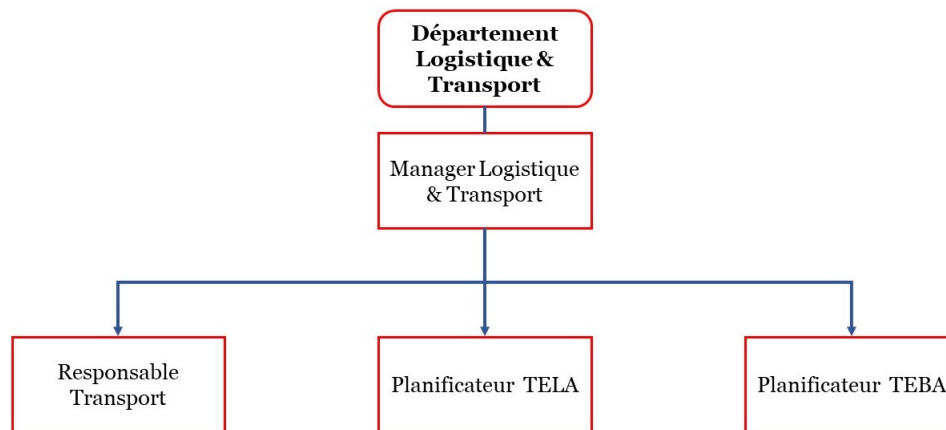


FIGURE 9 – Hiérarchie des différents postes au sein du département Logistique & Transport

Nous examinerons de plus près les membres de l'équipe du département Logistique et Transport, en décrivant leur rôle et leur contribution essentielle aux opérations de TotalEnergies.

Manager Logistique & Transport :

Le Manager Logistique et Transport est un responsable de haut niveau dans le département Logistique et Transport de TotalEnergies. Le titulaire de ce poste est responsable de la planification, de la coordination et de la gestion de toutes les opérations liées à la logistique et au transport de l'entreprise. Le Manager Logistique et Transport travaille en étroite collaboration avec les autres départements pour garantir une coordination efficace des activités.

Responsable Transport :

Le Responsable Transport est un poste clé dans le département de Logistique et Transport de TotalEnergies. Le titulaire de ce poste est responsable de la gestion de l'ensemble des activités de transport de l'entreprise, y compris la sécurité, l'organisation et la coordination de la logistique de transport. Le Responsable Transport travaille en étroite collaboration avec le Manager Logistique et Transport pour garantir la coordination efficace des activités.

Planificateurs TELA & TEBA :

Les planificateurs TELA et TEBA sont responsables de la coordination des opérations de transport en temps réel pour l'activité lubrifiante et bitume respectivement, veillant à la livraison sécurisée

et en temps voulu des produits.

Cartographie du processus Logistique et transport :

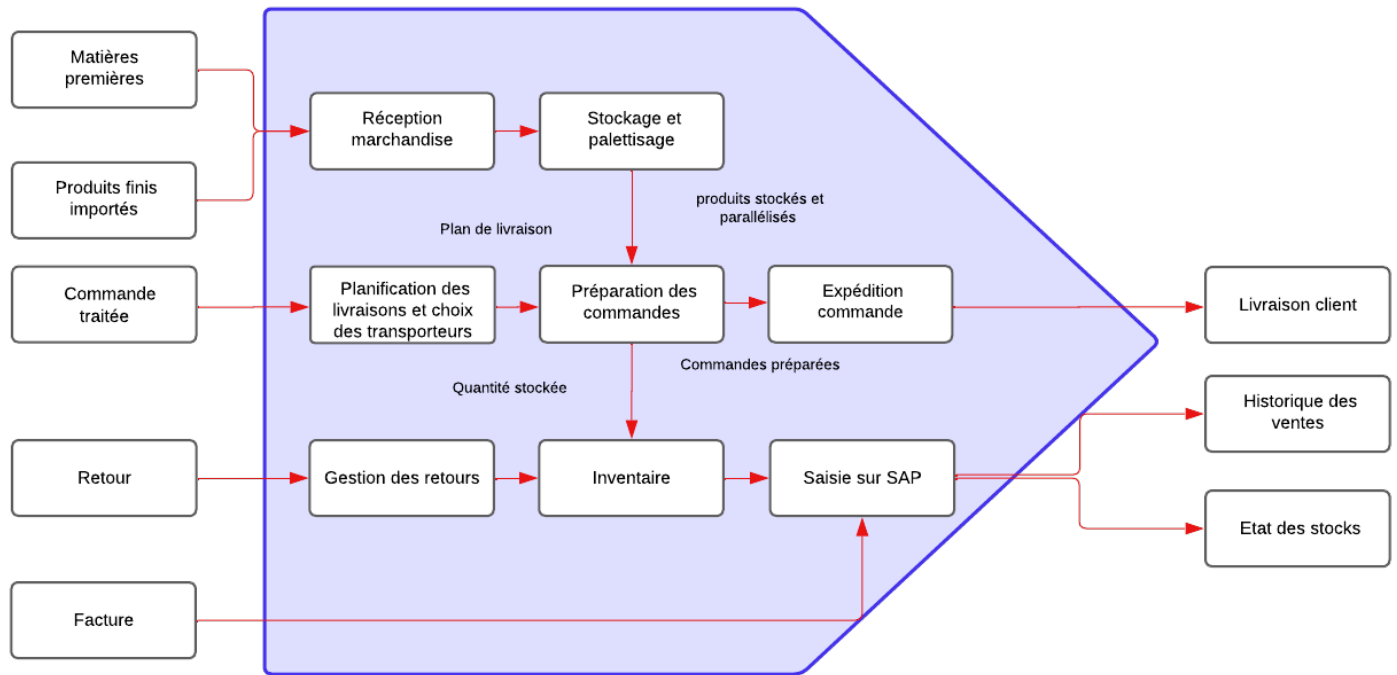


FIGURE 10 – Cartographie du processus logistique et transport

Description des Flux aval :

Dans la zone industrielle de Bethioua à Oran, TotalEnergies dispose d'une usine de production (blending) où elle produit des lubrifiants et des liquides de refroidissement. Cette usine est capable de produire 40 000 tonnes de produits finis par jour pour un shift de travail et produit 64 SKU. L'usine dispose d'un espace de stockage de 900 palettes pour les produits finis. Les produits sont ensuite acheminés vers l'entrepôt principal de Blida, qui peut stocker jusqu'à 5 700 palettes (soit 4 100 tonnes) et dispose de deux quais de chargement et de déchargement. L'entrepôt principal est capable de recevoir 250 palettes et de charger 280 palettes par jour.

TotalEnergies utilise deux canaux de distribution, B2B et B2C, qui représentent respectivement 66,86% et 33,14% de son activité globale. Ces canaux sont segmentés en quatre catégories : les distributeurs (automobiles et industriels) et TEQAS dans le canal B2C, qui représentent respectivement 67,16% et 32,84% des clients B2C, et GC et OEM dans le canal B2B, qui représentent respectivement 82,75% et 17,25% des clients B2B. 39% des clients de TotalEnergies sont basés dans le centre de l'Algérie, tandis que 28,5%, 18,7% et 13,8% se trouvent respectivement à l'est, à l'ouest et au sud. Selon la planification des tournées, les délais de livraison varient de 1 jour pour le centre à 2 à 8 jours pour les autres régions.

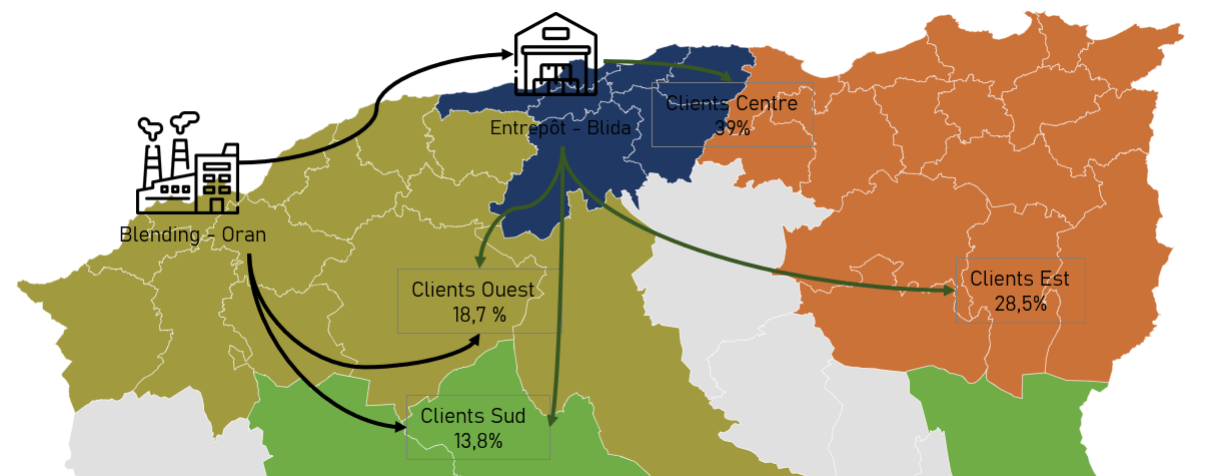


FIGURE 11 – Flux de Distribution et Répartition des clients

Déroulement de la planification des tournées :

En premier temps, l'administration des ventes reçoit les commandes des clients, les traite en vérifiant la disponibilité des produits en stock ainsi que leur quantité. Si les quantités commandées sont disponibles, elles sont directement envoyées au planificateur pour la planification de la livraison. Si les quantités sont insuffisantes, où les produits ne sont plus disponibles en stock, l'administration des ventes transmet la commande au commercial pour qu'il contacte le client et lui propose un report de la livraison.

Le planificateur reçoit le rapport de validation et planifie les itinéraires des camions et des chauffeurs, qui sont ensuite saisis dans SAP. en prenant en compte la disponibilité des ressources et les contraintes opérationnelles pour assurer une livraison efficace et rapide. Il vérifie également le coût par tonne du transport, et si ce coût est inférieur ou égal à coût spécifique fixé par le manager, le planificateur considère le planning de livraison comme conforme aux attentes et l'envoie.

En revanche, si le coût est supérieur, le planificateur analyse attentivement le planning pour en déterminer les raisons. Si nécessaire, il travaille en collaboration avec le responsable de transport pour proposer des ajustements ou des alternatives afin de réduire le coût tout en garantissant la satisfaction du client.

Si le planificateur réussit à trouver des solutions satisfaisantes, il en informe le commercial et le client, puis envoie le planning de livraison au dépôt et aux chauffeurs pour qu'ils puissent effectuer les livraisons dans les délais impartis. En revanche, s'il ne parvient pas à trouver de solutions satisfaisantes, il revoit avec le responsable de transport la décision d'envoyer ou non.

Finalement, le planificateur assure ensuite la surveillance des déplacements des camions en temps réel à l'aide d'outils de suivi OBC pour veiller au respect des délais de livraison prévus, ainsi que des règles de conduite et des consignes de sécurité établies par l'entreprise.

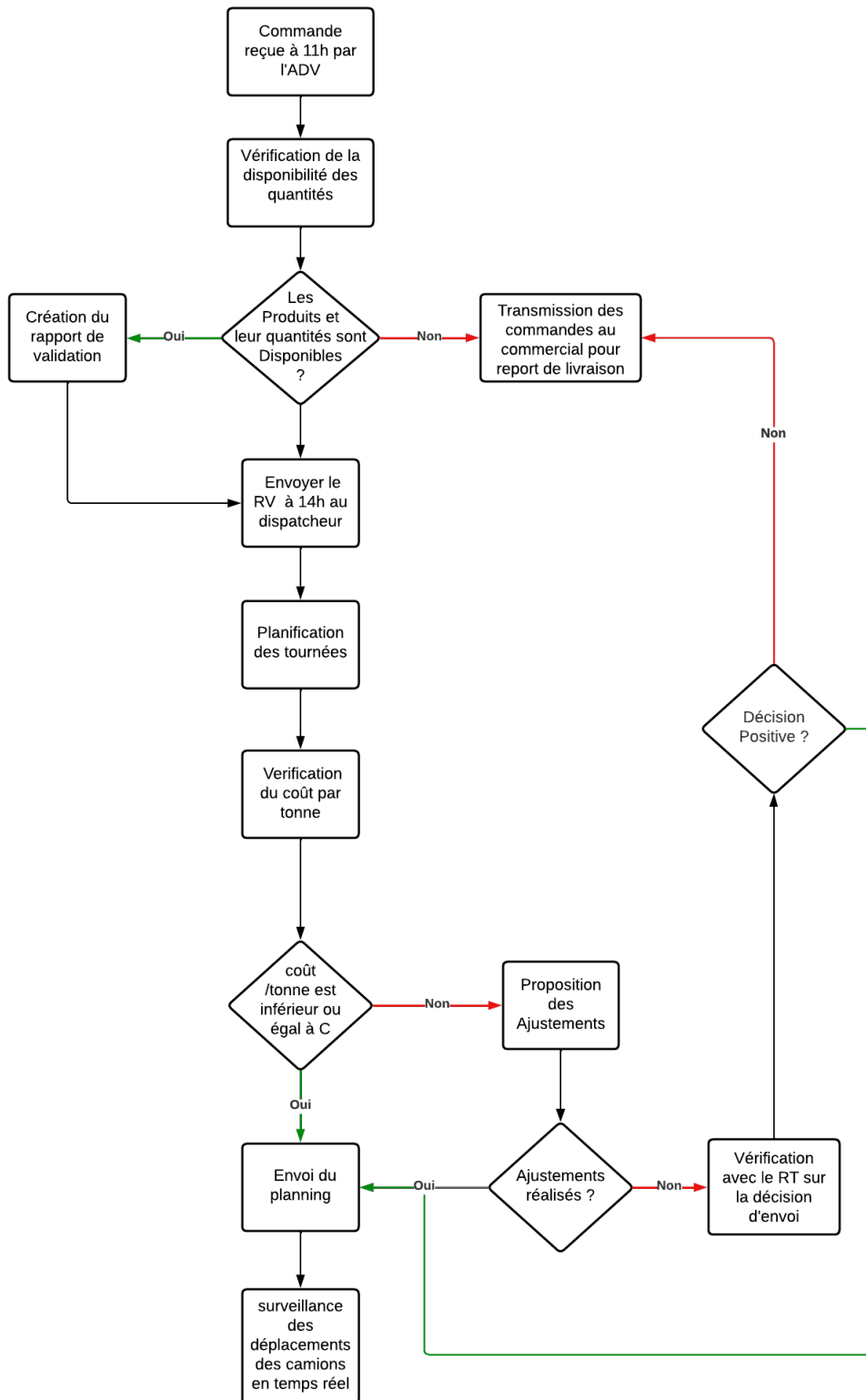


FIGURE 12 – Déroulement de la planification des tournées

1.5 Audit des pratiques logistiques

Afin d'analyser de manière exhaustive la logistique et le transport de TotalEnergies Algérie, d'évaluer leur efficacité et d'identifier les problèmes qui affectent les différents services, nous avons procédé à un audit en utilisant le référentiel d'évaluation de la performance logistique ASLOG.

L'objectif de cet audit est d'identifier les lacunes et les axes d'amélioration de la logistique de l'entreprise afin de renforcer sa compétitivité et sa rentabilité.

Il existe plusieurs référentiels permettant de réaliser un audit logistique. Nous avons choisi d'utiliser ASLOG car celui-ci nous permet de mettre l'accent sur la distribution et le transport, en mettant en avant les points essentiels tels que la maîtrise des flux en aval, le partenariat avec les transporteurs, ainsi que l'administration des ventes. De plus, ASLOG est un référentiel reconnu et éprouvé qui permet une évaluation globale et précise des performances logistiques, ce qui en fait un choix judicieux pour notre étude.

Le Référentiel ASLOG est un référentiel logistique conçu par l'Association Française pour la Logistique, qui a pour vocation d'aider les entreprises à analyser, diagnostiquer et améliorer la performance de leurs Supply Chain. Ce référentiel compte 124 questions réparties sur dix chapitres. Chaque chapitre est constitué de plusieurs sous chapitres, qui sont eux-mêmes constitués d'une à plusieurs questions, qui touchent divers aspects de la logistique, afin d'en analyser les principaux processus sur le plan stratégique, tactique et opérationnel et d'en évaluer la performance globale, et proposer un plan d'amélioration. L'évaluation de chaque chapitre se base sur les critères destinés pour chaque niveau, et la notation est de 0 à 3 par question.

L'audit de l'ASLOG se caractérise principalement par sa finalité et son contenu. L'objectif de celui-ci réside dans le fait d'améliorer les performances de l'entreprise sur l'ensemble des éléments logistiques : service aux clients, fiabilité des livraisons, délais de livraison améliorés, réactivité, optimisation des stocks, diminution des coûts logistiques

L'audit s'est déroulé sous forme d'entretiens individuels avec les responsables de département Logistique et Transport, nous avons retenu du référentiel ASLOG, les chapitres suivants :

- **Chapitre 5** : Logistique de transport
- **Chapitre 7** : Logistique de distribution

1.5.1 Logistique de Transport

Les clients de TotalEnergies sont distribués par tout le territoire national ce qui implique que l'activité transport occupe une grande partie de la supply chain de TotalEnergies par conséquent le groupe s'est investi énormément sur la formation des transporteurs et leurs suivi en se basant sur l'objectif de zéro accident routier. Les transporteurs sont sélectionnés selon un processus de sélection rigoureux basé sur plusieurs critères, par exemple : les chauffeurs doivent posséder une expérience minimum de 24 mois dans la conduite de véhicules lourds de marchandises.., ensuite des formations sont programmées pour ces chauffeurs incluent : une formation adaptée aux matières transportées pour les conducteurs de véhicules lourds de marchandises dangereuses pour s'assurer de la sécurité des chauffeurs, TotalEnergies s'assure par audit de contrôle régulièrement que les

conducteurs possèdent les qualifications nécessaires à la conduite et aux opérations de chargement et déchargement. Tous les transporteurs sont obligés d'équiper leurs camions d'un système GPS(OBC) afin d'en assurer la traçabilité et le respect des exigences (vitesse, pauses...).

Le processus est piloté par un responsable qui est le planificateur, ce dernier est chargé de trouver des combinaisons entre les partenaires (transporteurs) et la marchandise tout en optimisant la gestion des tournées selon la configuration suivantes :

Jour de livraison	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi
Commande = 22 Palettes	Livraison quotidienne				
Commande < 22 Palettes	Sud/Centre	Est/Centre	Ouest/Centre	Est/Centre	Centre

TABLE 1 – Les jours de livraison

Régions	Est	Ouest	Centre	Sud
Commande = 22 Palettes	J+3	J+3	J+2	J+4
Commande < 22 Palettes	J+4	J+5	J+3	J+7

TABLE 2 – Les délais de livraisons

Lorsque le planificateur reçoit une commande, il vérifie si celle-ci est égale à 22 palettes. Si c'est le cas, la commande est validée et envoyée directement pour livraison. Cependant, si elle est inférieure à 22 palettes, le planificateur travaille avec la cumulation des commandes et respecte les jours spécifiques de livraison, tels que le dimanche pour le Sud, et les délais de livraison selon les deux tableaux (1 et 2).

Par contre nous avons remarqué une mauvaise détermination des coûts du transport cela dû à une mauvaise allocation des ressources et un faible taux de remplissage.

1.5.2 Logistique de Distribution

TotalEnergies Algérie a opté pour l'utilisation exclusive de camions pour la distribution de ses produits. Les produits sont distribués sous trois formes différentes : en fût, en carton et en bidon. L'entreprise utilise deux canaux de distribution afin de maximiser l'efficacité : la distribution directe pour les comptes importants, tels que les grandes industries, et la distribution indirecte pour les réseaux de distributeurs, les concessionnaires et les magasins indépendants spécialisés dans l'entretien automobile, comme TotalEnergies Quartz Auto Service (TEQAS), qui est membre de ce réseau.

Pour assurer une distribution efficace, l'entreprise effectue des transferts inter-dépôts depuis son usine de production Blending à Oran vers son dépôt de Blida pour environ 87% de ses produits. Elle se charge également de la distribution des commandes depuis Blending vers les clients situés dans les régions Sud et Ouest, ainsi que depuis l'entrepôt de Blida vers tous les clients des quatre régions (Centre, Est, Ouest et Sud).

Contrairement à certaines entreprises qui utilisent des itinéraires prédéfinis pour la distribution de leurs produits, TotalEnergies Algérie planifie ses tournées en fonction des besoins de ses clients. Les prestataires logistiques externes utilisent différents types de camions sélectionnés en fonction du tonnage nécessaire pour chaque tournée. Cette approche permet à l'entreprise de s'adapter aux

besoins spécifiques de ses clients de manière plus efficace.

TotalEnergies Algérie est continuellement en quête d'améliorations pour son offre logistique en termes de qualité, de coût et de délais. L'entreprise prend en compte les niveaux et types de services proposés sur le marché pour mieux répondre aux attentes de ses clients. Les informations échangées avec les clients sont conçues de manière à ce qu'un interlocuteur identifié puisse fournir toutes les informations relatives à une commande en quelques minutes, en fonction de leur forme et de leur nature.

Pour les prévisions de ventes annuelles, l'entreprise s'appuie sur l'historique des ventes ainsi que l'expertise et les connaissances de la personne responsable de cette opération. Les délais de livraison standard sont également communiqués au client avant la passation de la commande afin de garantir une expérience client optimale.

1.6 Description de la problématique

1.6.1 Problématiques détectés

En mettant l'accent sur la logistique et le transport, l'audit réalisé nous a permis de nous plonger au cœur de la supply chain de TotalEnergies Algérie. Nous avons pu appréhender les opérations clés de l'entreprise et comprendre comment les différents départements interagissent les uns avec les autres. Cependant, en réalisant cette étude, nous avons également découvert un certain nombre de failles au sein du département logistique et transport, notamment en ce qui concerne le processus de planification des tournées. Elles ont été soigneusement étudiées afin de proposer des solutions adaptées au problème et qui permettront à TotalEnergies Algérie d'améliorer ses performances logistiques et de rationaliser sa chaîne d'approvisionnement au profit de ses clients.

Dysfonctionnement Processus de planification des tournées :

Vers 14h30, le planificateur reçoit un fichier Excel contenant en moyenne 100 commandes et 25 clients répartis dans différentes régions et wilayas. Il élabore alors un planning des tournées qui est envoyé le soir même au dépôt et aux transporteurs. La planification consiste à regrouper les commandes en trouvant les meilleures combinaisons de clients de même région et d'itinéraire pour minimiser le temps de transport, les coûts par kilomètre et maximiser le taux de remplissage.

Cependant, la plupart des commandes ont un faible tonnage, à l'exception de quelques-unes, et le planificateur est contraint de limiter le nombre de clients à trois par livraison, ce qui peut affecter le taux de remplissage et l'optimisation d'itinéraire au profit de la satisfaction des clients.

Cette opération prend beaucoup de temps et le planificateur la termine souvent aux alentours de 18h, voire 20h parfois. La pression, la quantité énorme de données et d'informations rendent le processus difficile, surtout lorsqu'il est effectué manuellement, ce qui peut conduire à des résultats très éloignés de l'optimum et entraîner des coûts énormes. Même lorsqu'il est contraint de maximiser le taux de remplissage, le planificateur risque de décevoir certains clients, ce qui peut engendrer des coûts supplémentaires.

Pour résumer, on a comme dysfonctionnements :

- **Le temps nécessaire à la préparation des tournées est important** : En raison de l'énorme quantité de données et d'informations, le planificateur doit passer beaucoup de temps à créer manuellement le programme de la tournée.

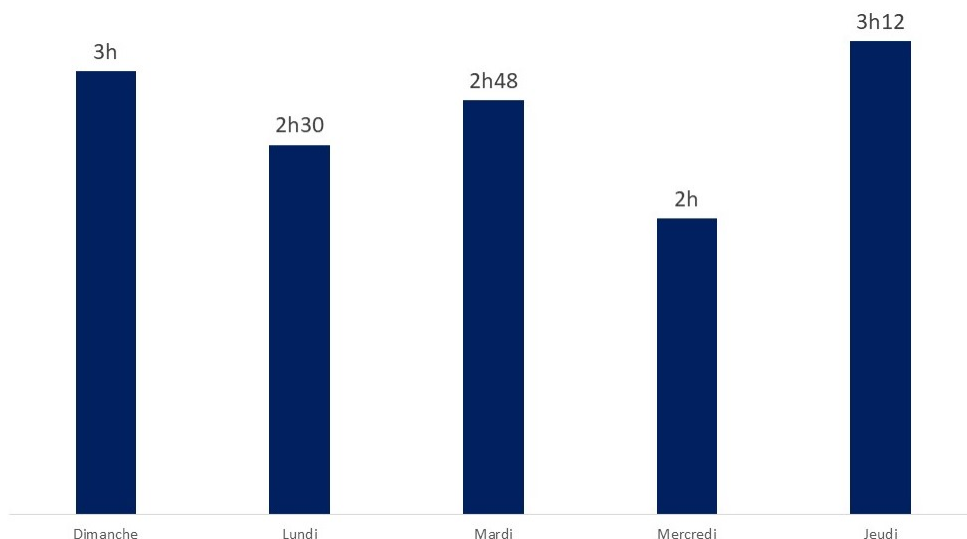


FIGURE 13 – Temps de traitement (une semaine d'observation)

- **Faible taux de remplissage** : En raison de la quantité et de la fréquence des commandes, il peut être difficile de remplir entièrement les camions.

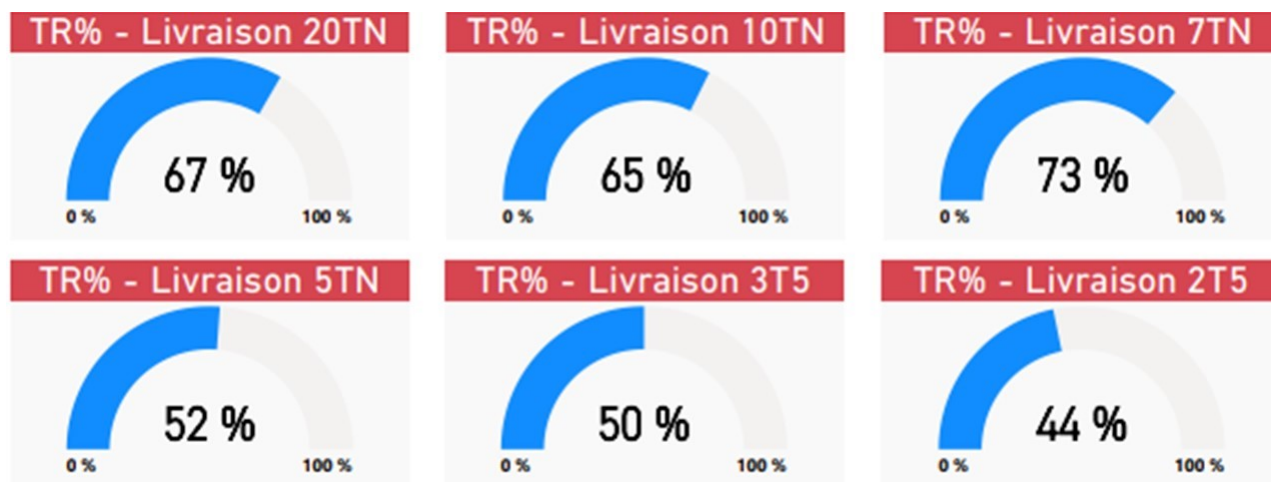


FIGURE 14 – Taux de remplissage

- **Difficultés à trouver les meilleures combinaisons de clients** : Afin de réduire le temps de transport et les coûts par kilomètre, la planification consiste à combiner les commandes en identifiant les combinaisons optimales de clients dans la même région et sur le même itinéraire, ce qui peut s'avérer un défi compte tenu de la complexité du processus.

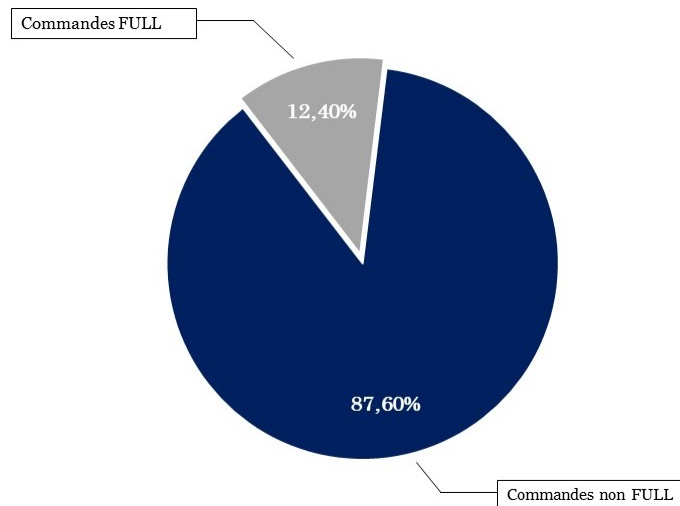


FIGURE 15 – Pourcentage des commandes clients Full et Non Full

- **Erreurs de planification** : La difficulté du processus de planification peut entraîner des erreurs, telles que la confusion entre les différents types de produits conditionnés sur une même palette.

1.6.2 Enoncé de la problématique

Dans un marché des lubrifiants en constante évolution et avec une concurrence de plus en plus féroce, la gestion efficace de la logistique est devenue un enjeu majeur pour maintenir la compétitivité de TotalEnergies.

Toutefois, en raison de la complexité de la chaîne logistique et de la diversité des produits proposés, une planification précise et efficace de la distribution est indispensable pour garantir des livraisons à temps et à des coûts raisonnables. Malheureusement, la planification actuelle manque de précision et l'affectation de la capacité de transport n'est pas clairement définie, entraînant des inefficacités dans la planification des tournées et des coûts logistiques considérables. Face à ces défis, il est essentiel pour TotalEnergies de trouver des solutions pour améliorer la gestion de sa logistique et maîtriser les coûts de transport afin de rester compétitif sur le marché.

La problématique que nous traitons dans le cadre de ce mémoire repose sur la question suivante :

Comment optimiser la planification des tournées de manière à minimiser les coûts de transport tout en réduisant efficacement le temps nécessaire pour accomplir cette tâche ?

Pour arriver à répondre à cette question, nous allons la fragmenter en deux sous questions :

- **Serait-il possible de réduire les coûts de transport en maximisant les taux de remplissage des camions et en planifiant efficacement les itinéraires de livraison pour minimiser la distance parcourue ?**
- **Serait-il envisageable de créer un outil qui permet de faciliter la tâche de planification ?**

Les analyses précédentes nous ont permis d'identifier deux pistes d'amélioration possibles qui sont :

- La création d'un outil de planification des itinéraires pour accélérer l'exécution de la planification. Un tel programme peut faciliter la planification en réduisant le temps de traitement nécessaire à l'exécution de cette opération.
- Maximiser le taux de remplissage des camions afin de réduire les coûts de transport. Les transporteurs pourraient réduire le nombre de voyages nécessaires pour livrer toutes les commandes en maximisant les taux de remplissage, ce qui réduirait les coûts de transport. Les transporteurs pourraient également minimiser la distance totale parcourue, ce qui réduirait les frais de transport, en planifiant efficacement les itinéraires de livraison.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le groupe TotalEnergies ainsi que ses différentes filiales, en mettant l'accent sur TotalEnergies Lubrifiants Algérie et ses principales activités. Nous avons ensuite réalisé un diagnostic approfondi en utilisant le référentiel ASLOG et l'approche processus afin de mieux comprendre le fonctionnement de l'activité logistique et de transport. Cette évaluation nous a permis de mesurer la performance de l'entreprise et de détecter les éventuels dysfonctionnements existants. Enfin, nous avons exposé la problématique qui synthétise l'ensemble des dysfonctionnements identifiés. Dans le chapitre suivant, nous présenterons une revue de littérature afin de mieux cerner les différents concepts et méthodes relatifs à la résolution de notre problématique.

Chapitre 02 : État de l'art

2 État de l'art

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est de présenter les aspects théoriques académiques liés à notre travail. Nous avons structuré ce chapitre en trois parties distinctes afin de permettre au lecteur de se familiariser avec les différents concepts et terminologies et de faciliter la compréhension des solutions proposées. La première partie est consacrée à la présentation des définitions relatives à la logistique et à la planification des transports. Dans la deuxième partie, nous revenons sur les bases des modèles mathématiques, en exposant leurs formulations mathématiques ainsi que leurs différentes variantes. Enfin, dans la troisième partie, nous nous concentrons sur les nombreuses méthodes de résolution développées en recherche opérationnelle, afin de trouver une solution optimale au problème que nous traitons.

Nous présentons ci-dessous un schéma récapitulatif de l'approche et de la structure adoptées dans cette partie de notre travail, qui vise à identifier les concepts de base liés à notre sujet.

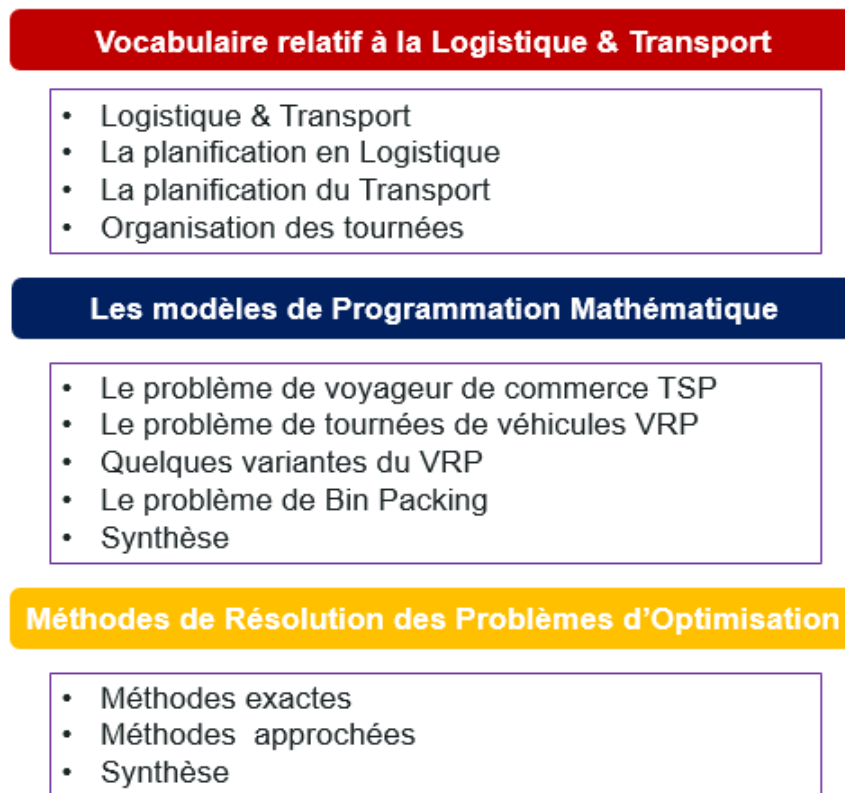


FIGURE 16 – Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 2

2.2 Définitions et vocabulaire relatifs à la logistique et transport

2.2.1 Logistique & Transport

Logistique :

La logistique est un ensemble d'activités permettant la planification, l'organisation, la mise en œuvre et le contrôle du flux de biens, de services et d'informations depuis le premier fournisseur au dernier client ayant comme but de répondre efficacement aux besoins des clients. Parmi ces activités on peut citer :

- La gestion des approvisionnements : la première étape consiste à l'acquisition de la matière première et les fournitures nécessaires pour le lancement de la production.
- La gestion des opérations : la logistique gère les différentes opérations y compris : l'organisation et la supervision des activités de production, de manutention, de stockage et de distribution.
- La gestion des transports : La coordination des différents moyens de transport tout en optimisant les distances et le temps d'arrivée de la commande jusqu'à la destination du client..
- La gestion des stocks implique la vérification du niveau du stock et le taux de rotation pour optimiser les coûts de stockage tout en assurant la disponibilité des produits.

La logistique est un élément important dans la chaîne d'approvisionnement qui vise à l'optimisation des coûts des différentes activités tout en améliorant la qualité du service et la satisfaction des clients. **(Christopher 2016, p. 2-3)**

Transport :

Le transport est l'une des activités clés de la supply chain, qui consiste à déplacer les biens ou les produits finis du lieu de fabrication ou de stockage vers le lieu de consommation ou de distribution. Choisir le bon moyen de transport permet aux entreprises d'ajuster l'emplacement de ses installations et de ses stocks pour trouver le bon équilibre entre réactivité et efficacité.

Le transport en supply chain comprend toutes les étapes nécessaires pour livrer les produits, y compris la planification, la sélection des modes de transport, l'organisation des itinéraires, la gestion des flux de transport, la coordination des parties impliquées dans la chaîne logistique et la gestion des coûts et des risques associés. Le transport peut être effectué par divers modes, tels que le transport routier, le transport ferroviaire, le transport maritime ou le transport aérien, en fonction de la nature des produits, de la distance à parcourir, des délais de livraison et des coûts associés.

La réactivité, l'efficacité et la qualité du transport ont un impact direct sur la performance globale de la supply chain, y compris les délais de livraison, les coûts de transport, la sécurité des produits, la flexibilité de la chaîne d'approvisionnement et la satisfaction des clients. **(Chopra and Meindl 2015, p. 63-64)**

2.2.2 La planification en logistique

2.2.2.1 Les problèmes de planification

La planification est un acteur important dans la définition de la stratégie d'entreprise. En outre, les objectifs commerciaux fixés par l'entreprise doivent garantir que les opérations internes et externes sont correctement planifiées pour livrer, produire et distribuer les produits dans les bonnes conditions et au bon moment. Différents types de décisions doivent être coordonnés à plusieurs niveaux de la hiérarchie. Par conséquent, les entreprises ont besoin d'outils et de méthodes pour mieux planifier leurs chaînes d'approvisionnement. (Stadtler and Kilger 2005, p. 553)

La planification est un processus systématique, rationnel et théorique d'analyse et de résolution de problèmes complexes de planification de tâches qui nécessitent une variété de ressources. Ces problématiques sont étroitement liées à la notion de l'optimisation. puisque la plupart du processus de planification sont basés sur des modèles mathématiques pour la résolution et la recherche de la solution optimale. En effet, le processus de planification peut se décortiquer selon les étapes suivantes :

- La détection du problème : l'utilisation de plusieurs méthodes de détection du problème sur la situation actuelle, par exemple la méthode QQQQCP.
- La définition et la formulation du problème : cette étape consiste premièrement à mieux comprendre le problème réel et les contraintes liées à ce dernier ensuite modéliser ce phénomène réel à l'aide des variables et des fonctions d'une manière fiable pour but d'analyser et faciliter la résolution de ce problème en utilisant une ou plusieurs théories fournissant des résultats avec une certaine marge d'erreur.
- La résolution du problème : il existe plusieurs algorithmes pour la résolution du modèle d'où la nécessité d'établir une comparaison selon le coût et le temps du traitement et la fiabilité des résultats pour le choix du meilleur algorithme de résolution adopté au problème.
- La validation solutions obtenues : En utilisant une analyse de sensibilité et des tests rétrospectifs.
- La mise en place de la solution : autrement dit l'implémentation unique ou bien d'une façon itérative.

2.2.2.2 La planification du transport

La planification du transport consiste à choisir les meilleurs modes de transport et à déterminer les itinéraires les plus efficaces tout en tenant compte des restrictions légales et environnementales. En outre, les coûts de transport sont contrôlés et la coordination entre les différents acteurs de la chaîne logistique est assurée. Les processus de coordination et de planification du transport peuvent être optimisés à l'aide d'outils tels que les systèmes de gestion du transport (TMS) ou les solutions de planification et d'optimisation de la chaîne logistique. Les décideurs peuvent utiliser ces outils pour traiter des problèmes tels que le besoin de capacités de transport, les négociations contractuelles avec les fournisseurs de services logistiques et la réservation des transporteurs. (Corriveau 2013, p. 15)

L'objectif ultime de cette planification est de minimiser les coûts logistiques tout en maintenant un niveau de service précis, en optimisant la répartition du trafic entre les différents types de transport et en planifiant les livraisons de manière à utiliser au mieux les ressources et le temps de travail disponibles. Enfin, Pour garantir la meilleure performance de la chaîne logistique, une gestion efficace du transport est également prise en compte incluant la consommation et l'entretien des véhicules. (Tixier et al. 1998, p. 171-173)

2.2.2.3 Processus de la planification du transport

Comme déjà mentionné la planification du transport au sein de l'entreprise vise à l'acheminement et la distribution des produits aux clients au bon moment et en bonne qualité pour cela le planificateur doit prendre en considération plusieurs facteurs ayant un poids important pour assurer une activité régulière et stable, on peut citer certains paramètres :

- Le lieu de la demande : les différents points de distribution, il est important de connaître l'adresse exacte des clients pour faciliter la tâche au distributeur.
- Temps de trajet maximum : ce paramètre est important pour la détermination de main d'œuvre issue de prestataire, qui peut changer selon leurs conventions et conditions de travail.
- Flottes hétérogènes : l'entreprise dispose d'une flotte de différents camions, qui varient en termes de capacité, rapidité, etc... il faut prendre en compte la disponibilité des chauffeurs, leurs horaires de travail.
- Restrictions de sécurité : certains produits ne peuvent pas être chargés ensemble. Ils sont appelés produits « non-compatibles ». Donc il faut séparer les produits non compatibles pour éviter des problèmes de sécurité.
- Capacité de stockage des installations : Chaque camion à une capacité de stockage propre. Cependant, un camion ne peut pas recevoir de charge supérieure à sa capacité de stockage autorisée.

2.2.2.4 Organisation des tournées

Le déroulement de la planification complexe connu sous le nom d'organisation des tournées implique non seulement de choisir le meilleur chemin parmi les alternatives disponibles, mais aussi de décider de l'ordre dans lequel un véhicule doit se rendre à différents points de livraison ou d'enlèvement. Tout en optimisant un paramètre tel que la distance à parcourir ou le coût de la tournée, il est essentiel de s'assurer que les poids et les volumes à transporter sont compatibles avec les capacités du véhicule. De plus, lorsque plusieurs camions sont impliqués, il est essentiel de planifier la façon dont ils effectueront les tournées en divisant les livraisons ou les collectes à effectuer, tout en minimisant un paramètre tel que le coût des tournées. (Pimor and Fender 2008, p. 346)

2.3 Les modèles de programmation mathématique

2.3.1 Le problème de voyageur de commerce TSP

Le problème du voyageur de commerce ou TSP (pour "Traveling Salesman Problem" en anglais), se définit comme un problème d'optimisation combinatoire qui consiste à déterminer le chemin le plus court entre un point (ex : ville) de départ et un point de destination, l'ensemble des villes

est noté I avec $|I| = n$, tout en visitant une liste de points spécifiés. Il s'agit en fait de trouver le circuit hamiltonien le plus court dans un graphe complet, où chaque ville i est représentée par un nœud et où chaque arête représente le coût c_{ij} (ex : distance) entre deux villes i et j , sachant que $\forall i, j \in I \times I, i \neq j$. (**Dantzig et al. 1954, p. 2-3**)

Ce problème est considéré comme le problème des tournées le plus simple, il est classé comme un problème NP-Complet .

Selon (Dantzig et al.), on pose c_{ij} le coût du trajet entre deux clients i et j , et x_{ij} une variable binaire indiquant si le trajet est compris dans la solution. Le problème du voyageur de commerce se modélise comme suit :

Modèle mathématique (TSP) :

Fonction objective :

$$Z_{\min} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

S.C :

$$(TSP) = \begin{cases} \sum_{j \in I} x_{ij} = 1, & \forall i \in I \\ \sum_{i \in I} x_{ij} = 1, & \forall j \in I \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, & \forall S \subseteq I, 1 \leq |S| \leq \lfloor n/2 \rfloor \\ x_{i,j} \in \{0, 1\} & \forall i, j \in I \times I, i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

- Dans ce problème, l'objectif est de minimiser le coût de déplacement total (fonction objective 1).
- Les contraintes (2.1 et 2.2) impliquent que l'on cherche à affecter à chaque ville, la ville qui lui succède selon l'ordre du parcours.
- La contrainte (2.3) permet d'éliminer les sous-cycles.
- La contrainte (2.4) indique que les variables de décision sont binaires.

2.3.2 Le problème de tournées de véhicules VRP

Le problème de tournées de véhicules (VRP) ("Vehicle Routing Problem" en anglais) est une généralisation du problème de TSP avec plusieurs voyageurs (véhicules), son objectif consiste à déterminer les meilleures itinéraires (les plus optimaux) pour une flotte de véhicules qui partent et arrivent d'un dépôt afin de visiter un ensemble de clients. L'évaluation de ces itinéraires se fait selon une fonction objective qui calcule les coûts (Ex : le temps de parcours, une distance, coût de

transport). Ce problème appartient à la classe des problèmes d'optimisation NP-Complets. (**Ou-
lad Kouider 2020**)

Le VRP est modélisé par un graphe $G = (V, A)/V = 0, \dots, n$, ou V correspond à l'ensemble des sommets du graphe tel que le 0 représente le dépôt qui est le point de départ de toutes les tournées, et les autres sommets $V \setminus \{0\}$ l'ensemble des clients à visiter, A : est l'ensemble des arcs reliant les clients, le poids de chaque arc (i, j) de l'ensemble A correspond au coût (distance, temps ..) engendré par le véhicule en traversant cet arc.

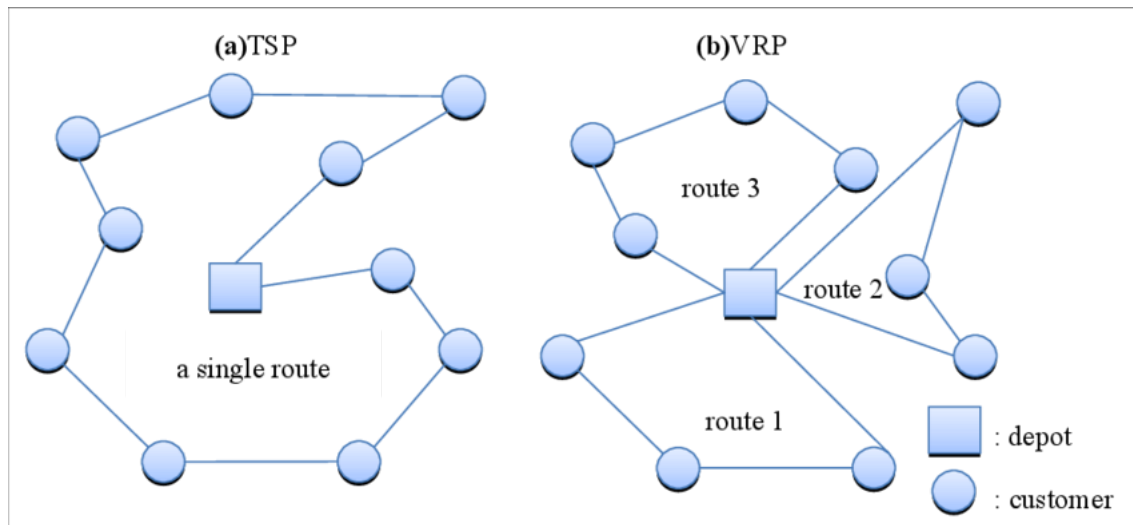


FIGURE 17 – Illustration du problème du voyageur de commerce (TSP) et du problème de tournée de véhicule (VRP)

L'objectif du VRP est de visiter tous les clients exactement une fois tout en minimisant la fonction objective et en respectant certaines conditions (contraintes) qui sont les suivantes :

- Les véhicules doivent commencer et finir leurs tournées au dépôt.
- Chaque véhicule effectue une seule tournée
- Tous les clients doivent être desservis
- Une flotte de M véhicules identiques dont la capacité est limitée à Q

2.3.3 Formulation mathématique

Pour la modélisation du VRP, nous allons utiliser la formulation adoptée par (**Fisher and Jai-
kumar 1978, 1981**)

Considérons :

- $I = \{1, \dots, n\}$: ensemble des villes.
La ville 0 représente le dépôt.
- $M = \{1, \dots, m\}$: ensemble des véhicules.
- C_{ij} : cout relatif au déplacement de la ville i vers la ville j ; $\forall (i, j) \in I ; i \neq j$

- Q : capacité des véhicules
- d_i : demande du client i

Variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si le véhicule } k \text{ va de la ville } i \text{ vers } j; \forall i, j \in I; \forall k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si le véhicule } k \text{ dessert la ville } i; \forall i \in I \setminus \{0\}; \forall k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Modèle mathématique (VRP) :

Fonction objective :

$$Z_{\min} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (3)$$

S.C :

$$(VRP) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k \in K} y_{0k} = m \\ \sum_{k \in M} y_{ik} = 1, \quad \forall i = \overline{1, n} \\ \sum_{i \in I} x_{ijk} = y_{jk}, \quad \forall j \in I \setminus \{0\}; \forall k \in M \\ \sum_{j=1}^n x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall i \in I \setminus \{0\}; \forall k \in M \\ \sum_{i=1}^n d_i y_{ik} \leq Q, \quad \forall k \in M \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq I, 2 \leq |S| \leq n - 2 \\ x_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall i, j \in I, \forall k \in M \\ y_{ik} \in \{0, 1\}; \forall i \in I, \forall k \in M \end{array} \right. \quad (4)$$

- La contrainte (4.1) permet de vérifier qu'on construit M tournées ;
- La contrainte (4.2) permet de vérifier le passage unique à chaque sommet du graphe (hors le dépôt) ;
- Les contraintes (4.3 et 4.4) signifient que si un véhicule dessert une ville, cela veut dire qu'il arrivait d'une autre ville et reparte vers une autre ;
- La contrainte (4.5) représente les contraintes de respect de la capacité des véhicules ;
- La contrainte (4.6) élimine la formation de sous-tour au sein d'une tournée ;
- Les contraintes (4.7 et 4.8) signifient que les variables de décision sont binaires.

Quelques variantes du problème de tournées de véhicules :

VRP à compartiments multiples (MCVRP) :

Le MCVRP est un problème d'optimisation combinatoire lié à la logistique, il est considéré comme une extension du problème classique de tournées de véhicules (VRP), il consiste à la recherche d'un meilleur itinéraire tout en optimisant le coût total. Nous notons que par rapport aux VRP classiques, des contraintes spécifiques supplémentaires liées aux compartiments des différents produits ont été ajoutées. ces contraintes sont définies comme suit :

- Un ensemble de types de produits $p, p \in P$ est pris en considération plutôt qu'un seul type, et ces types de produits ne peuvent pas être mélangés pendant le transport en raison d'exigences différentes en matière de transport, de plus, les produits se distinguent les uns des autres. Chaque point de service à la clientèle a besoin d'une variété de produits et chaque point peut être visité plusieurs fois pour fournir les différents produits.
- Un MCVRP permet de diviser la zone de chargement d'un véhicule en un nombre fini de compartiments, chacun d'entre eux pouvant transporter un seul type de chargement. Par conséquent, l'ensemble des compartiments dans lesquels la zone de chargement d'un véhicule peut être divisée est défini comme $M = 1, \dots, M_{max}$. En ce qui concerne les caractéristiques associées aux compartiments, le nombre et le volume des compartiments individuels d'un véhicule ne sont pas prédéterminés.
- La capacité globale Q de l'espace de chargement d'un véhicule est la seule limite au nombre de compartiments pouvant être créés. En outre, chaque compartiment peut être utilisé pour transporter n'importe quel type de marchandise. Les demandes de plusieurs clients pour le même produit de la même catégorie peuvent être placées dans le même compartiment.

Pour mieux appréhender la distribution de la marchandise en utilisant des véhicules multi-compartiments, voici une figure récapitulant le processus :

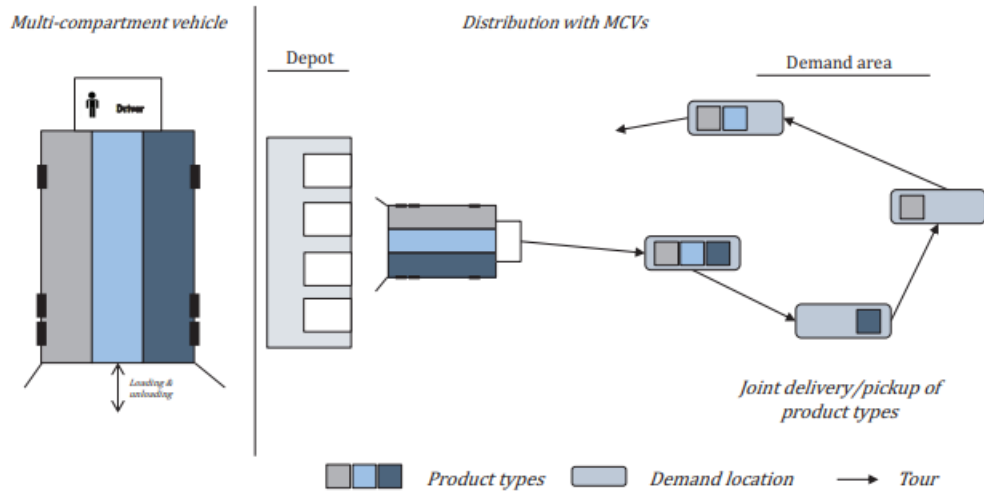


FIGURE 18 – Distribution process with MCVs

Il est important de noter que les caractéristiques relatives aux compartiments, telles que la flexibilité dans la configuration des compartiments et les exigences de livraison, doivent être prises en considération lors de l'élaboration des itinéraires des VMC, comme la possibilité de combiner plusieurs demandes de clients sur le même itinéraire de livraison. (Ostermeier et al. 2020)

VRP multi-dépôts (VRPMD) :

Lorsqu'une entreprise possède plusieurs dépôts, dont le nombre et les emplacements sont bien connus, chaque dépôt peut stocker tous les produits commandés par les clients. Une flotte de véhicules à capacité limitée est utilisée pour distribuer les produits aux clients. Chaque véhicule commence et finit au même dépôt. La localisation et la demande de chaque client sont connues à l'avance. Chaque client est visité par un véhicule exactement une fois. Le VRPMD est une version du VRP dans laquelle les véhicules peuvent s'approvisionner de plusieurs dépôts. (Hoa et al. 2007)

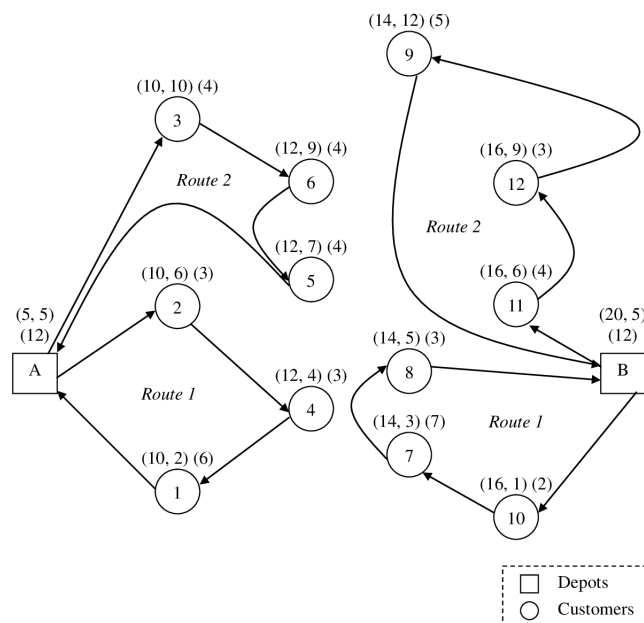


FIGURE 19 – Exemple VRPMD

Pour résoudre ce problème, trois décisions doivent être prises. Les décideurs doivent d’abord regrouper un ensemble de clients qui doivent être desservis par le même dépôt, ensuite ils affectent les clients d’un même dépôt à plusieurs itinéraires de manière à ce que la contrainte de capacité des véhicules ne soit pas violée. Enfin, ils doivent déterminer l’ordre de livraison de chaque itinéraire.

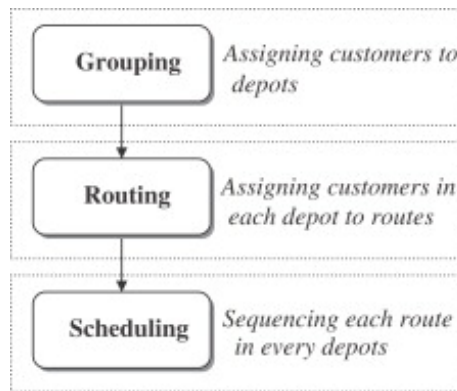


FIGURE 20 – La hiérarchie des décisions dans un problème VRPMD

VRP avec fenêtre de temps (VRPTW) :

La version du VRP la plus étudiée est le VRPTW (vehicle routing problem with time windows). Les clients et le dépôt ont des fenêtres de temps de visite spécifiques. Dans ce contexte, chaque arc est identifié par un temps de transit, qui est généralement considéré comme un coût.

Une fenêtre temporelle avec une date de service au plus tôt e_i et une date de service au plus tard l_i représente la disponibilité d’un client. Un camion arrivant chez le client i avant la date e_i doit attendre le début officiel de la fenêtre temporelle. La contrainte de temps de trajet maximum tient compte du temps d’attente qui en résulte. Si le temps d’arrivée dépasse l_i , donc la solution proposée sera rejetée. (Afifi and Moukrim 2016).

VRP avec livraison fractionnés (SDVRP) :

Lorsqu’un client a plusieurs commandes qui dépassent la capacité du véhicule, il devient nécessaire de permettre plusieurs livraisons au même client afin de satisfaire sa demande. Avec le SDVRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem), un client peut être desservi par plus d’un véhicule, c’est-à-dire que la demande d’un client peut être répartie entre plusieurs véhicules et que chaque véhicule peut effectuer des livraisons pour plusieurs clients. (Chen and Golden 2007)

En autorisant les livraisons fractionnées, il est possible de minimiser les coûts totaux de transport en utilisant moins de véhicules et en réduisant la distance totale parcourue par la flotte tout en satisfaisant toutes les demandes des clients et en respectant la contrainte de capacité de la flotte.

VRP avec livraisons et ramassages (VRPDP) :

Le VRPDP est un problème logistique important qui a de nombreuses applications, principalement dans le domaine de la logistique inverse. (D’une part, une population soucieuse de l’environnement entraîne une augmentation de la collecte de produits recyclables. D’autre part, les entreprises sont de plus en plus conscientes des économies qu’elles peuvent réaliser en combinant les livraisons et les

enlèvements). En outre, il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire difficile qui comporte des contraintes complexes spécifiques qu'on trouve pas au niveau des autres variantes du VRP. **(Wassan and Nagy 2019)**

La seule différence entre le VRPDP et le VRP est que, dans ce cas, les marchandises livrées peuvent être prises soit au dépôt, soit chez les livreurs. En outre cette variante englobe deux catégories de problèmes distinctes :

- unpaired pickup and delivery points : Dans cette catégorie on peut dire que les demandes clients sont indépendantes autrement dit : chaque unité collectée (dans une installation de stockage ou un service de livraison) peut être utilisée pour livrer des marchandises à n'importe quel client destinataire.
- paired pickup and delivery points : Les demandes des clients sont liées dans cette catégorie, par conséquent, chaque moyen de transport doit donc relier une certaine origine et une certaine destination. Ce type de problème est connu sous le nom de problème d'enlèvement et de livraison (PDP). **(Liong 2008)**

Afin de pouvoir déterminer le type de variantes de VRP, il est nécessaire de connaître les paramètres que l'on peut rencontrer lors de la formulation et de la modélisation du VRP. Voici un tableau qui résume les différents paramètres que l'on peut rencontrer lors de l'étude d'un VRP réalisé par **(Bouastia and Abdelli 2020)** :

Paramètre	Options possibles
Taille de parc de véhicule	Un seul véhicule
	Plusieurs véhicules
Types de véhicule	Homogène
	Hétérogène
Emplacement des véhicules	Un seul dépôt
	Plusieurs dépôts
Nature des demandes des nœuds	Demande déterministe
	Demande stochastique
	Satisfaction partielle de la demande
Emplacement des demandes	Aux nœuds
	Aux arcs
	Aux arcs et aux nœuds
Restriction de capacité sur les véhicules	Imposée ou identique pour toutes les tournées
	Imposée et non identiques pour toutes les tournées
	Non imposée
Longueur maximale d'une tournée	Imposée ou identique pour toutes les tournées
	Imposée et non identiques pour toutes les tournées
	Non déterminée

Temps maximal d'une tournée	Imposée ou identique pour toutes les tournées
	Imposée et non identiques pour toutes les tournées
	Non déterminée
Type de service	Un seul type
	Plusieurs mais uniques pour un type de véhicule
	Plusieurs pour un même véhicule
Contraintes horaires de service	Imposées et préfixées
	Spécifiées d'un intervalle à un noeuds
	Non spécifiées
Distance entre noeuds	Euclidienne
	Non euclidienne
	La même quel que soit la direction (symétrique)
	Différente (asymétrique)
Type de client	Dépendant
	Indépendant
Capacité de véhicule	Statique
	Dynamique
Demande des clients	Statique
	Dynamique

TABLE 3 – Variantes du problème de tournée de véhicules et ses contraintes

L'objectif pris en compte peut également varier. Les objectifs les plus fréquemment pris en considération sont la minimisation de la distance totale parcourue ou la minimisation du temps parcouru. Cependant, il est également possible de rencontrer les objectifs suivants :

- Maximiser les gains lorsqu'il est impossible de visiter l'ensemble de la clientèle, un gain étant lié à la visite d'un client ;
- Réduire le nombre de véhicules utilisés pour servir tous les clients ;
- Réduire les violations de contraintes.

Pour que les tournées soient réalisables en termes de demandes des clients et de capacité des véhicules, il faut trouver le plus petit nombre de véhicules possible. Ce nombre peut être déterminé en résolvant un problème de bin packing. En outre, une limite inférieure est établie en divisant la demande totale des clients par la capacité du véhicule, ce qui ne réduit pas toujours le nombre de véhicules, il est donc souhaitable de travailler en résolvant le problème de bin packing.

2.3.4 Le problème de Bin Packing

Étant donné n articles, chacun ayant un poids (ou une taille) entier $w_j (j = 1, \dots, n)$ et un nombre illimité de bacs identiques de capacité entière, le problème consiste à emballer tous les articles dans

le nombre de bacs de sorte que le poids total emballé dans un bac n'excède pas la capacité. Ce problème est considéré comme un problème *NP – Complet*. (Martello 2015)

Le bin packing est rencontré en pratique dans de nombreux domaines et industries tels que le secteur du transport et de la logistique, il est utilisé pour optimiser l'utilisation de l'espace des chargements de camions, réduire le nombre de camions...

Les contraintes du bin packing sont incluses dans le modèle mathématique du problème de tournées de véhicules, elles sont traduites par les contraintes du respect des capacités des véhicules, mais elles peuvent être introduites dans des dimensions multiples, c'est-à-dire que nous pouvons considérer la capacité en poids seulement ou en largeur seulement, ce qui représente les contraintes du "bin packing" unidimensionnel. En outre, on peut prendre en compte les deux en même temps, ou avec des contraintes additives, ce qui se traduit par un bin packing multiple.

Le nombre de camions utilisés peut également être inclus dans la fonction objective afin de minimiser ce nombre. En utilisant et en résolvant ce célèbre problème dans ce secteur, les entreprises peuvent à la fois minimiser les coûts de transport et améliorer l'efficacité des livraisons.

2.3.5 Formulation mathématique

Soit u une limite supérieure quelconque pour le nombre minimum de bacs nécessaires, en supposant que les bacs potentiels sont numérotés comme suit : $1, \dots, u$

Considérons :

Variables de décisions :

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{si le bac } i \text{ est utilisé dans la solution ; } (i = 1, \dots, u) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si l'objet } j \text{ est rangé dans le bac } i \text{ } (i = 1, \dots, u; j = 1, \dots, n) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Modèle mathématique :

Fonction objective :

$$Z_{\min} = \sum_{i=1}^u y_i \quad (5)$$

S.C :

$$(P) = \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \leq cy_i, & (i = 1, \dots, u) \\ \sum_{i=1}^u x_{ij} = 1, & (j = 1, \dots, n) \\ y_i \in \{0, 1\} & (i = 1, \dots, u), \\ x_{i,j} \in \{0, 1\} & (i = 1, \dots, u; j = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (6)$$

Quelques variantes du bin packing

Le bin packing pose une variété de défis, résultant des différents attributs des objets, tels que leurs formes homogènes ou non, leurs tailles uniformes ou variées, le fait qu'ils soient déformables ou non. D'autres facteurs doivent être pris en considération, comme le poids et le volume des bacs, et les exigences de compatibilité des objets à emballer.

Le bin packing à une dimension :

Dans cette variante, on trouve des problèmes de placement, les objets sont définis par une seule variable (hauteur, largeur, poids ou autre).

Le bin packing à deux dimensions :

Dans cette version, les objets sont de forme rectangulaire de différentes tailles et on suppose qu'il existe une quantité infinie de boîtes rectangulaires identiques (bacs) de plus grandes dimensions. L'objectif est de trouver une configuration de placement des objets qui minimise le nombre total de bacs utilisés.

Le bin packing à trois dimensions :

Ce problème est similaire au problème bidimensionnel bin packing, mais avec l'ajout d'une troisième dimension. Les objets dans ce problème sont caractérisés par leurs volumes et les capacités des boîtes sont spécifiées par leurs volumes.

2.4 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Pour qu'un problème d'optimisation puisse être résolu efficacement par l'une des diverses techniques disponibles, il est souvent nécessaire de le formuler sous la forme d'un programme linéaire. Il existe deux types de techniques d'optimisation : les méthodes exactes, qui fournissent la meilleure solution mais peuvent être coûteuses en termes de calcul pour les problèmes de grande taille, et les méthodes approchées, qui fournissent une bonne approximation en un temps raisonnable mais ne garantissent pas de trouver la meilleure solution optimale.

2.4.1 Les méthodes exactes

Le principe fondamental des techniques exactes consiste à rechercher systématiquement la meilleure solution possible à un problème ou à un ensemble de problèmes connexes. L'optimisation exacte fait référence à toutes les techniques qui permettent d'atteindre un résultat optimal connu pour un problème donné. Cela inclut la programmation dynamique, les méthodes lagrangiennes et les approches du simplexe. **(Layeb 2010)** Il existe quatre grandes catégories dans lesquelles les méthodes exactes peuvent être classées :

- La programmation dynamique ;
- La programmation linéaire ;
- La programmation non linéaire avec ou sans contraintes ;
- Les méthodes de recherche arborescente (Branch & Bound).

Bien que les méthodes exactes soient limitées par la taille des problèmes et les temps de calcul, qui peuvent être prohibitifs avant que l'algorithme n'atteigne la solution exacte, le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution est susceptible d'augmenter de manière exponentielle avec les dimensions du problème, Voici quelques-unes des approches exactes les plus populaires :

2.4.1.1 La programmation dynamique

La programmation dynamique est une technique générale de résolution exacte de problèmes d'optimisation, qui énumère explicitement toutes les solutions potentielles au problème tout en minimisant autant que possible les calculs et les facteurs en double.

La programmation dynamique utilise une approche récursive pour résoudre un problème en stockant les résultats intermédiaires dans une table. L'avantage de cette méthode est qu'elle évite d'évaluer deux fois la même fonction. Dans la plupart des cas, on utilise un tableau des résultats acquis qui est rempli lorsque les sous-problèmes sont résolus.

Les algorithmes basés sur la programmation dynamique sont généralement simples à construire et très efficaces pour résoudre les problèmes de petite et moyenne taille. Par contre, la programmation dynamique ne convient pas à tous les problèmes d'optimisation combinatoire.

Cependant, en raison des problèmes de complexité spatiale et/ou temporelle, tels que le problème de l'alignement multiple des séquences biologiques, la programmation dynamique n'est pas adaptée

à toutes les tâches d'optimisation combinatoire. Son application à des cas importants est généralement d'un coût élevé. **(Rustichini 1998)**

2.4.1.2 La programmation linéaire

La programmation linéaire (PL) est une branche de l'optimisation permettant de résoudre de nombreux problèmes économiques et industriels. En effet, lorsque la fonction objectif et les restrictions sont toutes deux linéaires, la méthode de résolution du problème est appelée programmation linéaire.

On parle de problème de programmation linéaire (PL) si l'ensemble des solutions potentielles S est exprimé sous la forme d'un ensemble de variables dont les valeurs sont comprises dans l'ensemble des nombres réels \mathbb{R} , si les contraintes doivent répondre à des inégalités linéaires et si f est une fonction linéaire de ces variables.

Les problèmes de recherche opérationnelle peuvent être formulés comme des problèmes PL. C'est pourquoi de nombreuses stratégies visant à résoudre d'autres problèmes d'optimisation sont basées sur la résolution de problèmes linéaires **(Corne 1999)**. Un programme linéaire peut être défini comme suit :

$$(P) = \begin{cases} \text{Min} & C^T x \\ \text{S.C.} & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

Tel que :

n : nombre de variables ($x = (x_1, \dots, x_n)$);

m : nombre de contraintes ($m \leq n$);

$A = (a_{ij})$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$: matrice des contraintes ($m \times n$) et $\text{rang}(A) = m$;

$C = (C_1, \dots, C_n)$: vecteur ligne des profits (ou gains);

$b = (b_1, \dots, b_m)$: vecteur colonne des seconds membres.

L'algorithme d'optimisation le plus couramment utilisé en programmation linéaire est l'algorithme du simplexe.

2.4.1.3 Les méthodes de recherche arborescente (Branch-and-Bound)

La procédure d'évaluation et de séparation progressive consiste à compter intelligemment toutes les solutions possibles à un problème donné en se basant sur certaines propriétés du problème de ce dernier. Cette méthode permet d'éliminer les réponses partielles qui ne conduisent pas au résultat souhaité. De ce fait, il est souvent possible de trouver la solution souhaitée en un temps raisonnable. Bien entendu, dans le pire des cas, on en revient toujours à l'éradication explicite de toutes les solutions possibles au problème. Pour ce faire, cette méthode dispose d'une fonction qui permet de freiner certaines solutions afin de les exclure ou de les conserver en tant que solutions potentielles.

2.4.2 Les méthodes approchées

Ces méthodes sont utilisées pour traiter des problèmes de dimension importante que les méthodes exactes sont incapables de résoudre en un temps raisonnable. Elles produisent généralement une solution faisable assez proche de l'optimum, réalisable et de bonne qualité mais pas nécessairement optimale en un temps relativement court. Nous distinguons les heuristiques et les méta-heuristiques.

La différence entre les deux approches ne se limite pas à la qualité de la solution, mais aussi au facteur temps qui joue un rôle très important dans le choix de l'approche. Certes, les méthodes exactes fournissent une solution optimale, mais au détriment d'un temps de calcul souvent très important. En revanche, les méthodes approximatives tentent de se rapprocher d'une solution optimale. En d'autres termes, elles se contentent d'obtenir des solutions aussi bonnes que possible en un temps raisonnable, mais ne garantissent pas leur optimalité.

La figure suivante montre un compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution des deux approches :

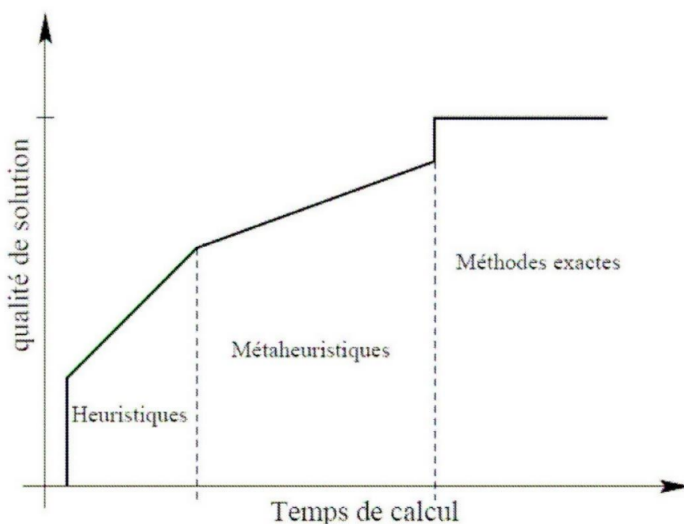


FIGURE 21 – Compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution

Dans ce qui suit, nous résumons les méthodes approximatives les plus courantes dans la littérature qui ont été utilisées pour résoudre le problème des tournées en général.

2.4.2.1 Les heuristiques

Heuristique (vient du grec "eurisko") qui signifie "je trouve". Une heuristique, ou "méthode approximative", est un algorithme ("constructive") qui fournit rapidement une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation NP -difficile. Une heuristique est donc, une idée que l'on applique à la résolution d'un problème sans garantir les performances, elle est spécifique à un problème, elle est conçue en s'appuyant sur sa propre structure et elle ne peut pas être généralisée. (Amari 2021)

Les heuristiques classiques peuvent être réparties en trois classes (**GRID 2018**) :

- Les méthodes à deux phases ;
- Les méthodes constructives ;
- Les méthodes d'amélioration.

En général, les heuristiques développées pour le VRP sont basées sur des heuristiques développées à l'origine pour le TSP. Dans cette partie, nous présentons une vue d'ensemble des heuristiques classiques proposées pour le VRP.

a- Les méthodes à deux phases :

Grâce à ces méthodes, le problème du VRP peut être décomposé en deux sous-problèmes :

Soit, répartir les clients en groupes (Clustering) et décider de l'ordre de parcours (Routing). Soit, décider l'ordre de l'itinéraire, puis répartir les clients en groupes.

Pour résoudre ces deux sous-problèmes, deux familles d'heuristiques ont vu le jour (**Oulad Kouider 2020**), les premières et les plus connues sont les méthodes "cluster first, route second" où les clients sont regroupés en clusters, puis à transformer chaque cluster en itinéraire ; la seconde famille d'heuristiques considère l'inverse, puisqu'un itinéraire visitant tous les clients est construit, puis divisé en plusieurs itinéraires.

- **Pour la première famille**, nous citerons l'algorithme "**Sweep**" proposé par (**Gillett and Miller 1974**) qui utilise les coordonnées polaires des clients pour la phase de clustering et construit ensuite une tournée pour chaque cluster. Les coordonnées polaires sont définies à partir du dépôt comme pôle, un client choisi aléatoirement permet de définir l'axe polaire et d'initialiser le premier cluster. Un balayage dans l'ordre croissant des coordonnées polaires affecte les clients au cluster actuel. Si l'ajout d'un client viole la contrainte de capacité dans le cluster actuel, un nouveau cluster est créé et défini comme cluster actuel. Une fois les clusters créés, un problème du voyageur de commerce est résolu pour chacun.
- **Pour la deuxième famille**, nous citerons l'algorithme "**Split**" proposé par (**Prins et al. 2009**) de la famille des "route first, cluster second" qui construit d'abord une tournée visitant tous les clients, puis un graphe auxiliaire est créé selon l'ordre de la tournée où chaque arc correspond à une tournée réalisable, la résolution du plus court chemin donne une solution du VRP qui est la meilleure solution suivant l'ordre établi par la tournée géante.

b- Les méthodes constructives :

Les méthodes constructives produisent des solutions admissibles en partant d'une solution initiale vide et en insérant, à chaque étape, une composante dans la solution partielle courante. Cette décision n'est jamais remise en question par la suite. (**Widmer 2001**)

La plupart des méthodes constructives sont de type "glouton". A chaque étape, la solution actuelle est complétée au mieux sans tenir compte de toutes les conséquences que cela entraîne en termes

de coût de la solution finale. Les méthodes les plus connues sont la méthode d'économie de Clarke et Wright et les méthodes d'insertion.

- Méthode des économies :

Afin de résoudre le CVRP, lorsque le nombre de véhicules est illimité, (**Clarke and Wright 1964**) ont créé une heuristique qui est connue sous le terme "savings". L'idée de base de cette approche est d'assigner un itinéraire à chaque client afin de le relier au dépôt unique.

L'étape suivante consiste à fusionner les itinéraires obtenus afin de réduire le coût de la solution actuelle. Pour ce faire, on procède successivement à des fusions réalisables avec le gain le plus important, compatibles avec la capacité et la disponibilité des véhicules, jusqu'à ce qu'aucune fusion ne soit trouvée ou que le nombre requis d'itinéraires soit atteint. Les fusions qui permettent de réaliser les économies les plus importantes sont mises en place en premier. (**Golden 1975**)

L'évaluation du gain entre deux clients i et j suit à la fusion de deux tournées dans une seule tournée est effectuée, comme suit :

$$S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}.$$

Voici le déroulement de la méthode (**Abbassa 2015**) :

1. Calculer les savings $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$. pour toutes les paires de clients i et j ;
2. Classer les savings dans l'ordre décroissant ;
3. En partant du haut de la liste, procéder comme suit :
4. Trouver la première liaison réalisable dans la liste, qui peut être utilisée pour étendre l'une des deux extrémités de la voie actuellement contruite ;
5. Si la route ne peut pas être étendue plus loin, mettre fin à la route. Choisissez la première liaison possible dans la liste pour commencer un nouvel itinéraire ;
6. Répéter les étapes 4 et 5 jusqu'à ce que plus aucune liaison ne puisse être choisie.

- Méthode d'insertion :

Les méthodes d'insertion construisent les tournées itérativement en insérant des clients à chaque itération selon un critère prédéfini jusqu'à obtenir une solution complète.

La plus connue est celle du **plus proche voisin**, qui insère à chaque itération le client le plus proche du dernier client visité jusqu'à ce que le seuil de capacité du véhicule soit atteint, puis crée une nouvelle tournée à partir du dépôt.

Une autre méthode est la méthode de **la meilleure insertion**, cette méthode commence avec autant de tours qu'il y a de véhicules, ces tours sont vides puisqu'ils consistent en une

boucle autour du dépôt. À chaque itération, l'insertion des clients non visités est testée et celui qui génère le coût minimum sans violer les contraintes est inséré. (**Oulad Kouider 2020**)

c- Les méthodes d'améliorations :

Ces heuristiques visent à améliorer les résultats d'une heuristique constructive. Parmi ces heuristiques, nous mentionnons la recherche locale qui vise à trouver les meilleures solutions dans le voisinage d'une solution donnée, en effectuant des transformations ou des mouvements qui réduisent le coût global et qui s'arrête dès qu'il n'y a plus de mouvements améliorants.

Chaque type de mouvement représente un voisinage de la solution considérée. Il existe deux types d'opérateurs de mouvement, les mouvements intra-route et les mouvements inter-routes.

Les mouvements intra-route consistent à améliorer chaque tournée séparément. Alors que les mouvements inter-routes agissent sur plusieurs tournées simultanément. (**GRID 2018**)

2.4.2.2 Les méta-heuristiques

Les métaheuristiques sont une classe de techniques d'optimisation qui ont la capacité de produire des solutions de haute qualité en un temps raisonnable à des problèmes combinatoires pour lesquels il n'existe pas d'approche classique connue plus efficace. Les méthodes créées pour éviter les minima locaux sont appelées métaheuristiques (du grec meta = qui englobe). Le fait que ces techniques soient des structures générales dont les composants sont instanciés en fonction du problème, comme le voisinage, le ou les critères d'arrêt, explique également le mot "méta".

Voici un tableau qui montre la différence entre les heuristiques et les métaheuristiques (**Amari 2021**) :

Heuristiques	Méta-heuristiques
Spécifique au problème	Générique
Déterministe	Non Déterministe
Solution unique	Différentes solutions

TABLE 4 – Différence entre les heuristiques et les métaheuristiques

La classification des métaheuristiques est arbitraire car elles ne sont pas, par définition, adaptées à la résolution d'un type de problème particulier. Cependant, nous pouvons distinguer deux stratégies : la première est basée sur une solution unique, tandis que la seconde est basée sur une population.

Les approches basées sur une population (ou des révolutionnaires) prévoient généralement de travailler avec un certain nombre de solutions à la fois, que l'on laisse se développer progressivement. L'étude de l'espace des configurations est inévitablement améliorée par l'utilisation simultanée de nombreuses solutions. Dans cette catégorie, nous passons en revue :

- Les algorithmes génétiques.
- Les algorithmes par colonies de fourmis.

a- Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques, basés sur les principes de la sélection naturelle et de la génétique, sont des méthodes d'optimisation stochastique développées par John Holland (**Holland 1975**) et enrichies par les recherches de David Goldberg (**Goldberg 1989**).

Les termes utilisés proviennent de la théorie de l'évolution, tels que individu (solution potentielle), population (ensemble de solutions), génotype (une représentation de la solution), gène (une partie du génotype), parent, enfant, reproduction, croisement, mutation et génération, etc.

Le fonctionnement de ces algorithmes est simple : on commence avec une population initiale de solutions possibles (chromosomes), arbitrairement choisies, dont la performance (Fitness) est évaluée. Ensuite, une nouvelle population de solutions est créée en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples tels que la sélection, le croisement et la mutation. Certains individus se reproduisent tandis que d'autres disparaissent et seuls les individus les mieux adaptés sont censés survivre. Ce processus se répète jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante. Les algorithmes génétiques cherchent à maximiser ou minimiser une fonction définie sur un espace de données. La figure 22 illustre les principales étapes d'un algorithme génétique :

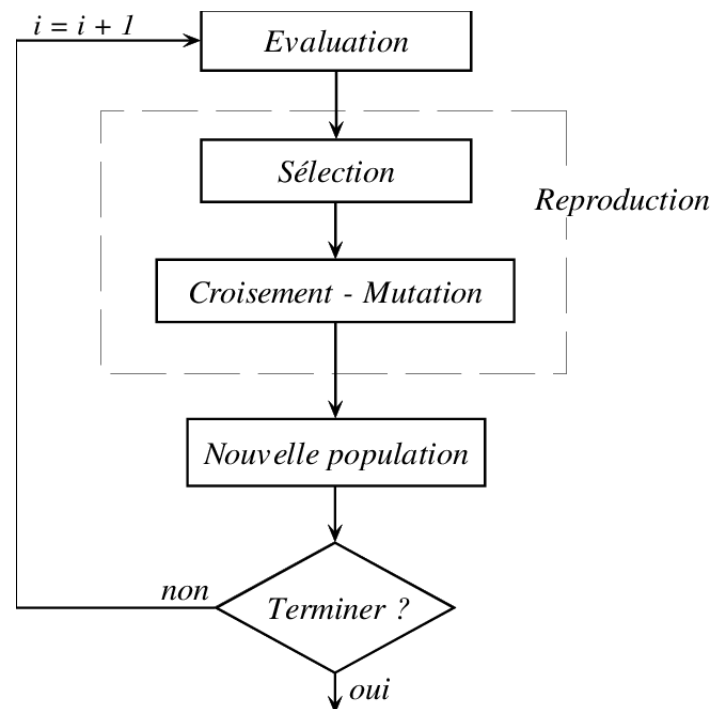


FIGURE 22 – Fonctionnement des algorithmes génétiques

La mise en oeuvre d'AG nécessite (**Douiri et al. 2019**) :

- **Le codage des données** : La première phase consiste à déterminer et à structurer correctement le problème. Dans cette phase, on attribue à chaque élément de l'espace de recherche une structure de données spécifique, nommée génotype ou ensemble de chromosomes, qui définira chaque individu de la population.

Il est crucial de coder chaque individu en séquence pour développer un algorithme génétique, car cela influence notamment la mise en œuvre des opérations de transformation. Cette étape établit donc la structure de données qui servira à représenter le génotype des membres de la population. Par conséquent, le codage doit être adapté au problème en question.

- **Génération de la population initiale** : La création de la population initiale implique la sélection des éléments de départ pour les faire évoluer, et cette sélection initiale d'individus influe grandement sur la vitesse de l'algorithme. Toutefois, une initialisation aléatoire est plus facile à effectuer : les valeurs des gènes sont choisies au hasard selon une distribution uniforme. Cependant, il peut être judicieux d'orienter la génération initiale vers des zones pertinentes de l'espace de recherche.
- **Fonction d'adaptation (Fitness)** : L'évaluation de la fitness est souvent l'étape où l'on mesure la performance de chaque individu. Pour évaluer la qualité d'un individu et le comparer aux autres, une mesure d'évaluation commune doit être établie. Il n'existe pas de règle pour définir cette fonction, et son calcul peut être quelconque, comme une simple équation ou une fonction affine. La manière la plus simple consiste à définir la fonction d'adaptation comme la formalisation du critère d'optimisation.
- **Sélection** : La sélection vise à identifier statistiquement les individus les plus performants d'une population et à éliminer les moins performants lors du passage d'une génération à une autre, en se basant sur la performance de l'individu. L'opérateur de sélection doit également donner une chance aux éléments moins performants, car ils peuvent engendrer une descendance pertinente par croisement ou mutation en fonction du critère d'optimisation. Plusieurs techniques de sélection existent, comme la sélection uniforme, la sélection par tournoi, l'élitisme et la sélection par roulette.
- **Croisement** : L'opérateur de croisement encourage l'exploration de l'espace de recherche et enrichit la diversité de la population en modifiant la structure des chromosomes. Le croisement s'effectue entre deux parents et génère deux enfants, dans l'espoir qu'au moins un des deux héritera de bons gènes des parents et sera mieux adapté qu'eux.
- **Mutation** : L'opérateur de mutation consiste en un processus appliquant une modification mineure du code génétique d'un individu pour introduire de la diversité et éviter de tomber dans des optima locaux.

b-Les colonies de fourmis :

L'optimisation par colonies de fourmis (OCF), un type de métaheuristique, est basée sur l'intelligence collective d'un groupe de fourmis. La communauté des biologistes a effectué de nombreuses recherches sur les insectes, en particulier les fourmis. Les résultats de leurs observations montrent que lorsque les fourmis se déplacent à la recherche de nourriture, elles libèrent des composés chimiques appelés phéromones qu'elles laissent derrière elles sur le chemin.

Le chemin est d'autant plus parcouru qu'il y a plus d'odeurs. La longueur du trajet diminue lorsque la concentration en phéromones augmente, ce qui rend l'évaporation des phéromones moins importante. En conséquence, le chemin le plus rapide devient le plus souhaitable. L'organisation communautaire des fourmis permet l'émergence du chemin le plus court. Ainsi, la colonie découvre le chemin le plus rapide vers sa source de nourriture.

Le concept de base est que les problèmes d'optimisation complexes peuvent être résolus avec succès par un grand nombre d'agents simples qui coopèrent pour partager une mémoire commune, semblable aux phéromones laissées par les fourmis. En utilisant leur mémoire commune, les données du problème et l'heuristique utilisée pour déterminer la viabilité du développement de la solution, le rôle des fourmis artificielles est de concevoir des solutions. Ils sont mis en œuvre sous la forme de processus parallèles. La figure suivante illustre le déroulement d'un algorithme de colonie de fourmis :

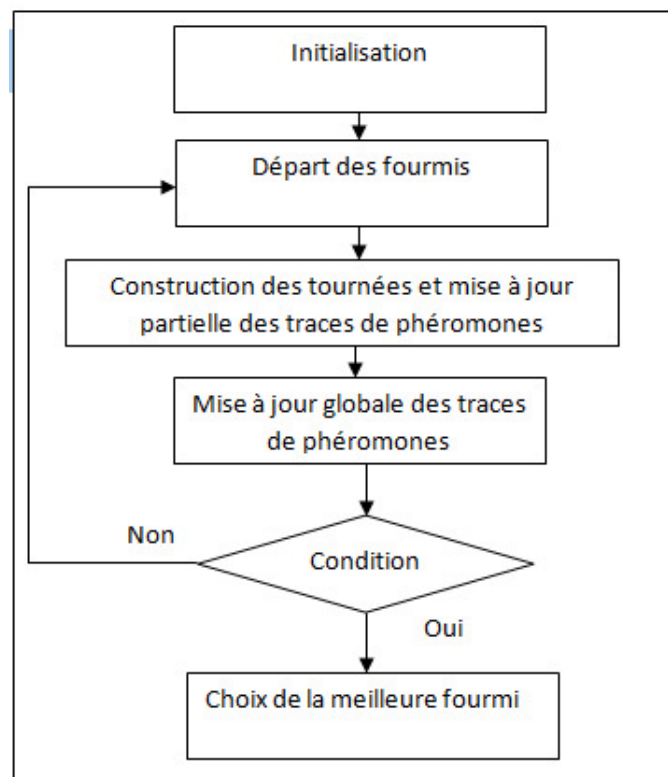


FIGURE 23 – Le déroulement d'un algorithme de colonie de fourmis.

Les algorithmes employés dans les approches à solution unique (ou trajectoire) partent d'une solution initiale (obtenue avec précision ou par tirage au sort) et s'en éloignent progressivement pour produire une trajectoire, c'est-à-dire un parcours progressif dans l'espace des solutions. Les éléments entrent dans cette catégorie :

- Le recuit simulé.
- La méthode Tabou .

a- Le recuit simulé :

Le recuit simulé (SA) a été présenté par (Kirkpatrick et al. 1983) et (Cerný 1985) comme une méthode de recherche locale standard, utilisant une stratégie pour contourner les

minima locaux. Cette métaheuristique s’inspire d’une technique employée depuis longtemps par les métallurgistes qui, afin d’obtenir un alliage exempt de défauts, alternent les cycles de réchauffage (ou recuit) et de refroidissement lent des métaux.

Le concept du recuit simulé consiste à explorer de manière itérative l’espace des solutions. On commence avec une solution notée s_0 , générée initialement de manière aléatoire, correspondant à une énergie initiale E_0 et une température initiale T_0 généralement élevée. À chaque itération de l’algorithme, un changement élémentaire est apporté à la solution, entraînant une variation de l’énergie du système ΔE . Si cette variation est négative (la nouvelle solution améliore la fonction objectif et permet de réduire l’énergie du système), elle est acceptée. Si la solution trouvée est moins bonne que la précédente, elle sera acceptée avec une probabilité P calculée selon la distribution de Boltzmann suivante : $P(E, T) = \exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$

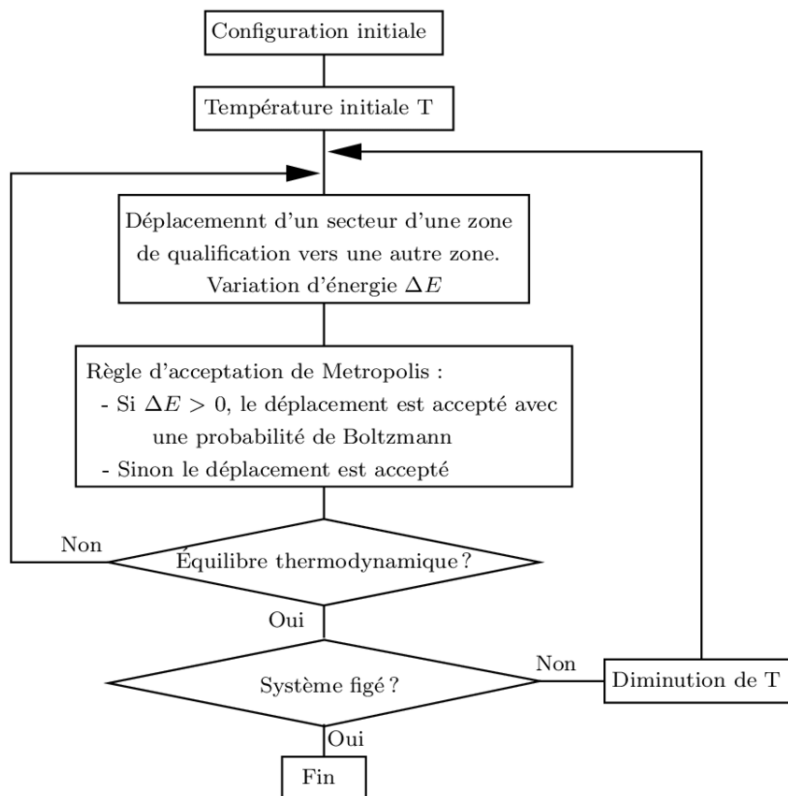


FIGURE 24 – Fonctionnement de l’algorithme Récuit Simulé

Voici donc d’une manière simple l’algorithme Récuit Simulé (Douiri et al. 2019) :

Algorithm 1 Recuit simulé

1. Engendrer une configuration initiale S_0 de $S : S \leftarrow S_0$
 2. Initialiser la température T en fonction du schéma de refroidissement
 3. Répéter
 4. Engendrer un voisin aléatoire S' de S
 5. Calculer $\Delta E = f(S') - f(S)$
 6. Si $\Delta E \leq 0$ alors $S \leftarrow S'$
 7. Sinon, accepter S' comme la nouvelle solution avec la probabilité $P(E, T) = \exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$
 8. Fin si
 9. Mettre T à jour en fonction du schéma de refroidissement (réduire la température)
 10. Jusqu'à la condition d'arrêt
 11. Retourner la meilleure configuration trouvée
-

b- La méthode Tabou :

Une série d'approches visant à éviter d'être piégé dans un minimum local ou une répétition de cycle est associée à une méthode de recherche locale connue sous le nom de recherche tabou.

Cette approche s'est avérée très efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles. En effet, des sous-ensembles de solutions N appartenant au voisinage S sont formés à partir d'une solution initiale s dans un ensemble de solutions locales S . Cependant, l'algorithme acceptera des solutions qui n'améliorent pas nécessairement la solution actuelle. A cet effet, nous mettons en œuvre une liste taboue (T) de longueur k qui contient les k dernières solutions visitées, cette dernière exclut la possibilité d'accepter et de stocker des solutions découvertes antérieurement. La réponse suivante est alors choisie parmi un groupe de réponses proches qui n'incluent aucun des éléments de cette liste taboue.

La décision concernant la solution suivante est alors prise parmi un groupe d'alternatives qui n'incluent aucun des éléments de cette liste d'interdiction. Lorsque k est atteint, la solution la plus ancienne de la liste est remplacée par chaque nouvelle solution choisie. Le principe de la première entrée, première sortie (FIFO) est la base sur laquelle la liste de tabulation est construite. On peut spécifier une limite de temps après laquelle la recherche doit s'arrêter ou utiliser le nombre de répétitions sans amélioration comme critère d'arrêt. (**Soriano and Gendreau 1997**). Voici une illustration du fonctionnement de l'algorithme Tabou :

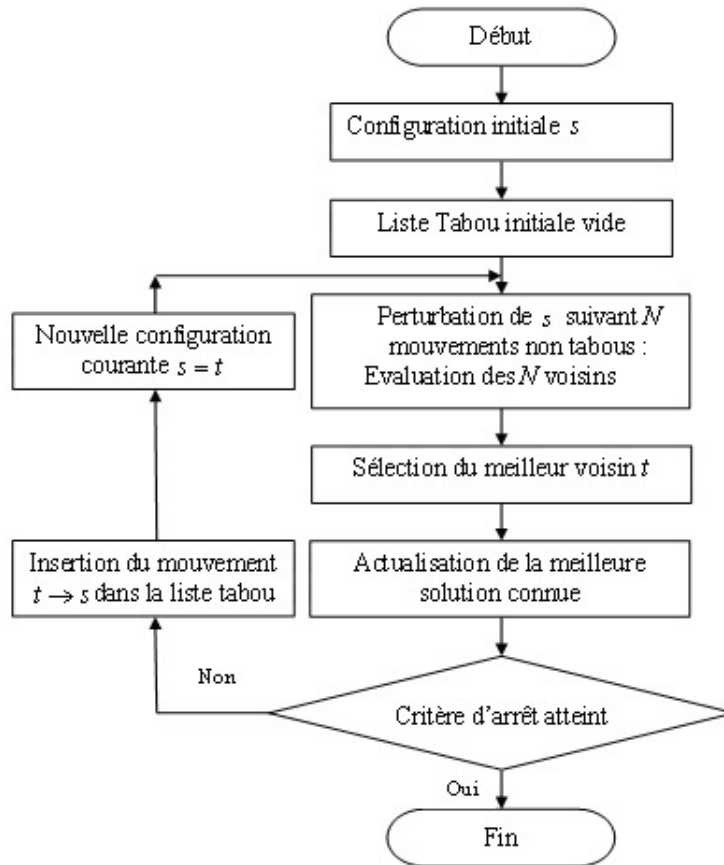


FIGURE 25 – Fonctionnement de l’algorithme Tabou.

Pour une analyse plus approfondie des métaheuristiques que nous avons abordées, référons-nous au tableau de comparaison suivant, qui met en évidence les critères clés de chaque approche :

2.4.3 Tableau de synthèse

Critère	Colonies de fourmis	Algorithmes génétiques	Recuit simulé	Recherche tabou
Inspiration naturelle	Comportement des fourmis	Théorie de l'évolution	Recuit des métaux	Mémoire et interdictions
Mécanisme de base	Pheromone deposition & evaporation	Sélection, croisement, mutation	Exploration probabiliste	Mémoire à court et long terme
Taille et complexité du problème	Moyenne à grande	Grande	Petite à moyenne	Petite à moyenne
Parallélisme	Élevé	Moyen	Faible	Faible
Robustesse	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne
Convergence	Lente	Moyenne	Rapide	Rapide
Paramétrisation	Sensible	Moyennement sensible	Sensible	Peu sensible
Capacité à échapper aux optima locaux	Moyenne	Moyenne	Élevée	Élevée
Temps d'exécution	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen	Moyen
Mémoire requise	Moyenne	Moyenne	Faible	Variable (selon taille liste tabou)
Facilité d'implémentation et de compréhension	Moyenne	Moyenne	Élevée	Moyenne
Scalabilité	Moyenne	Élevée	Moyenne	Moyenne

TABLE 5 – Tableau de comparaison des métaheuristiques.

Le schéma suivant regroupe toutes les différentes méthodes de résolution :

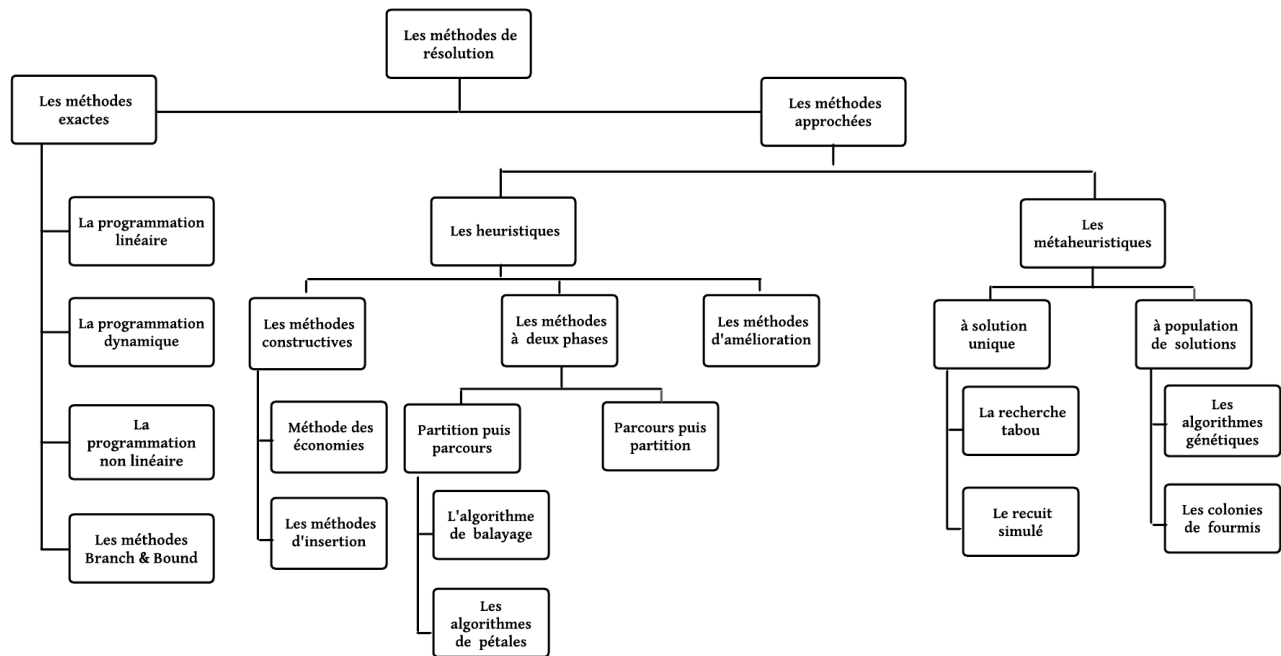


FIGURE 26 – Les méthodes de résolution des problèmes d’optimisation

2.5 Conclusion

La structure générale de notre étude a été établie dans ce chapitre, ainsi que les idées et les approches qui seront les plus utiles pour résoudre notre problème. Nous avons expliqué le principe de planification du transport et ses caractéristiques. En outre, nous avons abordé les nombreux concepts de variantes VRP ainsi que les différentes approches de résolution des problèmes d’optimisation.

Sur la base des idées et des concepts que nous avons apprises dans ce chapitre, nous tâcherons de présenter la solution que nous proposons afin de remédier aux différents dysfonctionnements détectés dans le chapitre suivant.

Chapitre 03 : Proposition et application de la solution

3 Contribution à l'Amélioration de la Planification des Tournées

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre de la solution proposée pour répondre aux besoins de l'entreprise en relation avec la problématique mentionnée. Notre objectif est de proposer un outil de planification des tournées qui réduit le temps de traitement et allège la charge de travail du planificateur. Dans cette démarche, nous avons dû prendre en compte plusieurs paramètres importants, tels que la réduction du nombre de camions utilisés et la minimisation des distances parcourues afin d'optimiser les coûts de transport.

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi une méthodologie de travail rigoureuse et structurée, qui se décompose comme suit :

Nous commençons par une modélisation mathématique du problème de tournées de véhicules, en tenant en compte les critères et les besoins spécifiques définis par l'entreprise. Cette modélisation nous permet de formuler le problème de manière précise et rigoureuse. Nous avons également utilisé l'outil CPLEX pour vérifier et valider notre modèle, ainsi que pour évaluer les résultats obtenus. A l'aide de CPLEX, nous avons effectué des simulations et des tests pour évaluer différentes configurations et paramètres, afin de trouver une solution optimale qui réduise le nombre de camions utilisés et la distance parcourue, tout en respectant les contraintes fixées par l'entreprise.

Par la suite, nous présentons l'algorithme de résolution que nous avons choisi pour résoudre le problème de planification des tournées de véhicules. Nous commençons par justifier notre choix en expliquant les raisons qui nous ont poussés à sélectionner cet algorithme spécifique, puis nous expliquons en détail son principe et mode de fonctionnement. Après avoir présenté l'algorithme, nous procédons à un test pratique en utilisant de vraies données fournies par l'entreprise. Nous appliquons l'algorithme à ces données et nous comparons ensuite les résultats obtenus par l'algorithme avec ceux produits par le planificateur actuel de l'entreprise.

Enfin, nous développons notre outil de digitalisation afin de présenter de manière claire et intuitive notre solution de planification des tournées. L'objectif de cet outil est de faciliter la compréhension et l'utilisation de notre algorithme de résolution. L'outil se présente sous la forme d'une interface qui demande aux utilisateurs d'insérer le fichier contenant les données nécessaires pour initier son déroulement. Par la suite, il génère une tournée optimale en indiquant la quantité à transporter ainsi que les distances parcourues pour chaque véhicule. Il offre également une visualisation graphique des différents paramètres importants pour la prise de décisions éclairées, tels que le nombre de camions utilisés, la capacité de chaque camion, les points de livraison etc., puis il fournit un rapport au format PDF incluant toutes les informations précédentes. Cet outil est conçu pour faciliter la tâche du planificateur en lui fournissant des informations clés de manière pratique et accessible.

Le schéma suivant résume les différentes parties de ce chapitre :

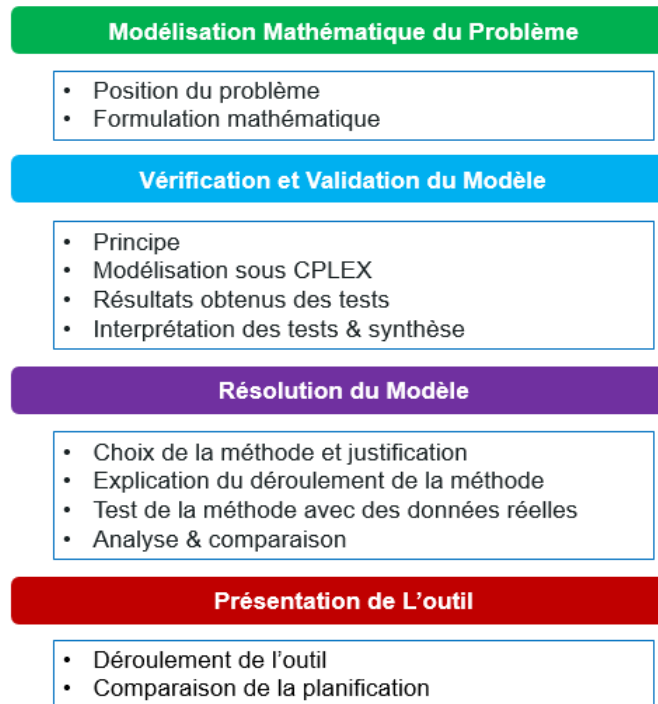


FIGURE 27 – Schéma récapitulatif de la démarche et structure du chapitre 3.

3.2 Modélisation Mathématique

3.2.1 Position du problème

Bien que TotalEnergies n'ait pas de camions en propre, son prestataire logistique se charge de la livraison, et la société elle-même assure la planification.

Dans le but de réduire les coûts de ses services, TotalEnergies délègue cette tâche à son planificateur qui planifiera les tournées en prenant en compte les coûts de transport, tout en respectant les exigences du service client.

Afin de réaliser les objectifs de l'entreprise, les buts suivants sont établis pour chaque planification :

- Minimiser la distance parcourue par chaque camion ;
- Minimiser le nombre de camions utilisés ;
- Limiter le nombre de clients dans un camion à un nombre prédéfini ;

3.2.2 Formulation mathématique

La modélisation mathématique est la science qui sert à transformer le monde réel en modèles simplifiés pouvant aider à la résolution de différents problèmes en optimisation.

Avant de procéder à la modélisation, nous prendrons en considération les éléments suivants :

- Tous les clients sont desservis d'un seul dépôt ;
- Le camion ne retourne pas au dépôt à la fin de la tournée ;

- Chaque client est visité une seule fois ;
- Le nombre et l'emplacement des clients sont prédéfinis ;
- La capacité du camion est définie et fixée pour toute la flotte (flotte homogène) ;
- Le coût de transport de chaque véhicule dépend de la distance parcourue et le nombre de camions utilisés ;
- Le distance entre les clients est considéré comme symétrique, (càd $d_{ij} = d_{ji}$).

Dans ce qui suit, nous allons proposer une formulation mathématique de problème :

Données :

- V : Ensemble des clients à visiter, y compris le dépôt ; $i = \overline{0, V}$, avec $i = 0$ représente le dépôt
- K : Ensemble des camions identiques, $k = \overline{0, K}$
- q_i : Demande du client i
- Q : Capacité maximale du camion
- d_{ij} : distance entre deux clients i et j , $\forall i, j \in V$
- m : Nombre maximum de clients à transporter dans un seul camion
- c_d : Coût de déplacement d'un camion par kilomètre parcouru
- c_u : Coût d'utilisation d'un camion

Variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si le camion } k \text{ va du client } i \text{ vers } j; \forall i, j \in V; i \neq j; \forall k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_k = \begin{cases} 1, & \text{si le camion } k \text{ est utilisé; } \forall k \in K \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Contraintes :

1- Contrainte assurant que chaque client est visité une fois par un camion :

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}$$

2- Contrainte assurant que chaque tournée commence au dépôt :

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K$$

3- Contraintes assurant que chaque fois qu'un camion visite un client i , il doit ensuite repartir de ce client pour visiter le suivant :

$$\sum_{i \in V} \sum_{p \in V} x_{ipk} = \sum_{p \in V} \sum_{j \in V} x_{pj k}, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0\}; \forall k \in K; \forall p \in V$$

4- Contrainte assurant que le nombre total de clients visités par un camion ne doit pas dépasser m :

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} \sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{ijk} \leq m, \quad \forall k \in K$$

5- Contrainte assurant que la capacité de chaque camion ne doit pas être dépassée :

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} \sum_{j \in V \setminus \{0\}} q_i \cdot x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K$$

6- Contraintes d'élimination des sous tours :

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq I, 2 \leq |S| \leq n - 2$$

Fonction objective :

L'objectif est de minimiser les distances totales parcourues par les camions utilisés ainsi que leur nombre.

En réalité, la fonction objectif rassemble l'objectif du problème de *BinPacking* et le problème de tournées de véhicules *CVRP*. Ce qui est exprimé par la fonction suivante :

$$Z_{\min} = \sum_{k \in K} (c_d \cdot \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ijk} + c_u \cdot z_k)$$

Modèle mathématique :

$$(C) = \left\{ \begin{array}{l} Z_{\min} = \sum_{k \in K} (c_d \cdot \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ijk} + c_u \cdot z_k) \\ \text{S.C :} \\ \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \\ \sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K \\ \sum_{i \in V} \sum_{p \in V} x_{ipk} = \sum_{p \in V} \sum_{j \in V} x_{pjk}, \quad \forall j \in V \setminus \{0\}; \forall k \in K \quad ; \forall p \in V \\ \sum_{i \in V \setminus \{0\}} \sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{ijk} \leq m, \quad \forall k \in K \\ \sum_{i \in V \setminus \{0\}} \sum_{j \in V \setminus \{0\}} q_i \cdot x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq I, 2 \leq |S| \leq n - 2 \\ x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in V, i \neq j, \forall k \in K \\ z_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \end{array} \right.$$

3.3 Vérification et Validation du modèle

3.3.1 Principe

La vérification et la validation du modèle mathématique utilisé comme base de la simulation sont essentielles pour assurer la crédibilité d'une résolution de problème d'optimisation. Cette approche entièrement mathématique tente d'évaluer la qualité de la solution numérique en déterminant si la solution acquise est réalisable ou si elle nécessite des modifications afin de garantir une réponse significative et idéale au problème donné.

L'objectif est de confirmer la précision des idées de programmation et la représentation de la réalité par le modèle ainsi l'amélioration des points faibles qui ne représente pas la réalité du problème.

Dans le cadre de la vérification et de la validation du modèle mathématique utilisé pour résoudre un problème d'optimisation, deux approches sont couramment utilisées : la relaxation du modèle et l'imposition de conditions aux limites :

Rendre les restrictions du problème moins rigides ou les supprimer temporairement est connu sous le nom de "relaxation du modèle". Cela permet d'évaluer les effets de chaque contrainte sur la solution finale et de décider si des changements sont nécessaires pour parvenir à une solution réalisable et idéale. En revanche, l'imposition de conditions aux limites dépend de la formulation du problème, de la quantité et de la complexité des variables. Ces conditions spécifient des restrictions ou des valeurs particulières que les variables situées aux limites du problème doivent respecter. La mise en place de conditions limites appropriées permet de s'assurer que la réponse finale est cohérente et répond aux critères du problème dans son ensemble.

Pour notre modèle on a constaté qu'il est plus approprié d'intervenir sur la contrainte de capacité maximale à ne pas dépasser et limitation du nombre de clients à respecter a un seul client par camion dans le premier test et 2 clients par camion pour le 2ème test. en prenant en considération aussi la limitation du nombre de camions .

3.3.2 Présentation de l'outil de vérification et validation de modèle

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio est un ensemble d'outils dédiés à la programmation mathématique et à la programmation par contraintes. Il comprend les éléments suivants :

1- Selon le système d'exploitation, il existe deux possibilités d'environnements de développement intégrés (IDE) : CPLEX Studio IDE pour Windows et oplide pour Linux.

2- Langage de modélisation : Il utilise le langage OPL (Optimization Programming Language). Il permet d'utiliser une syntaxe similaire à la formulation mathématique pour pour l'écriture de programmes linéaires ou quadratiques.

3- L'écriture de programmes linéaires ou quadratiques : Il existe deux solveurs : IBM ILOG CPLEX est utilisé pour la programmation mathématique et permet de résoudre des problèmes quadratiques ainsi que des problèmes linéaires en valeurs fractionnaires, mixtes ou entières. La programmation par contraintes est réalisée à l'aide d'IBM ILOG CP Optimizer.

Le langage OPL utilisé dans l'IDE Cplex Studio a une syntaxe proche de la formulation mathématique, ce qui facilite la création d'applications linéaires (ou quadratiques). La séparation du modèle et des données, qui permet de tester facilement le même modèle avec différents ensembles de données, est une caractéristique qui relève du langage OPL.

3.3.3 Modélisation sous CPLEX et les résultats des tests :

Test 01 :

Les figures suivantes présentent à la fois le modèle mis en œuvre dans CPLEX et les résultats obtenus en effectuant le premier test :

```

1 /*****
2 * OPL 22.1.1.0 Model
3 * Author: Benakouche & Azoune
4 * Creation Date: 20 mai 2023 at 4:18:33 PM
5 *****/
6 int n=5;
7 range N=1..5;
8 range K=1..6;
9 range F=2..5;
10 int D[N][N]=[[0,10,12,8,11],[10,0,7,15,10],[12,7,0,9,11],[8,15,9,0,8],[11,10,11,8,0]];
11 int Q = 20;
12 int demand[N] = [0, 11, 8, 9, 3];
13 dvar boolean x[N][N][K];
14 dvar boolean z[K];
15 dvar int u[N][K];
16 dvar boolean y[F][K];

```

FIGURE 28 – Initialisation des données du modèle

```

18 minimize sum(k in K) (z[k] + sum(i in N, j in N) D[i][j]*x[i][j][k]);
19 subject to
20 {
21 forall (k in K) u[1][k] == z[k];
22 forall (i in F, k in K) u[i][k] >= 2*y[i][k];
23 forall (i in F, k in K) u[i][k] <= n*y[i][k];
24 forall (i in F, j in F, k in K) u[i][k] - u[j][k]+1 <= (n-1)*(1-x[i][j][k]);
25 forall (i in N, k in K) x[i][i][k] == 0;
26 forall (k in K) sum(j in F) x[1][j][k] == z[k];
27 forall (k in K, j in F) sum(i in N) x[i][j][k] == y[j][k];
28 forall (k in K, i in F) sum(j in N) x[i][j][k] == y[i][k];
29 forall (k in K) sum(i in F) y[i][k] <= 1;
30 forall (k in K) sum(i in F) demand[i] * y[i][k] <= Q*z[k];
31 forall (i in F) sum(k in K) y[i][k] == 1;
32 }

```

FIGURE 29 – Définition de la fonction objective et les contraintes d'optimisation.

```

VRP_TotalEnergies.mod ×
32 }
33
34 // Affichage de la résolution du modèle
35
36 execute {
37     writeln("Assignments:");
38     for (var k in K) {
39         writeln("Truck ", k, ":");
40         var quantity = 0;
41         var distance = 0;
42         var lastClient = 1;
43         var firstClient = -1;
44         for (var i in N) {
45             for (var j in N) {
46                 if (x[i][j][k].solutionValue == 1) {
47                     if (firstClient == -1) {
48                         firstClient = i;
49                     }
50                     if (j != 1 && (i != firstClient || j != lastClient)) {
51                         writeln(" - Client ", i, " to ", j);
52                         quantity += demand[j]; // Utiliser demand[j] pour la quantité
53                         distance += D[i][j];
54                     }
55                     lastClient = j;
56                 }
57             }
58         }
59         writeln("    Quantity: ", quantity);
60         writeln("    Distance: ", distance);
61     }
62 }

```

FIGURE 30 – Définition de la boucle d’affichage de résultats

Le résultat obtenu pour un échantillon de taille réduite comprenant 4 clients numérotés de 2 à 5 et nombre de camions 6 est présenté ci-dessous. . L’indice 1 représente le dépôt de départ.

```

<< Journal de script (placer le code script ici pour l'exécuter)
// solution (optimal) with objective 86
Assignments:
Truck 1:
  - Client 1 to 3
    Quantity: 8
    Distance: 12
Truck 2:
  - Client 1 to 5
    Quantity: 3
    Distance: 11
Truck 3:
  Quantity: 0
  Distance: 0
Truck 4:
  Quantity: 0
  Distance: 0
Truck 5:
  - Client 1 to 4
    Quantity: 9
    Distance: 8
Truck 6:
  - Client 1 to 2
    Quantity: 11
    Distance: 10

```

FIGURE 31 – Résultat obtenu lors de l’exécution du programme

CPLEX propose un résultat optimal avec une fonction objective de 86, avec utilisation de 4 camions parmi 6 camions, chaque client est affecté à un camion. Selon les résultats, on constate que

les contraintes ont été satisfaites. En conséquence, nous pouvons conclure que le modèle mathématique a été vérifié avec succès.

Afin de garantir la fiabilité de notre modèle, nous avons effectué un deuxième test en modifiant le nombre de clients par camion à deux clients. ci dessous les résultats du test 02 y compris les interprétations.

Test 02 :

```

VRP_TotalEnergies.mod ×
18 minimize sum(k in K) (z[k] + sum(i in N, j in N) D[i][j]*x[i][j][k]);
19 subject to
20 {
21   forall (k in K) u[1][k] == z[k];
22   forall (i in F, k in K) u[i][k] >= 2*y[i][k];
23   forall (i in F, k in K) u[i][k] <= n*y[i][k];
24   forall (i in F, j in F, k in K) u[i][k] - u[j][k]+1<= (n-1)*(1-x[i][j][k]);
25   forall (i in N, k in K) x[i][i][k] == 0;
26   forall (k in K) sum(j in F) x[1][j][k] == z[k];
27   forall (k in K, j in F) sum(i in N) x[i][j][k] == y[j][k];
28   forall (k in K, i in F) sum(j in N) x[i][j][k] == y[i][k];
29   forall (k in K) sum(i in F) y[i][k] <= 2; // Augmentation de nombre de clients dans un camion à 2
30   forall (k in K) sum(i in F) demand[i] * y[i][k] <= Q*z[k];
31   forall (i in F) sum(k in K) y[i][k] == 1;
32 }

```

FIGURE 32 – Modèle avec contrainte de deux clients/camion

Le résultat obtenu pour un échantillon de taille réduite comprenant 4 clients numérotés de 2 à 5 et nombre de camions 6 est présenté ci-dessous. . L'indice 1 représente le dépôt de départ.

```

Problèmes Journal de script × Solutions Relaxations Journal du moteur Statistiques Conflits Profiteur Watson Machine Learning
Scriptage interactif
« Journal de script (placer le code script ici pour l'exécuter)
// solution (optimal) with objective 58
Assignments:
Truck 1:
  Quantity: 0
  Distance: 0
Truck 2:
  - Client 1 to 4
  - Client 4 to 5
  Quantity: 12
  Distance: 16
Truck 3:
  - Client 1 to 3
  - Client 3 to 2
  Quantity: 19
  Distance: 19
Truck 4:
  Quantity: 0
  Distance: 0
Truck 5:
  Quantity: 0
  Distance: 0
Truck 6:
  Quantity: 0

```

FIGURE 33 – Résultat obtenu du programme avec contrainte de deux clients/camion

Le solveur CPLEX a fourni une solution optimale avec une fonction objectif de 58, en utilisant 2 camions parmi les 6 disponibles et en attribuant deux clients à chaque camion. Les résultats montrent une minimisation de la fonction objectif par rapport au premier test, tout en respectant

les contraintes et le nombre de camions requis. Par conséquent, nous pouvons conclure avec succès que le modèle mathématique a été vérifié. Voici un tableau recapitulatif des résultats obtenus des tests effectués.

	nbre client/camion	nbre de camions utilisés	Fonction objectif
Test 01	01	04	86
Test 02	02	02	58

TABLE 6 – Les résultats obtenus des tests effectués

Synthèse :

L'analyse des résultats obtenus en exécutant le modèle avec une variation du nombre de clients par camion révèle une tendance intéressante. Nous remarquons qu'à mesure que le nombre de clients par camion augmente, le nombre total de camions nécessaires diminue. De plus, cette augmentation conduit à une optimisation accrue de la fonction objectif, ce qui se traduit par un taux de remplissage élevé.

3.4 Résolution du modèle

3.4.1 Détermination de la stratégie de résolution

Les CVRPs (Problèmes de Routage de Véhicules Capacités) et le problème de Bin Packing sont des problèmes d'optimisation appartenant à la classe des problèmes NP-difficiles. Pour résoudre ces problèmes, de nombreuses revues de la littérature ont proposé des approches basées sur des méthodes approximatives. Les heuristiques sont des méthodes utilisées pour résoudre un problème sans garantir des performances optimales, tandis que les métaheuristiques sont connues pour leur niveau de performance, ce qui en fait une recommandation judicieuse pour résoudre des problèmes NP-difficiles.

Il est important de noter que les métaheuristiques offrent des résultats acceptables dans des délais raisonnables tout en permettant l'exploration d'espaces de recherche étendus.

Après l'analyse du tableau présenté dans le chapitre précédent intitulé "Tableau de comparaison des métaheuristiques". nous avons choisi la stratégie de résolution de notre problème avec l'utilisation de l'approche de recuit simulé en se basant sur deux visions :

Vision entreprise (TotalEnergies) :

- Temps d'exécution : Le temps de résolution du problème est réduit par rapport aux autres approches ce qui permet au planificateur d'éliminer les pertes de temps liées à la planification.
- Mémoire requise : Les ordinateurs disposés au sein de l'entreprise sont de faibles puissances d'où la nécessité d'une méthode qui n'exige pas une grande capacité de mémoire.
- Convergence rapide à une solution de bonne qualité.

Vision académique :

- Facilité d'implémentation et compréhension : La facilité d'implémentation et compréhension est élevée ce qui nous permet de gagner en termes de temps et d'efforts
- Une robustesse moyenne par rapport aux autres méthodes de résolution.
- La taille et complexité du problème est petite à moyenne.
- La capacité à échapper aux optima locaux est élevée.

3.4.2 Explication du déroulement de la méthode

Le principe de l'algorithme de recuit simulé a été brièvement abordé en chapitre 2, on le détaillera dans ce qui suit en expliquant notre méthodologie de travail. Commençons par le choix d'une solution initiale en utilisant l'algorithme savings, il est important de noter qu'il est possible de travailler avec une solution initiale aléatoire, par contre l'utilisation d'un algorithme spécifique génère une meilleure solution. voici le déroulement de l'algorithme de sélection de la meilleure solution initiale :

Algorithm 2 `algorithmme_de_savings`

Require: `matrice_distance`, `demandes`, `capacité_camion`, `max_clients_par_camion`**Ensure:** `routes`

```
1: num_clients ← longueur(matrice_distance) - 1
2: économies ← []
3: routes ← []
4: for i = 1 à num_clients do
5:   for j = i + 1 à num_clients + 1 do
6:     économies.append((i, j, matrice_distance[0][i] + matrice_distance[0][j] - ma-
       trice_distance[i][j]))
7:   end for
8: end for
9: trier économies en ordre décroissant par économies
10: for all (i, j, économies) dans économies do
11:   if demandes[i] > capacité_camion OU demandes[j] > capacité_camion OU demandes[i] +
     demandes[j] > capacité_camion then
12:     continuer
13:   end if
14:   route_i ← None
15:   route_j ← None
16:   for all route dans routes do
17:     if i est dans route then
18:       route_i ← route
19:     end if
20:     if j est dans route then
21:       route_j ← route
22:     end if
23:   end for
24:   if route_i n'est pas None ET route_j n'est pas None then
25:     continuer
26:   end if
27:   if route_i est None ET route_j est None then
28:     nouvelle_route ← [0, i, j, 0]
29:     if somme(demandes[client] pour chaque client dans nouvelle_route[1 :-1]) ≤ capa-
       cité_camion ET longueur(nouvelle_route) - 2 ≤ max_clients_par_camion then
30:       routes.append(nouvelle_route)
31:     end if
32:   else if route_i est None then
33:     // Exécuter le code pour l'ajout du client i à la route du client j
34:   else if route_j est None then
35:     // Exécuter le code pour l'ajout du client j à la route du client i
36:   end if
37: end for
38: return routes
```

Après avoir choisi la solution initiale, l'étape suivante consiste au calcul des coûts totaux de chaque trajet défini par la solution produite par l'algorithme précédent en utilisant l'algorithme suivant :

Algorithm 3 calculer_coût_solution

Require: solution, matrice_distance

Ensure: coût_total

```
1: coût_total ← 0
2: for all route dans solution do
3:   for i = 0 à longueur(route) - 1 do
4:     coût_total ← coût_total + matrice_distance[route[i]][route[i + 1]]
5:   end for
6:   if longueur(route) > 2 then
7:     coût_total ← coût_total - matrice_distance[route[-2]][route[-1]]
8:   end if
9: end for
10: return coût_total
```

la 3ème et la dernière étape consiste à l'utilisation des deux algorithmes précédent plus la fonction simulated annealing qui implémente l'algorithme du recuit simulé, une méthode d'optimisation stochastique qui consiste à trouver l'approche optimale de la répartition des clients entre les camions compte tenu de la capacité de chaque camion et de la demande de chaque client. voici le déroulement de l'algorithme :

Algorithm 4 recuit_simulé

Require: matrice_distance, demandes, capacité_camion, temp_initiale, temp_finale,
taux_refroidissement, max_clients_par_camion

Ensure: meilleure_solution, meilleur_coût

```
1: Calculer num_clients, demande_totale, num_camions
2: Initialiser solution, coût_actuel, meilleure_solution, meilleur_coût, température
3: while température > temp_finale ET tous les clients ne sont pas affectés do
4:   Sélectionner aléatoirement deux camions : camion1, camion2
5:   if les deux camions ont au moins un client then
6:     Sélectionner aléatoirement un client de chaque camion : client1, client2
7:     Échanger les clients entre les deux camions
8:     if la charge de chaque camion ne dépasse pas la capacité then
9:       Calculer le coût de la nouvelle solution : coût_temporaire
10:      if coût_temporaire < coût_actuel then
11:        Accepter la nouvelle solution
12:        if coût_temporaire < meilleur_coût then
13:          Mettre à jour meilleure_solution et meilleur_coût
14:        end if
15:      else
16:        Calculer delta = coût_temporaire - coût_actuel
17:        if un nombre aléatoire < exp(-delta / température) then
18:          Accepter la nouvelle solution
19:        end if
20:      end if
21:    end if
22:  end if
23:  Diminuer la température : température *= taux_refroidissement
24: end while
25: return meilleure_solution, meilleur_coût
```

3.4.3 Test de la méthode avec des données réelles

Après avoir exposé l'algorithme de la méthode de recuit simulé ainsi que ses différents paramètres, il est maintenant temps de le mettre en pratique en utilisant des données réelles liées à la planification de TotalEnergies. Nous tenons à souligner que cette partie de l'étude est réalisée en utilisant l'outil Python et son environnement de développement PyCharm.

Voici une brève description qui permettra aux lecteurs de mieux comprendre et de suivre la solution mise en place :

Python :

Il s'agit d'un langage de programmation impératif interprété, multi paradigme, multiplateforme et orienté objet qui encourage la programmation structurée, fonctionnelle et orientée objet. Il fonctionne sur la majorité des plates-formes informatiques et il est distribué sous licence libre. En outre, il peut être converti en Java ou en NET. Python est caractérisé par sa simplicité et sa facilité d'utilisation.

Pycharm :

c'est un environnement de développement intégré utilisé pour programmer en Python. Il dispose d'un débogueur graphique et d'un outil d'analyse de code. En outre, il prend en charge le développement web de Django, la maintenance des tests unitaires et l'intégration des outils de contrôle de version.

Test sur les données et les résultats obtenus :

Pour notre étude, nous avons utilisé un rapport de validation préalablement traité par le planificateur. Ce rapport contient des informations sur la livraison de 14 clients, où chaque client a une demande à satisfaire le même jour. De plus, nous disposons de plusieurs camions pour effectuer les livraisons mais ce nombre est inconnu comme on veut le minimiser. La matrice des distances entre les différents clients a été déterminée vu que le coût total de transport est lié aux distances parcourues par les camions utilisés.

En utilisant l'algorithme du recuit simulé, nous avons traité ce cas spécifique et obtenu les résultats suivants :

```
Run: main x
Camion 1 :
-----
Dépôt (Blida)
-> RAMKA IMPORT EXPORT EURL (ANNABA), Quantité 0.18
-> SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR SKE Spa (EL Tarf), Quantité 2.10
-> EURL MONOLUB (OUM EL BOUAGHI), Quantité 13.15
Poids transporté : 15.42, Ratio : 0.77
Kilométrage parcouru : 613.92

Camion 2 :
-----
Dépôt (Blida)
-> KAROUI ADEL TOP LUB (HASSI MESSAOUD), Quantité 8.00
-> SPA CILAS (BISKRA), Quantité 2.00
-> SARL EGREKIMA (Jijel), Quantité 0.22
Poids transporté : 10.22, Ratio : 0.51
Kilométrage parcouru : 1169.39
```

FIGURE 34 – Configuration de la tournée des deux camions 1 et 2.

```
Run: main x
Camion 3 :
-----
Dépôt (Blida)
-> AMINE KARA SLIMANE (TLEMEN), Quantité 13.28
-> SARL ABM (MOSTAGANEM), Quantité 0.18
-> EURL EPTTRS (CHLEF), Quantité 3.62
Poids transporté : 17.07, Ratio : 0.85
Kilométrage parcouru : 694.86

Camion 4 :
-----
Dépôt (Blida)
-> CHELLALI EL HACHEMI (BOUIRA), Quantité 15.96
-> EURL BEAI (BOUMERDES), Quantité 0.19
-> Spa KIA AL DJAZAIR (Alger), Quantité 2.54
Poids transporté : 18.68, Ratio : 0.93
Kilométrage parcouru : 211.83
```

FIGURE 35 – Configuration de la tournée des deux camions 3 et 4.

```

Run: main x
-----
Camion 5 :
-----
Dépôt (Blida)
-> FATEH IMEKHLAF (Alger), Quantité 16.00
-> RENAULT TRUCKS ALgerIE EURL (Alger), Quantité 4.00
Poids transporté : 20.00, Ratio : 1.00
Kilométrage parcouru : 39.74

Nombre de camions : 5
Kilométrage total : 2729.742566442911

Process finished with exit code 0

```

FIGURE 36 – Configuration de la tournée du camion 5 et le coût total.

3.4.4 Analyse et comparaison

Maintenant on va comparer le résultat de notre algorithme avec celui du planificateur.

Le planificateur a proposé la planification suivante :

Camion	Clients	Wilayas	Poids transporté	Kilométrage parcouru	Taux de remplissage
1	Dépôt > FATEH > Spa KIA	Blida > Alger	18,54	51	92,7%
2	Dépôt > RENAULT EURL > CHELLALI	Blida > Alger > Bouira	19,95	150	99,75%
3	Dépôt > EGREKIMA > RAMKA IE > SHARIKET KAHRABA	Blida > Jijel > Annaba > El tarf	2,5	670	12,5%
4	Dépôt > EPTTRS > ABM > AMINE KARA	Blida > Chlef > Mostaganem > Tlemcen	17,07	694.86	85%
5	Dépôt > CILAS > KAROU LUB	Blida > Biskra > HASSI MESSAOU	10	870	50%
6	Dépôt > BEAI > MONOLUB	Blida > Boumerdes > OUM EL BOUAGHI	13,33	530	66,75%

TABLE 7 – Tournée proposée par le planificateur

Notre approche a proposé la planification suivante :

Camion	Clients	Wilayas	Poids transporté	Kilométrage parcouru	Taux de remplissage
1	Dépôt > MONOLUB > RAMKALIE > SHARIKET KAHRABA	Blida > Oum el Bouaghi > Annaba > El Tarf	15,42	613,92	77%
2	Dépôt > EGREKIMA > CILAS > KAROUILUB	Blida > Jijel > Biskra > Hassi Messaoud	10,55	1169,39	51%
3	Dépôt > EPTTRS > ABM > AMINE KARA	Blida > Chlef > Mostaganem > Tlemcen	17,07	694.86	85%
4	Dépôt > KIA > BEAI > CHELLALI	Blida > Alger > Boumerdes > Bouira	18,67	211,83	93%
5	Dépôt > FATEH > RENAULT	Blida > Alger	40	20	100%

TABLE 8 – Tournée proposée par notre Solution

Par la suite, on compare la solution de notre approche avec la solution du planificateur :

	Nombre de camions	Taux de remplissage moyen	Distance totale	Temps de planification
Planificateur	6	68%	2967	55min
Notre solution	5	81%	2729	11 sec

TABLE 9 – Tableau comparatif des résultats

Interprétation :

Le tableau 10 montre que notre solution a permis de réduire le nombre de camions nécessaires par rapport au planificateur de 6 à 5 camions, ce qui indique une meilleure utilisation des ressources et une gestion des tournées plus efficace et une diminution du coût d'utilisation des camions. De plus, nous avons pu atteindre un taux de remplissage moyen plus élevé avec une augmentation d'environ 19,12%, ce qui démontre une meilleure utilisation de la capacité des camions. Une utilisation améliorée de l'espace disponible peut entraîner une réduction des coûts de transport. Par ailleurs, nous avons pu réduire la distance totale parcourue par rapport au planificateur de 238 Km, ce qui a permis de réaliser des économies sur les coûts de déplacement, de réduire les émissions et de diminuer le temps de trajet. En outre, par rapport au planificateur, notre solution a considérablement réduit la période de planification, le temps de traitement a été réduit d'environ 99,67% , ce qui présente des avantages pour la réactivité et de la flexibilité opérationnelle.

En conclusion, notre solution semble surpasse le Planificateur dans plusieurs aspects clés. Elle parvient à réduire le nombre de camions nécessaires, à augmenter le taux de remplissage moyen, à réduire la distance totale parcourue et à diminuer considérablement le temps de planification.

3.5 Mise en place de la solution

Dans le cadre de notre projet, nous avons constaté que le planificateur rencontre souvent des difficultés à maîtriser des logiciels technologiques avancés tels que Python et son environnement PyCharm. Afin de rendre notre solution réaliste et facilement applicable, nous avons développé un outil convivial qui permet au planificateur de planifier et de prendre des décisions en toute simplicité, sans se soucier de la complexité d'utilisation de Python.

Présentation et déroulement de l'Outil

Pour la concrétisation de notre solution, nous avons construit et créé un système sophistiqué pour rationaliser et automatiser le processus de planification des itinéraires de livraison. Le programme est conçu pour bien travailler avec les utilisateurs, préparer et nettoyer les données, utiliser des algorithmes de planification efficaces, puis fournir un rapport de planification complet avec des visualisations compréhensibles. Le déroulement de l'outil se compose en quatre étapes, que nous avons résumées schéma ci-dessous :

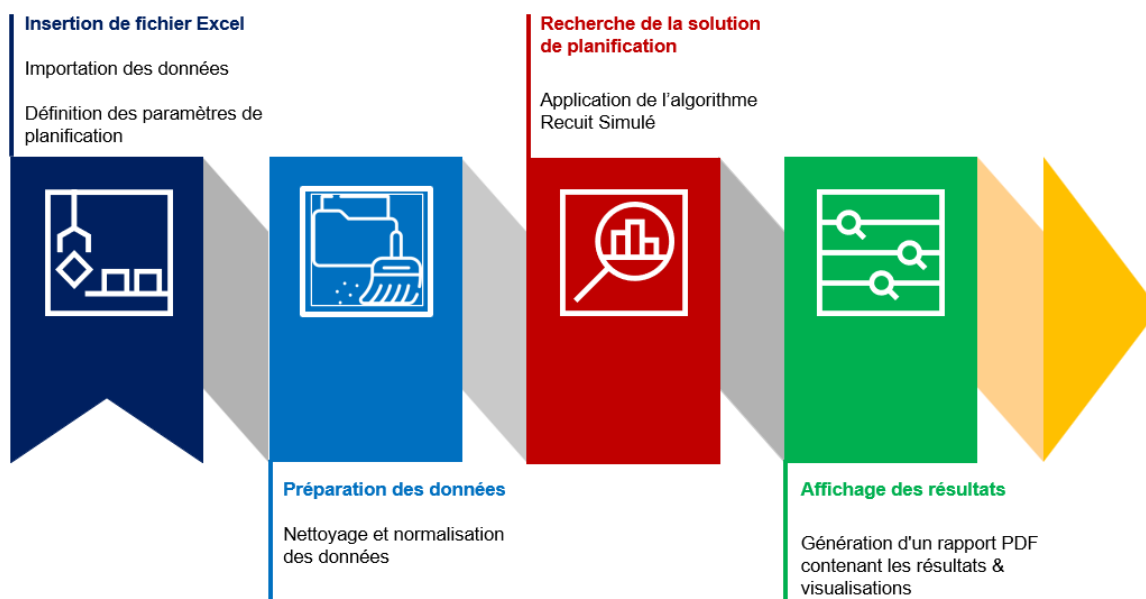


FIGURE 37 – Déroulement de l'Outil.

Étape 01 : Insertion du fichier Excel et définition des paramètres

Une fonctionnalité clé de notre interface consiste à permettre à l'utilisateur d'interagir avec notre outil, lorsque ce dernier clique sur une icône située sur le bureau, l'outil lui demande d'insérer un fichier Excel en cliquant sur le bouton "Ouvrir", comme l'indique la figure suivante :

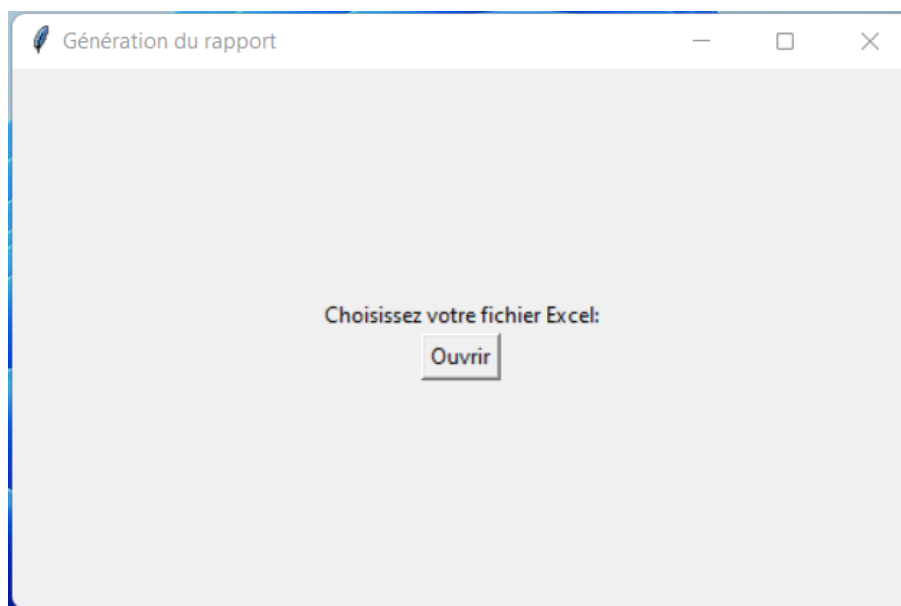


FIGURE 38 – Insertion du fichier Excel.

L'utilisateur n'a qu'à insérer le fichier souhaité, car le programme est conçu pour importer des données à partir de fichiers Excel. L'outil sollicite ensuite l'utilisateur à spécifier des paramètres de planification, tels que le nombre maximum de clients pouvant être transportés par un seul véhicule et la capacité du camion, comme l'indique la figure suivante :

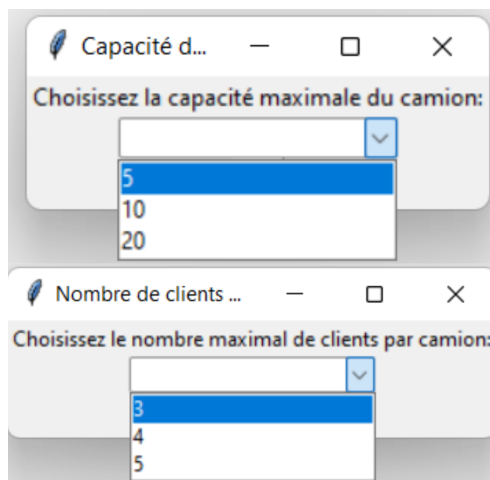


FIGURE 39 – Définition des paramètres

Voici un exemple contenant des données brutes que l'utilisateur est censé d'insérer :

Produit	Client	City	Quantit
RUBIA TIR 7400 15W40-20L	KAROUI ADEL TOP LUB	HASSI MES	8,00
DYNATRANS AC 50-FUT	EURL BEAI	BOUMERC	0,19
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	SPA CILAS	BISKRA	2,00
RUBIA S 40-FUT	EURL MONOLUB	OUM EL B	7,27
RUBIA TIR 7400 15W40-5L	EURL MONOLUB	OUM EL B	1,79
QUARTZ 7000 10W40-5L	EURL MONOLUB	OUM EL B	4,09

FIGURE 40 – Données brutes avant la préparation et traitement.

Étape 02 : Préparation et nettoyage des données

Une fois le fichier importé, l'outil se charge du prétraitement des données. Il peut nettoyer et préparer les données, calculer les distances entre les clients, créer une matrice de distance, calculer et créer un vecteur des demandes des clients. Pour réaliser ces opérations, nous avons utilisé les bibliothèques **geopy.geocoders**, **geopy.distance**, **numpy** et **pandas**.

Ci-dessous, une illustration des données après leur transformation et traitement :

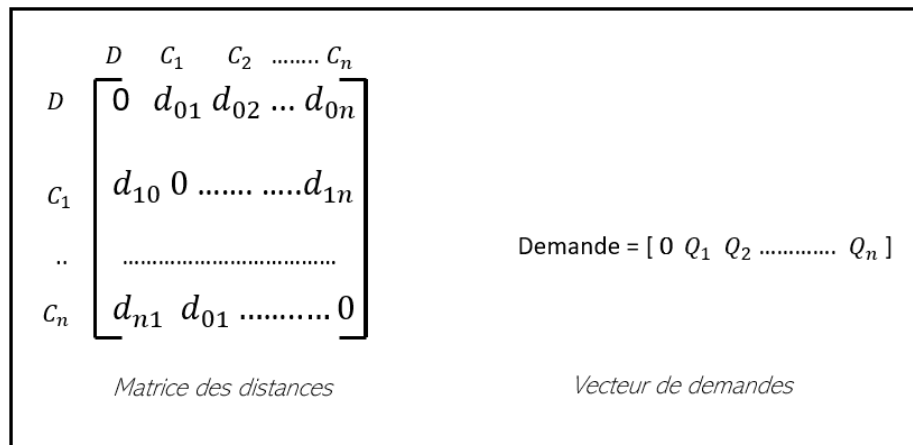


FIGURE 41 – Données transformées après la préparation et traitement.

Étape 03 : Recherche de la solution de planification en utilisant les données

Une fois les données préparées, l'outil applique l'algorithme de planification (recuit simulé) pour déterminer la meilleure solution de tournées. Cet algorithme propose une solution de planification optimisée en tenant compte des paramètres définis par l'utilisateur et des données prétraitées.

Étape 04 : Affichage des résultats et visualisation graphique dans un rapport PDF

Finalement, l'outil sollicite l'utilisateur de choisir l'emplacement du rapport final contenant le résultat comme l'indique la figure suivante :



FIGURE 42 – Choix de l'emplacement du rapport final.

L'application génère un rapport PDF complet avec les résultats, les graphiques et les images pour une visualisation facile de la tournée. Ce rapport énumère les clients avec leur adresse, les produits transportés dans chaque camion, la distance parcourue et l'horaire de la tournée par numéro de camion. Pour mieux cerner ce résultat nous avons présentés les informations liées au Camion 01 dans la figure suivante et celles des autres camions de la tournée vous les trouverez en annexe :

A screenshot of a report titled "Planning des tournées" with the TotalEnergies logo in the top left. The report details for "Camion 1" are as follows:

Camion 1 :
Dépôt Blida
-> RAMKA IMPORT EXPORT EURL (ANNABA)
Quantité : 0.18
-> SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR SKE Spa (El Tarf)
Quantité : 2.10
-> EURL MONOLUB (OUM EL BOUAGHI)
Quantité : 13.15
Ratio : 0.77
Kilométrage parcouru : 614.02

FIGURE 43 – Les informations liées au Camion 01.

Le rapport comprend également un tableau de bord avec des graphiques représentant la quantité totale transportée par camion, la durée de la tournée par camion et un tableau d'indicateurs de performance. Ces indicateurs comprennent le kilométrage total, l'utilisation globale du camion et le poids total de la livraison transportée. Le taux de remplissage moyen est une autre mesure affichée sous forme de jauge.

La durée de chaque tournée par camion est calculée en suivant les règles établies par le PATROM, à savoir :

- Le transport démarre depuis le dépôt à 9h ;
- La vitesse maximale autorisée est de 70 km/h ;
- Toutes les 4 heures de conduite, une pause de 30 minutes est nécessaire ;
- Si l'heure de fin dépasse 19h, le conducteur s'arrête et reprend le lendemain à 5h ;
- Le temps estimé pour le déchargement chez chaque client est de 1h.

Le temps total de conduite est calculé comme suit :

$$\text{Temps de conduite} = \frac{\text{distance}}{\text{vitesse max}}$$

$$\text{Nombre de pauses} = \frac{\text{temps de conduite}}{4}$$

$$\text{Temps de pause} = \text{nombre de pauses} \times 0.5$$

$$\text{Temps total} = \text{temps de conduite} + \text{temps de pause} + (\text{temps de déchargement} \times \text{nombre de clients})$$

Le taux de remplissage est calculée par la formule suivante :

$$TR = (\text{Poids transport} / \text{Capacit maximale}) * 100$$

Voici une visualisation du tableau de bord lié à la tournée précédente

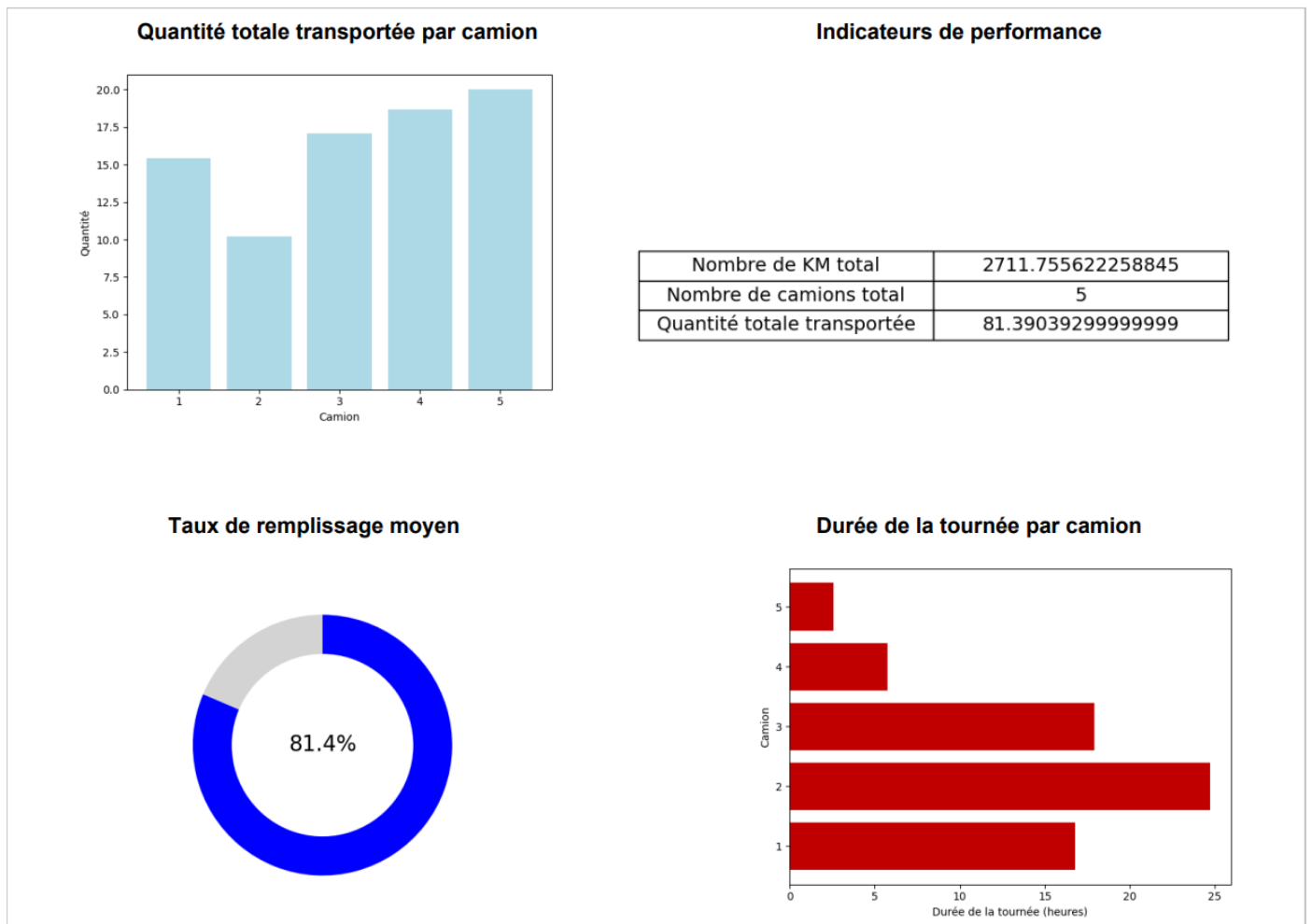


FIGURE 44 – Visualisation des résultats sous forme d’un Tableau de Bord.

Ainsi, cette application aide les entreprises à l’optimisation de leurs ressources tout en répondant efficacement aux demandes des consommateurs en simplifiant le processus complexe de planification des itinéraires, en le rendant plus précis et plus efficace.

3.6 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons décomposé notre stratégie de résolution en trois sections : dans un premier temps, nous avons élaboré un modèle mathématique adapté à notre problématique en prenant en considération les contraintes liées à l’activité transport au sein de Totanergies. Sur un échantillon de données plus restreint, nous l’avons ensuite validé à l’aide du programme d’optimisation linéaire CPLEX. La seconde moitié de ce chapitre a été consacrée à l’utilisation de l’algorithme du recuit simulé pour la résolution et la génération d’un plan de transport. La dernière partie s’est concentrée sur la création d’une interface simple contenant l’algorithme précédent et qui génère le plan de transport ainsi un tableau de bord qui suit en permanence chaque tournée de l’opération logistique de transport.

3.7 Perspectives et recommandations

Suite à l'élaboration et à l'implémentation réussie de notre outil de planification des tournées, nous avons identifié plusieurs possibilités d'évolution et d'améliorations potentielles. Ces recommandations visent à améliorer l'efficacité, la précision et la facilité d'utilisation de l'outil, tout en augmentant sa valeur pour l'entreprise.

- **Optimisation des Tournées par Intégration de la Technologie de Géocodage Payante :**

Investissement dans l'intégration de l'API Google Geocoding, une solution payante qui se combine avec notre outil de planification pour optimiser les itinéraires en temps réel et améliorer la précision des adresses pour une logistique plus efficace.

- **Intégration de l'outil de planification avec SAP :**

Une intégration plus poussée avec SAP réduirait le temps et les efforts nécessaires pour transférer des données entre différents systèmes. Les utilisateurs pourraient tout faire dans un seul et même système ce qui faciliterait et simplifierait également le processus de planification.

- **Création d'une base de données client intégrée :**

L'intégration d'une base de données clients dans l'outil simplifierait le suivi des adresses et d'autres informations importantes sur les clients. Cela pourrait permettre d'optimiser les itinéraires en tenant compte de détails spécifiques aux clients, comme les heures de livraison souhaitées.

- **Prévision et optimisation des besoins en camions :**

L'enregistrement et l'utilisation des données des tournées précédentes permettent d'enrichir les bdd des clients et de créer un système d'apprentissage basé sur des méthodes et des méthodologies académiques qui pourrait prédire les besoins futurs, en particulier le besoin en nombre de camions, avec une plus grande précision. Ces résultats pourraient être utilisées pour améliorer l'efficacité de la planification et négocier des contrats plus avantageux et favorables avec les prestataires logistiques, ce qui pourrait se traduire par une réduction significative des coûts. Avec cette proposition TotalEnergies peut opter pour des contrats de mise à disposition et éviter le 2ème type qui est le service à rotation car il présente plus d'inconvénients que d'avantages. Les principaux problèmes liés à ce choix sont l'indisponibilité potentielle des camions et l'inexpérience des chauffeurs.

- **Intégration avec l'outil de suivi OBC :**

Cette intégration pourrait aider à surveiller les camions en temps réel, à évaluer leur performance et à répondre rapidement aux problèmes. De plus, elle pourrait permettre de collecter des données précieuses pour améliorer la planification future.

- **Amélioration continue de l'algorithme de planification avec l'intégration de l'Intelligence Artificielle et du Machine Learning :**

La précision et l'efficacité de l'algorithme de planification peuvent être considérablement améliorées par l'utilisation de techniques d'IA et de ML. Ces technologies donnent à l'outil la capacité de reconnaître des modèles et des tendances à partir de données historiques,

d'apprendre par lui-même et d'optimiser les décisions de planification en conséquence. Par exemple, l'outil pourrait être entraîné à anticiper les périodes de demande élevée, à optimiser les itinéraires en fonction du trafic et des conditions météorologiques, et à réagir rapidement aux changements imprévus. La capacité d'auto-amélioration de l'outil le rend plus précis et plus efficace au fil du temps, ce qui améliore l'utilisation qu'en fait l'entreprise.

- **Amélioration de la Synergie Interdépartementale pour une Supply Chain Optimisée :**

Établir des sessions de brainstorming bimensuelles entre la logistique et le transport et le marketing et le commercial pour faciliter l'échange d'idées et aligner les objectifs respectifs.

Conclusion générale

Conclusion générale

TotalEnergies évolue dans un environnement exigeant et concurrentiel qui nécessite une innovation constante pour maintenir sa trajectoire ascendante et poursuivre ses objectifs de leadership. La maîtrise des coûts et la satisfaction client sont des paramètres clés de cette dynamique. Notre intervention vise à jeter l'ancre de l'innovation dans le département Logistique et Transport de l'entreprise, en digitalisant le processus de planification des tournées. L'objectif est d'optimiser le déploiement des ressources et de faciliter la tâche du planificateur.

Notre mission commence par un diagnostic rigoureux pour identifier les dysfonctionnements et les potentiels points d'amélioration des opérations logistiques de l'entreprise. En utilisant le référentiel ASLOG pour faire les entretiens avec les employés, nous avons pu comprendre la structure organisationnelle et les processus opérationnels du département. Cela nous a permis d'affiner notre vision du processus de planification et de transport, et de mieux cerner la problématique à laquelle nous devons répondre.

La méthodologie que nous avons adoptée s'est déclinée en quatre étapes principales :

La première étape consiste à modéliser mathématiquement le problème des tournées de véhicules avec capacité, ce qui reflète parfaitement la réalité opérationnelle de l'entreprise. Nous avons ainsi pu préciser l'ensemble de ses paramètres et contraintes propres à TotalEnergies, mettant en évidence la complexité du problème. Cette modélisation a fourni la base de notre solution.

Dans la deuxième étape, nous aborderons la résolution du modèle proposé. En raison de sa complexité, nous avons opté pour une approche méta-heuristique, en utilisant la stratégie de "recuit simulé" que nous avons adaptée aux besoins spécifiques de l'entreprise.

La troisième étape est la validation de notre solution, où nous comparons les résultats obtenus par notre méthode avec ceux utilisés par le planificateur. Cela nous a permis d'évaluer l'efficacité du modèle et de confirmer qu'il offrait une meilleure planification.

Enfin, nous avons consolidé notre approche dans un outil convivial et performant qui fournit non seulement un plan de tournées en format PDF, mais offre également un tableau de bord pour le pilotage de l'activité de transport.

Ce projet de fin d'études, nous a offert une expérience extrêmement enrichissante. Il nous a permis de consolider et d'élargir nos connaissances, d'appliquer les compétences acquises au cours de notre formation d'ingénieur. Du diagnostic à la modélisation mathématique, en passant par la programmation informatique, chaque étape nous a offert l'opportunité de concrétiser les concepts théoriques en solutions pratiques et innovantes. Pour conclure, nous espérons que nos recommandations et perspectives pourront contribuer à améliorer davantage notre travail à l'avenir et soutenir le développement continu de TotalEnergies.

Bibliographie

Bibliographie

- 6Wresearch. Algeria automotive lubricants market. URL <https://www.6wresearch.com/industry-report/algeria-automotive-lubricants-market>.
- Nadira Abbassa. L'heuristique de clarke & wright pour résoudre le problème de livraison de fioul. Master's thesis, Université AbdeLhamid Ibn Badis, 2015.
- Sohaib Afifi and Aziz Moukrim. Une méthode hybride pour le problème de tournées de véhicules avec contraintes de temps. In *ROADEF 2016, 17ème congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*, Feb 2016.
- Bedrane Amari. Historique et notion de méthodes approchées. In *École Nationale Polytechnique, Département Génie Industriel*, 2021.
- Ilham Bouastia and Omya Mariem Abdelli. Optimisation des tournées de distribution directes des produits laitiers : Application danone djurdjura algérie, 2020.
- V. Cerný. A thermodynamical approach to the traveling salesman problem : an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1) :41–51, 1985.
- Si Chen and Bruce Golden. The split delivery vehicle routing problem : Applications, algorithms, test problems, and computational results. *Transportation Science*, 41(2) :179–200, 2007.
- Sunil Chopra and Peter Meindl. *Supply chain management : strategy, planning, and operation*. Pearson, 6th edition, 2015.
- Martin Christopher. *Logistics and Supply Chain Management : Logistics & Supply Chain Management 5th Edition*. Pearson, 2016.
- G. Clarke and J. W. Wright. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4) :568–581, 1964.
- David Corne. *New Ideas in Optimization : Macs-Vrptw : A Multiple Ant Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows*. Thèse de doctorat, University of McGraw-Hill, London, 1999.
- Mathieu Corriveau. *Planification de la capacité logistique d'un réseau d'importation et de distribution*. PhD thesis, Université du Québec à Montréal, 2013.
- G.B. Dantzig, D.R. Fulkerson, and S.M. Johnson. Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Operations Research*, 2(4) :393–410, 1954.
- Sidi Mohamed Douiri, Souad Elberoussi, and Halima Lakhbab. Cours des méthodes de résolution exactes heuristiques et métaheuristiques. <http://www.fsr.ac.ma/DOC/cours/maths/Souad%20Bernoussi/Cours%20C2SI.pdf>, 2019. Consulté le 13 mai 2023.
- M.L. Fisher and R. Jaikumar. A decomposition algorithm for large-scale vehicle routing problems with branch and price. Technical Report 78-11-05, Department of Decision Sciences, University of Pennsylvania, 1978.

- M.L. Fisher and R. Jaikumar. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11 :109–124, 1981.
- Billy E. Gillett and Leland R. Miller. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations Research*, 22(2) :340–349, 1974.
- D. Goldberg. *Genetic algorithms*. Addison Wesley, 1989. ISBN 0-201-15767-5.
- B. L. Golden. Vehicle routing problem : Formulations and heuristic solution techniques. Technical Report NO. 113, Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, August 1975.
- Maroua GRID. *Bee life Parallèle sur GPU pour résoudre le problème dynamique des tournées de véhicules avec une contrainte de capacité*. PhD thesis, Département de l’informatique, Biskra, Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
- William Hoa, George TS Ho, Ping Ji, and Henry CW Lau. A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 177(3) :1853–1869, 2007.
- J. H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975.
- Mordor Intelligence. Rapport sur le marché des lubrifiants. Technical report, a. URL <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/lubricants-market>.
- Mordor Intelligence. Rapport sur le marché des lubrifiants en afrique, b. URL <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/africa-lubricants-market>.
- S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and K. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 :671–680, 1983.
- Abdeslam Layeb. *Utilisation des Approches d’Optimisation Combinatoire pour La Vérification des Applications Temps Réel*. Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, Constantine, 2010.
- Omar Liong. *Vehicle routing problem : models and solutions*. PhD thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia, 2008.
- Silvano Martello. *Bin Packing Problem*. Publisher Name, 2015.
- Manuel Ostermeier, Tino Henke, Alexander Hubner, and Gerhard W Wascher. Multi-compartment vehicle routing problems : State-of-the-art, modeling framework and future directions. *European Journal of Operational Research*, 284(1) :1–21, 2020.
- Tayeb Oulad Kouider. *Optimisation de la planification des tourn’ees de v’ehicules ’electriques*. PhD thesis, Universit’e de Lorraine, 2020.
- Yves Pimor and Michel Fender. *Logistique, Production, Distribution, Soutien*. Dunod, 5 edition, 2008.
- C. Prins, N. Labadi, and M. Reghioui. Tour splitting algorithms for vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, 47(2) :507–531, 2009.

- Ken Research. Algeria lubricants market is expected to reach dzd 55 billion in terms of revenues by 2022, 2022. URL <https://www.prnewswire.com/news-releases/algeria-lubricants-market-is-expected-to-reach-dzd-55-billion-in-terms-of-revenues-by-2022.html>.
- Aldo Rustichini. Dynamic programming solution of incentive constrained problems. *Journal of Economic Theory*, 78(2) :329–354, 1998.
- Patrick Soriano and Michel Gendreau. Fondements et applications des méthodes de recherche avec tabous. *RAIRO-Recherche Opérationnelle*, 31(2) :133–159, 1997.
- Hartmut Stadtler and Christoph Kilger. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer, 2005. ISBN 978-3-540-24814-9.
- Statista. Lubricants industry - statistics & facts. URL <https://www.statista.com/topics/5263/lubricants-industry>.
- Daniel Tixier, Herve Mathe, and Jacques Colin. *La logistique d'entreprise*. Dunod, 1998.
- Niaz A. Wassan and Gábor Nagy. Vehicle routing problem with deliveries and pickups : Modelling issues and meta-heuristics solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019 :1–23, 2019. doi : 10.1155/2019/9047524.
- Marino Widmer. Les metaheuristiques : Des outils performants pour les problemes industriels. In *3e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels"*. Université de Fribourg, Département d'informatique, 2001.

Annexes

Annexes

Annexe A

Les Personnes interviewées lors de l'audit ASLOG

Chacune des personnes auditées a fait l'objet d'un entretien individuel dans le cadre de l'audit. Au total, nous avons identifiés quatre personnes pour les deux chapitres, comme le montre le tableau suivant :

Nom et Prénom	Poste
Islam Mestrouh	Responsable transport
Yazid Ameziane	Manager transport
Ramdane Bouzegzi	Planificateur transport
Abdellah Fekkai	Young Graduate SC

TABLE 10 – Personne interviewée lors de l'audit ASLOG.

Description des deux chapitres choisi selon ASLOG.

Chapitre 5 : la logistique de transport

Ce chapitre vise à mettre l'accent sur la logistique de transport y compris le choix des transporteurs : ce point consiste à déterminer s'il existe un contrôle avant chaque chargement qui permet de vérifier la conformité du véhicule qui se présente mais aussi comment les transporteurs sont choisis, un deuxième point est vérifié qui est le niveau de maîtrise de flux et le type de partenariat avec les transporteurs et la maîtrise opérationnelles. Pour faire cela nous avons un ensemble de questions qui nous permettent de mieux cerner cette partie :

1. Choix des transporteurs :
 - 1.1. Comment les transporteur assurant les approvisionnements sont-ils choisis ?
 - 1.2. Comment les transporteur assurant les livraisons vers les clients ou prestataires intermédiaires sont-ils choisis ?
2. Maîtrise du flux aval
 - 2.1. Comment les besoins de transport sont-ils évalués ?
3. Partenariat avec les transporteurs
 - 3.1. Quelle maîtrise est exercée sur les opérations de tras ?
 - 3.2. Quelle maîtrise est exercée sur les opérations de transmission des informations (incidents de transport) ?
4. Maîtrise opérationnelle
 - 4.1. Quelle maîtrise est exercée sur la sécurité des produits pendant les opérations de transport ?
 - 4.2. Quelle maîtrise est exercée sur la qualité de transport et de livraison ?

Chapitre 7 : la logistique de distribution

Ce chapitre vise à mettre l'accent sur la logistique de distribution y compris la définition de l'offre logistique ainsi que la façon dont les prévisions de ventes sont élaborées et suivies, en outre il est important d'auditer l'activité et le suivi opérationnelle y compris la programmation des opérations,

la préparation des commandes..Pour faire cela nous avons un ensemble de questions qui nous permettent de mieux cerner cette partie :

1. Définition de l'offre logistique

- 1.1. Comment la logistique s'adapte-t-elle aux catégories de produits, de services et de clients ?
- 1.2. Comment les prestations logistiques qui peuvent être fournies aux prospects sont-elles indiquées ?
- 1.3. Comment sont spécialisées les prestations logistiques qui seront fournies en matière de distribution et de transport ?
- 1.4. Comment la forme et la nature des informations échangées sont-elles préalablement définies avec le client ?
- 1.5. Comment les emballages de protection et les supports de manutention sont-ils choisis et étiquetés

2. prévision de vente

- 2.1. Comment les prévisions de ventes sont-elles élaborées et suivies ?

3. Administration des ventes

- 3.1. Comment les informations issues du client pour les opérations de distribution sont-elles utilisées ?
- 3.2. Quelles sont les vérifications effectuées par l'opérateur de l'administration des ventes à la saisie de la commande ?
- 3.3. Quelle est l'influence du crédit client sur l'acceptation de la commande ?
- 3.4. Quelle est l'influence de la gestion des recouvrements clients sur l'acceptation de la commande ?
- 3.5. Comment les délais de livraison sont-ils définis ?
- 3.6. Comment la commande est-elle confirmée au client (accusé de réception de commande) ?
- 3.7. Comment les délais de livraison sont-ils définis ?
- 3.8. Comment la pénurie de produits finis est-elle gérée ?

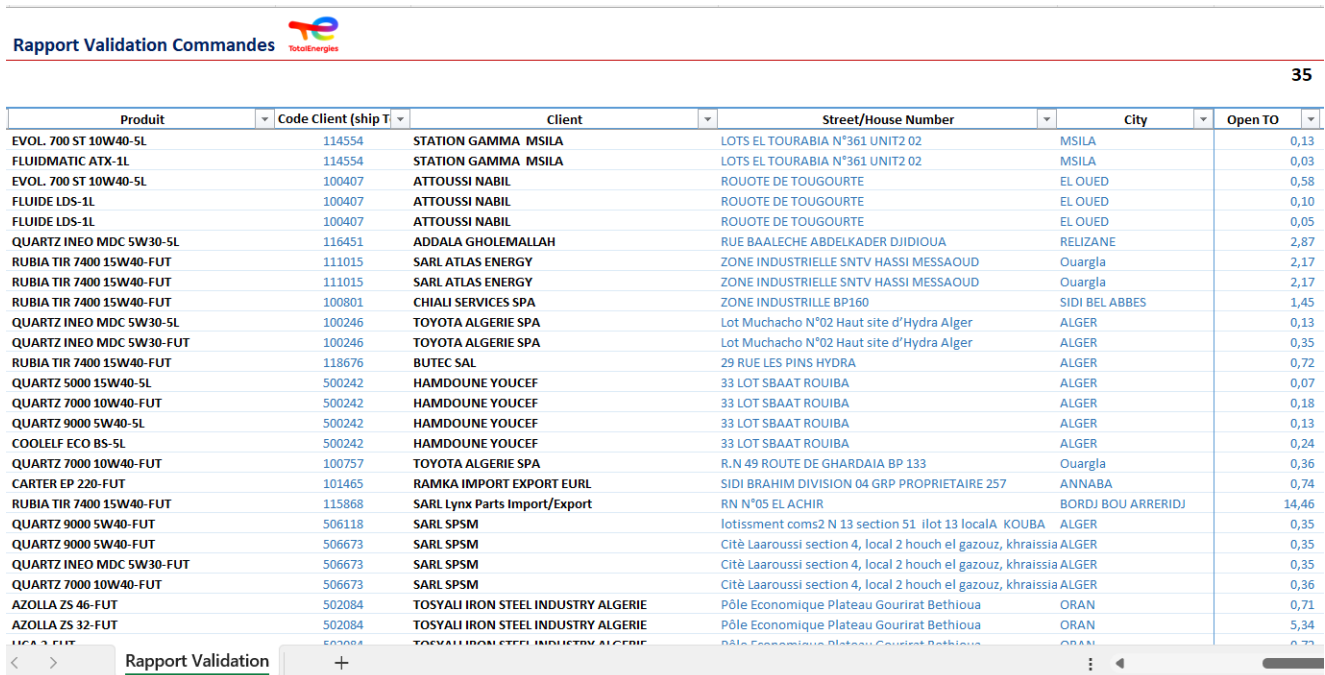
4. Activité et suivi opérationnel

- 4.1. Comment les aspects logistiques pour le lancement d'un nouveau produit ou d'une promotion sur un produit existant sont-ils pris en compte ?
- 4.2. Comment la programmation des opérations est-elle assurée ?
- 4.3. Comment la préparation de commandes est-elle réalisée ?
- 4.4. Comment l'entreprise se comporte-t-elle pour assurer la traçabilité de ses flux de produits ?

(Source cours Mr Zouaghi)

Annexe B

1. Rapport de validation :



Produit	Code Client (ship T)	Client	Street/House Number	City	Open TO
EVOL 700 ST 10W40-5L	114554	STATION GAMMA MSILA	LOTS EL TOURABIA N°361 UNIT2 02	MSILA	0,13
FLUIDOMATIC ATX-1L	114554	STATION GAMMA MSILA	LOTS EL TOURABIA N°361 UNIT2 02	MSILA	0,03
EVOL 700 ST 10W40-5L	100407	ATTOUSSI NABIL	ROUOTE DE TOUGOURTE	EL OUED	0,58
FLUIDE LDS-1L	100407	ATTOUSSI NABIL	ROUOTE DE TOUGOURTE	EL OUED	0,10
FLUIDE LDS-1L	100407	ATTOUSSI NABIL	ROUOTE DE TOUGOURTE	EL OUED	0,05
QUARTZ INEO MDC 5W30-5L	116451	ADDALA GHOLEMALLAH	RUE BAALACHE ABDELKADER DJIDIOUA	REUZANE	2,87
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	111015	SARL ATLAS ENERGY	ZONE INDUSTRIELLE SNTV HASSI MESSAOUD	Ouargla	2,17
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	111015	SARL ATLAS ENERGY	ZONE INDUSTRIELLE SNTV HASSI MESSAOUD	Ouargla	2,17
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	100801	CHIALI SERVICES SPA	ZONE INDUSTRIELLE BP160	SIDI BEL ABBES	1,45
QUARTZ INEO MDC 5W30-5L	100246	TOYOTA ALGERIE SPA	Lot Muchacho N°02 Haut site d'Hydra Alger	ALGER	0,13
QUARTZ INEO MDC 5W30-FUT	100246	TOYOTA ALGERIE SPA	Lot Muchacho N°02 Haut site d'Hydra Alger	ALGER	0,35
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	118676	BUTEC SAL	29 RUE LES PINS HYDRA	ALGER	0,72
QUARTZ 5000 15W40-5L	500242	HAMDOUNE YUCEF	33 LOT SBAAT ROUIBA	ALGER	0,07
QUARTZ 7000 10W40-FUT	500242	HAMDOUNE YUCEF	33 LOT SBAAT ROUIBA	ALGER	0,18
QUARTZ 9000 5W40-5L	500242	HAMDOUNE YUCEF	33 LOT SBAAT ROUIBA	ALGER	0,13
COOLELF ECO BS-5L	500242	HAMDOUNE YUCEF	33 LOT SBAAT ROUIBA	ALGER	0,24
QUARTZ 7000 10W40-FUT	100757	TOYOTA ALGERIE SPA	R.N 49 ROUTE DE GHARDAIA BP 133	Ouargla	0,36
CARTER EP 220-FUT	101465	RAMKA IMPORT EXPORT EURL	SIDI BRAHIM DIVISION 04 GRP PROPRIETAIRE 257	ANNABA	0,74
RUBIA TIR 7400 15W40-FUT	115868	SARL Lynx Parts Import/Export	RN N°05 EL ACHIR	BORDJ BOU ARRERIDJ	14,46
QUARTZ 9000 5W40-FUT	506118	SARL SPSM	lotissement coms2 N 13 section 51 ilot 13 localA KOUBA	ALGER	0,35
QUARTZ 9000 5W40-FUT	506673	SARL SPSM	Cité Laaroussi section 4, local 2 houch el gazouz, khraissia	ALGER	0,35
QUARTZ INEO MDC 5W30-FUT	506673	SARL SPSM	Cité Laaroussi section 4, local 2 houch el gazouz, khraissia	ALGER	0,35
QUARTZ 7000 10W40-FUT	506673	SARL SPSM	Cité Laaroussi section 4, local 2 houch el gazouz, khraissia	ALGER	0,36
AZOLLA ZS 46-FUT	502084	TOSYALI IRON STEEL INDUSTRY ALGERIE	Pôle Economique Plateau Gourirat Bethioua	ORAN	0,71
AZOLLA ZS 32-FUT	502084	TOSYALI IRON STEEL INDUSTRY ALGERIE	Pôle Economique Plateau Gourirat Bethioua	ORAN	5,34
USA 2-FUT	502084	TOSYALI IRON STEEL INDUSTRY ALGERIE	Pôle Economique Plateau Gourirat Bethioua	ORAN	0,71

FIGURE 45 – Rapport de validation.

2. Les bibliothèques qu'on a utilisé dans Python :

Math : est une bibliothèque Python qui facilite l'utilisation des fonctions mathématiques, prenant un simple exemple : pour importer une fonction sinus à notre modèle il suffit d' écrire la syntaxe suivante : **from math import sin**.

Random : Importé de Python, le module random définit un certain nombre de fonctions qui permettent de créer ou de manipuler des nombres entiers aléatoires. La fonction random() de Python génère un nombre aléatoire entre 0 et 1 via une génération pseudo-algorithmique de nombres. Elle est utilisée par les fonctions du module random.

Numpy : est une bibliothèque Python qui permet d'effectuer des opérations de tableaux ainsi de travailler efficacement sur plusieurs éléments de tableau à la fois, d'accéder à des solutions de calcul haute performance pour des calculs complexes et d'utiliser des tableaux et des matrices multidimensionnels avec des fonctions mathématiques et des techniques de calcul vectoriel rapide.

Openpyxl : La bibliothèque Openpyxl est utilisée pour écrire ou lire les données dans le fichier Excel et pour de nombreuses autres tâches. Un fichier Excel que nous utilisons pour nos opérations est appelé Workbook et contient un minimum d'une feuille et un maximum de dizaines de feuilles.

Pandas : Pandas est un package Python open-source qui est largement utilisé pour la science des données, l'analyse des données et les tâches impliquant l'apprentissage automatique. Il est construit au-dessus de Numpy, un package différent qui offre un support pour les tableaux multi-

dimensionnels.

GeoPy : est une bibliothèque Python qui facilite la géocodification pour les utilisateurs de Python. La géocodification consiste à convertir une adresse ou une description de lieu en coordonnées géographiques. GeoPy calcule la distance entre les adresses.

Joblib : est une bibliothèque Python qui fournit un ensemble d'outils pour faciliter le parallélisme et la persistance de données en Python. Il est particulièrement utile pour les tâches qui nécessitent de nombreux calculs intensifs en CPU, comme certains types de calculs mathématiques ou de traitement de données.

FPDF : est une bibliothèque Python qui permet de générer des documents PDF de manière programmatique. FPDF signifie "Free PDF", indiquant que la bibliothèque est libre d'utilisation et open-source.

3.Rapport de résultat détaillé : Pour mieux comprendre le rapport final généré par l'interface nous avons utilisé un autre rapport de validation et présenté le résultat détaillé dans les figures suivantes :



Planning des tournées

Camion 1 :

Dépôt Blida

-> EURL MONOLUB (OUM EL BOUAGHI)

Quantité : 13.15

-> SHARIKET KAHRABA EL DJAZAIR SKE Spa (El Tarf)

Quantité : 2.10

-> RAMKA IMPORT EXPORT EURL (ANNABA)

Quantité : 0.18

Ratio : 0.77

Kilométrage parcouru : 555.51

Camion 2 :

Dépôt Blida

-> BOULKHARFANE EURL (CONSTANTINE)

Quantité : 2.71

-> RADJATI SMAIL "2" (CONSTANTINE)

Quantité : 14.34

-> HATTAB HUILLES ET GRAISSES (CONSTANTINE)

Quantité : 0.38

Ratio : 0.87

Kilométrage parcouru : 338.51

Camion 3 :

Dépôt Blida

-> KAROUI ADEL TOP LUB (HASSI MESSAOUD)

Quantité : 8.00



Planning des tournées

-> ABDESSELAM FARES (BISKRA)

Quantité : 0.08

-> SPA CILAS (BISKRA)

Quantité : 2.00

Ratio : 0.50

Kilométrage parcouru : 952.85

Camion 4 :

Dépôt Blida

-> GENERAL ELECTRIC GLOBAL SERVICES (ORAN)

Quantité : 1.80

-> AMINE KARA SLIMANE (TLEMCEM)

Quantité : 13.28

-> EURL MASOIL COMPTOIR (MASCARA)

Quantité : 1.48

Ratio : 0.83

Kilométrage parcouru : 586.54

Camion 5 :

Dépôt Blida

-> SARL EGREKIMA (Jijel)

Quantité : 0.22

-> MOKHNACHE Zine Eddine (SETIF)

Quantité : 0.19

-> MAKHLOUFI Lahcene (SETIF)

Quantité : 17.78



Planning des tournées

Ratio : 0.91

Kilométrage parcouru : 359.23

Camion 6 :

Dépôt Blida

-> Spa KIA AL DJAZAIR (Alger)

Quantité : 2.54

-> SARL ABM (MOSTAGANEM)

Quantité : 0.18

-> EURL EPTTRS (CHLEF)

Quantité : 3.62

Ratio : 0.32

Kilométrage parcouru : 379.35

Camion 7 :

Dépôt Blida

-> EURL BEAI (BOUMERDES)

Quantité : 0.19

-> SARL " LA GENERALE LUBRIFIANTS " (BEJAIA)

Quantité : 1.88

-> CHELLALI EL HACHEMI (BOUIRA)

Quantité : 15.96

Ratio : 0.90

Kilométrage parcouru : 317.45

Camion 8 :

Dépôt Blida



Planning des tournées

-> RENAULT TRUCKS AlgerIE EURL (Alger)

Quantité : 4.00

-> FATEH IMEKHLAF (Alger)

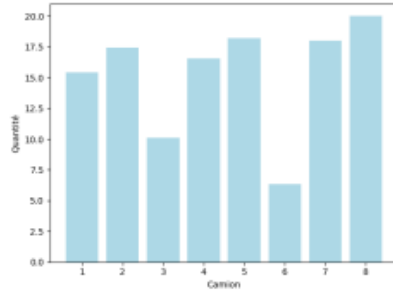
Quantité : 16.00

Ratio : 1.00

Kilométrage parcouru : 39.75

Planning des tournées

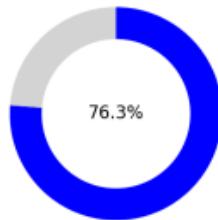
Quantité totale transportée par camion



Indicateurs de performance

Nombre de KM total	3529.1894540635203
Nombre de camions total	8
Quantité totale transportée	122.03039299999998

Taux de remplissage moyen



Durée de la tournée par camion

