



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par : Guelleb Eloued Ali Abderrahmane

Ouadah Mohamed Mehdi

Thème

Optimisation des tournées de véhicules multi-jours
et multi-produits sous contraintes de capacité :
cas de l'entreprise Delicias

Soutenu publiquement, le 21 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

-M. Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA-Tlemcen	Président
-M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA-Tlemcen	Encadrant
-M. Ziriab BENSENANE	Ingénieur	Delicias	Co-Encadrant
-M. Mohamed Amine CHERIER	MCB	ESSA-Tlemcen	Examineur 1
-Mme. Imen KOULOUGHLI	MCA	ESSA-Tlemcen	Examinatrice 2

Année universitaire : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier **Allah** le Tout-Puissant qui nous a accordé la santé, la détermination et l'endurance requises pour accomplir cette tâche.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **M. Fouad Maliki**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité et son soutien tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations pertinentes et son suivi rigoureux ont été d'une grande importance dans la réussite de ce travail. Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail ainsi que pour leurs remarques constructives.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous nos professeurs pour la qualité de l'enseignement reçu et les savoirs qu'ils nous ont partagés tout au long de notre cursus universitaire.

Nos remerciements vont également à **M.BENSENANE Zeriab**, notre encadrant au sein de l'entreprise Delicias , pour son accueil chaleureux, sa disponibilité, ses orientations précieuses et son accompagnement tout au long de notre stage. Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des ouvriers et du personnel de l'entreprise Delicias pour leur collaboration, leur aide et leur esprit d'équipe, qui ont grandement contribué à la réussite de notre travail.

Nous voulons également exprimer notre gratitude envers nos collègues de promotion pour l'esprit d'entraide et de solidarité qui a caractérisé notre parcours. Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous nos proches et à nos amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence constante tout au long de cette aventure.

Dédicace

Avant toute chose, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la volonté, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa miséricorde et Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

Je dédie ce modeste travail : À mes très chers parents,

À ma mère, source infinie d'amour, de tendresse et de sacrifice. Merci pour tes prières, ton soutien inconditionnel et ta présence constante dans les moments les plus difficiles. Tes encouragements ont toujours été ma plus grande force.

À mon père, pour ses conseils précieux, sa sagesse, son soutien moral et matériel, et pour tous les efforts qu'il a fournis afin de me permettre de poursuivre mes études dans les meilleures conditions. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui.

À mes frères et mes sœurs, pour leur affection, leur soutien et leur confiance. Votre présence à mes côtés est une source de motivation permanente.

À tous les membres de ma famille GUELLEB ELOUED et BENGUETIB, proches et éloignés, pour leurs encouragements, leurs prières et leur appui tout au long de mon parcours.

À mes chers amis, qui ont partagé avec moi les moments de joie comme les moments de stress, merci pour votre soutien, votre sincérité et votre fidélité.

À mes collègues de promotion, avec qui j'ai vécu des années d'apprentissage, de solidarité et de travail d'équipe. Je garderai de merveilleux souvenirs de ce parcours partagé.

Mes sincères remerciements vont à M.BENSENANE Zeriab, mon encadrant en entreprise, pour son accompagnement, ses conseils éclairés et la confiance

précieuse qu'il m'a accordée tout au long de mon stage.

À mon encadrant, M. Fouad Maliki, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses conseils éclairés et son orientation précieuse qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

À mon binôme, Ouadah Mehdi, pour sa collaboration, son engagement et son soutien tout au long de ce PFE. Travailler à tes côtés a été un réel plaisir et a grandement enrichi cette expérience.

Que ce travail soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon profond respect envers toutes ces personnes.

Dédicace

Je rends grâce à Allah, le Miséricordieux, qui a éclairé mon chemin tout au long de mes années d'études.

J'offre le fruit de mon travail :

- À mes parents, sources inépuisables de tendresse et de sacrifices. Que le Ciel vous garde longtemps auprès de nous.
- À mon frère et mes deux sœurs, dont l'affection a été mon refuge.
- À l'ensemble de ma famille OUADAH , pour leur soutien et leur présence à chaque étape de ma vie.
- À mon binôme, pour tous les moments de partage, d'entraide et de complicité tout au long de ce parcours.
- À mes compagnons de route, dont la sincérité a embelli ce parcours.
- À mon encadrant de l'entreprise M.BENSNANE Zeriab , pour sa disponibilité, ses précieux conseils et la confiance qu'il m'a accordée.
- À mon encadrant pédagogique, M. MALIKI Fouad. Sa disponibilité, ses précieux éclairages et son dévouement ont grandement contribué à l'aboutissement de cette formation.

Qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

Ce travail traite de l'optimisation des tournées de véhicules pour l'entreprise agroalimentaire Delicias (Tlemcen), à travers une formulation multi-jours et multi-produits avec contraintes de capacité (CVRP). Une métaheuristique hybride combinant algorithme génétique et recherche tabou est proposée pour minimiser le temps total de transport, en tenant compte des contraintes de capacité des véhicules, de la durée maximale d'une tournée et de la diversité des produits. Le modèle est implémenté au sein d'une application de bureau développée avec CustomTkinter, intégrant la visualisation cartographique interactive des tournées via Folium.

Mots-clés : Optimisation logistique, problème de tournées de véhicules (VRP), multi-jours, multi-produits, algorithme génétique, recherche tabou, métaheuristique hybride, distribution agroalimentaire, CVRP, durée maximale de tournée. CustomTkinter, Folium, application de bureau.

Abstract

This work addresses the optimization of vehicle routes for the agri-food company Delicias (Tlemcen), through a multi-day, multi-product with capacity constraints (CVRP). A hybrid metaheuristic combining a genetic algorithm and tabu search is proposed to minimize total transportation time, taking into account vehicle capacity constraints, maximum route duration and product diversity. The model is implemented within a desktop application developed using CustomTkinter, featuring interactive map visualization of vehicle routes via Folium.

Keywords : Logistics optimization, Vehicle Routing Problem (VRP), multi-day, multi-product, genetic algorithm, tabu search, hybrid metaheuristic, agri-food distribution, CVRP, maximum route duration, CustomTkinter, Folium, desktop application.

الملخص

تناول هذا العمل تحسين جولات المركبات لشركة دليسياس الغذائية (تلمسان)، من خلال صياغة متعددة الأيام ومتعددة المنتجات مع قيود القدرة الاستيعابية (CVRP). تُقترح خوارزمية هجينة تجمع بين الخوارزمية الحينية والبحث المحظور بهدف تقليل إجمالي وقت النقل، مع مراعاة قيود سعة المركبات والمدة القصوى للجولة وتنوع المنتجات. تم تطبيق النموذج ضمن تطبيق مكتبي طُوِرَ باستخدام مكتبة CustomTkinter ، مع تصوير خرائطي تفاعلي لمسارات المركبات عبر مكتبة Folium .

الكلمات المفتاحية : تحسين الإمداد والتوزيع، مسألة توجيه المركبات (VRP)، متعدد الأيام، متعدد المنتجات، الخوارزمية الحينية، البحث المحظور، الخوارزمية الهجينة، توزيع المنتجات الغذائية، (CVRP)، المدة القصوى للجولة، CustomTkinter ، Folium ، تطبيق مكتبي.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction

1	la logistique et le Problème de tournées	
	de véhicules	3
1.1	Introduction	3
1.2	Définitions	4
1.2.1	Logistique et distribution	4
1.2.2	Définition de la Supply Chain	6
1.2.3	Distribution physique	7
1.2.4	Le problème VRP	7
1.2.5	Origine du VRP	9
1.2.6	Différence avec le problème du voyageur de commerce (TSP)	10
1.2.7	classifications du Vehicle Routing Problem (VRP)	11
1.2.8	Méthodes de résolution du VRP	13

1.3	Conclusion	16
2	Présentation de l'entreprise	18
2.1	Introduction	18
2.2	Présentation Générale	19
2.2.1	Historique et évolution	19
2.2.2	Secteur d'activité	20
2.2.3	Gamme de produits	21
2.2.4	Organisation générale	23
2.2.5	Structure de production	23
2.3	Structure logistique et zone de distribution	24
2.3.1	Infrastructure logistique	24
2.3.2	Zone géographique desservie	24
2.4	Description et analyse du système de distribution actuel	25
2.4.1	Flotte de véhicules	25
2.4.2	Typologie des clients	25
2.4.3	Fréquence de livraison	25
2.4.4	Méthode actuelle de planification	25
2.4.5	Analyse des coûts logistiques actuels	26
2.5	Conclusion	26
3	Formulation et résolution du modèle VRP	28
3.1	Introduction	28
3.2	Description du problème	29
3.3	Données du cas étudié	31
3.3.1	Temps de trajet	31
3.3.2	Temps de service	32
3.3.3	Caractéristiques du véhicules et et demandes des produits	33
3.4	Modélisation mathématique du VRP	35
3.4.1	Ensembles et paramètres	35
3.4.2	Variables de décision	35
3.4.3	Fonction objectif	36
3.4.4	Contraintes	36

3.4.5	Calcul de l'horizon D :	38
3.4.6	Intégrité :	39
3.5	Résolution de problème	39
3.5.1	Pré-traitement	41
3.5.2	La construction gloutonne	45
3.5.3	métaheuristique hybride	47
3.5.4	Algorithme génétique	47
3.5.5	Recherche tabou	50
3.6	Implémentation et Résultats obtenus	62
3.6.1	Environnement de développement	62
3.6.2	Paramètres de résolution	66
3.6.3	Planning des tournées	66
3.6.4	Utilisation du temps de tournée	71
3.6.5	Répartition Temps de trajet vs Temps de service	71
3.6.6	Livraisons en deux parties	71
3.6.7	Vérification du respect des contraintes	72
3.7	Conclusion	74
conclusion		75
Annexe		77
A Temps de trajet		77

Table des figures

1.1	les 7R de la logistique	5
1.2	les flux logistiques	6
1.3	Vehicle Routing Problem (VRP)	9
1.4	classifications du Vehicle Routing Problem (VRP)	11
1.5	Méthodes de résolution du VRP	15
2.1	Entreprise Delicias	20
2.2	organigramme de Delicias	23
2.3	Zone géographique desservie	24
3.1	Structure de l'algorithme proposé	40
3.2	Interface Customtkinter-Delicias	64
3.3	Folium-Delicias	65
3.4	Résultats obtenus	66
3.5	la tournée de la 3e journée-Folium	70
3.6	la tournée de la 5e journée-Folium	71
3.7	temps par tournée de chaque véhicule	72
3.8	poids chargé par chaque véhicule pour la tournée de chaque journée	73

Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre TSP et VRP	10
1.2	Classifications VRP selon les contraintes	12
2.1	Gamme de produits Delicias	22
3.1	temps de trajet partie 1	31
3.2	Temps de service par localité	32
3.3	Modèles de véhicules et leurs capacités	33
3.4	Liste des produits et leurs poids	33
3.5	Demandes par localité	34
3.6	Population initiale classée par ordre croissant de fitness	54
3.7	Déroulement du Tournoi 1 ($k = 4$) — problème de minimisation .	54
3.8	Paramètres de résolution	66
A.1	temps de trajet partie 2	77
A.2	temps de trajet partie 3	78
A.3	temps de trajet partie 4	78
A.4	temps de trajet partie 5	79
A.5	temps de trajet partie 6	79
A.6	temps de trajet partie 7	80

Liste des abréviations

Acronyme	Signification
VRP	Vehicle Routing Problem
TSP	Travelling Salesman Problem
NP-difficile	Non-Polynomial difficile
PME	Petite et Moyenne Entreprise
SCM	Supply Chain Management (Gestion de la chaîne logistique)
AG	Algorithme Génétique
RT	Recherche Tabou
OX	Order Crossover (opérateur de croisement)
Tmax	Temps maximum par tournée
MTZ	Miller-Tucker-Zemlin (contrainte d'élimination des sous-tours)
V4°	Vinaigre 4 degrés
EDF	Eau de fleur
V3L	Vinaigre 3 litres
Bic(p)	Bicarbonate petite taille
Bic(g)	Bicarbonate grande taille
V7°	Vinaigre 7 degrés
Vapo	Vaporisateur

Introduction

La distribution des produits finis constitue un maillon essentiel de la chaîne logistique des entreprises, notamment dans le secteur agroalimentaire. Elle assure la liaison entre la production et le consommateur final, garantissant la disponibilité des produits au bon endroit, au bon moment et dans des conditions optimales de qualité et de sécurité. Dans un contexte concurrentiel où les exigences des clients sont de plus en plus élevées, la maîtrise des coûts logistiques et l'optimisation des flux de distribution deviennent des facteurs déterminants pour la performance des entreprises.

Le secteur agroalimentaire présente des contraintes particulières qui complexifient la gestion de la distribution. Parmi celles-ci, on retrouve la périssabilité des produits, la diversité des gammes et des formats, la variabilité de la demande selon les saisons, ainsi que l'obligation de respecter les normes d'hygiène et de sécurité alimentaire. Ces caractéristiques imposent aux entreprises de concevoir des stratégies de transport adaptées, capables de minimiser les coûts tout en respectant les délais et la qualité des produits.

Le problème de routage de véhicules (Vehicle Routing Problem, VRP) constitue un outil fondamental pour répondre à ces défis logistiques. Il consiste à déterminer l'ensemble des itinéraires optimaux pour un véhicule ou une flotte de véhicules afin de desservir un ensemble de clients, tout en respectant des contraintes spécifiques telles que la capacité des véhicules, les fenêtres de livraison ou le nombre limité de véhicules disponibles. Introduit pour la première fois par Dantzig et Ramser en 1959, le VRP est considéré comme une extension du

problème du voyageur de commerce (TSP), appliqué à plusieurs clients et véhicules, ce qui en fait un problème combinatoire complexe et difficile à résoudre pour de grandes instances.

Dans le contexte des entreprises agroalimentaires, l'application du VRP permet non seulement de réduire les coûts de transport, mais également de limiter l'empreinte environnementale liée à la distribution, d'améliorer la satisfaction client et d'assurer une meilleure planification des ressources logistiques. La littérature scientifique a proposé de nombreuses variantes et méthodes de résolution, allant des approches exactes basées sur la programmation linéaire et le branch-and-bound, aux heuristiques et métaheuristiques telles que l'algorithme génétique, l'algorithme de colonies de fourmis ou les algorithmes de type Tabou.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette dynamique et se concentre sur la distribution des produits finis au sein de l'entreprise Delicias, spécialisée dans l'agroalimentaire. L'objectif principal est de proposer une approche de modélisation et de résolution du problème de routage de véhicules tenant compte des contraintes réelles de l'entreprise : la capacité des véhicules, la spécificité des produits, les heures de travail de livraison et les contraintes géographiques liées aux zones de distribution.

Pour atteindre cet objectif, le mémoire est structuré en plusieurs parties complémentaires. La première partie présente un état de l'art sur la logistique et le VRP et ses différentes variantes, en mettant l'accent sur les applications dans le secteur agroalimentaire. La deuxième partie décrit le contexte de l'entreprise et les données logistiques disponibles, telles que la flotte de véhicules, les clients, les points de livraison et les gammes de produits à distribuer. La troisième partie est consacrée à la modélisation mathématique du problème, à la formulation des contraintes spécifiques à l'entreprise ainsi qu'à la proposition des méthodes de résolution adaptées. Cette partie présente également le développement d'une application de bureau (Desktop) réalisée à l'aide de la bibliothèque CustomTkinter, permettant l'intégration des données, l'exécution des algorithmes d'optimisation, la visualisation des tournées de livraison et l'analyse des résultats.

CHAPITRE 1

LA LOGISTIQUE ET LE PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES

1.1 Introduction

La logistique et la distribution constituent des piliers essentiels de la performance des entreprises modernes, notamment dans les secteurs industriel et agroalimentaire. La logistique ne se limite pas au simple transport des marchandises ; elle englobe l'ensemble des activités visant à planifier, organiser, exécuter et contrôler les flux physiques, informationnels et financiers, depuis les fournisseurs jusqu'au client final. Une gestion logistique efficace permet de concilier rapidité, qualité, coût et flexibilité, contribuant ainsi directement à la compétitivité et à la satisfaction des clients.

Dans ce cadre, la Supply Chain joue un rôle stratégique en intégrant et en coordonnant l'ensemble des acteurs et des processus impliqués dans la création et la livraison d'un produit ou d'un service. Elle cherche à optimiser globalement la performance tout en assurant la fluidité des flux et la réduction des coûts. La distribution physique, pour sa part, constitue le maillon opérationnel garantissant la mise à disposition des produits finis au bon endroit et au bon moment, tout en maintenant un niveau de service élevé. La maîtrise des coûts logistiques et l'efficacité des opérations de distribution apparaissent donc comme des facteurs déterminants de la performance globale des organisations.

Dans le cadre de la planification des livraisons, le Vehicle Routing Problem (VRP) représente un enjeu majeur pour les entreprises souhaitant optimiser leurs tour-

nées de véhicules. Ce problème combinatoire, introduit par Dantzig et Ramser en 1959, vise à déterminer les itinéraires les plus efficaces pour desservir un ensemble de clients tout en respectant diverses contraintes, telles que la capacité des véhicules ou les fenêtres de temps. Le VRP et ses différentes variantes constituent aujourd'hui des outils incontournables pour améliorer l'efficacité logistique, réduire les coûts de transport et renforcer la satisfaction client.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les concepts fondamentaux de la logistique, de la Supply Chain et de la distribution physique, tout en introduisant le problème des tournées de véhicules et ses principales classifications. Il fournit ainsi le cadre théorique nécessaire à la compréhension des enjeux liés à l'optimisation des flux et à la planification des livraisons dans un contexte industriel et agroalimentaire.

1.2 Définitions

1.2.1 Logistique et distribution

Définition de la logistique :

La logistique constitue une fonction stratégique de l'entreprise industrielle. Elle regroupe l'ensemble des activités de planification, d'organisation, de mise en œuvre et de contrôle des flux physiques (matières premières, produits semi-finis et produits finis), des flux informationnels et, indirectement, des flux financiers, depuis le point d'approvisionnement jusqu'au client final.

la logistique est « la partie de la chaîne d'approvisionnement qui planifie, met en œuvre et contrôle efficacement et efficacement les flux et le stockage des biens, des services et des informations connexes, du point d'origine au point de consommation, afin de satisfaire les exigences des clients ».

Dans une perspective de génie industriel, la logistique vise principalement l'optimisation globale du système productif, en recherchant le meilleur compromis entre le coût, la qualité, le délai et la flexibilité. Elle constitue ainsi un levier essentiel d'amélioration de la performance industrielle et de renforcement de la compétitivité des organisations. [1]

Les « 7 R » de la logistique :

constituent un principe fondamental permettant de définir clairement la mission de la fonction logistique. Cette règle met en évidence les objectifs essentiels que toute chaîne logistique doit atteindre afin d'assurer une performance optimale et la satisfaction du client.

Elle repose sur la capacité à garantir simultanément :

- 1–Le bon produit : fournir exactement le produit demandé, conforme aux spécifications.
- 2–La bonne quantité : livrer la quantité adéquate, ni insuffisante ni excessive.
- 3–Le bon état : assurer que le produit est en parfait état, sans défaut ni détérioration.
- 4–Le bon endroit : acheminer le produit vers la destination prévue.
- 5–Le bon moment : respecter les délais de livraison convenus.
- 6–Le bon client : livrer au client concerné, sans erreur d'identification.
- 7–Le bon prix : optimiser les coûts afin d'offrir un service compétitif et rentable.

Ainsi, la maîtrise des « 7 R » permet d'améliorer l'efficacité opérationnelle, de réduire les coûts logistiques et de renforcer la satisfaction client. [2]



FIGURE 1.1 – les 7R de la logistique

1.2.2 Définition de la Supply Chain

La gestion de la chaîne logistique, ou Supply Chain Management (SCM), désigne l'ensemble des activités, des ressources et des flux permettant de planifier, d'approvisionner, de produire, de stocker et de distribuer un produit depuis les fournisseurs de matières premières jusqu'au client final. Elle englobe la coordination entre plusieurs acteurs tels que les fournisseurs, les fabricants, les transporteurs, les distributeurs et les détaillants afin d'assurer la disponibilité des produits au bon moment, au bon endroit et au moindre coût. La supply chain repose sur trois principaux flux : les flux physiques (matières premières, produits finis), les flux d'informations (commandes, prévisions, données de production) et les flux financiers (paiements, facturation). Son objectif principal est d'améliorer la performance globale de l'entreprise en réduisant les délais, les coûts logistiques et les ruptures de stock tout en augmentant la satisfaction des clients. Avec la mondialisation et l'évolution des technologies numériques, la supply chain est devenue un élément stratégique de compétitivité pour les entreprises industrielles et commerciales. Elle intègre aujourd'hui des outils avancés pour optimiser la prise de décision et la gestion des opérations. Une chaîne logistique efficace permet également une meilleure flexibilité face aux fluctuations de la demande et aux perturbations du marché. Ainsi, la supply chain constitue un système intégré qui vise la synchronisation de toutes les opérations logistiques et productives dans une logique de performance durable et de création de valeur pour l'ensemble des partenaires de la chaîne. [3]

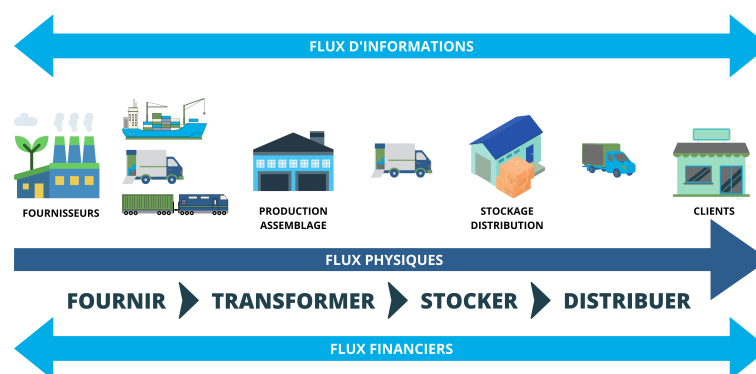


FIGURE 1.2 – les flux logistiques

1.2.3 Distribution physique

La distribution physique, que l'on appelle couramment la logistique de distribution, représente la totalité des tâches et des méthodes qui servent à envoyer les produits terminés à partir du site de fabrication jusqu'au client final. Elle ne s'arrête pas uniquement au déplacement des marchandises, mais comprend aussi le pilotage des réserves, l'entreposage, la manutention, le conditionnement, la préparation des colis, l'organisation des expéditions et la surveillance de l'ensemble des flux de produits.

L'intention majeure de la distribution physique est d'assurer la présence des articles au bon endroit, au moment choisi et en nombre suffisant, tout en limitant les frais et en proposant une qualité de service qui répond aux besoins des clients. En clair, elle cherche à baisser les dépenses de logistique sans réduire la qualité du travail, ce qui constitue un point fort pour les entreprises, particulièrement dans les domaines où le contentement du client et la rapidité sont essentiels, comme pour les produits alimentaires.

La distribution physique occupe aussi une place stratégique dans la gestion de la chaîne logistique, car elle fait le lien entre la production, les entrepôts et la vente. Une bonne organisation de la distribution physique permet non seulement de réduire les stocks et les prix du transport, mais aide aussi à raccourcir les temps d'attente, à être plus souple face aux changements de la demande et à satisfaire davantage les clients.

Pour finir, la distribution physique est une partie capitale de la logistique, qui a pour but de garantir le meilleur trajet des produits finis depuis l'usine jusqu'à l'acheteur final, tout en mélangeant réussite financière, qualité des prestations et adaptation aux besoins du marché. [4]

1.2.4 Le problème VRP

Définition du VRP :

Le problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem – VRP) est un problème d'optimisation combinatoire largement étudié dans le domaine de la logistique et de la recherche opérationnelle.

Il consiste à déterminer l'ensemble optimal de tournées qu'une flotte de véhicules doit effectuer afin de desservir un groupe de clients à partir d'un dépôt central. Chaque client possède généralement une demande spécifique qui doit être satisfaite par un véhicule.

L'objectif principal est souvent de minimiser le coût total de distribution, qui peut inclure la distance parcourue, le temps de transport ou les coûts opérationnels. Dans le VRP, plusieurs contraintes doivent être respectées, telles que la capacité limitée des véhicules, les fenêtres de temps de livraison ou la durée maximale des tournées.

Chaque client doit être visité une seule fois par un seul véhicule. Les tournées commencent et se terminent généralement au dépôt.

Ce problème constitue une généralisation du problème du voyageur de commerce (TSP), car il implique plusieurs véhicules au lieu d'un seul.

Le VRP est considéré comme un problème NP-difficile, ce qui signifie que sa résolution devient très complexe lorsque le nombre de clients augmente. Par conséquent, différentes méthodes de résolution sont utilisées pour traiter ce problème. Ces méthodes peuvent être des approches exactes, heuristiques ou métaheuristiques.

Dans la pratique, le VRP joue un rôle important dans l'optimisation des systèmes de distribution. Il est appliqué dans plusieurs domaines tels que la livraison de marchandises, les services postaux, la collecte des déchets ou le transport de passagers. Son objectif final est d'améliorer l'efficacité logistique. [5]

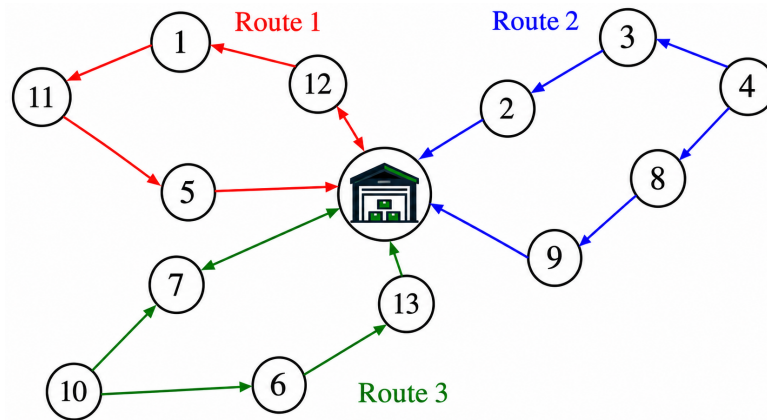


FIGURE 1.3 – Vehicle Routing Problem (VRP)

1.2.5 Origine du VRP

L'origine du problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem – VRP) est liée aux premiers travaux de la recherche opérationnelle portant sur l'optimisation du transport et de la distribution. Ce problème est étroitement associé au problème du voyageur de commerce (Travelling Salesman Problem – TSP), étudié dès le début du XX^e siècle. Le TSP consiste à trouver le trajet le plus court permettant à un voyageur de visiter un ensemble de villes une seule fois avant de revenir à son point de départ.

Le VRP a été proposé pour la première fois en 1959 par les chercheurs George B. Dantzig et John H. Ramser. Dans leur étude intitulée *"The Truck Dispatching Problem"*, ils ont présenté un modèle mathématique visant à optimiser les tournées de camions d'une entreprise de distribution de carburant. Ce travail constitue le point de départ du développement du VRP dans la littérature scientifique.

À partir des années 1960 et 1970, plusieurs chercheurs ont commencé à proposer de nouvelles formulations et méthodes de résolution. Ces travaux ont permis d'introduire différentes variantes du VRP afin de prendre en compte des contraintes plus proches de la réalité. Par exemple, les contraintes de capacité des véhicules, les fenêtres de temps de livraison ou encore les limites de distance. Avec l'augmentation de la complexité des systèmes logistiques, le VRP est devenu un domaine important de la recherche opérationnelle. À partir des années

1980 et 1990, les chercheurs ont développé des méthodes heuristiques et méta-heuristiques pour traiter des instances de grande taille.

Aujourd’hui, le VRP continue d’évoluer grâce à l’intégration des technologies informatiques avancées et des données en temps réel.[6]

1.2.6 Différence avec le problème du voyageur de commerce (TSP)

Le VRP et le Traveling Salesman Problem (TSP) sont souvent confondus, mais ils diffèrent par plusieurs points :

Aspect	TSP	VRP
Objectif	Trouver le chemin le plus court pour un vendeur visitant tous les clients une seule fois	Trouver les itinéraires optimaux pour une flotte de véhicules desservant tous les clients
Nombre de véhicules	1	Plusieurs véhicules possibles
Contraintes	Aucun ou très limité	Capacité des véhicules, fenêtres de temps, contraintes de service, etc.
Application	Théorique, modélisation simplifiée	Logistique réelle, distribution et transport

TABLE 1.1 – Comparaison entre TSP et VRP

[7]

1.2.7 classifications du Vehicle Routing Problem (VRP)

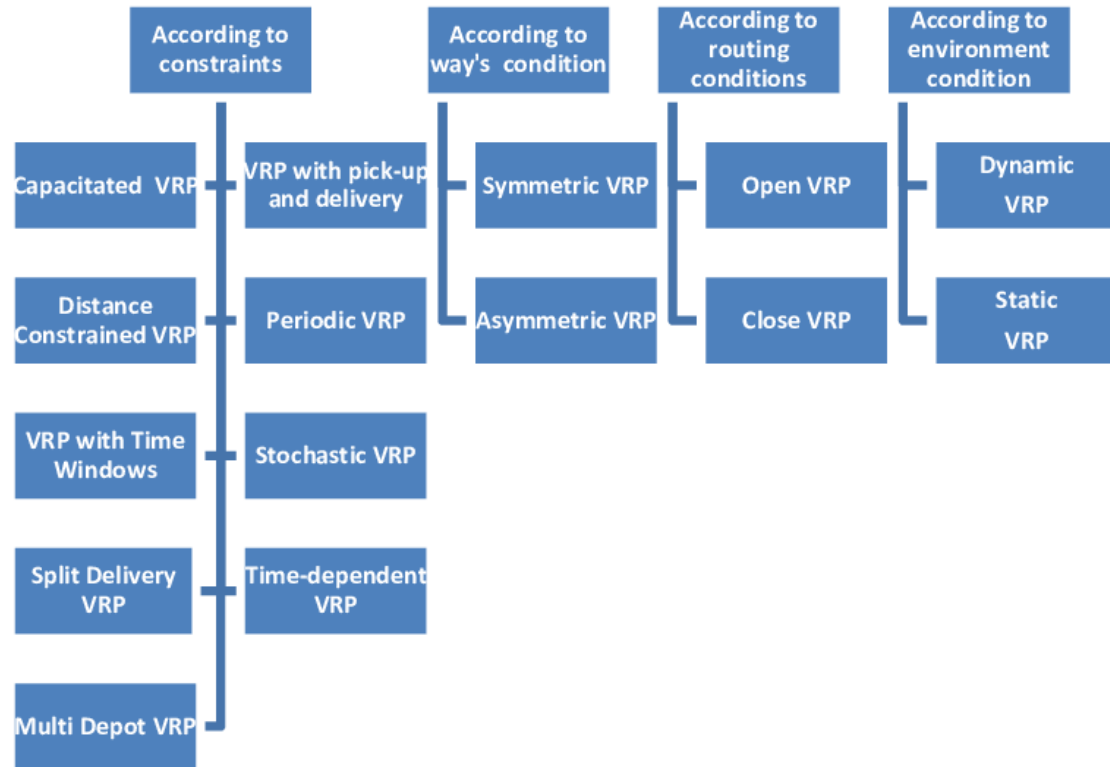


FIGURE 1.4 – classifications du Vehicle Routing Problem (VRP)

1-Selon les contraintes :

Cette catégorie regroupe les variantes où des limitations spécifiques sont imposées aux véhicules ou aux clients :

Type de VRP	Objectif	Contraintes principales
Capacitated VRP (CVRP)	Minimiser le coût total ou la distance totale de distribution	Capacité limitée des véhicules (la somme des demandes sur chaque tournée $\leq$ capacité du véhicule)
Distance Constrained VRP	Minimiser les coûts tout en respectant une limite de distance ou de temps	Distance maximale ou durée maximale de tournée par véhicule
VRP with Time Windows (VRPTW)	Optimiser les tournées en respectant les horaires de service	Chaque client doit être servi dans une fenêtre de temps donnée
Split Delivery VRP (SDVRP)	Réduire le coût total en autorisant la division des livraisons	Un même client peut être desservi par plusieurs véhicules
Multi Depot VRP (MDVRP)	Optimiser la distribution à partir de plusieurs dépôts	Plusieurs entrepôts de départ et de retour pour les véhicules
VRP with Pick-up and Delivery (VRPPD)	Gérer simultanément les collectes et les livraisons	Contraintes de précédence (collecte avant livraison), capacité des véhicules
Periodic VRP (PVRP)	Planifier les tournées sur un horizon multi-périodes	Fréquence de visite imposée pour certains clients (ex : 2 fois/semaine)
Stochastic VRP (SVRP)	Minimiser les coûts sous incertitude	Demandes, temps de trajet ou autres paramètres modélisés comme variables aléatoires
Time-Dependent VRP	Optimiser les tournées en tenant compte du trafic variable	Temps de trajet dépendant de l'heure de la journée

TABLE 1.2 – Classifications VRP selon les contraintes

[8] [9]

2-Selon les conditions de la voie :

Cette catégorie se concentre sur la configuration du réseau routier et la symétrie des distances.

VRP symétrique : La distance ou le coût pour se rendre d'un point A à un point B est identique à celui pour aller de B à A.

VRP asymétrique : La distance ou le temps entre deux points peut varier selon le sens de déplacement, en raison de sens uniques, de pentes ou d'autres contraintes routières.

3-Selon les conditions de routage :

–Open VRP (OVRP) : Les véhicules ne sont pas tenus de revenir à l'entrepôt après avoir livré le dernier client.

–Closed VRP : Chaque véhicule doit obligatoirement retourner à son point de départ (l'entrepôt) à la fin de sa tournée, ce qui correspond au scénario classique.

4-Selon les conditions de l'environnement :

Cette catégorie distingue la façon dont le système gère l'information.

Dynamic VRP : Les données (nouvelles commandes, incidents, etc.) arrivent en temps réel pendant que les véhicules sont en déplacement, ce qui exige une réoptimisation continue des tournées.

Static VRP : Toutes les informations (clients, demandes, itinéraires) sont connues à l'avance et restent fixes une fois les tournées planifiées.

1.2.8 Méthodes de résolution du VRP

Le problème de tournées de véhicules (VRP) est un problème combinatoire complexe. Pour le résoudre, plusieurs méthodes ont été développées, classées généralement en trois grandes catégories : les méthodes exactes, les méthodes heuristiques et les méthodes métaheuristiques.[10]

1-Méthodes exactes :

Les méthodes exactes visent à déterminer la solution optimale pour le problème des tournées de véhicules. Elles s'appuient généralement sur des techniques de programmation mathématique telles que la programmation linéaire en nombres entiers. Parmi les approches les plus répandues, on trouve Branch and Bound, Branch and Cut et Branch and Price. Ces méthodes parcourent de manière systématique l'ensemble des solutions possibles tout en éliminant celles qui ne sont pas prometteuses. Elles assurent l'obtention de la meilleure solution disponible. Néanmoins, leur principal inconvénient réside dans le temps de calcul élevé lorsque le nombre de clients est important. De ce fait, elles sont principalement utilisées pour les problèmes de petite ou moyenne taille. Elles servent également de référence pour juger de l'efficacité des méthodes approximatives. [11]

2-Méthodes heuristiques :

Les méthodes heuristiques représentent des approches approximatives permettant de trouver rapidement une solution réalisable au problème. Elles ne garantissent pas l'optimalité, mais fournissent souvent des solutions de qualité correcte avec un temps de calcul réduit. Ces méthodes reposent généralement sur des règles simples de construction ou d'amélioration des tournées. Parmi les heuristiques classiques, on retrouve l'algorithme des économies de Clarke et Wright, heuristique gloutonne et l'heuristique du plus proche voisin ou l'insertion séquentielle. Elles conviennent particulièrement aux problèmes de grande taille où les méthodes exactes deviennent impraticables. Leur simplicité de mise en œuvre constitue également un avantage non négligeable. Elles sont souvent employées pour générer une solution initiale, laquelle peut ensuite être optimisée par d'autres techniques. [11]

3-Méthodes métaheuristiques :

Les métaheuristiques sont des stratégies d'optimisation avancées conçues pour explorer efficacement un vaste espace de solutions. Elles utilisent des mé-

canismes d'exploration et d'exploitation afin d'éviter de rester bloquées dans des optimums locaux. Contrairement aux heuristiques simples, elles incluent souvent des processus stochastiques et des stratégies d'amélioration progressive. Parmi les métaheuristiques les plus connues appliquées au VRP, on distingue les algorithmes génétiques, le recuit simulé, la recherche tabou et les algorithmes de colonies de fourmis. Ces méthodes permettent d'obtenir des solutions proches de l'optimum pour des problèmes complexes. Elles sont largement employées dans la logistique et le transport réel. Leur efficacité dépend généralement du réglage des paramètres et de la manière dont les solutions sont représentées. Aujourd'hui, elles figurent parmi les approches les plus performantes pour résoudre des VRP de grande dimension. [12]

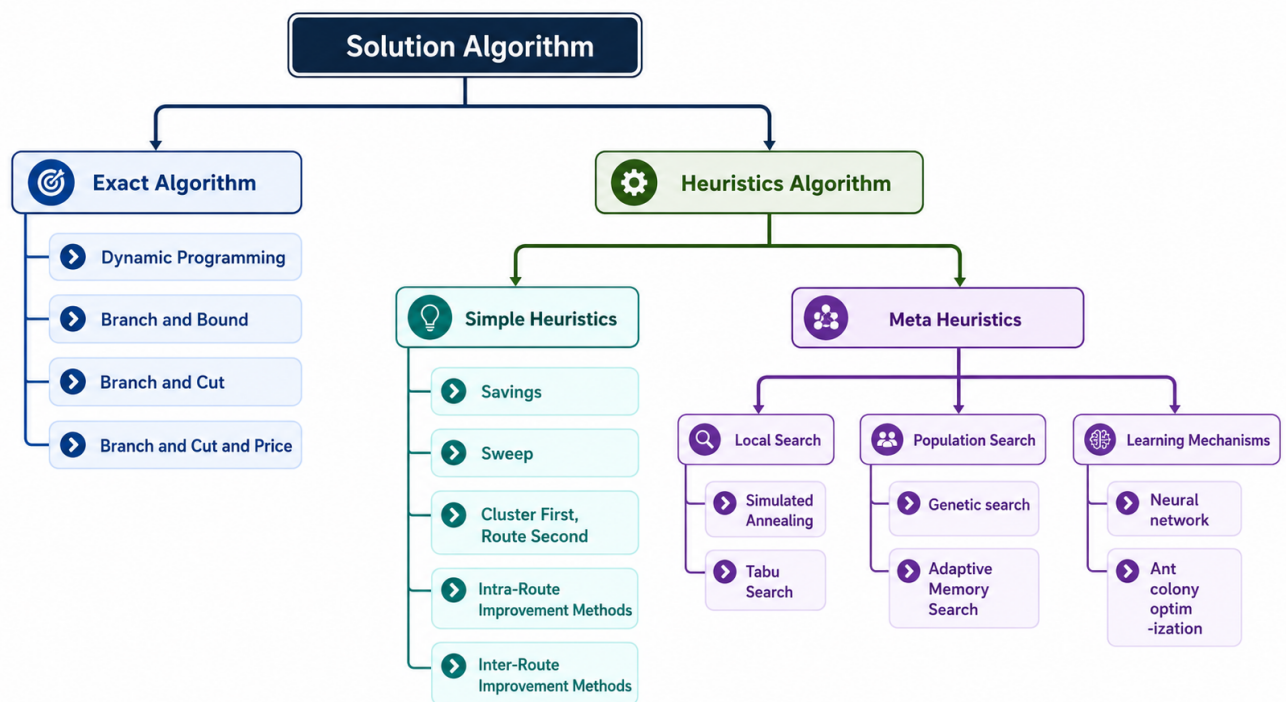


FIGURE 1.5 – Méthodes de résolution du VRP
[13]

1.3 Conclusion

Le présent chapitre a permis d'établir les fondements théoriques essentiels à la compréhension globale de la logistique, de la Supply Chain et de la distribution physique, en mettant en lumière les interactions complexes entre ces différentes dimensions. Il a souligné le rôle stratégique de la logistique dans l'optimisation des flux de matières, d'informations et de finances, ainsi que son influence directe sur la performance et la compétitivité des entreprises dans des environnements économiques de plus en plus exigeants. La logistique ne se limite plus à une fonction support : elle constitue un levier stratégique majeur, capable de générer de la valeur ajoutée, de renforcer la réactivité face aux besoins des clients et de contribuer significativement à la réduction des coûts opérationnels.

La distribution physique, composante opérationnelle essentielle, assure la disponibilité des produits au bon moment et au bon endroit, tout en garantissant la maîtrise des coûts et le maintien d'un niveau de service élevé. Elle joue un rôle central dans la satisfaction client et la fidélisation, en influençant directement la qualité perçue des services proposés. La gestion efficace de la distribution implique la coordination de nombreuses activités, telles que la gestion des stocks, le transport, la manutention et la planification des tournées, afin de garantir une circulation fluide et optimisée des produits depuis les centres de production jusqu'aux points de consommation.

L'introduction du Vehicle Routing Problem (VRP) et de ses différentes variantes a mis en évidence l'importance des outils d'optimisation dans la planification des tournées de véhicules. Ces outils permettent non seulement de réduire les coûts logistiques et les distances parcourues, mais également d'améliorer la ponctualité des livraisons, de limiter l'impact environnemental et d'accroître la satisfaction des clients. La connaissance des diverses variantes du VRP, telles que le VRP capacitaire, le VRP avec fenêtres temporelles ou encore le VRP soumis à des contraintes de distance, offre une vision complète des problématiques rencontrées dans l'organisation du transport et des livraisons.

La maîtrise de ces concepts constitue un préalable indispensable à l'analyse des problématiques de distribution dans des contextes industriels et agroali-

mentaires réels. Elle permet non seulement d'évaluer de manière critique les systèmes logistiques existants, mais aussi de concevoir et de mettre en œuvre des solutions optimisées adaptées aux besoins spécifiques des entreprises. Ainsi, ce chapitre fournit un cadre théorique solide, nécessaire pour appréhender efficacement les défis liés à la logistique et à la planification des livraisons, tout en préparant le lecteur à l'étude approfondie des modèles mathématiques, des méthodes d'optimisation et des approches innovantes qui seront présentés dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE

2.1 Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent le cadre théorique relatif à la logistique et au problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem – VRP), il apparaît essentiel d'analyser le contexte réel dans lequel s'inscrit notre étude. En effet, toute démarche d'optimisation logistique doit être fondée sur une compréhension approfondie de l'environnement organisationnel, productif et distributif de l'entreprise concernée. Le présent chapitre est consacré à la présentation détaillée de l'entreprise Delicias, société opérant dans le secteur agroalimentaire. Cette étape constitue une phase fondamentale de l'étude, puisqu'elle permet d'identifier les caractéristiques structurelles de l'entreprise, la nature de ses produits, son organisation interne ainsi que la configuration de son système logistique. Dans un premier temps, nous présenterons l'histoire de l'entreprise, son activité principale, sa gamme de produits ainsi que son organisation générale. Cette analyse permettra de situer l'entreprise dans son environnement économique et industriel et de comprendre les spécificités liées à son fonctionnement. Dans un second temps, nous décrirons la structure logistique et le système de distribution actuel. Cette partie portera notamment sur la flotte de véhicules, les capacités de transport, les zones géographiques desservies, la typologie des clients, la fréquence des livraisons ainsi que la méthode actuelle de planification des tournées. Une attention particulière sera accordée à l'identification des contraintes logistiques et des sources potentielles

d'inefficacité. L'objectif principal de ce chapitre est donc d'établir un diagnostic précis du système de distribution existant. Ce diagnostic permettra de mettre en évidence les limites de l'organisation actuelle et de justifier la nécessité de recourir à un modèle d'optimisation basé sur le VRP. Ainsi, cette analyse servira de fondement au chapitre suivant, consacré à la modélisation mathématique du problème et à la proposition d'une solution optimisée adaptée aux contraintes réelles de l'entreprise.

2.2 Présentation Générale

2.2.1 Historique et évolution

L'entreprise Delicias est une société agroalimentaire algérienne créée il y a environ deux ans et située à Tlemcen. Malgré sa création récente, elle a su développer progressivement sa présence sur le marché régional grâce à une stratégie basée sur la diversification des produits, la qualité de fabrication et l'élargissement progressif de sa zone de distribution. À ses débuts, Delicias s'est spécialisée dans la production de vinaigre et d'eau de fleur, avant d'élargir par la suite sa gamme en intégrant de nouveaux produits tels que la vanille, la chantilly, tortillas destinées aux tacos. et le bicarbonate. Depuis sa création, l'entreprise s'est orientée vers la transformation et le conditionnement de produits alimentaires destinés aussi bien à la consommation domestique qu'aux commerçants de détail. Elle s'est développée autour de deux sites de production, intégrant plusieurs lignes spécialisées afin de répondre aux exigences du marché local. Son évolution repose principalement sur l'augmentation continue du portefeuille clients et l'extension géographique de la distribution vers plusieurs wilayas de l'Ouest algérien, ce qui a engendré une complexification progressive de la gestion logistique.



FIGURE 2.1 – Entreprise Delicias

2.2.2 Secteur d'activité

Delicias opère dans le secteur de l'industrie agroalimentaire, un domaine stratégique caractérisé par une forte concurrence et une demande continue. Son activité principale consiste en la fabrication, le conditionnement et la distribution de produits alimentaires transformés destinés à une large clientèle. L'entreprise intervient notamment dans la production de vinaigre alimentaire, utilisé aussi bien dans la cuisine domestique que dans la restauration. Elle assure également la fabrication d'eau de fleur, très prisée dans les usages culinaires traditionnels et la pâtisserie. En parallèle, Delicias s'est développée dans la production de poudres alimentaires telles que la vanille, la chantilly et le bicarbonate, répon-

dant aux besoins croissants des consommateurs en produits prêts à l'emploi. L'entreprise propose aussi la fabrication de tortillas destinées aux tacos, ce qui lui permet de s'inscrire dans les nouvelles tendances de consommation alimentaire.

Le positionnement stratégique de Delicias repose sur la production de biens de grande consommation à rotation rapide, ce qui exige une gestion rigoureuse de la chaîne d'approvisionnement. Cela implique un contrôle strict des matières premières, une planification efficace de la production ainsi qu'une optimisation des stocks. L'entreprise doit également garantir la qualité sanitaire de ses produits en respectant les normes en vigueur dans l'industrie agroalimentaire. Par ailleurs, la diversité de sa gamme nécessite une certaine flexibilité dans les processus de fabrication afin de s'adapter aux variations de la demande. En outre, Delicias accorde une importance particulière au conditionnement de ses produits, qui constitue un élément clé dans la conservation et l'attractivité commerciale. Enfin, l'activité de distribution joue un rôle essentiel, puisque l'entreprise doit assurer une livraison rapide et régulière vers plusieurs wilayas, ce qui renforce l'importance d'une logistique performante et bien structurée.

2.2.3 Gamme de produits

L'entreprise propose une gamme variée structurée autour de plusieurs familles de produits.

		
Vinaigre 4°	Vinaigre 7°	Vinaigre 10°
		
Vinaigre balsamique	Eau de fleur	Bicarbonette
		
Vanille	Chantilly	Tortilla

TABLE 2.1 – Gamme de produits Delicias

Cette diversification permet à l'entreprise de répondre à différents segments de marché et d'augmenter son chiffre d'affaires par la multiplication des références.

2.2.4 Organisation générale

Delicias est une petite entreprise à structure organisationnelle relativement simple et centralisée. L'organigramme fonctionnel peut être structuré autour des services suivants :

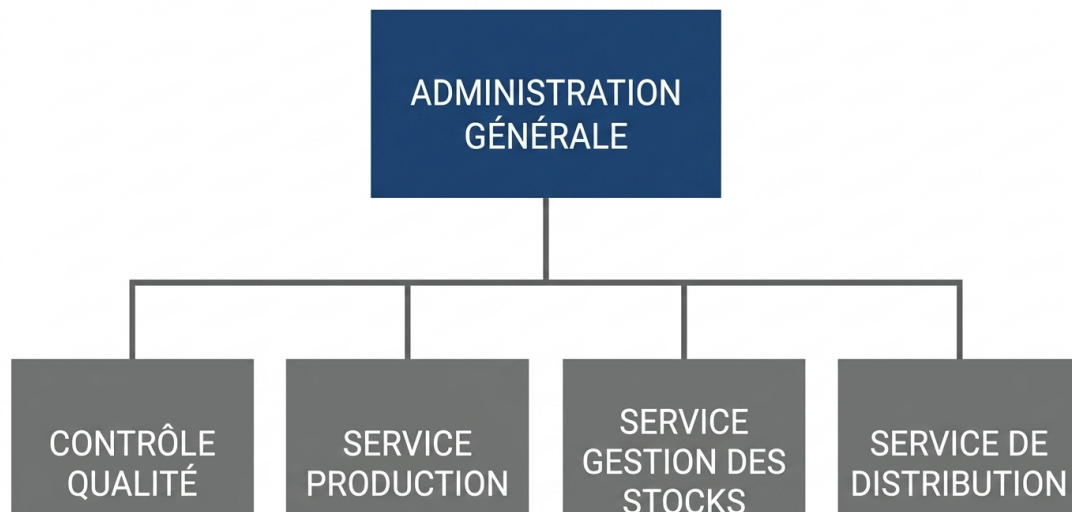


FIGURE 2.2 – organigramme de Delicias

2.2.5 Structure de production

L'entreprise dispose de plusieurs lignes de production distinctes :

- Une ligne dédiée exclusivement au vinaigre 4° ;
- Une ligne regroupant l'eau de fleur, le vinaigre 7° et le vinaigre 10° ;
- Une ligne spécialisée dans la fabrication des tortillas pour tacos ;
- Une ligne dédiée aux produits en poudre (bicarbonate, vanille, chantilly).

Cette organisation par lignes spécialisées permet une meilleure maîtrise des procédés et une réduction des risques de contamination croisée.

2.3 Structure logistique et zone de distribution

2.3.1 Infrastructure logistique

L'entreprise fonctionne avec :

- Deux sites de production ;
- Un espace de stockage des produits finis ;
- Une flotte composée de trois véhicules utilitaires de type fourgonnette.

Les produits finis sont stockés avant expédition vers les différents points de vente répartis dans plusieurs wilayas.

2.3.2 Zone géographique desservie

Delicias distribue ses produits principalement dans la région Ouest de l'Algérie, couvrant les wilayas suivantes :

- Tlemcen et ses environs
- Aïn Témouchent et ses environs, Sidi Bel Abbès et ses environs, Oran, Saïda, Mostaganem, Aïn Sefra, Méchria

Cette dispersion géographique implique des distances importantes entre le dépôt central et certains points de livraison, ce qui rend la planification des tournées particulièrement stratégique.



FIGURE 2.3 – Zone géographique desservie

2.4 Description et analyse du système de distribution actuel

2.4.1 Flotte de véhicules

L'entreprise dispose de trois véhicules utilitaires de type fourgonnette. Ces véhicules assurent la distribution des produits finis vers l'ensemble des clients. La capacité moyenne d'une fourgonnette est estimée entre 1200 kg et 1400 kg, selon le modèle et le volume utile disponible. La capacité constitue une contrainte essentielle dans l'organisation des tournées de livraison.

2.4.2 Typologie des clients

Les clients de Delicias comprennent :

- Grossistes ;
- Supérettes ;
- Épicerie de détail ;

Le nombre de clients varie selon les wilayas et la demande locale. La répartition géographique des clients entraîne une hétérogénéité dans les volumes livrés et dans la fréquence de distribution.

2.4.3 Fréquence de livraison

La fréquence de livraison dépend :

- Du volume de commande ;
- De l'éloignement géographique ;
- De l'importance commerciale du client.

2.4.4 Méthode actuelle de planification

La planification des tournées est actuellement réalisée de manière manuelle. Elle repose principalement sur :

- L'expérience du responsable logistique ;
- La connaissance terrain des chauffeurs ;

- Une organisation empirique des zones.

Aucun outil informatique d'optimisation ou modèle mathématique formel n'est utilisé pour déterminer les itinéraires optimaux. Les décisions sont donc prises sur la base de l'expérience et de l'intuition, ce qui peut générer des inefficacités telles que :

- Des distances supplémentaires non nécessaires ;
- Un mauvais équilibre des charges ;
- Une sous-utilisation de la capacité des véhicules ;
- Des coûts logistiques plus élevés.

2.4.5 Analyse des coûts logistiques actuels

Les coûts liés à la distribution comprennent :

- Les dépenses en carburant ;
- Les coûts de maintenance et d'entretien des véhicules ;
- Les salaires des chauffeurs ;
- Les assurances ;
- L'amortissement des véhicules.

L'absence d'un système d'optimisation formalisé peut entraîner une augmentation des kilomètres parcourus et, par conséquent, une augmentation des coûts variables, notamment le carburant et l'usure mécanique. Le nombre de clients varie selon les wilayas et la demande locale. La répartition géographique des clients entraîne une hétérogénéité dans les volumes livrés et dans la fréquence de distribution.

2.5 Conclusion

Au terme de ce chapitre, une analyse détaillée de l'entreprise Delicias et de son système de distribution a été réalisée afin de comprendre le contexte réel dans lequel s'inscrit cette étude. Cette étape a permis de présenter l'historique de l'entreprise, son activité dans le secteur agroalimentaire, la diversité de sa gamme de produits ainsi que son organisation interne et sa structure productive. L'étude a également mis en évidence les caractéristiques essentielles de la

structure logistique, notamment l'existence de deux sites de production, d'un espace de stockage centralisé et d'une flotte composée de trois véhicules utilitaires assurant la distribution vers plusieurs wilayas de l'Ouest algérien. La dispersion géographique des clients, combinée à des ressources de transport limitées, constitue un facteur déterminant dans la complexité de la gestion des tournées. L'analyse du système de distribution actuel a révélé que la planification des livraisons repose principalement sur une approche empirique, fondée sur l'expérience du responsable logistique et des chauffeurs. Bien que cette méthode puisse être adaptée à une petite structure en phase initiale de développement, elle montre ses limites face à l'élargissement progressif de la zone de distribution et à l'augmentation du portefeuille clients. Cette situation peut engendrer des inefficacités telles qu'une mauvaise utilisation des capacités des véhicules, des distances parcourues excessives et une augmentation des coûts logistiques. Ainsi, le diagnostic établi met en évidence la nécessité d'adopter une approche scientifique et structurée pour l'organisation des tournées de livraison. L'optimisation du système de distribution apparaît comme un levier stratégique permettant d'améliorer la performance logistique, de réduire les coûts de transport et de renforcer la compétitivité de l'entreprise. Dans cette perspective, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation mathématique du problème de distribution à travers une formulation adaptée du Vehicle Routing Problem (VRP), en tenant compte des contraintes réelles de l'entreprise Delicias. Cette modélisation constituera la base de la proposition d'une solution optimisée visant à améliorer l'efficacité globale du système logistique.

FORMULATION ET RÉOLUTION DU MODÈLE VRP

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la résolution du problème de tournées de véhicules intégrant à la fois une planification sur plusieurs jours et la gestion de plusieurs types de produits, dans le contexte spécifique de l'entreprise Delicias. Dans le domaine de la distribution agroalimentaire, la coordination efficace des livraisons sur un horizon de planification donné, ainsi que l'optimisation des opérations logistiques, constituent des enjeux stratégiques majeurs. Une organisation inadéquate des tournées peut engendrer des ruptures d'approvisionnement, une augmentation significative des coûts de transport et, par conséquent, une dégradation du niveau de satisfaction des clients.

L'objectif principal de ce chapitre consiste à élaborer un modèle d'optimisation permettant de minimiser les coûts globaux de transport ainsi que les distances parcourues sur l'ensemble de la période étudiée. Ce modèle prend en considération un ensemble de contraintes opérationnelles propres à l'entreprise. Parmi celles-ci, la planification des visites sur plusieurs jours et la gestion simultanée de différentes catégories de produits jouent un rôle central, notamment pour répondre de manière précise et adaptée à la diversité des demandes des clients.

Par ailleurs, les véhicules mis à disposition par l'entreprise sont soumis à des limitations de capacité, ce qui impose une gestion rigoureuse des quantités transportées pour chaque type de produit. Dans ce cadre, chaque véhicule doit être

affecté de façon optimale afin de respecter ces contraintes, qui peuvent inclure des exigences de compartimentation ou des restrictions liées à l'incompatibilité de certains produits. L'objectif est ainsi d'assurer la satisfaction complète de la demande tout en respectant les limites physiques des moyens de transport.

Dans ce contexte, une modélisation mathématique détaillée est proposée afin de représenter de manière fidèle et rigoureuse le problème étudié. Cette modélisation inclut la définition des ensembles, des paramètres et des variables de décision, ainsi que la formulation de la fonction objectif et des différentes contraintes. Ces dernières concernent en particulier l'affectation des clients aux jours de livraison, la gestion des produits multiples (en termes de compatibilité et de volume), les capacités des véhicules, ainsi que la satisfaction globale de la demande.

Dans le cadre de cette étude, le modèle développé est implémenté au sein d'une interface graphique conçue avec la bibliothèque CustomTkinter, offrant un environnement convivial et interactif pour la saisie des données, l'exécution des algorithmes et la visualisation des résultats. Afin de résoudre efficacement le problème considéré, une métaheuristique hybride a été mise en œuvre, combinant les principes de l'algorithme génétique et de la recherche tabou. Cette approche vise à exploiter à la fois la capacité d'exploration globale de l'algorithme génétique et les mécanismes d'intensification de la recherche tabou, permettant ainsi d'obtenir des solutions de haute qualité pour ce problème de tournées de véhicules multi-produits.

3.2 Description du problème

Le problème étudié est une extension du Vehicle Routing Problem intégrant une planification multi-jours, la gestion de plusieurs produits et des contraintes de capacité des véhicules. Il s'applique à un système de distribution où l'on considère une demande globale mensuelle à satisfaire.

Dans ce modèle, la zone d'étude est divisée en 33 zones géographiques. Chaque zone regroupe plusieurs clients afin de simplifier le problème, ce qui permet de réduire la complexité liée au grand nombre de points de livraison.

Ainsi, les décisions de routage sont prises au niveau des zones et non des clients individuels.

La demande est exprimée mensuellement pour 10 produits différents. Chaque zone possède une demande agrégée correspondant à l'ensemble des clients qu'elle contient. En raison de la capacité limitée des véhicules, il n'est pas possible de satisfaire toute la demande en une seule journée.

Le système dispose de 3 véhicules, chacun ayant une capacité limitée. Tous les véhicules sont utilisés chaque jour, car leur mobilisation engendre un coût fixe (commission journalière), ce qui impose leur exploitation continue sur tout l'horizon de planification.

L'objectif du problème est de déterminer le nombre minimal de jours nécessaires pour satisfaire la totalité de la demande mensuelle, tout en organisant les tournées de manière optimale. La fonction objectif consiste à minimiser la somme des temps de trajet entre les zones et des temps de service.

Le temps de service dans chaque zone dépend du nombre de clients qu'elle regroupe. Ainsi, plus une zone contient de clients, plus le temps de service associé est élevé, ce qui influence directement la durée totale des tournées.

Les décisions incluent l'affectation des zones aux véhicules et aux jours, le séquençement des visites, ainsi que la répartition des quantités livrées de chaque produit sur l'horizon. Le modèle doit garantir la satisfaction complète de la demande mensuelle tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules à chaque tournée.

Ce problème est de nature combinatoire et classé comme NP-difficile. L'intégration simultanée des dimensions multi-jours, multi-produits et du regroupement en zones rend l'espace de recherche très vaste. Par conséquent, la résolution exacte devient difficile pour des instances réelles, ce qui justifie le recours à des méthodes heuristiques ou métaheuristiques pour obtenir des solutions efficaces dans un temps raisonnable.

3.3 Données du cas étudié

3.3.1 Temps de trajet

Le tableau 3.3.1 présente la matrice des temps de trajet utilisée pour l'instance de référence. Les matrices complètes correspondant aux différentes instances étudiées sont fournies en annexe.

Localités	depot	Tlemcen	Ouled Mimoune	Hennaya	Sabra	Maghnia
depot	0	12	39	20	52	55
Tlemcen	12	0	44	16	47	54
Ouled Mimoune	39	44	0	47	84	84
Hennaya	20	16	47	0	41	48
Sabra	52	47	84	41	0	33
Maghnia	55	54	84	48	33	0
Fellaoucene	43	41	72	29	37	43
Nedrouma	69	68	98	53	64	43
Ghazaouet	77	75	103	62	80	66
Honaine	66	64	96	52	72	85
El Marsa Ben M'hidi	97	94	120	60	82	62
Bensekrane	38	44	43	38	72	73
Telagh	110	104	68	100	138	140
Beni Snous	60	55	85	63	51	52
Bedo	109	103	89	113	136	150
Ain Turk (Canastal)	135	135	139	122	150	156
Oran Centre Ville	120	120	111	124	147	154
Bir El Djir	129	115	107	116	142	150

TABLE 3.1 – temps de trajet partie 1

3.3.2 Temps de service

TABLE 3.2 – Temps de service par localité

Localités	Temps
Tlemcen	180
Mansourah	150
Chetouan	100
Ouled Mimoune	60
Remchi	280
Hnaya	30
Sebra	60
Maghnia	180
Fellaoucene	30
Nedrouma	60
Ghazaouet	180
Honaine	70
El Marsa Ben M'hidi	100
Bensekrane	30
Telagh	50
Beni Snous	40

Localités	Temps
Bedo	50
Aïn El Arbaa	30
Aïn Kihal	45
Aïn Témouchent	300
Beni Saf	100
El Amria	100
El Malah	60
Hammam Bou Hadjar	180
Oulhaça El Gheraba	60
Aïn Turk	100
Oran Centre Ville	250
Bir El Djir	120
Saïda	120
Mécheria	100
Aïn Safra	100
Mostaganem	180
Sidi Bel Abbès	180

3.3.3 Caractéristiques du véhicules et et demandes des produits

Modèle de véhicule	Capacité
FIAT SCUDO	1.2 TONNES
FIAT DUCATO	1.4 TONNES
RENAULT MASTER	1.4 TONNES

TABLE 3.3 – Modèles de véhicules et leurs capacités

Produits	Poids
Eau de fleur	8.94 kg
Vinaigre 4 degré	8.98 kg
Vinaigre 3L	12.34 kg
petite Bicarbonate	10.57 kg
grande Bicarbonate	5.83 kg
Vanille	3.21 kg
Chantilly	3.21 kg
Vinaigre Balsamique	6.72 kg
Vaporisateur	12.48 kg

TABLE 3.4 – Liste des produits et leurs poids

TABLE 3.5 – Demandes par localité

Localités	EDF	V4°	V3L	Bic(p)	Bic(g)	Van	Chan	Bal	Vapo	Tac	7°
Tlemcen	11	68	5	8	9	11	9	5	3	21	10
Mansourah	8	46	3	5	6	8	6	3	2	14	7
Chetouan	6	34	3	4	5	6	5	3	2	11	5
Ouled Mimoune	2	12	1	2	2	2	2	1	1	4	2
Remchi	10	57	4	7	8	9	8	4	2	17	8
Hnaya	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sebra	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maghnia	7	38	3	4	5	6	5	3	2	12	6
Fellaoucene	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nedrouma	2	12	1	2	2	2	2	1	1	4	2
Ghazaouet	8	46	3	5	6	8	6	3	2	14	7
Honaine	1	6	1	1	1	1	1	1	1	2	1
El Marsa Ben M'hidi	2	12	1	2	2	2	2	1	1	4	2
Bensekrane	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Telagh	8	46	3	5	6	8	6	3	2	14	7
Beni Snous	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bedo	8	46	3	5	6	8	6	3	2	14	7
Aïn El Arbaa	3	17	2	2	3	3	3	2	1	6	3
Aïn Kihal	2	12	1	2	2	2	2	1	1	4	2
Aïn Témouchent	17	102	7	11	13	17	13	7	4	31	14
Beni Saf	6	34	3	4	5	6	5	3	2	11	5
El Amria	3	16	2	2	3	3	2	1	1	5	3
El Malah	2	12	1	2	2	2	2	1	1	4	2
Hammam Bou Hadjar	6	34	3	4	5	6	5	3	2	11	5
Oulhaça El Gheraba	1	4	1	1	1	1	1	1	1	2	1
Aïn Turk	6	34	3	4	5	6	5	3	2	11	5
Oran Centre Ville	6	34	3	4	5	6	5	3	2	11	5
Bir El Djir	11	68	5	8	9	11	9	5	3	21	10
Saïda	10	57	4	7	8	9	8	4	2	17	8
Mécheria	10	57	4	7	8	9	8	4	2	17	8
Aïn Safra	15	91	6	10	12	15	12	6	4	27	13
Mostaganem	10	57	4	7	8	9	8	4	2	17	8
Sidi Bel Abbès	13	79	6	9	11	13	10	5	3	24	11

3.4 Modélisation mathématique du VRP

Modèle mathématique — VRP Multi-produits/Multi-jours

3.4.1 Ensembles et paramètres

$\mathcal{N} = \{0, 1, \dots, n\}$ nœuds : 0 = dépôt, 1..n = clients (+ fractions)

$\mathcal{K} = \{1, 2, 3\}$ ensemble des véhicules

$\mathcal{D} = \{1, \dots, D\}$ jours de livraison (D calculé automatiquement)

$\mathcal{P} = \{1, \dots, 11\}$ ensemble des produits

t_{ij} : temps de trajet entre i et j (min)

s_i : temps de service chez i (min)

Q_k : capacité du véhicule k (kg)

d_{ip} : demande du client i pour le produit p (unités)

w_p : poids unitaire du produit p (kg/u)

$T_{\max} = 660$ min (contrainte temps)

$W_i = \sum_{p \in \mathcal{P}} w_p \cdot d_{ip}$: poids total à livrer au client i (kg)

3.4.2 Variables de décision

$x_{ijkd} \in \{0, 1\}$ = 1 si le véhicule k emprunte l'arc ($i \rightarrow j$) le jour d

$y_{ikd} \in \{0, 1\}$ = 1 si le client i est visité par le véhicule k le jour d

$u_{ikd} \in \mathbb{R}^+$ position (temps cumulé) du client i dans la tournée k , jour d

$z_{kd} \in \{0, 1\}$ = 1 si le véhicule k est utilisé le jour d

3.4.3 Fonction objectif

$$\min Z = \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}} t_{ij} \cdot x_{ijkd} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} s_i \cdot y_{ikd}$$

On minimise le temps total = somme des temps de trajet sur tous les arcs empruntés + somme des temps de service chez tous les clients visités.

3.4.4 Contraintes

C1—Couverture totale : Chaque client est visité exactement une fois (sur tous les jours et tous les véhicules) :

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{d \in \mathcal{D}} y_{ikd} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}$$

C2—Conservation du flot :

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{ijkd} = y_{ikd} \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

- Si le client i est visité par le véhicule k le jour d ($y_{ikd} = 1$), alors un seul arc sortant de ce client doit être emprunté.
- Si le client i n'est pas visité ($y_{ikd} = 0$), alors aucun arc sortant ne peut être utilisé.

C3—Contrainte de capacité des véhicules :

$$\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} W_i \cdot y_{ikd} \leq Q_k \cdot z_{kd} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

La somme des poids W_i de tous les clients affectés au véhicule k le jour d ne peut pas dépasser sa capacité Q_k :

Cette contrainte représente la contrainte physique de chargement du véhicule.

C4—Contrainte de temps maximum par tournée :

$$\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} \left(t_{0i} \cdot x_{i0kd} + s_i \cdot y_{ikd} + \sum_{j \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} t_{ij} \cdot x_{ijkd} \right) \leq T_{\max} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

Le temps de parcours total d'une tournée (trajet + service) ne dépasse pas $T_{\max}$

C5—Élimination des sous-tours (contrainte MTZ) :

$$u_{ikd} - u_{jkd} + n \cdot x_{ijkd} \leq n - 1 \quad \forall i \neq j \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

Sans cette contrainte, le modèle pourrait créer des boucles fermées ne passant pas par le dépôt. La formulation MTZ attribue une position u aux clients et interdit que deux clients consécutifs aient des positions incohérentes.

C6— Bornes des variables MTZ :

$$1 \leq u_{ikd} \leq n \quad \forall i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}, \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

La position dans la tournée est bornée entre 1 (premier client) et n (dernier possible). Contrainte technique indispensable pour que C6 fonctionne correctement.

C7 — Utilisation des véhicules : (tous les véhicules requis sont utilisés chaque jour) :

$$z_{kd} = 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

Chaque véhicule doit travailler chaque jour utilisé. C'est une contrainte opérationnelle propre à cette instance : les trois véhicules doivent être actifs simultanément.

C8— Lien entre variables y et z :

$$\sum_{i \in \mathcal{N} \setminus \{0\}} y_{ikd} \geq z_{kd} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall d \in \mathcal{D}$$

Activation du véhicule Si $z_{kd} = 1$ (le véhicule k est actif le jour d), alors il doit desservir au moins un client. Cette contrainte empêche les véhicules actifs à vide :

Cette contrainte garantit qu'un véhicule actif est nécessairement utilisé pour au moins une tournée.

C9 — Condition de livraison : (non fractionnée si poids inférieur à la capacité max) :

$$W_i \leq \max_{k \in \mathcal{K}} Q_k \Rightarrow \text{livraison non fractionnée, sinon livraison fractionnée}$$

Si le poids total d'un client dépasse la capacité maximale d'une véhicule, sa demande est fractionnée en plusieurs livraisons partielles (sous-clients).

3.4.5 Calcul de l'horizon D :

$$D = \max \left(\left\lceil \frac{\sum_i W_i}{\sum_k Q_k} \right\rceil, \left\lceil \frac{\sum_i s_i}{0.7 \cdot T_{\max} \cdot |3c|} \right\rceil \right) + 1$$

Le nombre de jours n'est pas fixé à l'avance mais calculé comme le maximum entre la borne issue du poids total (combien de jours pour livrer toute la marchandise vu les capacités journalières) et la borne issue du temps de service total (combien de jours pour assurer tous les services avec 70% de $T_{\max}$ par véhicule), plus 1 jour de marge.

— **1. Première borne (capacité de transport) :**

$$\left\lceil \frac{\sum_i W_i}{\sum_k Q_k} \right\rceil$$

Elle représente le nombre minimum de jours nécessaires en fonction de la capacité totale des véhicules. Elle garantit que la demande globale peut être transportée sans dépasser les capacités disponibles.

— **2. Deuxième borne (temps de service) :**

$$\left\lceil \frac{\sum_i s_i}{0.7 \cdot T_{\max} \cdot |3c|} \right\rceil$$

Elle représente le nombre minimum de jours nécessaires en fonction du temps total de service, en tenant compte de la durée maximale d'une tournée et d'un taux d'utilisation réaliste de 70%.

— **3. Choix de la borne critique :**

$$\max \left(\left\lceil \frac{\sum_i W_i}{\sum_k Q_k} \right\rceil, \left\lceil \frac{\sum_i s_i}{0.7 \cdot T_{\max} \cdot |3c|} \right\rceil \right)$$

On retient la contrainte la plus restrictive entre la capacité et le temps, car elle détermine le minimum de jours nécessaires pour garantir la faisabilité du planning.

— **4. Marge de sécurité : +1** Une marge supplémentaire est ajoutée afin de prendre en compte les imprévus (retards, variations de demande, aléas opérationnels) et d'assurer une meilleure flexibilité du planning.

3.4.6 Intégrité :

$$x_{ijkd} \in \{0, 1\}, \quad y_{ikd} \in \{0, 1\}, \quad u_{ikd} \geq 0, \quad z_{kd} \in \{0, 1\}$$

3.5 Résolution de problème

La résolution de ce problème s'avère particulièrement complexe en raison de sa nature combinatoire et de la multiplicité des contraintes à considérer, telles que la gestion de plusieurs véhicules, produits et horizons de planification. Cette complexité, souvent classée comme NP-difficile, rend les méthodes exactes peu efficaces, voire impraticables, pour des instances de taille réelle. Par conséquent, il devient nécessaire de recourir à des approches approximatives capables de fournir des solutions de bonne qualité dans un temps raisonnable. Dans ce contexte, l'utilisation d'une métaheuristique hybride apparaît comme

une stratégie pertinente, combinant les avantages de différentes méthodes afin d'explorer efficacement l'espace des solutions tout en améliorant la convergence vers des solutions optimales ou quasi-optimales.

Ainsi, pour traiter ce problème, nous adoptons une métaheuristique hybride basée sur l'algorithme génétique et la recherche tabou. Cette approche se décompose en quatre phases essentielles permettant de construire et d'exécuter efficacement la méthode proposée, à savoir : le pré-traitement des données, la phase de construction d'une solution initiale, l'application de la métaheuristique hybride pour l'amélioration des solutions, et enfin la génération des résultats en sortie.

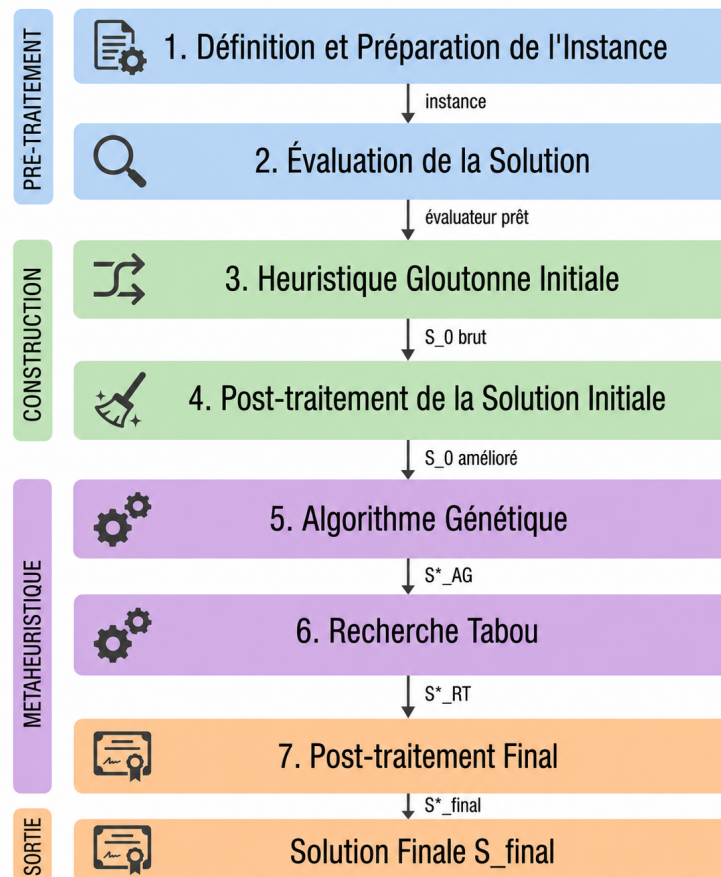


FIGURE 3.1 – Structure de l'algorithme proposé

3.5.1 Pré-traitement

étape 1—construction de l'instance :

La construction de l'instance se décompose en deux étapes distinctes avant toute résolution.

I—Fractionnement des clients lourds :

Pour chaque zone, on calcule son poids total en multipliant la quantité demandée de chaque produit par son poids unitaire et en sommant sur tous les produits. Si ce poids dépasse la capacité maximale d'un véhicule (1 400 kg), le client ne peut pas être livré en une seule tournée. On calcule alors le nombre de sous-livraisons nécessaires par la division entière supérieure du poids total sur la capacité maximale. Pour un client pesant 2 800 kg par exemple, deux sous-clients sont créés, chacun recevant la moitié des demandes. Ces sous-clients sont traités comme des nœuds indépendants dans le graphe, avec les mêmes coordonnées géographiques et temps de trajet que le client d'origine.

II— Calcul du nombre de jours :

Une fois l'instance étendue construite, on détermine automatiquement l'horizon de planification D . Deux bornes inférieures sont calculées : la borne poids, qui divise le poids total à livrer par la capacité cumulée des trois véhicules sur une journée, et la borne temps, qui divise le temps de service total par le temps utile journalier disponible, fixé à 70 % de $T_{\max}$ multiplié par le nombre de véhicules. Le facteur 70 % introduit une marge réaliste pour les aléas et les temps de trajet. Le nombre de jours retenu est le maximum des deux bornes, avec une marge de 1 jours ajoutée pour absorber les imprévus opérationnels.

Algorithm 1 Construction de l'instance (Pré-traitement)

-
- 1: **Entrée** : Données brutes : clients, produits, poids w_p , demandes d_{ip} , capacités Q_k , temps T_{ij} , temps de service s_i , T_{max}
 - 2: **Sortie** : Instance structurée I prête à être utilisée par les algorithmes

 - 3: $N_c \leftarrow |\text{CLIENTS}|$, $Q_{max} \leftarrow \max_k Q_k$ $\triangleright$ Nombre total de clients et capacité maximale d'un véhicule
 - 4: **for all** client $i \in \{1, \dots, N_c\}$ **do** $\triangleright$ Parcourir tous les clients originaux un par un
 - 5: $w_i \leftarrow \sum_p w_p \cdot d_{ip}$ $\triangleright$ Calculer le poids total du client i sur tous les produits
 - 6: $n_{split} \leftarrow \max(1, \lceil w_i / Q_{max} \rceil)$ $\triangleright$ Nombre de sous-livraisons : 1 si $w_i \leq Q_{max}$, sinon $\lceil w_i / Q_{max} \rceil$
 - 7: **if** $n_{split} > 1$ **then** $\triangleright$ Le client dépasse la capacité max : fractionnement nécessaire
 - 8: Créer n_{split} sous-clients $i_1, \dots, i_{n_{split}}$ $\triangleright$ Dupliquer le client en n_{split} entrées distinctes dans la liste
 - 9: Répartir d_{ip} équitablement entre les sous-clients $\triangleright$ Chaque sous-client reçoit $\lfloor d_{ip} / n_{split} \rfloor$ unités de chaque produit
 - 10: $s_{i_k} \leftarrow s_i / 2$ pour $k \geq 2$ $\triangleright$ Le temps de service des sous-clients suivants est réduit de moitié
 - 11: **end if**
 - 12: **end for** $\triangleright$ Fin du fractionnement : la liste étendue des clients est constituée

 - 13: $W_{tot} \leftarrow \sum_{i,p} w_p \cdot d_{ip}$, $S_{tot} \leftarrow \sum_i s_i$ $\triangleright$ Poids total à livrer sur toute la période ; somme des temps de service
 - 14: $J_{poids} \leftarrow \lceil W_{tot} / \sum_k Q_k \rceil$ $\triangleright$ Borne inférieure en jours : combien de jours pour livrer tout le fret
 - 15: $J_{temps} \leftarrow \lceil S_{tot} / (0.7 \times T_{max} \times N_v) \rceil$ $\triangleright$ Borne temps : 70% de T_{max} et N_v véhicules donne le temps utile par jour
 - 16: $N_{jours} \leftarrow \max(J_{poids}, J_{temps}) + 1$ $\triangleright$ Prendre le max des deux bornes + 1 jour de marge.

 - 17: **retourner** $I = \{\text{clients étendus}, T_{ij}, s_i, d_{ip}, Q_k, T_{max}, N_{jours}\}$ $\triangleright$ L'instance complète est retournée aux algorithmes suivants
-

étape 2—Évaluation d'une solution :

Évaluation d'une solution est la fonction centrale de toute la métaheuristique : elle est appelée à chaque étape de l'algorithme génétique et de la recherche tabou pour mesurer la qualité d'une solution candidate. Elle retourne deux valeurs : le coût total pénalisé et un indicateur de faisabilité.

I—Vérification de la couverture :

Avant tout calcul, on vérifie que l'ensemble des clients couverts par la solution correspond exactement à l'ensemble complet des clients de l'instance. Si un client est absent ou visité deux fois, la solution reçoit un coût catastrophique de 10^{12} , ce qui la rend immédiatement éliminable par la métaheuristique sans aucune ambiguïté.

II—Évaluation tournée par tournée :

Pour chaque tournée r de la solution, trois grandeurs sont calculées. Le temps de trajet est obtenu en parcourant la séquence complète et en sommant les temps d'arc issus de la matrice réelle 34×34 . Le temps de service est la somme des durées de déchargement chez chaque client visité, allant de 30 minutes pour les petits clients jusqu'à 300 minutes pour les grandes zones. Le poids chargé est la somme des poids de toutes les demandes en dix produits de tous les clients de la tournée. Le temps total de la tournée est alors ajouté au coût global. Si la tournée dépasse la capacité du véhicule ou la limite de temps $T_{\max}$ de 660 minutes, des pénalités proportionnelles sont ajoutées au coût : 800 unités par kilogramme excédentaire pour le poids, et 15 unités par minute excédentaire pour le temps. Ces coefficients ont été calibrés pour que les violations restent dissuasives sans bloquer totalement l'exploration de l'espace de recherche.

III—Contrainte de présence des véhicules : Une pénalité fixe de 5 000 unités est ajoutée pour chaque couple (véhicule k , jour d) où un véhicule ne possède aucune tournée active un jour utilisé. Cette contrainte opérationnelle propre à l'instance impose que les trois véhicules travaillent simultanément chaque jour de livraison, reflétant une contrainte contractuelle ou réglementaire réelle.

Algorithm 2 Évaluation d'une solution

```

1: Entrée : Solution  $S$  (ensemble de tournées), instance  $I$ 
2: Sortie : Coût total  $C(S)$ , indicateur de faisabilité  $f \in \{\text{vrai}, \text{faux}\}$ 

3: Vérifier que chaque client est couvert exactement une fois    ▶ Contrôle d'intégrité :
   aucun client oublié ni livré deux fois
4: if couverture incorrecte then ▶ Solution invalide : pénalité maximale pour l'exclure
   immédiatement
5:   retourner  $C \leftarrow 10^{12}$ ,  $f \leftarrow \text{faux}$ 
6: end if

7:  $C \leftarrow 0$ ,  $f \leftarrow \text{vrai}$     ▶ Initialiser le coût à zéro et supposer la solution faisable
8: for all tournée  $r \in S$  do    ▶ Évaluer chaque tournée indépendamment
9:    $\text{trajet}(r) \leftarrow T_{0,r_1} + \sum_{k=1}^{|r|-1} T_{r_k,r_{k+1}} + T_{r_{|r|},0}$     ▶ Temps de déplacement :
10:   $\text{service}(r) \leftarrow \sum_{i \in r} s_i$     ▶ Somme temps de service tous les clients de tournée
11:   $\text{temps}(r) \leftarrow \text{trajet}(r) + \text{service}(r)$     ▶ Durée totale de la tournée = trajet + service
12:   $\text{poids}(r) \leftarrow \sum_{i \in r} w_i$  ▶ Charge totale transportée par le véhicule pour cette tournée
13:   $C \leftarrow C + \text{temps}(r)$     ▶ Accumuler le temps de cette tournée dans le coût total
14:  if  $\text{poids}(r) > Q_{r.\text{véhicule}}$  then    ▶ Violation de capacité : le véhicule est surchargé
15:     $C \leftarrow C + 800 \times (\text{poids}(r) - Q_{r.\text{véhicule}})$     ▶ Pénalité forte de 800 par kg dépassé ;
    marquer infaisable
16:     $f \leftarrow \text{faux}$ 
17:  end if
18:  if  $\text{temps}(r) > T_{\max}$  then    ▶ Violation temporelle : la tournée dépasse 660 min
19:     $C \leftarrow C + 15 \times (\text{temps}(r) - T_{\max})$     ▶ Pénalité de 15 par minute dépassée ;
    marquer infaisable
20:     $f \leftarrow \text{faux}$ 
21:  end if
22: end for

23: for all jour  $d$  actif do    ▶ Vérifier la contrainte d'activité : tous les véhicules doivent
   travailler
24:  if un véhicule est absent le jour  $d$  then
25:     $C \leftarrow C + 5000$     ▶ Pénalité très lourde de 5000 par véhicule/jour absent
26:     $f \leftarrow \text{faux}$ 
27:  end if
28: end for

29: retourner  $C, f$     ▶ Retourner le coût total (avec pénalités) et le statut de faisabilité

```

3.5.2 La construction gloutonne

Solution initial (heuristique gloutonne) : L'algorithme glouton GreedySolution construit une solution initiale réalisable qui servira de point de départ à la métaheuristique hybride. Il se déroule en trois étapes progressives.

I—Initialisation : Les clients sont d'abord triés par poids total décroissant, calculé comme la somme des poids de leurs demandes sur les dix produits. Ce tri place en tête les clients les plus contraignants, dont les demandes dépassent souvent plusieurs centaines de kilogrammes. Ensuite, l'ensemble des routes disponibles est créé : une route vide pour chaque combinaison (véhicule k , jour d), soit $K \times D$ routes au total, chacune associée à un véhicule précis parmi les trois.

II—Garantie de couverture minimale : Pour chaque route dans l'ordre (jour, véhicule), on tente d'affecter le premier client de la liste des non affectés qui respecte simultanément la contrainte de capacité en poids et la contrainte de temps $T_{\max}$. Si aucun client ne peut être inséré de manière faisable, le premier client disponible est forcé dans la route quitte à violer temporairement une contrainte, car la fonction d'évaluation corrigera cette violation par des pénalités. Cette étape garantit qu'aucune route ne reste totalement vide, ce qui satisfait la contrainte de présence obligatoire de tous les véhicules chaque jour.

III—Cheapest Insertion globale : Tant qu'il reste des clients non affectés, on recherche exhaustivement la meilleure insertion possible parmi toutes les combinaisons (client, route, position). Pour chaque client candidat et chaque position d'insertion dans chaque route, on calcule le coût marginal delta, défini comme l'augmentation du temps total de la tournée après insertion. On retient le triplet (client, route, position) qui minimise ce delta tout en respectant les contraintes de poids et de temps. Si aucune insertion faisable n'existe, le client est forcé dans la route la moins chargée en poids afin de garantir la couverture totale de l'instance.

Algorithm 3 Construction gloutonne (solution initiale)

-
- 1: **Entrée** : Instance I
 - 2: **Sortie** : Solution initiale réalisable S_0
 - 3: Trier les clients par poids décroissant : $w_{i_1} \geq w_{i_2} \geq \dots$ ▶ Priorité aux clients les plus lourds pour limiter les dépassements de capacité
 - 4: Initialiser une tournée vide $r_{k,d}$ pour chaque véhicule k , jour d ▶ Créer $N_v \times N_{jours}$ tournées vides prêtes à recevoir des clients
 - 5: **for all** client i (ordre décroissant de poids) **do** ▶ Affecter chaque client à la première tournée qui peut l'accueillir
 - 6: $insr \leftarrow \text{faux}$ ▶ Indicateur : le client n'a pas encore été placé
 - 7: **for all** tournée $r_{k,d}$ dans l'ordre **do** ▶ Parcourir toutes les tournées disponibles
 - 8: **if** $poids(r_{k,d}) + w_i \leq Q_k$ et $temps(r_{k,d} \cup \{i\}) \leq T_{max}$ **then** ▶ Vérifier capacité et fenêtre temporelle avant insertion
 - 9: Insérer i dans $r_{k,d}$ à la meilleure position ▶ Position qui minimise l'augmentation du temps de trajet
 - 10: $insr \leftarrow \text{vrai}$ ▶ Client placé : sortir de la boucle des tournées
 - 11: **break**
 - 12: **end if**
 - 13: **end for**
 - 14: **if** $\neg insr$ **then** ▶ Aucune tournée ne peut accueillir le client sans violation
 - 15: Forcer l'insertion dans la tournée de moindre charge ▶ Garantir la couverture de tous les clients, quitte à violer une contrainte
 - 16: **end if**
 - 17: **end for** ▶ Tous les clients sont placés ; la solution peut contenir des violations légères
 - 18: Appliquer $RemplissageRoutes(S_0)$ ▶ Post-traitement immédiat pour consolider les routes avec 1 seul client
 - 19: **retourner** S_0 ▶ Solution de départ transmise à l'AG
-

3.5.3 métaheuristique hybride

La métaheuristique hybride développée combine un Algorithme Génétique (AG) pour l'exploration large de l'espace de solutions et une Recherche Tabou (RT) pour l'exploitation intensive des meilleures solutions. L'AG opère sur une population de 100 solutions représentées sous forme de tournées multi-véhicules multi-jours, avec un croisement OX préservant l'ordre relatif des clients et quatre opérateurs de mutation (relocate, swap, 2-opt, or-opt). Après 1000 générations, la meilleure solution est transmise à la RT qui affine localement le résultat via des mouvements de voisinage cycliques. La RT intègre un mécanisme de diversification par perturbation après 35 itérations sans amélioration, ainsi qu'un post-traitement remplissant les routes sous-utilisées. Cette hybridation séquentielle permet de bénéficier de la capacité d'exploration globale de l'AG tout en exploitant la convergence fine de la RT.

3.5.4 Algorithme génétique

Étape 1 : Créer la population de départ

On commence par créer une première solution "raisonnable" avec la méthode gloutonne, Ensuite on crée une centaine de variantes de cette solution en déplaçant des clients au hasard. On appelle ça la population initiale, comme un groupe de 100 individus au départ.

Étape 2 : Évaluer qui est le meilleur :

Pour chaque solution, on calcule son coût : le temps total de tous les véhicules. Plus c'est court, meilleure est la solution. C'est notre critère de sélection.

Étape 3 : La sélection et la reproduction

À chaque génération, on va créer une nouvelle population. Pour ça :

- On garde d'abord les meilleures solutions telles quelles (les élites). Ce sont les "champions" qu'on ne veut pas perdre.

- Pour remplir le reste de la nouvelle population, on fait se reproduire des solutions entre elles.

Pour choisir les parents, on prend 4 solutions au hasard dans la population et on garde la meilleure des 4. On fait ça deux fois pour avoir deux parents. C'est ce qu'on appelle la sélection par tournoi : les meilleurs ont plus de chances d'être choisis, mais les moins bons ont quand même une petite chance, ce qui garde de la diversité.

Étape 4 : Le croisement

Une fois qu'on a deux parents, on crée un enfant en mélangeant leurs listes de clients :

- On prend un morceau de la liste du premier parent (par exemple les clients 3, 7, 2) et on le met dans l'enfant.
- On regarde ensuite le deuxième parent et on prend les clients qui manquent encore, dans l'ordre où ils apparaissent chez lui.
- Résultat : l'enfant hérite d'un bout de la logique du premier parent et d'un bout du second, sans jamais oublier un client ni en livrer deux fois.

Étape 5 : La mutation (introduire du hasard)

Après le croisement, l'enfant a une chance sur deux ou trois d'être légèrement modifié au hasard. Pourquoi ? Parce que sans mutation, toutes les solutions finiraient par se ressembler et on raterait peut-être de bonnes solutions inattendues.

Il y a 4 types de mutations possibles, choisies au hasard : Relocate, Swap, 2-opt, Or-opt

Étape 6 : On répète pendant des centaines de générations

On refait les étapes 3, 4 et 5 encore et encore, jusqu'à 1000 générations. À chaque fois, la population tend à s'améliorer car les meilleures solutions ont plus de chances de se reproduire. Une fois que l'algorithme génétique a terminé, on prend la meilleure solution trouvée et on la passe dans l'algorithme recherche tabou.

Algorithm 4 Algorithme Génétique

- 1: Créer une solution de départ (méthode gloutonne) ▶ Point de départ de qualité pour accélérer la convergence
 - 2: Générer une population de N solutions en perturbant la solution de départ
 ▶ Introduire de la diversité tout en restant proche d'une bonne région
 - 3: $s^* \leftarrow$ meilleure solution de la population ▶ Mémoriser le meilleur individu initial
 - 4: **for** chaque génération **do** ▶ Répéter jusqu'au critère d'arrêt (nombre de générations ou temps)
 - 5: **if** la meilleure solution actuelle est meilleure que s^* **then** ▶ Mise à jour de l'élite globale si amélioration détectée
 - 6: Mettre à jour s^*
 - 7: **end if**
 - 8: Garder les meilleurs individus (élitisme) ▶ Préserver les meilleures solutions pour la génération suivante
 - 9: **while** population non complète **do** ▶ Remplir la nouvelle population par reproduction
 - 10: Sélectionner 2 parents par tournoi ▶ Favoriser les bons individus sans exclure les moins bons
 - 11: Créer un enfant par **croisement OX** des 2 parents ▶ Hériter de sous-séquences ordonnées de chaque parent
 - 12: Appliquer une **mutation** à l'enfant (avec probabilité p) ▶ Perturbation aléatoire pour explorer de nouvelles solutions
 - 13: Ajouter l'enfant à la nouvelle population
 - 14: **end while**
 - 15: **end for**
 - 16: Affiner s^* avec une **recherche tabou** ▶ Exploitation locale intensive pour améliorer la meilleure solution trouvée
 - 17: **retourner** s^* ▶ Meilleure solution obtenue après évolution et affinage
-

3.5.5 Recherche tabou

Initialisation :

On part d'une solution de départ s_0 (des routes déjà construites), et on la considère pour l'instant comme la meilleure solution connue. La boucle principale (répétée 1000 fois)

À chaque tour, l'algorithme fait 3 choses :

1. Générer un voisin :

On prend la solution actuelle et on la modifie légèrement en utilisant une des 4 techniques à tour de rôle : Relocaliser ,2-opt ,Swap,Or-opt

2. Accepter ou non la nouvelle solution

- Si la nouvelle solution est meilleure → on la garde comme meilleure solution, on remet le compteur de stagnation à 0
- Sinon → on avance quand même (c'est là la force de la recherche tabou : on accepte des solutions moins bonnes pour éviter de rester bloqué)

3. Détecter la stagnation (plateau)

Si l'algorithme n'améliore rien pendant 35 tours d'affilée, c'est qu'il tourne en rond. Dans ce cas, on perturbe la meilleure solution connue (on la secoue un peu) pour explorer une nouvelle zone.

La recherche tabou résout ça en mémorisant les derniers mouvements effectués et en les interdisant temporairement (ils sont "tabous"). Cette idée est gérée via le mécanisme de plateau + perturbation.

À la fin : On retourne la meilleure solution trouvée pendant toute la recherche.

Algorithm 5 Recherche Tabou

```

1:  $s \leftarrow$  solution initiale           ▶ Solution courante = solution de départ
2:  $s^* \leftarrow s$ ,  coût*  $\leftarrow$  évaluer( $s^*$ )           ▶ Meilleure solution connue
3: Initialiser la liste tabou  $\mathcal{T} \leftarrow \emptyset$        ▶ Aucun mouvement interdit au départ
4: plateau  $\leftarrow 0$                                      ▶ Compteur de stagnation
5: for  $it = 1$  to max_iter do                             ▶ Répéter jusqu'au budget d'itérations
6:   Choisir un voisinage  $\mathcal{N}$  (Relocate / 2-opt / Swap / Or-opt, en rotation) ▶
   Alternier les opérateurs pour diversifier l'exploration
7:    $s' \leftarrow$  meilleur voisin de  $s$  dans  $\mathcal{N}$  non interdit par  $\mathcal{T}$  ▶ Sélectionner le
   meilleur mouvement admissible
8:   if  $it \bmod 10 = 0$  then                                ▶ Correction périodique des déséquilibres de
   charge
9:     Rééquilibrer les routes sous-chargées dans  $s'$ 
10:  end if
11:  if coût( $s'$ ) < coût* then                               ▶ Amélioration globale trouvée
12:     $s^* \leftarrow s'$ ,  coût*  $\leftarrow$  coût( $s'$ )
13:    plateau  $\leftarrow 0$                                      ▶ Réinitialiser le compteur de stagnation
14:  else
15:    plateau  $\leftarrow$  plateau + 1                             ▶ Pas d'amélioration : incrémenter la
   stagnation
16:  end if
17:  Ajouter le mouvement effectué dans  $\mathcal{T}$  (tenure =  $\tau$ )   ▶ Interdire ce
   mouvement pendant  $\tau$  itérations
18:   $s \leftarrow s'$  ▶ Accepter le voisin même sans amélioration (évite les minima
   locaux)
19:  if plateau  $\geq$  plateau_limit then                       ▶ Stagnation trop longue : relancer
   depuis une solution perturbée
20:    Diversification :  $s \leftarrow$  perturber( $s^*$ )
21:    plateau  $\leftarrow 0$ 
22:  end if
23: end for
24: retourner  $s^*$                                            ▶ Meilleure solution trouvée sur toutes les itérations

```

I—Les opérateurs de l’algorithme génétique :

I.1—opérateur de sélection : Dans le domaine des algorithmes évolutionnaires, la sélection constitue un mécanisme central : elle désigne les individus appelés à se reproduire et à transmettre leurs gènes à la génération suivante. Son objectif est double : exercer une pression sélective suffisante pour orienter la recherche vers des solutions de meilleure qualité, tout en maintenant une diversité génétique propre à éviter une convergence trop précoce.

Parmi les stratégies de sélection couramment employées, **la sélection par tournoi** se distingue par sa facilité de mise en œuvre, sa robustesse et son indépendance par rapport à la mise à l’échelle des valeurs de fitness

La sélection par tournoi consiste à tirer aléatoirement k individus de la population courante, puis à sélectionner le meilleur d’entre eux (celui possédant la valeur de fitness la plus élevée) comme parent pour la reproduction. Ce processus est répété autant de fois que nécessaire pour constituer la nouvelle génération.[14]

I.1.1—Impact de la taille k sur la pression sélective : Le paramètre k (taille du tournoi) est le levier principal permettant de contrôler la pression sélective. Plus k est grand, plus la probabilité que le meilleur individu absolu de la population gagne le tournoi est élevée, ce qui intensifie la pression sélective. Inversement, un k faible ($k = 2$ au minimum) réduit cette pression et favorise l’exploration de l’espace de recherche.

Pour $k = 4$, la littérature scientifique et les résultats expérimentaux montrent un excellent compromis entre pression sélective et maintien de la diversité. C’est pourquoi cette valeur est fréquemment choisie comme valeur par défaut dans les implémentations pratiques des algorithmes génétiques.

I.1.2—Algorithme Détaillé :

Étape	Intitulé	Description
1	Initialisation	Disposer de la population courante $P = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ avec N individus, chacun associé à une valeur de fitness $f(I_i)$.
2	Tirage aléatoire	Sélectionner uniformément et aléatoirement $k = 4$ individus distincts de P , formant l'ensemble du tournoi $T = \{I_a, I_b, I_c, I_d\}$. Le tirage est généralement effectué sans remise pour garantir la diversité des candidats.
3	Évaluation comparative	Comparer les valeurs de fitness des 4 individus sélectionnés : $f(I_a), f(I_b), f(I_c), f(I_d)$. Dans un problème de minimisation, le vainqueur est l'individu ayant la plus petite valeur de fitness.
4	Sélection du vainqueur	Désigner le vainqueur : $I^* = \min_{I_i \in T} f(I_i)$. Cet individu est copié dans la population de parents P' pour la reproduction.
5	Répétition	Répéter les étapes 2 à 4 jusqu'à obtenir le nombre de parents nécessaires pour constituer la nouvelle génération (généralement N parents pour une population de taille N).

I.1.3—Exemple numérique complet — Minimisation

Considérons une population de $N = 10$ individus avec leurs valeurs de fitness respectives. Nous illustrons pas à pas l'exécution d'un tournoi de taille $k = 4$ dans un problème de minimisation (le plus petit fitness est le meilleur).

Population initiale ($N = 10$ individus)

Les individus (I_4, I_{10}, I_2, I_8) sont les 4 individus tirés aléatoirement lors du premier tournoi. Il s'agit ici des **quatre meilleurs individus** (plus petites valeurs de fitness).

Individu	Représentation (binaire)	Fitness $f(I_i)$	Rang relatif
I_4	00101101	31	1 ^{er} (meilleur)
I_{10}	01001001	42	2 ^e
I_2	01001110	45	3 ^e
I_8	00011010	54	4 ^e
I_6	01110001	63	5 ^e
I_9	10100110	68	6 ^e
I_1	10110100	72	7 ^e
I_7	11010010	79	8 ^e
I_3	11001010	88	9 ^e
I_5	10111110	95	10 ^e (moins bon)

TABLE 3.6 – Population initiale classée par ordre croissant de fitness

Déroulement du Premier Tournoi

Rappel : En minimisation, le **vainqueur** est l'individu ayant la **plus petite** valeur de fitness.

Candidat	Fitness	Classement dans le tournoi	Résultat
I_4	31	1 ^{er}	VAINQUEUR
I_{10}	42	2 ^e	Finaliste
I_2	45	3 ^e	Éliminé
I_8	54	4 ^e	Éliminé

TABLE 3.7 – Déroulement du Tournoi 1 ($k = 4$) — problème de minimisation

Conclusion du Tournoi 1 : L'individu I_4 (fitness = 31) remporte le tournoi et est sélectionné comme parent. Il sera utilisé dans les opérateurs de croisement et de mutation pour produire un descendant dans la génération suivante.

I.2—opérateur de croisement :

Après la sélection des parents par tournoi, l'étape suivante consiste à appliquer un opérateur de croisement pour produire des descendants. Parmi les opérateurs adaptés aux représentations de type permutation (problèmes d'ordonnancement, voyageur de commerce, etc.), le croisement OX (Order Crossover) est particulièrement efficace pour préserver l'ordre relatif des gènes.

I.2.1—Principe de l'opérateur OX : Soient deux parents P_1 et P_2 , chacun étant une permutation de taille L . Le croisement OX produit deux enfants E_1 et E_2 selon les étapes suivantes :

Choisir aléatoirement deux points de coupure c_1 et c_2 , avec $1 \leq c_1 < c_2 \leq L$.

Copier le segment $[c_1, c_2]$ de P_1 dans E_1 , exactement aux mêmes positions.

Remplir les positions restantes de E_1 en parcourant l'ordre des gènes de P_2 à partir de la position c_2+1 (en revenant au début si nécessaire), et en ignorant les gènes déjà présents dans le segment copié.

Appliquer le symétrique pour obtenir E_2 : copier le segment $[c_1, c_2]$ de P_2 dans E_2 , puis compléter avec l'ordre des gènes de P_1 . [15]

Exemple numérique

Reprenons les deux parents sélectionnés :

$P_1 =$

A	B	C	D	E	F	G	H
---	---	---	---	---	---	---	---

$P_2 =$

H	G	F	E	D	C	B	A
---	---	---	---	---	---	---	---

Les points de coupure sont : $c_1 = 3$ et $c_2 = 6$.

Construction de l'enfant E_1

Étape 1 : copie du segment de P_1

$E_1 =$

		C	D	E	F		
--	--	---	---	---	---	--	--

Étape 2 : parcours de P_2 et remplissage

On parcourt P_2 (en respectant l'ordre et en évitant C, D, E, F) :

H	G	F	E	D	C	B	A
---	---	---	---	---	---	---	---

Étape 3 : insertion dans les cases vides

$$E_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline B & A & C & D & E & F & H & G \\ \hline \end{array}$$

Construction de l'enfant E_2

Étape 1 : copie du segment de P_2

$$E_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & & F & E & D & C & & \\ \hline \end{array}$$

Étape 2 : parcours de P_1

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline G & H & C & D & E & F & A & B \\ \hline \end{array}$$

Étape 3 : insertion

$$E_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline G & H & F & E & D & C & A & B \\ \hline \end{array}$$

Résultat final

$$E_1 = (B, A, C, D, E, F, H, G) \quad ; \quad E_2 = (G, H, F, E, D, C, A, B)$$

II—Les opérateurs de mutation de metaheuristique hybride (AG+RT) :

Après l'étape de croisement, les enfants issus de la recombinaison génétique subissent une mutation. La mutation est un opérateur essentiel qui introduit de la diversité dans la population en modifiant aléatoirement certains gènes des individus. Elle est appliquée avec une faible probabilité pour éviter de détruire les bonnes solutions tout en permettant d'explorer de nouvelles régions de l'espace de recherche.

Nous avons utilisé ces quatre types de mutations pour les deux métaheuristique AG et RT : Mutation Swap ,Mutation 2opt ,Mutation OrOpt, Mutation Relocation. Ces quatre opérateurs ne sont pas redondants mais complémentaires.

Leur utilisation combinée permet à l'algorithme évolutionnaire d'explorer efficacement différentes régions de l'espace des solutions, d'éviter la convergence prématurée et d'affiner progressivement la qualité des tournées.[16]

II.1— Mutation Swap :

L'opération de *swap* (échange) est une transformation élémentaire qui consiste à permuter la position de deux éléments dans une structure de données, telle qu'un tableau ou une permutation.

Soit une séquence :

$$S = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

Un *swap* entre les positions i et j produit une nouvelle séquence S' définie par :

$$S' = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

où les éléments aux positions i et j sont échangés, tandis que les autres restent inchangés.

Exemple

Considérons la séquence suivante :

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Étape 1 : Choix des éléments à échanger (positions 2 et 4)

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Étape 2 : Après l'opération de swap

1	4	3	2	5
---	---	---	---	---

Résultat final :

$$S' = (1, 4, 3, 2, 5)$$

II.2—Mutation 2opt :

La mutation 2-*opt* est un opérateur de transformation . Elle consiste à améliorer une solution en supprimant deux arêtes (liens) et en reconnectant les segments obtenus de manière différente.

Soit une tournée représentée par la séquence :

$$S = (x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_j, x_{j+1}, \dots, x_n)$$

L'opération 2-opt consiste à :

- supprimer les arêtes (x_i, x_{i+1}) et (x_j, x_{j+1}) ,
- inverser l'ordre des éléments entre les positions $i + 1$ et j ,
- reconnecter la tournée pour obtenir une nouvelle solution S' .

La nouvelle séquence devient alors :

$$S' = (x_1, x_2, \dots, x_i, x_j, x_{j-1}, \dots, x_{i+1}, x_{j+1}, \dots, x_n)$$

Exemple :

Considérons la tournée suivante :

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

Étape 1 : Segment à inverser

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

Étape 2 : Après inversion

1	2	5	4	3	6
---	---	---	---	---	---

Résultat final :

$$S' = (1, 2, 5, 4, 3, 6)$$

II.3—Mutation Or-opt

La mutation *Or-opt* est un opérateur de transformation. Elle consiste à extraire une chaîne de k éléments consécutifs (généralement $k = 1, 2$ ou 3) et à la réinsérer dans une autre position de la séquence.

Soit une tournée :

$$S = (x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+k}, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

L'opération Or-opt consiste à :

- sélectionner une sous-chaîne de longueur k ,
- la supprimer de sa position initiale,
- la réinsérer après une autre position j .

La nouvelle solution S' est ainsi obtenue par déplacement de ce segment sans inversion.

Exemple illustratif

Considérons la séquence suivante :



Étape 1 : Sélection du segment ($k = 2$)



Étape 2 : Suppression du segment



Étape 3 : Réinsertion après la position 5



Résultat final :

$$S' = (1, 4, 5, 2, 3, 6)$$

II.4—Mutation Relocation

La mutation *Relocation* (ou déplacement) est un opérateur de transformation. Elle consiste à retirer un élément de sa position initiale et à le réinsérer dans une autre position de la séquence.

Soit une tournée :

$$S = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_n)$$

L'opération de relocation consiste à :

- sélectionner un élément x_i ,
- le supprimer de sa position initiale,
- le réinsérer après une autre position j .

La nouvelle solution S' est obtenue par déplacement de cet élément sans modifier l'ordre des autres éléments.

Exemple

Considérons la séquence suivante :

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Étape 1 : Sélection de l'élément à déplacer

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Étape 2 : Suppression de l'élément

1	2	4	5
---	---	---	---

Étape 3 : Réinsertion après la position 4

1	2	4	3	5
---	---	---	---	---

Résultat final :

$$S' = (1, 2, 4, 3, 5)$$

III—les Mécanismes Utilisés :

III.1—Élitisme :

L'élitisme 20% est une assurance qualité : quoi qu'il arrive pendant le croisement et la mutation, les meilleures solutions de la génération actuelle survivront toujours. Cela garantit que l'algorithme ne peut jamais oublier la meilleure solution qu'il a trouvée, tout en laissant 80% de la population libre d'explorer de nouvelles configurations.

III.2—Diversification par perturbation :

la diversification par perturbation intervient dans la Recherche Tabou , quand l'algorithme détecte un plateau (stagnation).

Quand 35 itérations consécutives n'apportent aucune amélioration, l'algorithme "secoue" la meilleure solution connue pour explorer une nouvelle région de l'espace de recherche.

Elle applique 4 mouvements aléatoires (relocations ou swaps inter-tournées) sans aucun critère de qualité — le but est justement de casser la structure locale.

III.3—Le rééquilibrage tous les 10 tours :

Parfois, certains véhicules se retrouvent presque vides pendant la recherche. Tous les 10 tours, **on redistribue les clients** pour mieux équilibrer les charges entre véhicules. Cela évite d'avoir un véhicule qui fait un long trajet pour 1 seul client.

3.6 Implémentation et Résultats obtenus

3.6.1 Environnement de développement

–CustomTkinter : bibliothèque d’interface graphique

–**Origine et contexte de développement** : CustomTkinter est une bibliothèque Python créée par Tom Schimansky dans le but d’améliorer l’aspect visuel de Tkinter, la bibliothèque graphique standard de Python. Bien que Tkinter soit appréciée pour sa simplicité d’utilisation, sa légèreté et sa stabilité, son apparence graphique est souvent jugée dépassée par rapport aux interfaces proposées par les frameworks modernes.

Pour répondre à cette limitation, CustomTkinter a été développée afin de fournir des composants graphiques plus esthétiques et adaptés aux standards actuels. Ses principaux objectifs sont les suivants :

- proposer une interface utilisateur moderne et attrayante;
- prendre en charge automatiquement les thèmes clair et sombre (Light/Dark Mode);
- améliorer l’apparence et l’ergonomie des widgets Tkinter;
- conserver la simplicité d’utilisation ainsi que la compatibilité avec les applications Tkinter existantes.

Grâce à ces caractéristiques, CustomTkinter est largement utilisée dans le développement d’applications de bureau en Python, dans les projets pédagogiques et dans la réalisation de prototypes d’interfaces modernes. [17]

–**Architecture interne de CustomTkinter** : L’architecture de CustomTkinter est fondée sur une approche orientée objet qui étend les fonctionnalités de Tkinter. La bibliothèque s’appuie sur les composants natifs de Tkinter comme base de fonctionnement, tout en y ajoutant des mécanismes de personnalisation graphique permettant de concevoir des interfaces plus modernes et ergonomiques.

Cette architecture est composée de plusieurs éléments essentiels :

- Widgets personnalisés : boutons, étiquettes (labels), champs de saisie (entries), cadres (frames), curseurs (sliders) et autres composants graphiques enrichis.

- Gestionnaire de thèmes : responsable de la définition et de l'application des styles, couleurs et thèmes de l'interface.

- Système d'apparence : assure la prise en charge des modes clair (Light Mode) et sombre (Dark Mode), avec un basculement automatique ou manuel.

- Moteur de rendu graphique : améliore l'aspect visuel des composants grâce à des fonctionnalités telles que les coins arrondis, les palettes de couleurs modernes et certains effets graphiques avancés.

La plupart des composants de CustomTkinter héritent directement des classes standard de Tkinter. Cette approche permet de conserver la compatibilité avec l'écosystème Tkinter tout en ajoutant de nouvelles fonctionnalités, notamment :

- des propriétés de style plus flexibles ;
- des paramètres graphiques avancés pour la personnalisation de l'interface ;
- une gestion améliorée des couleurs, des dimensions et de la mise en page des widgets.

Grâce à cette architecture, CustomTkinter offre un équilibre entre la simplicité de Tkinter et les exigences esthétiques des applications de bureau modernes.

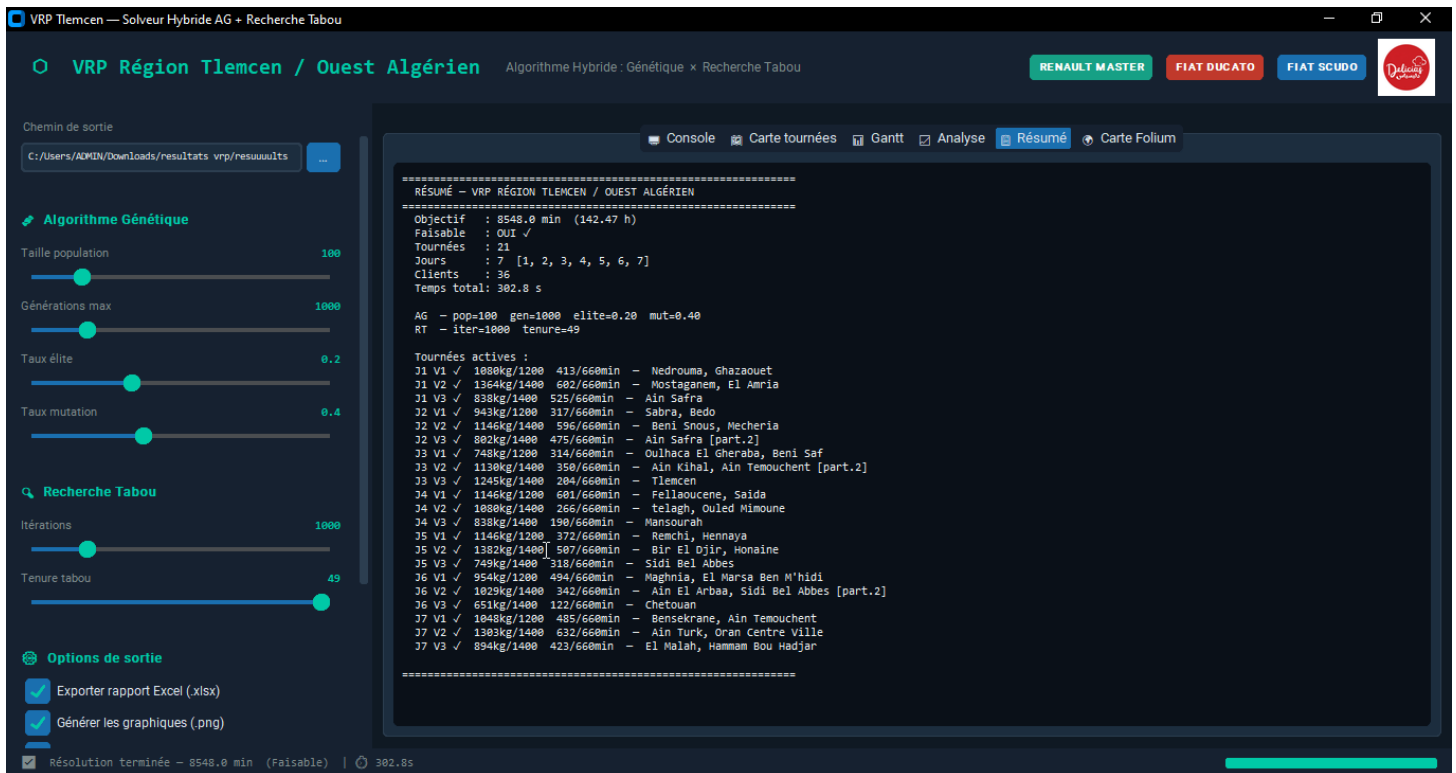


FIGURE 3.2 – Interface Customtkinter-Delicias

–Folium :bibliothèque de cartes interactives

Folium est une bibliothèque Python open-source développée pour faciliter la création de cartes interactives. Elle est construite au-dessus de la bibliothèque JavaScript **Leaflet.js**, très utilisée dans le développement web pour les cartes dynamiques.

Folium a été conçu pour :

- Simplifier la création de cartes interactives directement depuis Python
- Éviter l'utilisation directe de JavaScript
- Permettre l'intégration des cartes dans des notebooks (Jupyter) ou des applications web [18]

–Fonctionnement de Folium :

1–Création de la carte : On définit une carte avec une position initiale (latitude, longitude) Exemple : `folium.Map(location=[...])`

2-Ajout de couches (layers) : Marqueurs, Polygones, Heatmaps, GeoJSON

3-Génération HTML : Folium transforme la carte en fichier HTML interactif

4-Affichage : La carte s'affiche dans un navigateur ou notebook



FIGURE 3.3 – Folium-Delicias

3.6.2 Paramètres de résolution

Paramètre	Valeur
Taille de la population	100
Génération maximale	1000
Taux de mutation	40%
Taux de croisement	100%
Taux d'élitisme	20%
Itérations RT	1000
Temps maximal	660 min
Seuil de stagnation (plateau)	35

TABLE 3.8 – Paramètres de résolution

3.6.3 Planning des tournées

Les résultats de l'optimisation du VRP pour la région de Tlemcen / Ouest Algérien montrent une solution faisable et complète, couvrant l'ensemble des 7 jours de planification. Au total, 21 tournées actives ont été générées pour assurer la livraison de 21 515 kg de marchandises, avec un temps total cumulé de 8 569 minutes (142,82 heures). Chaque tournée respecte la contrainte de temps maximum imposée de 660 minutes par jour,

```
=====
RESULTATS - VRP REGION TLEMCEM / OUEST ALGERIEN
=====
Objectif (Temps total) : 8569.0 min (142.82 h)
Faisabilite globale   : OUI
Tournées actives      : 21
Jours utilises        : 7 [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]
Tmax (tous clients)   : 660 min

Poids total a livrer   : 21515.0 kg
Nb jours planifies     : 7
=====
```

FIGURE 3.4 – Résultats obtenus

JOUR 1

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : Hennaya, Remchi

Poids : 1145.83 / 1200 kg [OK]

Temps : 372.0 / 660 min (trajet 62.0 + svc 310.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Beni Snous, Mecheria

Poids : 1145.83 / 1400 kg [OK]

Temps : 596.0 / 660 min (trajet 416.0 + svc 180.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Mansourah

Poids : 837.90 / 1400 kg [OK]

Temps : 190.0 / 660 min (trajet 40.0 + svc 150.0) [OK]

JOUR 2

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : El Marsa Ben M'hidi, Maghnia

Poids : 953.68 / 1200 kg [OK]

Temps : 494.0 / 660 min (trajet 214.0 + svc 280.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Beni Saf, Oulhaca El Gheraba

Poids : 747.72 / 1400 kg [OK]

Temps : 314.0 / 660 min (trajet 154.0 + svc 160.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Ain Safra [part.2]

Poids : 801.60 / 1400 kg [OK]

Temps : 475.0 / 660 min (trajet 425.0 + svc 50.0) [OK]

JOUR 3

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : Ain Kihal, Ain Temouchent

Poids : 1185.18 / 1200 kg [OK]

Temps : 500.0 / 660 min (trajet 155.0 + svc 345.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Ain El Arbaa, Hammam Bou Hadjar

Poids : 998.57 / 1400 kg [OK]

Temps : 410.0 / 660 min (trajet 200.0 + svc 210.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Nedrouma, Ghazaouet

Poids : 1080.26 / 1400 kg [OK]

Temps : 413.0 / 660 min (trajet 173.0 + svc 240.0) [OK]

JOUR 4

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : Fellaoucene, Saida

Poids : 1145.83 / 1200 kg [OK]

Temps : 601.0 / 660 min (trajet 391.0 + svc 210.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Telagh, Ouled Mimoune

Poids : 1080.26 / 1400 kg [OK]

Temps : 266.0 / 660 min (trajet 156.0 + svc 110.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Tlemcen

Poids : 1245.25 / 1400 kg [OK]

Temps : 204.0 / 660 min (trajet 24.0 + svc 180.0) [OK]

JOUR 5

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : Sabra, Bedo

Poids : 943.31 / 1200 kg [OK]

Temps : 317.0 / 660 min (trajet 207.0 + svc 110.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Sidi Bel Abbès

Poids : 748.89 / 1400 kg [OK]

Temps : 318.0 / 660 min (trajet 138.0 + svc 180.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (2) : El Amria, Mostaganem

Poids : 1364.19 / 1400 kg [OK]

Temps : 602.0 / 660 min (trajet 342.0 + svc 260.0) [OK]

JOUR 6

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : Honaine, Chetouan

Poids : 788.24 / 1200 kg [OK]

Temps : 312.0 / 660 min (trajet 142.0 + svc 170.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Ain Safra

Poids : 837.90 / 1400 kg [OK]

Temps : 525.0 / 660 min (trajet 425.0 + svc 100.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (1) : Sidi Bel Abbès [part.2]

Poids : 681.59 / 1400 kg [OK]

Temps : 228.0 / 660 min (trajet 138.0 + svc 90.0) [OK]

JOUR 7

Vehicule 1 — FIAT SCUDO (cap. 1200 kg)

Clients (2) : El Malah, Ain Temouchent [part.2]

Poids : 1129.76 / 1200 kg [OK]

Temps : 376.0 / 660 min (trajet 166.0 + svc 210.0) [OK]

Vehicule 2 — FIAT DUCATO (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Bir El Djir, Bensekrane

Poids : 1350.66 / 1400 kg [OK]

Temps : 424.0 / 660 min (trajet 274.0 + svc 150.0) [OK]

Vehicule 3 — RENAULT MASTER (cap. 1400 kg)

Clients (2) : Oran Centre Ville, Ain Turk

Poids : 1302.58 / 1400 kg [OK]

Temps : 632.0 / 660 min (trajet 282.0 + svc 350.0) [OK]

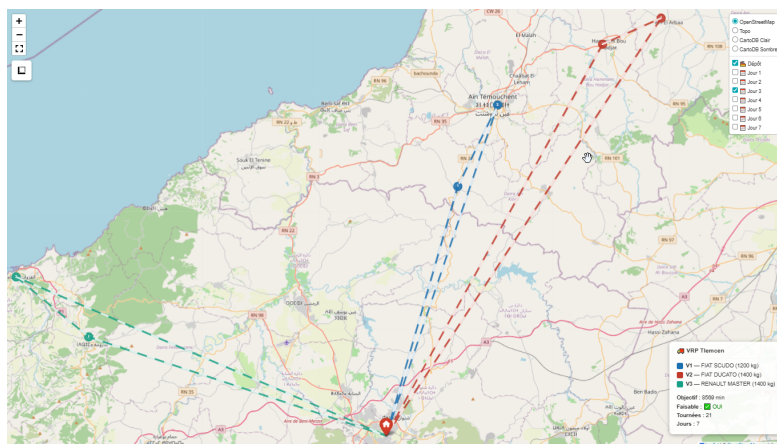


FIGURE 3.5 – la tournée de la 3e journée-Folium

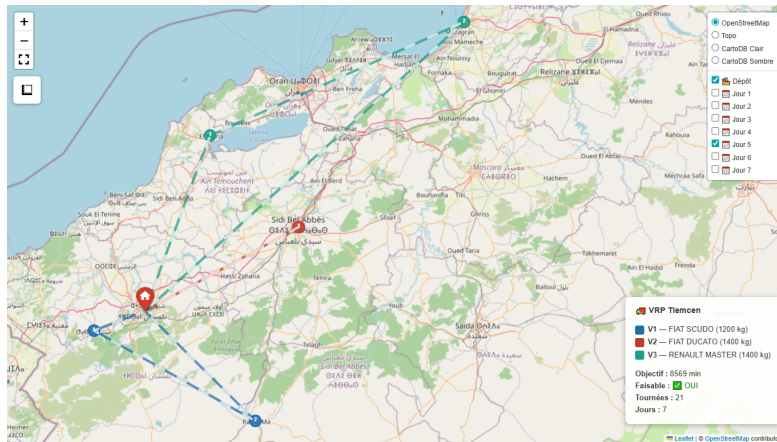


FIGURE 3.6 – la tournée de la 5e journée-Folium

3.6.4 Utilisation du temps de tournée

La plupart des tournées mobilisent entre 47% et 96% de la fenêtre temporelle disponible. Les tournées les plus tendues sont le Master J7 ($632/660 = 95.8\%$) et le Master J5 ($602/660 = 91.2\%$), laissant peu de marge en cas d'imprévu. À l'opposé, le Master J1 ($190/660 = 28.8\%$) et le Ducato J4 ($266/660 = 40.3\%$) sont très confortables, signalant une forte asymétrie entre les jours.

3.6.5 Répartition Temps de trajet vs Temps de service

Certaines tournées sont dominées par le temps de trajet pur (ex. Ducato J1 : 416 min de trajet pour seulement 180 min de service). Cela indique des destinations géographiquement très distantes (Mecheria, Aïn Safra). D'autres au contraire sont essentiellement du temps de service, comme le Scudo J1 (62 min de trajet, 310 min de service) — signe de clients proches mais nécessitant un long temps de service.

3.6.6 Livraisons en deux parties

Trois clients reçoivent une livraison fractionnée sur deux jours : Aïn Safra (J2 et J6), Aïn Temouchent (J3 et J7), et Sidi Bel Abbès (J5 et J6). Cela peut indiquer

des commandes trop volumineuses pour être traitées en une seule tournée, ou une contrainte de fenêtre horaire du client.

3.6.7 Vérification du respect des contraintes

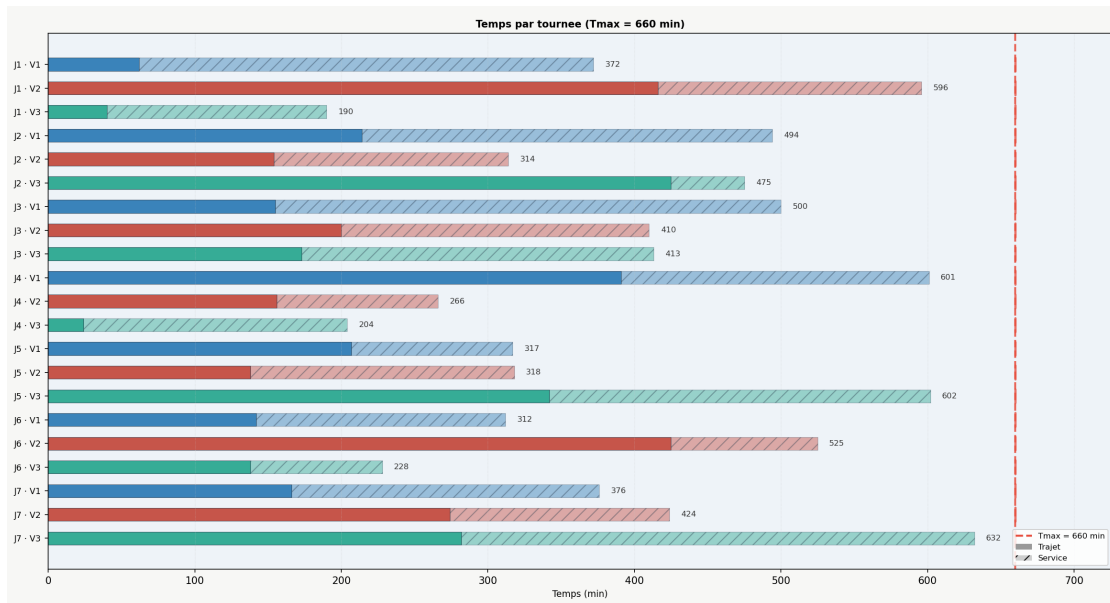


FIGURE 3.7 – temps par tournée de chaque véhicule

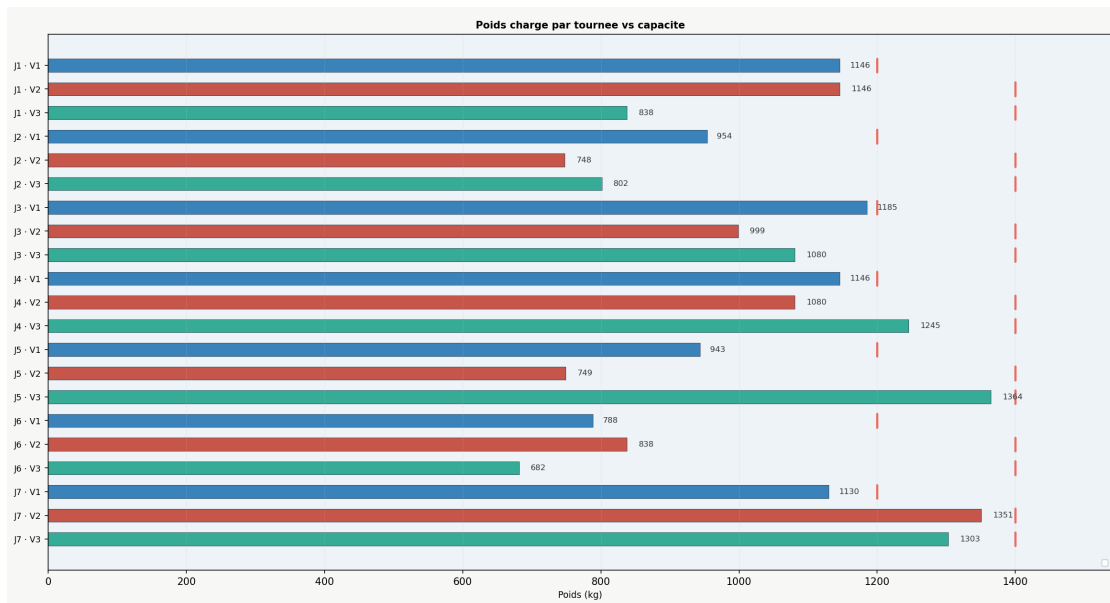


FIGURE 3.8 – poids chargé par chaque véhicule pour la tournée de chaque journée

D'après les figures 3.8 et 3.9, aucun véhicule ne dépasse sa capacité sur aucune journée. On observe cependant deux comportements distincts :

Véhicules bien chargés (>80% de capacité) :

J1-V1, J1-V2, J3-V1, J4-V3, J5-V3, J7-V2, J7-V3 — l'algorithme optimise bien le remplissage dans ces cas.

Véhicules sous-chargés (<60% de capacité) :

J1-V3 (838 kg / 1400 kg = 60%), J2-V2 (748 kg), J5-V2 (749 kg), J6-V3 (682 kg) — ces sous-utilisations sont imposées par la contrainte de temps (impossibilité d'ajouter un client sans dépasser 660 min) et non par manque de volume disponible.

Cela montre que la contrainte de temps est **plus restrictive** que la contrainte de capacité dans ce cas précis.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et à la résolution du problème de tournées de véhicules multi-jours et multi-produits appliqué à l'entreprise Delicias. Dans un premier temps, une description rigoureuse du problème a été établie, intégrant les contraintes réelles de l'entreprise : trois véhicules aux capacités distinctes, trente-trois zones géographiques, dix produits aux poids variables, et un horizon de planification calculé dynamiquement. Une formulation mathématique complète a ensuite été proposée, incluant la fonction objectif de minimisation du temps total, ainsi que les contraintes de couverture, de capacité, de temps maximal par tournée et d'élimination des sous-tours via la formulation MTZ. Pour résoudre ce problème de nature NP-difficile, une méta-heuristique hybride combinant un algorithme génétique et une recherche tabou a été développée et implémentée. L'algorithme génétique assure une exploration large de l'espace des solutions grâce aux opérateurs de sélection par tournoi, de croisement OX et de mutation variée, tandis que la recherche tabou affine localement la meilleure solution obtenue par des mouvements cycliques de voisinage. Des mécanismes complémentaires tels que l'élitisme, la diversification par perturbation et le rééquilibrage des charges ont renforcé l'efficacité globale de l'approche. Les résultats obtenus démontrent la pertinence de la solution proposée : un planning optimal sur **7 jours**, mobilisant **3 véhicules et 21 tournées** actives, permet de livrer la totalité des **21 515 kg** de marchandises tout en respectant strictement les contraintes de capacité et de temps. La visualisation des tournées via l'interface **CustomTkinter** et les cartes interactives **Folium** facilite l'interprétation et l'exploitation opérationnelle des résultats.

CONCLUSION

Ce travail a porté sur l'optimisation du système de distribution de l'entreprise agroalimentaire Delicias, à travers une modélisation et une résolution du problème de tournées de véhicules intégrant des dimensions multi-jours et multi-produits. L'objectif principal était de pallier les insuffisances de la planification empirique actuellement pratiquée par l'entreprise, en proposant une approche scientifique et structurée capable d'améliorer significativement les performances logistiques.

Le premier chapitre a fourni les fondements théoriques nécessaires à la compréhension des enjeux logistiques et du VRP. Il a mis en évidence le rôle stratégique de la logistique dans la compétitivité des entreprises, ainsi que la richesse des variantes et des méthodes de résolution du VRP développées dans la littérature. Cette base conceptuelle a constitué le socle indispensable à la démarche adoptée tout au long du travail.

Le deuxième chapitre a présenté en détail l'entreprise Delicias, son activité agroalimentaire, sa gamme de produits diversifiée et son organisation logistique. L'analyse du système de distribution existant a révélé des limites importantes : une planification fondée sur l'intuition, une sous-utilisation fréquente des capacités des véhicules, et une dispersion géographique importante des clients couvrant plusieurs wilayas de l'Ouest algérien. Ce diagnostic a justifié et motivé la mise en place d'un modèle d'optimisation formel.

Le troisième chapitre, cœur du travail, a proposé une modélisation mathématique complète du problème, puis une métaheuristique hybride combinant algorithme génétique et recherche tabou pour le résoudre efficacement. Les ré-

sultats obtenus sont probants : un planning faisable sur 7 jours, 21 tournées actives réparties entre 3 véhicules, et la livraison de 21 515 kg de marchandises dans le strict respect des contraintes de capacité et de temps.

L'implémentation au sein d'une interface graphique conviviale et la visualisation cartographique des tournées via Folium confèrent à la solution un caractère opérationnel immédiatement exploitable par l'entreprise.

Ce travail démontre ainsi que l'optimisation mathématique, loin d'être réservée aux grandes entreprises, constitue un levier accessible et efficace pour renforcer la performance logistique des PME en pleine croissance.

ANNEXE A

TEMPS DE TRAJET

Localités	Fellaoucene	Nedrouma	Ghazaouet	Honaine	El Marsa Ben M'hidi	Bensekrane	Telagh	Beni Snous
depot	43	69	77	66	97	38	49	60
Tlemcen	41	68	75	64	94	44	55	55
Ouled Mimoune	72	98	103	96	120	43	12	85
Hennaya	29	53	62	52	60	38	59	63
Sabra	37	64	80	72	82	72	95	51
Maghnia	43	43	66	85	62	73	92	52
Fellaoucene	0	29	44	45	83	59	81	84
Nedrouma	29	0	27	53	73	83	107	88
Ghazaouet	44	27	0	61	71	96	115	120
Honaine	45	53	61	0	125	72	104	113
El Marsa Ben M'hidi	83	73	71	125	0	113	131	115
Bensekrane	59	83	96	72	113	0	55	89
Telagh	81	107	115	104	131	55	0	96
Beni Snous	84	88	120	113	115	89	96	0
Bedo	66	64	82	107	76	95	111	51
Aïn Turk (Canastal)	127	153	142	129	201	113	132	182
Oran Centre Ville	129	151	160	129	200	112	110	180
Bir El Djir	121	146	155	122	195	107	107	175

TABLE A.1 – temps de trajet partie 2

Localités	Bedo	Aïn Turk	Oran Centre Ville	Bir El Djir
depot	75	135	120	129
Tlemcen	71	135	120	115
Ouled Mimoune	130	139	111	107
Hennaya	70	122	124	116
Sabra	46	150	147	142
Maghnia	27	156	154	150
Fellaoucene	66	127	129	121
Nedrouma	64	153	151	146
Ghazaouet	82	142	160	155
Honaine	107	129	129	122
El Marsa Ben M'hidi	76	201	200	195
Bensekrane	95	113	112	107
Aïn Tallout	111	132	110	107
Beni Snous	51	182	180	175
Beni Boussaid	0	175	173	170
Aïn Turk (Canastal)	175	0	27	38
Oran Centre Ville	173	27	0	16
Bir El Djir	170	38	16	0

TABLE A.2 – temps de trajet partie 3

Localités	depot	Tlemcen	Mansourah	Chetouan	Remchi
depot	0	12	20	11	27
Tlemcen	12	0	13	18	24
Mansourah	20	13	0	16	23
Chetouan	11	18	16	0	25
Remchi	27	24	23	25	0
Aïn El Arbaa	98	94	93	94	70
Aïn Kihal	62	65	66	60	45
Aïn Témouchent	71	70	68	70	45
Beni Saf	64	63	61	63	38
El Amria	90	89	88	89	64
El Malah	78	77	75	77	52
Hammam Bou Hadjar	87	86	85	85	60
Oulhaça El Gheraba	60	58	56	58	32

TABLE A.3 – temps de trajet partie 4

Localités	Aïn El Arbaa	Aïn Kihal	Aïn Témouchent	Beni Saf
depot	98	62	71	64
Tlemcen	94	65	70	63
Mansourah	93	66	68	61
Chetouan	94	60	70	63
Remchi	70	45	45	38
Aïn El Arbaa	0	51	34	60
Aïn Kihal	51	0	22	35
Aïn Témouchent	34	22	0	35
Beni Saf	60	35	35	0
El Amria	29	45	27	54
El Malah	27	33	17	40
Hammam Bou Hadjar	15	42	24	49
Oulhaça El Gheraba	76	49	49	30

TABLE A.4 – temps de trajet partie 5

Localités	El Amria	El Malah	Hammam Bou Hadjar	Oulhaça El Gheraba
depot	90	78	87	60
Tlemcen	89	77	86	58
Mansourah	88	75	85	56
Chetouan	89	77	85	58
Remchi	64	52	60	32
Aïn El Arbaa	29	27	15	76
Aïn Kihal	45	33	42	49
Aïn Témouchent	27	17	24	49
Beni Saf	54	40	49	30
El Amria	0	20	22	68
El Malah	20	0	18	57
Hammam Bou Hadjar	22	18	0	65
Oulhaça El Gheraba	68	57	65	0

TABLE A.5 – temps de trajet partie 6

Localités	depot	Saïda	Mécheria	Aïn Safra	Mostaganem	Sidi Bel Abbès
depot	0	165	240	185	158	69
Saïda	165	0	131	204	177	100
Mécheria	240	131	0	80	290	198
Aïn Safra	185	204	80	0	360	270
Mostaganem	158	177	290	360	0	108
Sidi Bel Abbès	69	100	198	270	108	0

TABLE A.6 – temps de trajet partie 7

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Council of Supply Chain Management Professionals, "Cscmp supply chain management definitions and glossary," 2013, consulté en 2026. [Online]. Available : <https://cscmp.org>
- [2] R. H. Ballou, *Business Logistics/Supply Chain Management*, 5th ed. Pearson Prentice Hall, 2004.
- [3] D. M. Lambert, M. C. Cooper, and J. D. Pagh, "Supply chain management : Implementation issues and research opportunities," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 1998.
- [4] A. Rushton, P. Croucher, and P. Baker, *The Handbook of Logistics and Distribution Management*, 7th ed. London, United Kingdom : Kogan Page, 2022.
- [5] P. Toth and D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, P. Toth and D. Vigo, Eds. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. [Online]. Available : <https://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/1.9780898718515>
- [6] G. Laporte, "Fifty years of vehicle routing," *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp. 408–416, 2009.
- [7] E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan, and D. B. Shmoys, *The Traveling Salesman Problem : A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Wiley, 1985.
- [8] Elsevier ScienceDirect, "Vehicle routing problem - topics in engineering," 2026. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vehicle-routing-problem>

- [9] S. Almoustafa, "Distance-constrained vehicle routing problem : exact and approximate solution (mathematical programming)," Ph.D. dissertation, Brunel University, School of Information Systems, Computing and Mathematics, 2013.
- [10] G. Laporte, "The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms," *European Journal of Operational Research*, vol. 59, no. 3, pp. 345–358, 1992. [Online]. Available : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179290192C>
- [11] —, "The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms," *European journal of operational research*, vol. 59, no. 3, pp. 345–358, 1992.
- [12] A. H. Gandomi, X.-S. Yang, S. Talatahari, and A. H. Alavi, "Metaheuristic algorithms," *Metaheuristic applications in structures and infrastructures*, pp. 1–24, 2013.
- [13] S. Bansal, "Issues in solving vehicle routing problem with time window and its variants using meta heuristics - a survey," 06 2013.
- [14] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [15] L. Davis, "Applying adaptive algorithms to epistatic domains," *Proceedings of IJCAI*, 1985.
- [16] A. E. Eiben and J. E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*. Springer, 2015.
- [17] T. Schimansky, "Customtkinter : Modern and customizable python ui-library based on tkinter," <https://customtkinter.tomschimansky.com/>, 2026, documentation officielle, consultée le 03/06/2026.
- [18] P.-V. Developers, "Folium documentation," <https://python-visualization.github.io/folium/latest/>, 2026, accessed : 2026-06-04.