

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie Industriel
L'entreprise ANEP Messagerie Express
Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie industriel
Option : Management Industriel

**Optimisation des tournées de distribution chez ANEP
Messagerie Express**

GRENDI Djaber

Sous la direction de : Mme Sofia AIT BOUAZZA MAA

Présenté et soutenu publiquement le (04/07/2023)

Composition du Jury :

| | | | |
|-----------|-----------------------|-----|-----|
| Président | Mme Bahia BOUCHAFAA | MCA | ENP |
| Examineur | M. Ali BOUKABOUS | MAA | ENP |
| Promoteur | Mme Sofia AIT BOUAZZA | MAA | ENP |

ENP 2023

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



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département du Génie Industriel
L'entreprise ANEP Messagerie Express
Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie industriel
Option : Management Industriel

**Optimisation des tournées de distribution chez ANEP
Messagerie Express**

GRENDI Djaber

Sous la direction de : Mme Sofia AIT BOUAZZA MAA

Présenté et soutenu publiquement le (04/07/2023)

Composition du Jury :

| | | | |
|-----------|-----------------------|-----|-----|
| Président | Mme Bahia BOUCHAFAA | MCA | ENP |
| Examineur | M. Ali BOUKABOUS | MAA | ENP |
| Promoteur | Mme Sofia AIT BOUAZZA | MAA | ENP |

ENP 2023

RÉSUMÉS ET MOTS CLÉS

مختصر:

تتطور خدمات البريد السريع في الجزائر على مر السنين وتواجه العديد من التحديات التي تتطلب مرونة واستجابة فائقة في معالجة الطلبات وبناءً على ذلك، يكتسب اختيار قناة التوزيع أهمية استراتيجية كبيرة ويجب أن يكون متوافقاً مع هذه التحديات.

الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تنفيذ سياسة الإدارة الجديدة لخدمات البريد السريع. سنقوم من خلال ملاحظة التحولات بتحليل ودراسة الأنشطة اللوجستية داخل شركة ANEP MESSAGERIE EXPRES لتحديد المشكلات وتوجيه الحالة الحالية .

بعد ذلك، سيتم اقتراح نموذج رياضي مناسب يلخص القيود الواقعية. ثم يتم حل النموذج باستخدام تقنيات ميتاهيريستيك مع تقييم أداء وصلاحيّة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الخوارزميات المقترحة. وأخيراً، يتعين تطوير لوحة القيادة لمراقبة والتحكم في أنشطة النقل.

الكلمات المفتاحية: تحسين تدفقات النقل، النمذجة الرياضية VRP، الخدمات اللوجستية، سلسلة التوريد

Abstract:

Express courier services in Algeria face increasing challenges that require flexibility and responsiveness in order processing. Consequently, the strategic selection of a distribution network aligned with these challenges is of paramount importance.

This project aims to implement a new management policy for express courier services. To achieve this, an analysis of the logistic activities of ANEP Messagerie Express will be conducted to diagnose problems and guide decision-making.

An appropriate mathematical model that encapsulates real constraints will be proposed and solved using metaheuristic techniques. The performance and validity of the results obtained from the proposed algorithms will be evaluated.

Finally, the development of a dashboard will enable monitoring and control of transportation activities.

Keywords: transport flow improvement, mathematical modeling, VRP (Vehicle Routing Problem), logistics services, supply chain.

Résumé :

Les services de messagerie express en Algérie font face à des défis croissants qui exigent flexibilité et réactivité dans le traitement des demandes. Ainsi, le choix d'un circuit de distribution stratégiquement aligné sur ces défis revêt une importance majeure.

Ce projet vise à mettre en œuvre une nouvelle politique de gestion des services de messagerie express. Pour cela, une analyse des activités logistiques de l'ANEP Messagerie Express sera réalisée afin de diagnostiquer les problèmes et guider les décisions.

Un modèle mathématique adéquat synthétisant les contraintes réelles sera ensuite proposé et résolu à l'aide de techniques de métaheuristique. Les performances et la validité des résultats obtenus par les algorithmes seront évaluées.

Enfin, le développement d'un tableau de bord permettra la surveillance et le contrôle des activités de transport.

Mots-clés : amélioration des flux de transport, modélisation mathématique, VRP (Vehicle Routing Problem), services logistiques, chaîne Logistique

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

À mes chers parents, qui ont toujours été là pour moi, m'encourageant et me soutenant dans toutes mes entreprises. Votre amour inconditionnel et vos sacrifices ont été une source d'inspiration tout au long de ma vie. Que Dieu vous protège et vous comble de bonheur.

Je dédie également cette réalisation à mes deux sœurs bien-aimées et à mon frère, qui ont toujours été présents pour moi, me soutenant dans les moments difficiles et partageant les joies de mes réussites. Votre présence et votre soutien ont été précieux pour moi, et je suis reconnaissant de vous avoir dans ma vie.

Je tiens à remercier mes amis, Dadi, Abd El Rahmane, Omar, Cherif, Wail, Abd El Karim, Lakhdar et Djamel, qui ont été à mes côtés tout au long de ce parcours. Votre amitié et votre soutien m'ont donné la force de persévérer et de me dépasser. Je suis honoré de vous avoir comme amis.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à tous mes professeurs qui m'ont enseigné et guidé durant mes études. Vos connaissances et votre expertise m'ont permis de grandir sur le plan académique et personnel.

À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à mon parcours et à la réalisation de ce travail, je vous adresse ma sincère reconnaissance. Votre aide et votre soutien ont été inestimables, et je suis reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi.

DJABER GRENDI

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma gratitude envers le bon Dieu de m'avoir accordé la vie, la santé et la volonté nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Madame Sofia AIT-BOUAZZA, ma promotrice et enseignante, pour son encadrement, son soutien constant, ses encouragements et ses précieux conseils tout au long de ce projet. Grâce à elle, j'ai pu donner le meilleur de moi-même et progresser dans mes compétences.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur DAHMANE, le directeur commercial de l'entreprise ANEP Messagerie Express. C'est grâce à lui que j'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage au sein de cette entreprise. Sa confiance en moi et son appui ont été essentiels pour l'accomplissement de mon projet.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur MOUHOUBI, mon encadrant au sein d'ANEP Messagerie Express. Ses conseils éclairés, sa disponibilité et son expertise m'ont permis d'approfondir mes connaissances et d'apporter une valeur ajoutée à mon travail. Sa collaboration et son soutien ont été inestimables.

Nous souhaitons vivement remercier les membres du jury de nous avoir honorés en acceptant d'examiner notre modeste travail.

Pour conclure, notre reconnaissance s'adresse à l'équipe pédagogique du Département Génie Industriel de l'École Nationale Polytechnique, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, et à tous ceux qui ont cru en nos capacités.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

| | | |
|---------|---|----|
| I. | INTRODUCTION GENERALE | 11 |
| II. | CHAPITRE 1 : ETUDE DE L'EXISTANT | 14 |
| II.1 | Présentation de la société ANEP Messagerie Express | 14 |
| II.1.1 | La naissance et le développement de L'ANEP Messagerie Express | 14 |
| II.1.2 | Structuration de l'entreprise..... | 15 |
| II.1.3 | Activité :..... | 16 |
| II.1.4 | Les moyens et infrastructures de l'ANEP Messagerie Express :..... | 16 |
| II.2 | Environnement de l'entreprise | 18 |
| II.2.1 | La logistique en Algérie | 18 |
| II.2.2 | Le marché du courrier express | 19 |
| II.3 | Diagnostics | 20 |
| II.3.1 | Analyse externe suivant les cinq forces de porter :..... | 20 |
| II.3.2 | Diagnostic interne | 22 |
| II.3.3 | Analyse Stratégique suivant la matrice SWOT | 36 |
| II.3.4 | Résultat du diagnostic | 38 |
| II.4 | Énoncé de la problématique | 38 |
| III. | CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART..... | 41 |
| III.1 | Problème de tournée de véhicule (VRP) | 41 |
| III.1.1 | Description du problème..... | 41 |
| III.1.2 | Formulation mathématique | 42 |
| III.1.3 | La complexité..... | 44 |
| III.1.4 | Les méthodes de résolution..... | 44 |
| III.1.5 | Les variantes du VRP : | 57 |
| IV. | CHAPITRE 3 : RÉOLUTION DE LA PROBLÉMATIQUE | 66 |
| IV.1 | La Modélisation mathématique | 66 |
| IV.1.1 | Description du problème..... | 66 |
| IV.1.2 | Formulation Mathématique..... | 67 |

| | | |
|--------|--|-----|
| IV.1.3 | Complexité du problème..... | 71 |
| IV.1.4 | Vérification et Validation du modèle..... | 72 |
| IV.2 | La résolution du modèle mathématique : | 76 |
| IV.2.1 | Choix de la méthode de la résolution :..... | 76 |
| IV.2.2 | Première solution : L’algorithme génétique (AG) :..... | 76 |
| IV.2.3 | Deuxième solution : MACS-VRPTW : | 80 |
| IV.3 | III.3 Expérimentation : | 84 |
| IV.3.1 | Présentation de l’outil et l’environnement de développement :..... | 84 |
| IV.3.2 | Résultats obtenus : | 85 |
| IV.3.3 | Analyse et critiques :..... | 88 |
| IV.3.4 | Jeux de données : benchmark de Solomon : | 89 |
| IV.4 | Elaboration d’un tableau de bord : | 92 |
| IV.4.1 | Phase 1 : Identification..... | 93 |
| IV.4.2 | Phase 2 : Conception..... | 93 |
| IV.4.3 | Phase 3 : Mise en œuvre | 99 |
| IV.4.4 | Phase 4 : Amélioration permanente | 99 |
| V. | Conclusion générale..... | 101 |
| VI. | Bibliographie..... | 104 |
| VII. | Annexes..... | 108 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Les moyens et infrastructure de l'ANEP Messagerie Express. | 17 |
| Tableau 2: Diagnostic externe de l'entreprise suivant les cinq forces de porter. | 20 |
| Tableau 3: périmètre des flux considérées..... | 25 |
| Tableau 4: Matrice SWOT (Forces/Faiblesses)..... | 37 |
| Tableau 5: Matrice SWOT (Opportunités/Menaces)..... | 37 |
| Tableau 6: Variantes du problème de tournée de véhicules et ses contraintes. | 57 |
| Tableau 7: classification des variantes de VRP selon le type de contraintes..... | 59 |
| Tableau 8: valeurs des fonctions objectives obtenues. | 88 |
| Tableau 9: résultat de benchmark de Solomon. | 91 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Organigramme de la société ANEP Messagerie Express..... | 15 |
| Figure 2:Récapitulatif des résultats du diagnostic externe. | 21 |
| Figure 3:Cartographie de niveau 1 du macro-processus transport..... | 25 |
| Figure 4: Cartographie de niveau 2 du macro-processus transport..... | 26 |
| Figure 5:Cartographie du processus de réalisation. | 27 |
| Figure 6:Modélisation du processus de la réalisation. | 28 |
| Figure 7:Cartographie du processus de gestion des chauffeurs. | 30 |
| Figure 8:Modélisation du processus de gestion des chauffeurs..... | 30 |
| Figure 9:Cartographie du processus gestion de la relation client. | 31 |
| Figure 10:Modélisation du processus de gestion de la relation client. | 31 |
| Figure 11:Cartographie globale du macro-processus du transport. | 32 |
| Figure 12 Analyse SWOT de l'entreprise..... | 36 |
| Figure 13:Schéma illustratif d'un VRP..... | 42 |
| Figure 14: Fonctionnement de l'algorithme de la recherche tabou. | 52 |
| Figure 15: Fonctionnement de l'algorithme de recuit simulé..... | 53 |
| Figure 16: Fonctionnement des algorithmes génétiques..... | 54 |
| Figure 17: Fonctionnement des algorithmes des colonies de fourmis. | 56 |
| Figure 18:Compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution (thèse, CADET, 2003, page 16)..... | 57 |
| Figure 19:représentation globale des variantes du VRP..... | 63 |
| Figure 20: déclaration des paramètres du modèle..... | 72 |
| Figure 21: procédure d'initialisation des paramètres..... | 73 |
| Figure 22: déclaration des variables de décision | 73 |
| Figure 23: les contraintes d'optimisation..... | 73 |
| Figure 24: boucle d'affichage de résultats | 74 |
| Figure 25: importation des données | 75 |
| Figure 26: résultat obtenu lors de l'exécution du programme..... | 75 |
| Figure 27: schématisation de la procédure de travail..... | 77 |
| Figure 28: : Algorithme de génération de la population initiale..... | 78 |
| Figure 29: Algorithme de croisement à un point k. | 79 |
| Figure 30: Algorithme de mutation..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| Figure 31: Architecture du système MACS-VRPTW. | 81 |
| Figure 32: Algorithme MACS-VRPTW..... | 81 |
| Figure 33: la procédure ACS-Time..... | 82 |
| Figure 34: la procédure ACS-VEI. | 84 |
| Figure 35: L'ordre de passage des véhicules pour les tournées..... | 86 |
| Figure 36: L'ordre de passage des véhicules pour les tournées..... | 87 |
| Figure 37: Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme génétique..... | 87 |
| Figure 38: Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme MACS..... | 88 |
| Figure 39: Les jeux de tests de Solomon pour le VRPTW..... | 90 |
| Figure 40:étapes d'élaboration d'un tableau de bord..... | 93 |
| Figure 41:Principaux KPI du tableau de bord sous power BI. | 100 |

Liste des abréviations

ACO : Ant Colony Optimization

ACS : Ant Colony System

AG : Algorithmes Génétiques

AME : Anep Messagerie Express

BI : Business Intelligence

BPMN: Business Process Model and Notation

CA : Chiffre d'affaire

CVRP : Capacitated Vehicle Routing Problem

FIFO : First In First Out

IBM : International Business Machines Corporation

IDE : Integrated Development Environment

KPI : Key Performance Indicator

MACS-VRPTW : Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows.

MTSP : Multiple Traveling Salesman Problem

NP : Non-deterministic Polynomial time

OPL : Optimization Programming Language

PL : Programmation Linéaire

PLNE : Programmation linéaire en nombres entiers

RO : Recherche Opérationnelle

SC : Supply Chain

TSP : Traveling Salesman Problem

VRP : Vehicle Routing Problem

VRPTW : Vehicle Routing Problem with Time Window

I. INTRODUCTION GENERALE

Le secteur de la logistique et du transport joue un rôle essentiel dans le développement économique et social d'un pays, notamment en Algérie. Afin de favoriser l'efficacité et la performance de ce secteur, les autorités algériennes ont entrepris des efforts pour moderniser les infrastructures de transport.

Dans ce contexte, les entreprises de messagerie express occupent une place cruciale en assurant un transport rapide et sécurisé des colis et des documents, permettant ainsi de connecter les régions éloignées, de stimuler le commerce international et de favoriser la croissance économique.

Ces entreprises ont connu une croissance rapide ces dernières années, principalement due à l'essor du commerce électronique et à l'augmentation des échanges commerciaux internationaux. Toutefois, cette expansion a également mis en évidence les défis auxquels est confronté le transport express, notamment en termes de coûts, de qualité de service et de durabilité environnementale.

Dans ce contexte, j'ai eu l'opportunité de participer à un projet spécifique au sein de l'entreprise Anep Messagerie Express. En tant que membre de l'équipe projet, j'ai contribué à la mise en œuvre d'une nouvelle politique de gestion des tournées de distribution. Plus concrètement, on tentera d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

Comment concevoir un outil qui permet d'établir des plans de transport optimaux afin de réduire les coûts de transport tout en minimisant le nombre total de voitures utilisées et rendre ainsi l'entreprise compétitive sur le marché ?

Dans un premier temps, nous allons réaliser une analyse approfondie des processus de transport actuels de l'entreprise. Cette analyse nous permettra de mettre en évidence les problèmes rencontrés par l'ANEP Messagerie Express et les domaines à améliorer. Nous allons également étudier les attentes et les besoins des clients en matière de transport de marchandises, afin de mieux comprendre leurs exigences.

Dans un deuxième temps, Nous avons procédé à diagnostiquer l'ensemble des processus de l'entreprise en utilisant l'approche processus et nous nous sommes efforcé de faire ressortir toutes les contraintes et les obstacles qui peuvent concourir à la lenteur des opérations entravant ainsi le bon fonctionnement du transport et, par voie de conséquence, impactant négativement l'efficacité de toutes les activités de l'entreprise.

Nous avons constaté que la complexité et la diversité des opérations de transport étaient des facteurs clés qui entraînaient des retards dans la livraison de marchandises, des coûts élevés, nous avons ainsi analysé les différentes phases du processus de transport, de la planification à la livraison, en passant par l'expédition, la réception et la distribution.

Afin de répondre à notre problématique, nous avons commencé par réaliser une modélisation mathématique du problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps (VRPTW) de manière précise et rigoureuse. Ensuite, nous avons utilisé deux méta-heuristiques pour résoudre le problème en raison de leur capacité à explorer efficacement l'espace de recherche et à trouver des solutions fiables dans des délais raisonnables. Enfin, nous avons développé un tableau de bord personnalisé pour l'entreprise afin de visualiser les tournées planifiées ainsi que les véhicules utilisés et d'autres informations.

L'idée de cette étude s'inscrit ainsi dans ce même contexte et à cet effet, nous avons structuré notre travail comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation des lieux : nous commençons par une présentation générale de l'entreprise et son secteur d'activité. Par la suite, nous présentons un diagnostic de sa chaîne logistique. Finalement, nous exposons d'une manière claire la problématique qui fait l'objet de ce travail.
- Nous présenterons dans le deuxième chapitre l'approche théorique qui nous semble être la plus appropriée pour cerner la problématique de l'amélioration des performances du processus de distribution.
- Nous consacrerons le troisième chapitre à notre apport personnel qui consiste à présenter notre méthode de résolution. Nous achèverons notre travail par une conclusion.

CHAPITRE 1 : ETUDE DE L'EXISTANT

II. CHAPITRE 1 : ETUDE DE L'EXISTANT

Introduction

Ce chapitre est divisé en trois parties distinctes :

La première partie consiste à présenter l'entreprise ANEP Messagerie Express, où nous avons effectué notre stage.

La deuxième partie a pour objectif de dresser un diagnostic interne et externe de l'entreprise, afin de déterminer les axes d'amélioration.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée à l'exposition de notre problématique

II.1 Présentation de la société ANEP Messagerie Express

II.1.1 La naissance et le développement de L'ANEP Messagerie Express

La société ANEP Messagerie Express, AME-Spa, filiale du groupe ANEP, fondée en 2000, spécialisée dans l'acheminement de courrier, colis et marchandises et la distribution de la presse nationale et étrangère.

L'AME, à travers ses cinq unités régionales (Alger, Oran, Constantine, Ghardaïa et Bechar) couvre l'ensemble du territoire national y compris les localités les plus éloignées du grand sud.

L'AME s'impose des délais d'acheminement du courrier, colis et marchandises qui varient entre J+1 et J+3 pour le grand sud.

L'entreprise « AME SPA » a été créée le 26 Janvier 2000 suite à la restructuration de l'EPE ANEP/Spa. L'entreprise « AME SPA » est actuellement une filiale de l'entreprise « ANEP/Spa ».

L'entreprise ANEP Messagerie express « AME SPA » est une entreprise publique économique qui opère dans le domaine de la messagerie express en Algérie. Créée en 2012, elle est sous la forme juridique d'une société par actions et est gérée par un Conseil d'Administration. ANEP Messagerie Express offre une gamme de services de transport de marchandises et de colis, de la collecte à la livraison en passant par le tri et l'acheminement, Le capital social s'élève à 110 000 000.00 DA.

II.1.2 Structuration de l'entreprise

L'entreprise dispose de trois (03) structures centrales au niveau du siège et de 05 structures opérationnelles réparties par régions (unité centre à Alger - unité Est à Constantine - unité Ouest à Oran – unité sud-est à Ghardaïa – unité sud-ouest à Béchar).

Les structures régionales nord et sud ne sont pas organisées de la même manière en raison de leurs niveaux d'activités.

Les directions régionales du nord sont structurées en trois (03) départements (commercial – administration – finances et comptabilité) lesquels disposent chacun de trois (03) services.

En revanche les directions régionales du sud sont structurées en trois (03) services (commercial – Ressources humaines et moyens généraux – finances et comptabilité) suivies de sections.

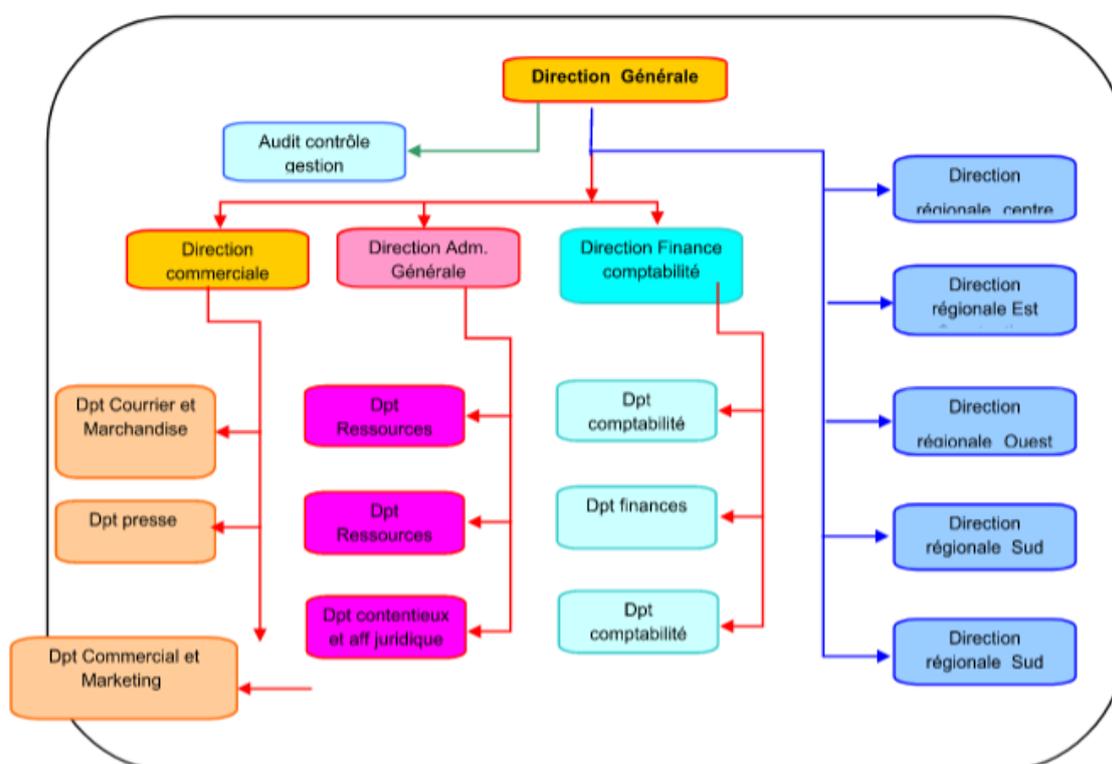


Figure 1 : Organigramme de la société ANEP Messagerie Express

II.1.3 Activité :

- La Collecte, le Tri et la distribution du courrier et colis à travers tout le territoire national
- Le transport de la marchandise à travers tout le territoire national
- Distribution de la presse
- **La Collecte, le Tri et la distribution du courrier et colis à travers tout le territoire national**

L'activité de l'acheminement du courrier est conclue par des contrats signés entre l'ANEP Messagerie Express- AME et ses clients.

La quasi-totalité du personnel de la Messagerie Express intervient jusqu'au moindre hameau perdu dans la campagne et dans les délais les plus courts.

- **Le transport de la marchandise à travers tout le territoire national**

L'activité de distribution du courrier domestique de l'ANEP MESSAGERIE EXPRESS a pour mission la livraison de la marchandise à travers tout le territoire national.

- **La Distribution de la presse (journaux et revues)**

L'activité abonnement presse de l'ANEP MESSAGERIE EXPRESS a pour mission la livraison à domicile de la presse Nationale et Internationale sous forme d'abonnement.

Le service Abonnement possède un portefeuille clientèle non négligeable parmi celles-ci, les Entreprises publiques et privées.

Dotée de moyens humains importants, jouissant d'un capital expérience appréciable et de moyens matériels considérables permettant de rapprocher l'information du client, l'AME ne ménage aucun effort, d'abord, pour fidéliser son actuelle clientèle, étendre son activité par l'élargissement de son réseau à travers l'attrait d'une clientèle nouvelle.

II.1.4 Les moyens et infrastructures de l'ANEP Messagerie Express :

Le **tableau 1** regroupe les différentes informations concernant les moyens et les infrastructures dont dispose ANEP Messagerie Express.

Tableau 1: Les moyens et infrastructure de l'ANEP Messagerie Express.

| | |
|--|--|
| <p>Implantations nationales</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Présence dans 58 wilayas à travers le territoire nationale. ● Plus de 2000 sites desservis. ● Plus de 500 clients. ● 1800 dissertes. ● 5 unités régionales : Alger, Oran, Constantine, Ghardaïa, Béchar ● 3 centre de liaison : Chlef, Biskra, et Djelfa ● 5 bureaux de liaison : Tamanrasset, illizi, Adrar, Tindouf et El Bayadh |
| <p>Capital humain</p> | <p>600 employés. dont 152 conducteurs titulaires du Brevet Professionnel Conducteur</p> |
| <p>Flotte propre</p> | <p>L'entreprise dispose d'une flotte de, plus de 200 véhicules (des fourgonnettes et des motos) pour transporter les colis et les courriers.</p> <p>Les conducteurs sont formés et qualifiés pour conduire ces véhicules en toute sécurité, tout en respectant les délais de livraison.</p> <p>Chaque conducteur est accompagné d'un préposé qui est chargé d'aider à la manutention des colis et de s'assurer que les colis sont livrés à la bonne adresse.</p> |
| <p>Centre de tri</p> | <p>L'entreprise dispose d'un centre de tri où les colis et les courriers sont triés, organisés et acheminés vers leur destination. Le personnel qui travaille dans le centre de tri est formé pour utiliser les scanners et les systèmes de tri automatisés pour accélérer le processus et minimiser les erreurs.</p> |

| | |
|---------------------------------|--|
| <p>Moyens techniques</p> | <ul style="list-style-type: none"> ● Géolocalisation ● Système de suivi et de traçabilité ● Scanners de codes-barres ● Véhicules de livraison spéciaux ● 5 Centres de maintenance technique |
|---------------------------------|--|

II.2 Environnement de l'entreprise

L'environnement de l'entreprise est un élément clé à prendre en compte pour assurer sa performance et son développement.

Dans le cas de l'entreprise ANEP Messagerie Express, qui opère dans le secteur de la logistique en Algérie, l'analyse de l'environnement est particulièrement importante compte tenu des particularités de ce marché.

II.2.1 La logistique en Algérie

La logistique est un secteur clé pour le développement économique d'un pays. En Algérie, ce secteur connaît une croissance continue depuis plusieurs années, notamment grâce à l'augmentation des échanges commerciaux avec l'étranger. Malgré cette croissance, la logistique en Algérie reste encore en deçà des standards internationaux et présente encore de nombreuses contraintes.

Le paysage logistique en Algérie se compose principalement d'entreprises de transport, de transitaires et de commissionnaires de transport. Ces prestataires sont souvent de petites et moyennes entreprises (PME) qui peinent à répondre aux exigences des clients en termes de qualité de service, de fiabilité et de flexibilité.

Le secteur de la logistique en Algérie est également confronté à des défis tels que l'insuffisance des infrastructures de transport, la bureaucratie et la complexité des formalités douanières, ainsi que la faiblesse du niveau de formation des travailleurs du secteur.

Cependant, le gouvernement algérien a entrepris des efforts pour améliorer la situation de la logistique dans le pays. Plusieurs projets d'investissement ont été lancés pour moderniser les infrastructures de transport, notamment la construction de nouvelles autoroutes et de ports.

En outre, des réformes ont été entreprises pour simplifier les procédures douanières et encourager la création d'entreprises logistiques plus performantes.

II.2.2 Le marché du courrier express

Le marché du courrier express affiche une bonne santé. Il s'agit d'un secteur à très haute valeur ajoutée puisqu'il offre aux opérateurs la possibilité de transporter leurs documents et colis dans des délais record.

L'ouverture des pays sur l'économie mondiale, la globalisation dont les opérateurs sont une des conséquences les plus évidentes, développent inévitablement le marché du fret express. Les entreprises dans le monde, entre autres en Algérie, ne sauraient d'ailleurs plus se passer des avantages de l'express, devenu un véritable outil de gestion sur un marché en constante expansion. Si, au départ, ces opérateurs transportaient essentiellement des documents et des pièces détachées, un autre marché s'est rapidement développé : celui des colis et des gros poids.

Les entreprises ont vite compris tout l'intérêt du fret express dans un marché où la réactivité, le just-in-time ont devenus des conditions sine qua non de réussite.

D'autant plus que ces intermédiaires prennent en charge toute la gestion administrative de l'envoi, notamment les formalités administratives et libèrent ainsi l'entreprise d'une paperasserie trop coûteuse en temps et en énergie.

Ainsi, quant au regard à porter sur le marché de l'express, il s'agit d'un véritable baromètre de l'économie de chaque pays et donc de l'Algérie. De plus, depuis l'arrivée de la concurrence, les perspectives de développement sont manifestes.

La bataille est donc lancée. Une guerre à coups de tarifs et de délais de livraison de plus en plus courts est déclarée au grand bonheur des clients.

Le développement de l'activité incite la profession à vouloir mieux s'organiser. Les opérateurs veulent en effet accorder leurs violons et mieux défendre leurs intérêts.

Soutenu par la très forte croissance du e-commerce, le chiffre d'affaires du secteur progresse tant en valeur qu'en volume. Toutefois, les professionnels du secteur sont confrontés à une profonde mutation structurelle depuis plusieurs années.

Dans ce contexte, les entreprises du secteur doivent à la fois diversifier leur clientèle et leurs activités mais aussi constamment innover en termes de services (réduction des délais de livraison, traçabilité des envois en temps réel, options de livraisons, flexibilité, etc.). Le secteur est segmenté par les professionnels selon :

Selon le type d'activité :

- **La messagerie traditionnelle** : concerne la collecte et la livraison d'envois de moins de trois tonnes dans un délai supérieur à 24 heures.
- **Le fret express** : Concerne la collecte et la livraison d'envois de moins de trois tonnes dans un délai inférieur à 24 heures.

- **Les coursiers urbains :** Acheminement des lettres, colis et petits paquets de moins de 30 kilos dans un délai de quelques heures. Les tournées sont régulières ou à la demande.

Selon le type de clientèle :

Les entreprises constituent le principal débouché des entreprises du secteur.

On distingue deux marchés : la livraison en provenance d'entreprises et à destination d'entreprises (B to B) et la livraison en provenance d'entreprises et à destination des particuliers (B to C).

Peu d'entreprises de messagerie réalisent des livraisons de particulier à particulier (C to C), La Poste demeurant le transporteur privilégié sur ce marché.

II.3 Diagnostics

Cette section de notre étude consistera en une évaluation exhaustive de la société ANEP Messagerie Express, en utilisant les cinq forces de Porter et de la matrice SWOT pour l'analyse externe, ainsi que la cartographie des processus pour l'analyse interne.

II.3.1 Analyse externe suivant les cinq forces de porter :

L'analyse repose sur les 5 axes suivants : l'intensité de la concurrence, le pouvoir de négociation des clients, le pouvoir de négociation des fournisseurs, la menace des nouveaux entrants et la menace des produits de substitution. Il a mené aux observations suivantes :

Tableau 2: Diagnostic externe de l'entreprise suivant les cinq forces de porter.

| Forces | Observation |
|--------------------------------------|--|
| Menace des nouveaux entrants. | <p>Forte</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Barrière à l'entrée pour exercer l'activité ● Il est relativement facile pour de nouveaux concurrents d'entrer sur le marché algérien de la messagerie express. |
| Menace des fournisseurs. | <p>Faible</p> <ul style="list-style-type: none"> ● ANEP Messagerie Express a une capacité de négociation supérieure grâce à sa taille et à sa présence sur le marché. |

| | |
|---|---|
| Menaces du pouvoir de négociation des clients. | Forte <ul style="list-style-type: none"> Les clients peuvent facilement |
| Menace des produits de substitution | Faible <ul style="list-style-type: none"> Inclure les services postaux (La commodité et la rapidité offertes par l'entreprise est une option attrayante pour de nombreux clients, ce qui peut limiter la menace des produits de substitution.) |
| Menace de l'intensité concurrentielle. | Forte <ul style="list-style-type: none"> Une forte concurrence entre les entreprises de messagerie express en Algérie |

Les résultats du diagnostic externe ont été regroupés dans la figure suivante, sous forme d'un diagramme afin de mieux observer et comparer les différentes dimensions :

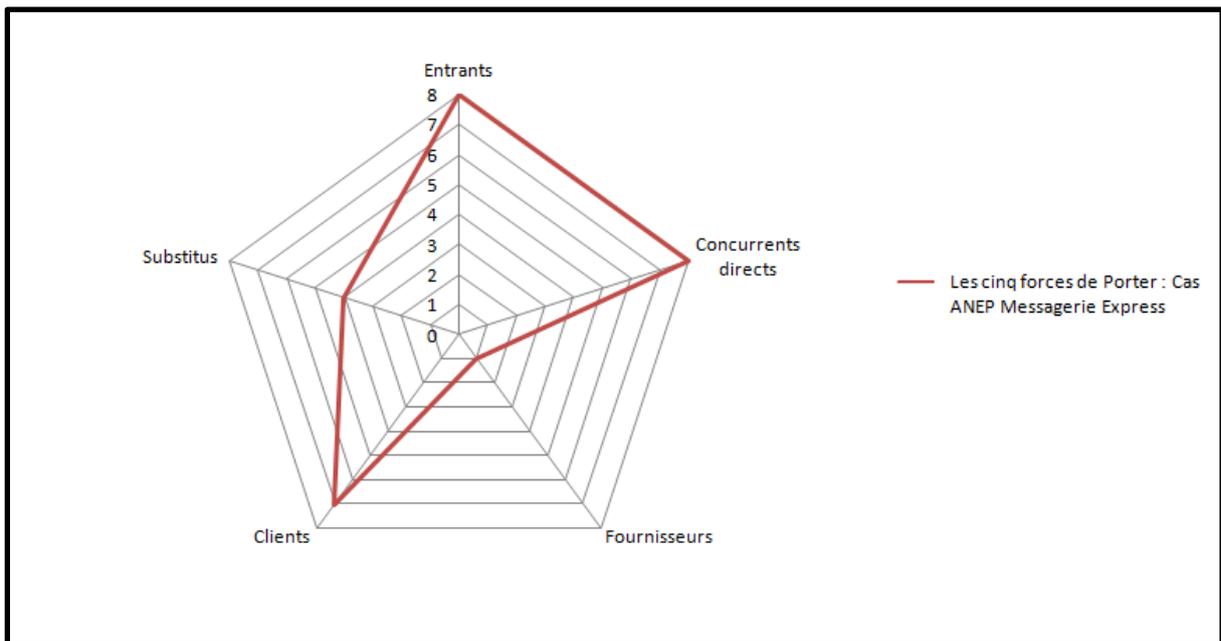


Figure 2: Récapitulatif des résultats du diagnostic externe.

Résultat de l'analyse :

Nous pouvons voir que le marché de la messagerie express est très compétitif.

Cependant, ANEP Messagerie Express bénéficie d'un avantage concurrentiel en raison de sa notoriété et de son expérience sur le marché algérien (Depuis 2000).

De plus, la commodité et la rapidité offertes par les services de messagerie express sont des avantages clés pour de nombreux clients, ce qui peut limiter la menace des produits de substitution.

II.3.2 Diagnostic interne

Dans cette partie de notre analyse, nous allons nous concentrer sur l'analyse interne de l'entreprise ANEP Messagerie Express. Cette analyse permettra d'évaluer les ressources et les capacités de l'entreprise afin d'identifier ses forces et ses faiblesses. Pour effectuer l'analyse interne, Nous avons utilisé une approche processus conforme à la norme ISO 9001 en modélisant les processus à l'aide du BPMN. Voici les étapes que nous avons suivies dans cette démarche :

Etape 1 : Identification des processus et Le cadrage du champ d'analyse

Nous avons identifié trois macro-processus pour l'entreprise :

le processus de réalisation, le processus de gestion des chauffeurs et le processus de relation client.

Nous allons maintenant compléter l'identification de ces processus en détaillant leurs activités spécifiques.

- **Processus de réalisation :**

Ce processus concerne la réalisation des tournées de distribution chez ANEP Messagerie Express.

Il englobe les activités suivantes :

- Planification des tournées : Élaboration d'un plan de distribution en fonction des commandes et des zones géographiques à couvrir.
- Préparation des colis : Préparation des colis à livrer, y compris l'emballage adéquat et l'étiquetage approprié.

- Affectation des chauffeurs aux tournées : Attribution des chauffeurs aux tournées planifiées, en tenant compte des compétences, de la disponibilité et des contraintes de temps.
- Exécution des livraisons : Réalisation des livraisons selon les tournées prévues, en respectant les horaires et en assurant la satisfaction des clients.
- Gestion des retours : Traitement des retours de marchandises, y compris la gestion des retours pour remplacement ou remboursement.
- **Processus de gestion des conducteurs :**

Ce processus se concentre sur la gestion des chauffeurs d'ANEP Messagerie Express. Il englobe les activités suivantes :

- Recrutement et sélection des chauffeurs : Identification des besoins en chauffeurs, publication d'offres d'emploi, sélection des candidats qualifiés et réalisation des entretiens d'embauche.
- Formation et développement des compétences : Mise en place de programmes de formation initiale et continue pour les chauffeurs, visant à améliorer leurs compétences techniques et comportementales.
- Gestion des horaires et des congés : Planification des horaires de travail des chauffeurs, gestion des congés et des absences pour assurer une couverture adéquate.
- Évaluation des performances : Réalisation d'évaluations régulières des performances des chauffeurs, en se basant sur des critères prédéfinis et des retours d'expérience.
- Gestion des problèmes et des plaintes : Traitement des problèmes liés aux chauffeurs, résolution des plaintes des clients et mise en place de mesures correctives.
- **Processus de gestion de la relation client :**

Ce processus concerne la gestion des relations avec les clients d'ANEP Messagerie Express. Il englobe les activités suivantes :

- Prise des commandes : Réception des commandes des clients, vérification de leur exactitude et enregistrement dans le système.
- Communication avec les clients : Fourniture d'informations aux clients sur leurs commandes, suivi des livraisons et gestion des demandes spécifiques.
- Résolution des problèmes et des plaintes : Réponse aux problèmes rencontrés par les clients, traitement des plaintes et mise en place d'actions correctives.

- Gestion des demandes spéciales : Prise en compte des demandes spéciales des clients, telles que les conditions de livraison particulières ou les exigences spécifiques.
- Collecte des commentaires des clients : Obtention des retours d'expérience des clients, réalisation de sondages de satisfaction et analyse des résultats.

Après avoir identifié les processus, nous allons définir les bornes des flux à examiner. Cette définition des bornes de flux permettra de délimiter le champ d'application de la chaîne logistique qui sera prise en compte dans notre analyse.

La société ANEP Messagerie Express /AME-SPA dispose de trois (03) Directions Centrales au niveau siège et de 05 Unité Régionales à savoir, Unité Centre à Alger, Unité Est à Constantine, Unité Ouest à Oran, Unité Sud-Est à Ghardaïa, Unité Sud-Ouest à Béchar.

ANEP Messagerie Express est présente dans 58 wilayas en Algérie. Elle dessert plus de 2000 sites à travers le territoire national avec l'aide de plus de 200 véhicules. Grâce à sa flotte de 1800 dissertes, A partir de cela, nous pouvons définir les bornes de flux comme suit :

- 1) Organisation :** Nous allons limiter l'analyse aux opérations de transport seulement, donc nous allons concentrer sur les différentes activités liées au transport de la société, telles que la planification des itinéraires, l'affectation des véhicules, la gestion des chargements et déchargements, le suivi des livraisons, etc.
- 2) Géographie :** ANEP Messagerie Express est présente dans 58 wilayas en Algérie. Elle dessert plus de 2000 sites à travers le territoire national avec l'aide de plus de 200 véhicules. Grâce à sa flotte de 1800 dissertes, donc aucune limite particulière n'a été fixée
- 3) Service :** L'entreprise ANEP Messagerie express est une entreprise publique économique qui opère dans le domaine de la messagerie express en Algérie. Elle offre une gamme de services de transport de marchandises et de colis, de la collecte à la livraison en passant par le tri et l'acheminement. L'entreprise dispose d'une flotte de, plus de 200 véhicules (des fourgonnettes et des motos) pour transporter les colis et les courriers.

Nous pouvons ressortir la définition des bornes de flux rempli dans le contexte de l'ANEP Messagerie Express dans le tableau suivant :

Tableau 3: périmètre des flux considérés.

| | |
|---------------------|---|
| Organisation | Entreprise de transport |
| Géographie | Aucune limite fixée |
| Service | services de transport de marchandises et de colis, de la collecte à la livraison en passant par le tri et l'acheminement. |

Étape 2 : Cartographier les processus

Maintenant que nous avons identifié les processus, nous pouvons passer à l'étape de cartographie des processus. Cette étape consiste à représenter graphiquement les différentes étapes de chaque processus et à identifier les interactions entre eux

En analysant l'opération de transport des courriers au sein de l'entreprise Anep messagerie express, il est possible de déduire la cartographie des macro-processus transport de l'entreprise :

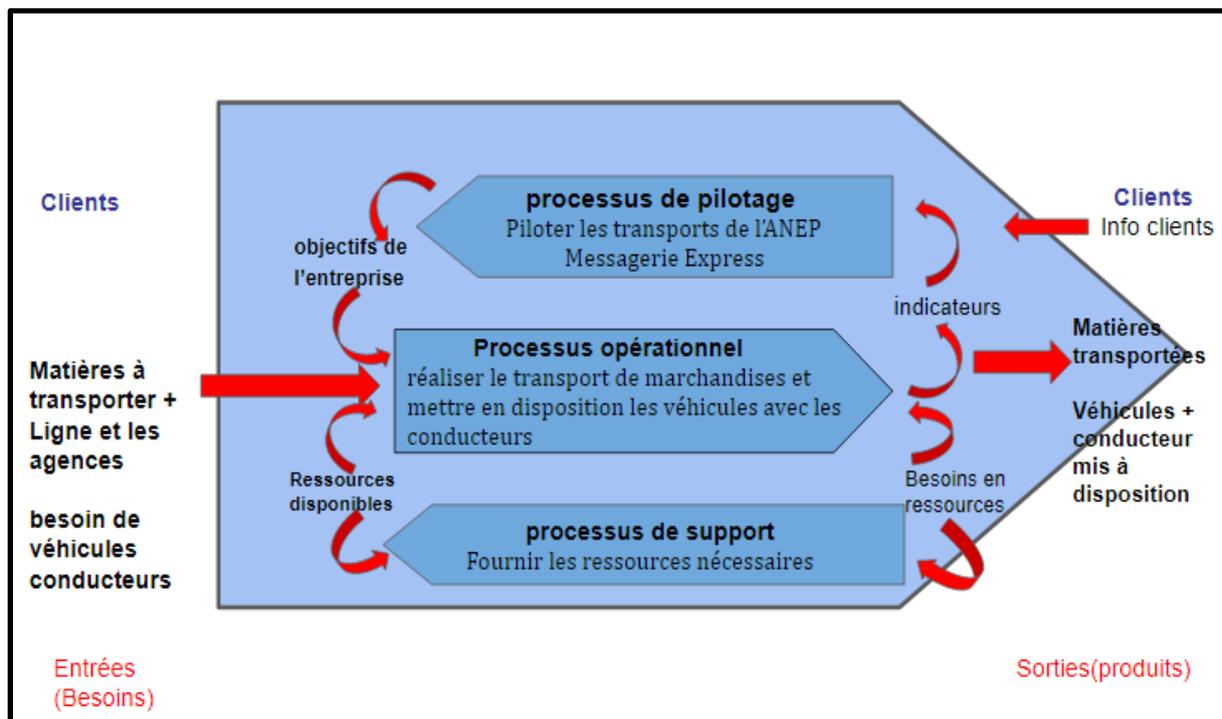


Figure 3: Cartographie de niveau 1 du macro-processus transport.

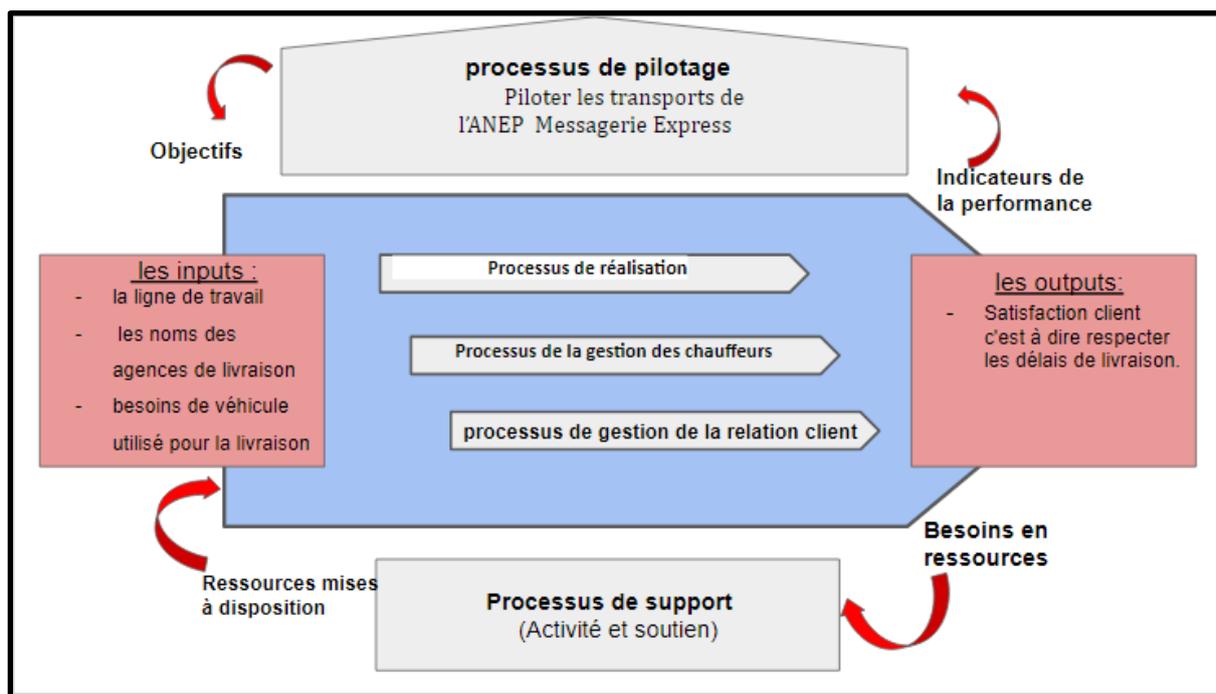


Figure 4: Cartographie de niveau 2 du macro-processus transport.

Etape 3 : description détaillée de chaque processus

Maintenant que nous avons cartographié les processus, passons à l'étape de description détaillée de chaque processus. Cette étape consiste à fournir une vue d'ensemble claire de chaque processus, en décrivant les objectifs, les ressources nécessaires, les activités spécifiques, les indicateurs de performance clés

et la valeur ajoutée, ce que le processus apporté de bénéfique à l'entreprise :

- Les principales macro-activités (les grandes étapes ou tâches qui composent le processus)
- Les outils, les ressources, les personnes impliquées dans le processus
- Comment le processus s'articule avec les autres processus importants de l'entreprise, afin de garantir une cohérence et une efficacité globale.

1. Processus de réalisation :

Les conducteurs reçoivent des informations détaillées sur la ligne de travail qu'ils doivent accomplir, y compris les noms des agences de livraison associées à cette ligne de travail, plan de transport et le véhicule qu'ils doivent utiliser pour la livraison.

Cela permet aux conducteurs d'avoir une vision claire de leur mission et de mieux se préparer pour l'accomplir. En outre, le fait de leur attribuer un véhicule spécifique leur permet d'être plus efficaces dans leurs déplacements et de mieux respecter les délais de livraison.

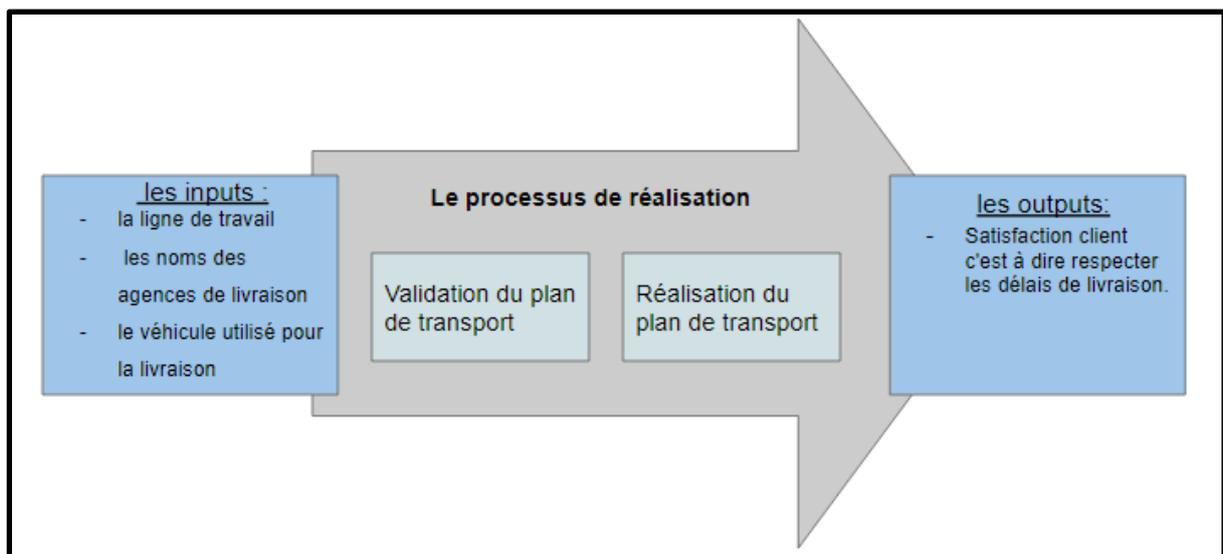


Figure 5: Cartographie du processus de réalisation.

● La validation du plan de transport

Consiste à vérifier que le plan de transport est conforme aux exigences de la commande, que les agences de livraison sont correctement identifiées, que les produits sont correctement étiquetés et que les délais de livraison sont respectés. Cette étape est effectuée par le responsable logistique qui vérifie les données de la commande et les compare avec les ressources disponibles, les horaires de travail, les itinéraires, etc.

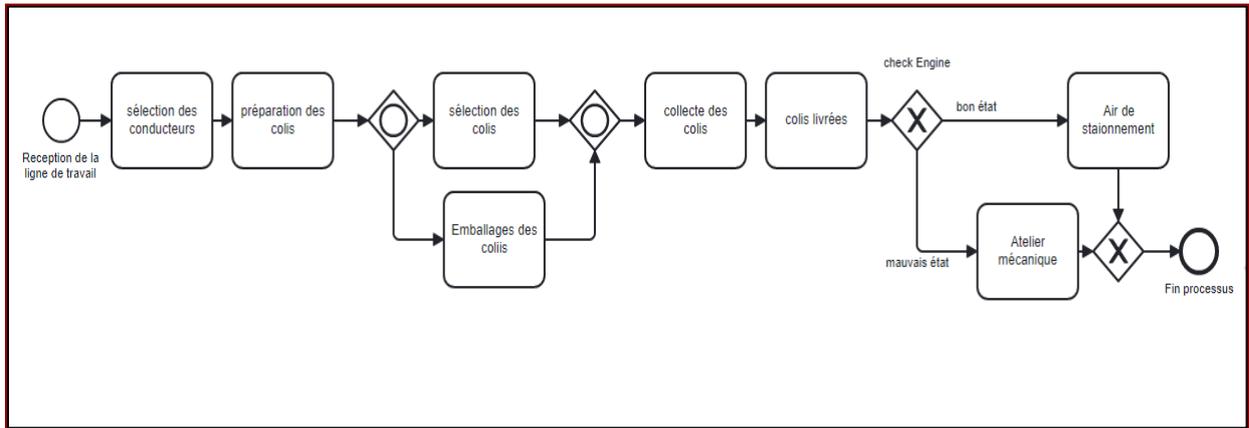


Figure 6:Modélisation du processus de la réalisation.

Le nombre de conducteurs et de véhicules est toujours fixé (25 pour le cas d'alger car il y a 25 lignes), Si le plan de transport est jugé acceptable, il est validé et transmis aux conducteurs pour exécution.

- **La réalisation du plan de transport**

Consiste à exécuter le plan de transport validé en acheminant les produits aux agences de livraison dans les délais impartis. Cette étape est effectuée par les conducteurs de l'ANEP Messagerie Express, qui doivent suivre les itinéraires prescrits, respecter les horaires de livraison et s'assurer que les produits sont correctement livrés à chaque agence de livraison.

L'entreprise suit et surveille le déroulement du transport pour s'assurer que le plan de transport est respecté et que les délais de livraison sont respectés. L'entreprise utilise un système de suivi et de géolocalisation qui donne des rapports de suivi et d'analyse pour mesurer les performances du transport.

- **Indicateurs de performance clés :**

Taux de livraison à temps, taux de retour de marchandises, satisfaction client et la productivité des tournées.

2. Processus de la gestion des chauffeurs :

Le processus de gestion des chauffeurs dans l'ANEP messagerie express implique plusieurs étapes clés pour assurer une gestion efficace du personnel et une sécurité optimale pour les conducteurs et les clients.

Les principales étapes du processus avec leurs entrées, sorties et opérations :

Inputs :

- Le nombre de livraisons prévues
- Les horaires de travail et de repos des conducteurs
- Les critères de sélection
- Recrutement et formation décidées

Outputs :

- Chauffeurs affectés
- Les plannings des conducteurs chauffeurs
- Chauffeurs qualifiés
- Rapport sur la performance des conducteurs

Opérations du processus :

- Planification des conducteurs : Cette étape implique la création d'un calendrier des conducteurs qui prend en compte les demandes de livraison et les horaires de travail
- Recrutement : Cette étape implique le recrutement et la sélection des conducteurs en fonction des critères de sécurité et des exigences de l'entreprise
- Formation : Cette étape implique la formation des conducteurs sur les procédures de sécurité et de conduite de l'entreprise
- Suivi de la performance : Cette étape implique le suivi de la performance des conducteurs en termes de temps de livraison, de conformité aux normes de sécurité et de satisfaction des clients.
- Gestion des urgences : Cette étape implique la gestion des situations d'urgence telles que les accidents de la route, les retards de livraison et les pannes de véhicules.

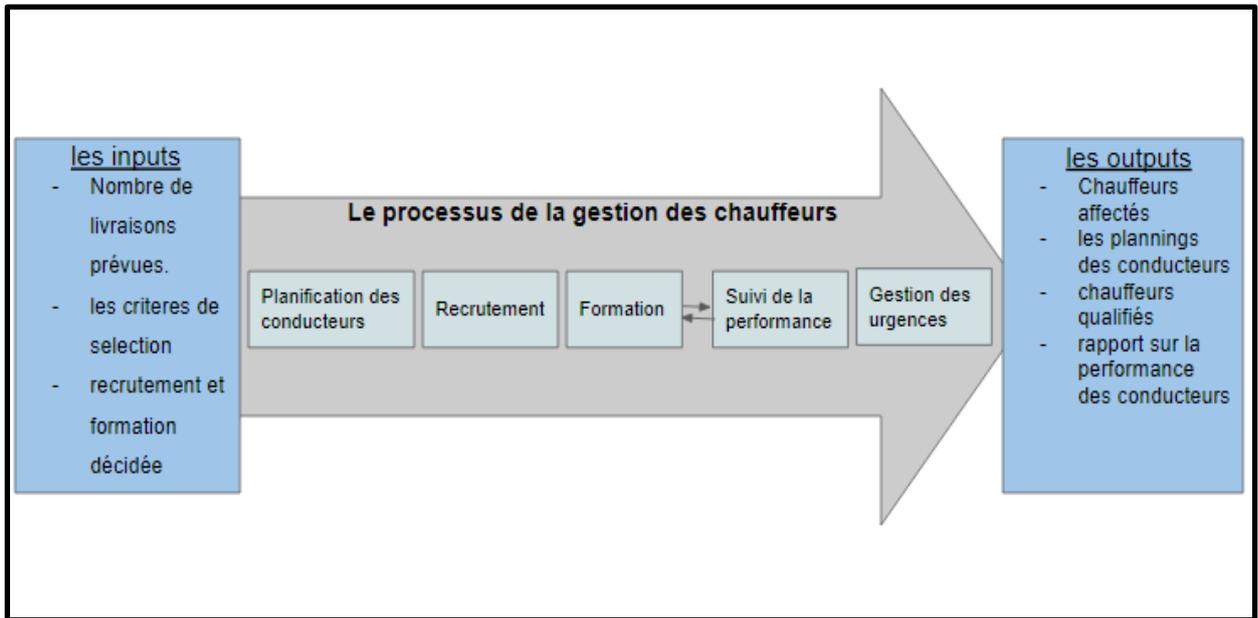


Figure 7: Cartographie du processus de gestion des chauffeurs.

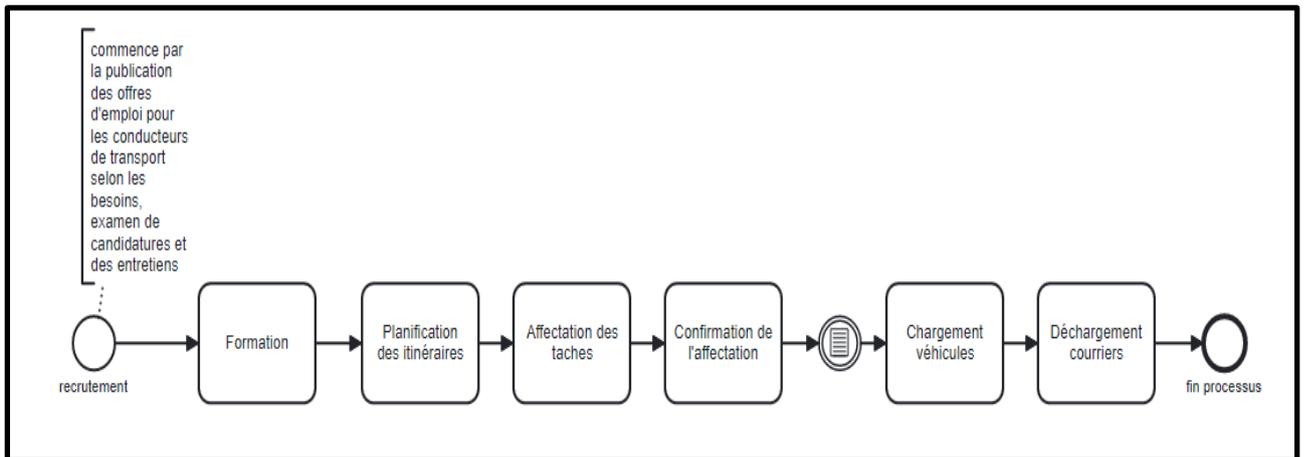


Figure 8: Modélisation du processus de gestion des chauffeurs.

- **Indicateurs de performance clés :**

Taux de rétention des chauffeurs, temps moyen de réponse aux problèmes et le taux de satisfaction des chauffeurs.

3. Processus de la gestion de la relation client :

Il vise à répondre aux demandes et aux besoins des clients de manière rapide et efficace, ce processus est illustré par la **figure 10** et la **figure 11**.

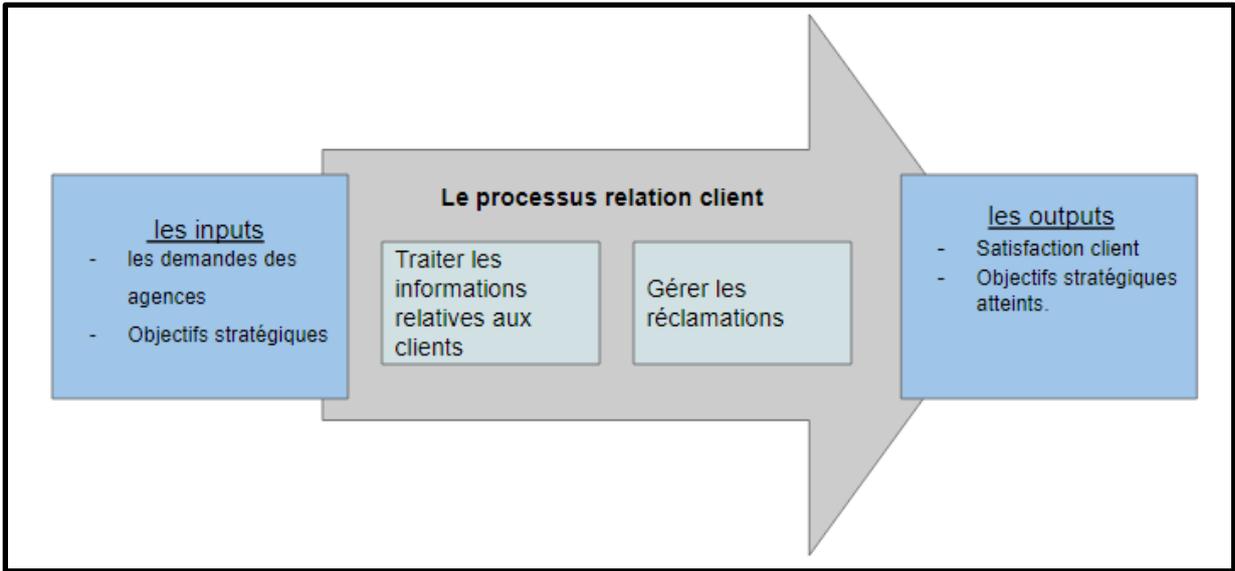


Figure 9: Cartographie du processus gestion de la relation client.

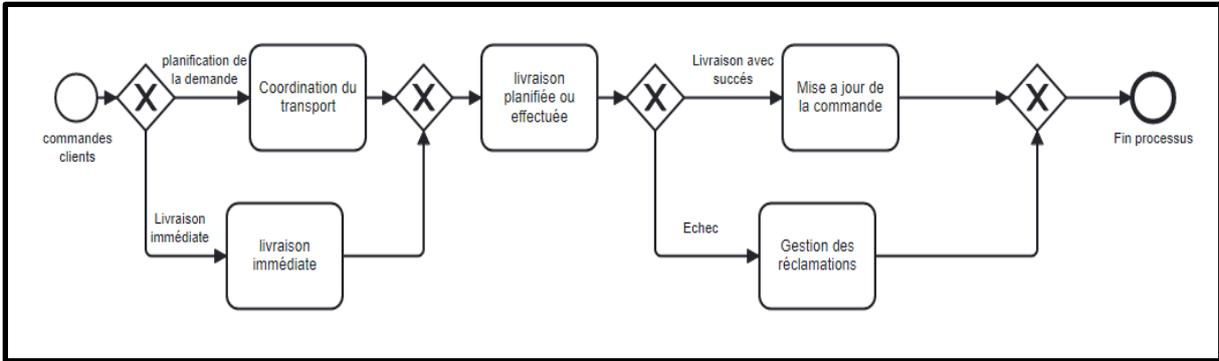


Figure 10: Modélisation du processus de gestion de la relation client.

● **Indicateurs de performance clés :**

Taux de résolution des problèmes, taux de satisfaction client, délai moyen de réponse aux demandes et le taux de répétition des commandes.

Etape 4 : Elaboration d'une cartographie globale du macro-processus et identifier les dysfonctionnements :

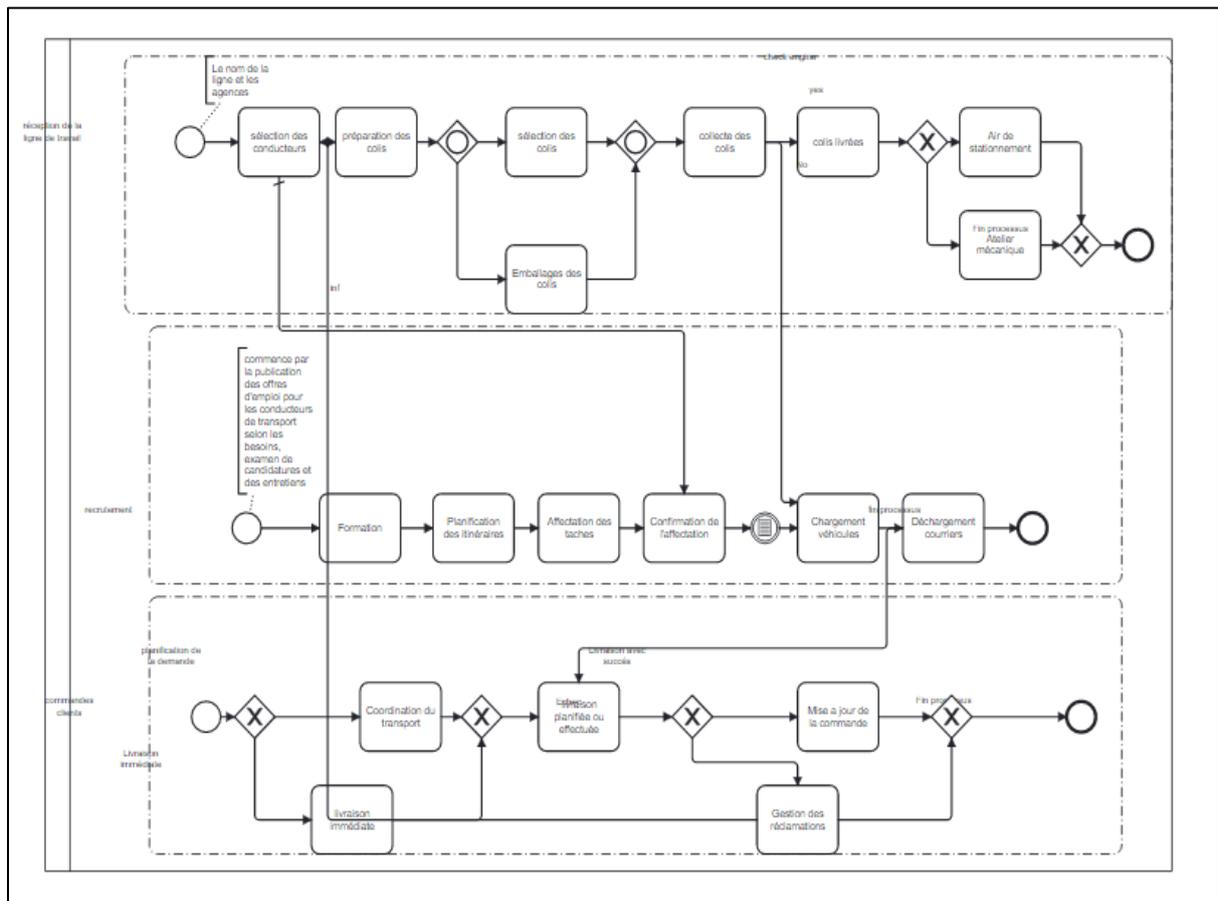


Figure 11: Cartographie globale du macro-processus du transport.

Ces processus propres à chaque mission peuvent être relativement autonomes et par-là même créer des dysfonctionnements entre eux. Durant notre période d'analyse nous avons constaté l'ensemble des dysfonctionnements suivant :

- **Dysfonctionnement 1**

Un dysfonctionnement courant qui peut entraîner des coûts supplémentaires dans le processus de transport de l'entreprise est les itinéraires inefficaces. Dans l'ANEP messagerie express avec plusieurs lignes contenant des sites à livrer, il est fréquent que des itinéraires inefficaces soient utilisés, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires dans le processus de transport. Dans certains cas, il est possible d'utiliser un seul véhicule pour desservir deux lignes plutôt que d'en utiliser deux pour chaque ligne.

- **Dysfonctionnement 2**

Les conducteurs passent trop de temps à charger et décharger les colis, cela peut entraîner des retards dans les livraisons et des coûts supplémentaires pour les heures supplémentaires des conducteurs.

- **Dysfonctionnement 3**

Les véhicules ne sont pas bien entretenus, cela peut entraîner des pannes, des réparations coûteuses et une utilisation inefficace des ressources. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires tels que des frais de réparation, des frais de remplacement de véhicules et des coûts de perte de clientèle.

- **Dysfonctionnement 4**

La planification des itinéraires de transport n'est pas optimisée, cela peut entraîner des retards, des surcharges et une utilisation inefficace des ressources. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires tels que des frais de temps supplémentaire pour les conducteurs, des frais de carburant supplémentaires, des frais de remplacement de véhicules et parfois des coûts de pénalités de retard.

Etape 5 : Identifier les causes inhérentes aux dysfonctionnements

Dans le cadre de notre projet, nous allons nous intéresser uniquement à la résolution du premier dysfonctionnement.

Avant de chercher à résoudre un dysfonctionnement, il est crucial d'en identifier la cause avec certitude afin de ne pas se tromper dans les solutions à apporter.

A cette fin, nous avons recours à l'outil « le cube de Stern », qui permet de classer et d'identifier les causes liées au problème . Les étapes de l'analyse des causes sont les suivantes :

- **La première étape** consiste à identifier les causes probables du dysfonctionnement.

Dans notre cas, nous avons identifié les causes suivantes:

- **Cause 1** : Une planification inadéquate des itinéraires de livraison, les itinéraires de livraison ne sont pas planifiés de manière efficace, cela a entraîné des itinéraires inefficaces qui augmentent les coûts de transport. Cela peut être dû à une planification manuelle qui ne prend pas en compte tous les facteurs pertinents, tels que les conditions de circulation, la capacité des véhicules ..

- **Cause 2** : Une mauvaise utilisation des outils de planification de routage, les outils de planification de routage ne sont pas utilisés correctement (ne sont pas mis à jour régulièrement), cela a entraîné des itinéraires inefficaces qui augmentent les coûts de transport.
- **Cause 3** : Des changements dans le volume ou le type de livraisons : Si l'ANEP Messagerie Express ne tient pas compte des changements dans le volume ou le type de livraisons, cela peut entraîner des itinéraires inefficaces. Par exemple, si l'entreprise ajoute de nouvelles agences (destinations) ou modifie la fréquence des livraisons, cela peut avoir un impact sur les itinéraires et nécessiter une mise à jour des plans de livraison.
- **Cause 4** : L'entreprise est soumise à des contraintes de temps, telles que des délais de livraison stricts et des exigences de livraison le jour même. Dans ces cas, les conducteurs sont obligés de prendre des itinéraires plus directs et moins efficaces pour respecter les délais de livraison.
- **La deuxième étape** : consiste à Analyser chaque cause selon quatre critères :
 - L'urgence : est-il urgent ou non de traiter cette cause de dysfonctionnement ?
 - L'importance : Cette cause apparaît-elle comme étant d'importance pour expliquer le dysfonctionnement ?
 - Le pouvoir d'action : Nous sentons-nous capables a priori de trouver des solutions pour remédier à cette cause de dysfonctionnement ?
 - La capacité à trouver une solution : Avons-nous, à notre niveau, un pouvoir d'action pour agir sur cette cause ?

Planification inadéquate des itinéraires de livraison :

- Urgence : Cette cause est assez urgente car elle peut entraîner des coûts supplémentaires pour l'entreprise à court terme.
- Importance : Cette cause est très importante car elle peut avoir un impact significatif sur la rentabilité de l'entreprise et la satisfaction des clients.
- Pouvoir d'action : L'ANEP Messagerie Express a un certain pouvoir d'action pour remédier à cette cause en utilisant des outils de planification de routage efficaces et en formant leur personnel à une planification plus efficace.
- Capacité à trouver une solution : L'entreprise a un pouvoir d'action pour agir sur cette cause, mais cela peut nécessiter des ressources et des investissements pour améliorer les processus de planification.

Utilisation inefficace des outils de planification de routage :

- Urgence : Cette cause est assez urgente car elle peut entraîner des coûts supplémentaires pour l'entreprise à court terme.
- Importance : Cette cause est importante car une utilisation inefficace des outils de planification peut entraîner des itinéraires inefficaces et des coûts supplémentaires.
- Pouvoir d'action : L'entreprise a un certain pouvoir d'action pour remédier à cette cause en utilisant des outils de planification de routage efficaces et en formant leur personnel à une utilisation plus efficace de ces outils.
- Capacité à trouver une solution : L'entreprise a un pouvoir d'action pour agir sur cette cause, mais cela peut nécessiter des ressources et des investissements pour améliorer l'utilisation des outils de planification.

Changements dans le volume ou le type de livraisons :

- Urgence : Cette cause peut être urgente si les changements dans le volume ou le type de livraisons ont un impact significatif sur les itinéraires ou les coûts de transport.
- Importance : Cette cause est importante car les changements dans le volume ou le type de livraisons peuvent nécessiter des ajustements dans les plans de livraison et les itinéraires.
- Pouvoir d'action : L'entreprise a un certain pouvoir d'action pour remédier à cette cause en surveillant régulièrement les changements dans le volume ou le type de livraisons et en ajustant les plans de livraison en conséquence.
- Capacité à trouver une solution : L'entreprise a un pouvoir d'action pour agir sur cette cause, mais cela peut nécessiter des ajustements réguliers des plans de livraison et des itinéraires pour s'adapter aux changements dans le volume ou le type de livraisons.

Contraintes de temps :

- Urgence : Cette cause peut être très urgente car les délais de livraison sont stricts et ne peuvent pas être reportés.
- Importance : Cette cause est importante car les contraintes de temps peuvent nécessiter des itinéraires plus directs et moins efficaces pour respecter les délais de livraison.
- Pouvoir d'action : L'entreprise a un certain pouvoir d'action pour remédier à cette cause en travaillant avec les clients pour définir des délais de livraison plus réalistes et en utilisant des itinéraires plus efficaces lorsque cela est possible.

- Capacité à trouver une solution : L'entreprise a un pouvoir d'action pour agir sur cette cause, mais cela peut nécessiter des discussions avec les clients
- **La troisième étape** : consiste à évaluer les résultats :

D'après les résultats, l'entreprise doit faire des efforts pour améliorer le processus de planification et de livraison afin de mieux respecter les contraintes de temps donc elle doit faire des investissements dans la technologie de livraison qui peut être également un outil pour l'amélioration de la précision et la rapidité de livraison.

II.3.3 Analyse Stratégique suivant la matrice SWOT

Le SWOT (Acronyme de Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats) est un outil très pratique lors de la phase de diagnostic stratégique . Il présente l'avantage de synthétiser les forces et faiblesses d'une entreprise au regard des opportunités et menaces générées par son environnement.

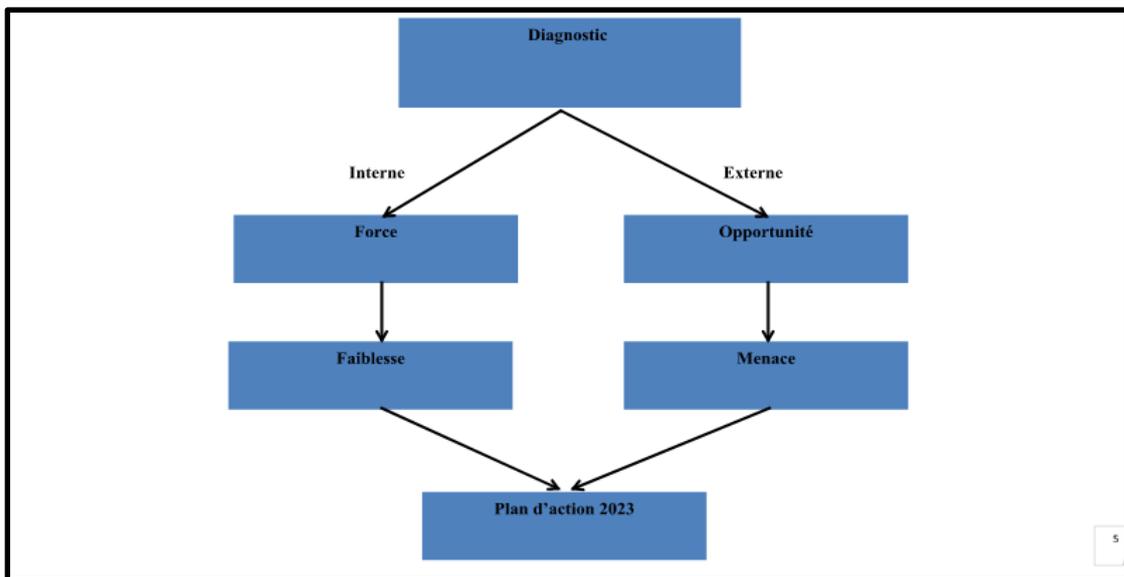


Figure 12 Analyse SWOT de l'entreprise

Nous allons donc examiner de plus près chaque aspect de cette matrice et discuter de la manière dont elle peut être utilisée pour élaborer des stratégies efficaces.

Les résultats de l'analyse sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4: Matrice SWOT (Forces/Faiblesses)

| Forces | Faiblesses |
|---|---|
| Réseau de distribution performant | Plus de 77% du chiffre d'affaires de l'AME relève d'un seul segment qui est la messagerie interbancaire ; |
| une couverture totale du territoire national. | Résistance au changement |
| Une qualité de prestation constante et indéniable | |
| Solvabilité. | |
| Portefeuille clients importants et fidélisé | |
| Personnel qualifié. | |
| Les délais sont respectés | |
| agréés par l'Autorité de Régulation des Postes et Communications électroniques (ARPCÉ) pour le transport des plis et des colis. | |
| Une flotte importante avec des moyens adéquats. | |

Tableau 5: Matrice SWOT (Opportunités/Menaces)

| Opportunités | Menaces |
|---|--|
| C'est un marché en pleine croissance | Manque de véhicules neufs sur le marché Algérien |
| Un réseau de distribution déjà en place, qui peut être lui-même, le support pour d'autres | Le marché du courrier est ouvert à la concurrence, la menace viendrait du marché |

| | |
|--|--|
| clients et d'autres segments | informel et aux nouveaux entrants. |
| Barrière à l'entrée pour exercer l'activité. | En ce qui concerne l'activité de l'abonnement presse, la menace viendrait essentiellement du développement de la presse dématérialisée à travers les différents supports (presse électronique / presse numérique). |
| | Situation monopolistique de la fourniture de la presse étrangère. |

II.3.4 Résultat du diagnostic

Au cours de notre période d'analyse, nous avons observé que dans la plupart des cas, le choix des itinéraires pour chaque véhicule est effectué de manière intuitive. Cependant, nous sommes conscients que l'étude des itinéraires est un élément crucial de toute entreprise de transport et qu'elle fait partie intégrante de l'ingénierie des transports. C'est pourquoi, nous avons considéré qu'il était à la fois opportun et impératif de mettre en place une méthode basée sur des fondements techniques pour élaborer les plans de transport

II.4 Énoncé de la problématique

Au sein de l'ANEP Messagerie Express, il est essentiel de résoudre les problèmes liés aux coûts logistiques pour améliorer la compétitivité de l'entreprise sur le marché. À la lumière des dysfonctionnements identifiés lors de l'audit, tels que la gestion inefficace des déplacements des équipes de livraison et les difficultés à respecter les horaires de visites convenus avec les clients, il devient crucial de se pencher sur la question suivante :

« Comment établir des plans de transport optimaux au sein de l'ANEP Messagerie Express afin de réduire les coûts logistiques et renforcer sa compétitivité sur le marché ? »

Cette problématique découle de la nécessité de garantir des opérations de transport rentables, efficaces et efficientes au sein de l'entreprise. Ainsi, deux aspects majeurs seront abordés dans ce projet de fin d'étude :

- 1) La conception d'itinéraires qui permettent de minimiser les coûts de transport, tout en tenant compte des contraintes sociales et temporelles.
- 2) La réduction du nombre total de véhicules mobilisés, afin d'optimiser l'utilisation des ressources et d'améliorer l'efficacité globale des opérations logistiques.

L'objectif ultime de ce projet est de proposer des solutions concrètes et efficaces pour optimiser les coûts logistiques de l'ANEP Messagerie Express, améliorer sa compétitivité et

renforcer sa position sur le marché. Ce projet s'appuiera sur l'utilisation d'outils et de méthodologies adaptés, notamment des modèles mathématiques d'optimisation spécifiques au réseau de distribution de l'entreprise.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de mieux appréhender le secteur de la logistique au sein de l'ANEP Messagerie Express et de comprendre le contexte spécifique dans lequel l'entreprise opère.

La mise en évidence des dysfonctionnements au niveau de la gestion des déplacements des équipes de livraison et du respect des horaires de visites avec les clients souligne l'importance de résoudre les problèmes liés aux coûts logistiques pour améliorer la compétitivité de l'entreprise.

Le prochain chapitre présentera en détail les outils et les approches méthodologiques qui seront utilisés pour résoudre cette problématique. Ces outils joueront un rôle essentiel dans la proposition de solutions concrètes visant à optimiser les coûts de transport, concevoir des itinéraires efficaces et efficientes, ainsi qu'à rationaliser l'utilisation des ressources.

CHAPITRE 2 :

ETAT DE L'ART

III. CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART

Introduction

Le problème de tournées de véhicules (PTV) est une problématique importante dans le domaine de la logistique et de la planification de transport. Il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire qui consiste à planifier un ensemble de tournées pour des véhicules afin de desservir un ensemble de clients tout en minimisant les coûts et en respectant des contraintes telles que les capacités des véhicules, les fenêtres de temps des clients et les contraintes de temps de travail des conducteurs.

Le problème de tournées de véhicules a été étudié depuis plusieurs décennies et de nombreuses approches ont été proposées pour le résoudre. Les approches traditionnelles incluent des méthodes exactes telles que la programmation linéaire, la programmation par contraintes et la méthode de branch-and-bound, ainsi que des méthodes heuristiques telles que la recherche locale et la recherche tabou.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter en détail le VRP ainsi que sa formulation mathématique. Nous allons expliquer les différentes contraintes et objectifs qui doivent être pris en compte lors de la résolution du VRP. Nous allons également mettre l'accent sur les nombreuses méthodes de résolution qui ont été développées pour résoudre ce problème. Enfin, nous allons proposer une classification des différentes variantes du problème de tournées de véhicules, en présentant les caractéristiques de chaque variante et les approches de résolution qui peuvent être utilisées pour résoudre ces problèmes spécifiques.

III.1 Problème de tournée de véhicule (VRP)

III.1.1 Description du problème

Le problème de construction de tournées de véhicules (VRP : Vehicle Routing Problem en anglais) est un problème d'optimisation combinatoire et de recherche opérationnelle. Il fait partie de la catégorie des problèmes de transport (AOUADJ, 2019).

Le problème de tournées de véhicules (vehicles routing problem VRP) est une extension du problème du voyageur du commerce. Il a été introduit pour la première fois par Dantzig en 1954 sous le nom de (Truck Dispatching Problem) et a depuis fait l'objet d'études intensives pour le modéliser et le résoudre. Le problème de tournée de véhicule est un problème

d'optimisation combinatoire qui vise à déterminer le meilleur ensemble de tournées pour un groupe de véhicules afin de desservir un ensemble de clients. Le but est de minimiser les coûts, tels que la distance parcourue, le temps de trajet ou d'autres mesures de coût, tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules et les contraintes de temps pour la livraison de marchandises. L'ensemble des clients visités par un véhicule désigne la tournée de celui-ci. Chaque client doit être desservi une et une seule fois et chaque tournée commence et se termine au dépôt. [1]

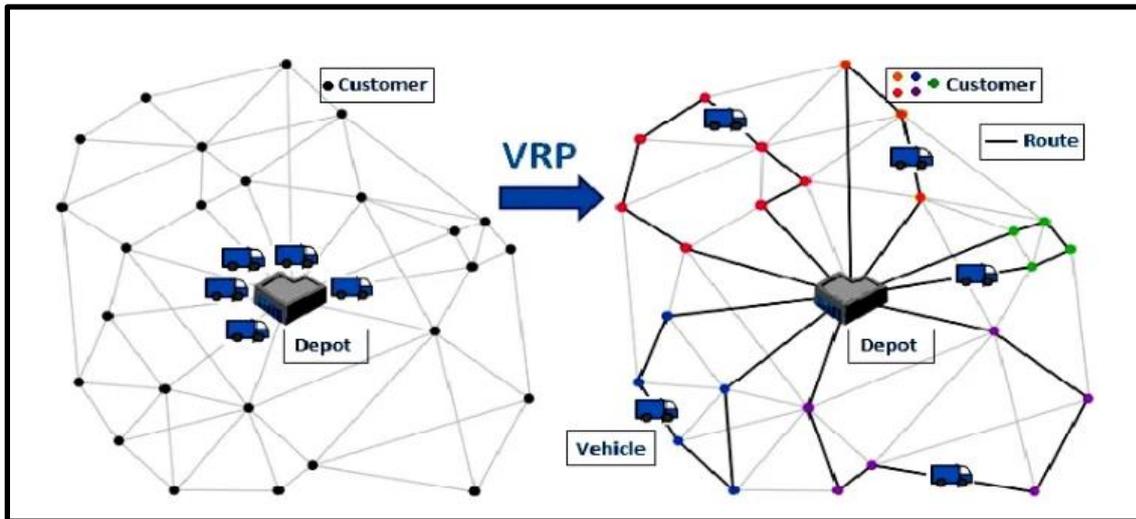


Figure 13: Schéma illustratif d'un VRP.

III.1.2 Formulation mathématique

La formulation mathématique la plus couramment utilisée pour résoudre le problème de VRP en programmation linéaire en nombres entiers est présentée ici. Cette formulation a été adoptée par plusieurs auteurs de la littérature, tels que Laporte (1992) et Rego (1994).

Le problème de VRP concerne la conception d'itinéraires pour la visite de plusieurs villes. Le graphe complet $G(N, E)$ est utilisé pour définir ce problème, ce qui signifie que :

- Chaque ville de $N \setminus \{1\}$ soit visitée exactement une fois par exactement un seul véhicule.
- Tous les itinéraires commencent et prennent fin au dépôt.
- Tous les sommets sont reliés entre eux et qu'une ville peut être visitée à partir de toute autre ville

Considérons :

- $N = (v_0, v_1 \dots v_n)$, l'ensemble des sommets du graphe G , représente les clients (sites) du VRP, tels que : v_0 : le dépôt qui est le point de départ et d'arrivée de toutes les routes et $(v_1 \dots v_n)$ se sont les sites (clients)
- A , l'ensemble des arcs du graphe G , représente les chemins reliant les clients entre eux et au dépôt du VRP, donc A est l'ensemble des arcs,

- À chaque arc (i, j) on associe une valeur d_{ij} qui est la distance, ces distances sont symétriques c'est à-dire que $d_{ij} = d_{ji} \forall i, j \in E$

Les données du problème :

- n : le nombre de sommets (Clients)
- m : le nombre de véhicule.
- c_{ij} : le coût de déplacement de i vers j .
- q_i : la demande associée au client i .
- Q : capacité du véhicule.

Les variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le camion } k \text{ part du sommet } i \text{ vers } j; \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction objective :

$$\text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk}$$

Le modèle mathématique s'écrit comme suit :

$$(A) \{ \text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \dots \dots \dots (1.1) \}$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i = \underline{1, n}; \dots \dots \dots (1.2)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \forall i = \underline{1, n}; \dots \dots \dots (1.3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ilk} - \sum_{j=1}^n x_{ljk} = 0; \forall l = \underline{1, n}, \forall k = \underline{1, m} \dots \dots \dots (1.4)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ojk} = 1, \forall k = \underline{1, m} \dots \dots \dots (1.5)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i0k} = 1, \forall k = \underline{1, m} \dots \dots \dots (1.6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_i x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k = \underline{1, m}; \dots \dots \dots (1.7)$$

$$x_{ijk} \in [0,1], \quad \forall i, j = \underline{0, n}, \quad \forall k = \underline{1, m} \dots \dots \dots (1.8)$$

Sous cette formulation :

- L'équation (1.1) représente l'objectif qui est de minimiser la somme des coûts de toutes les tournées
- Les équations (1.2) et (1.3) imposent que chaque client soit servi une seule fois par un seul véhicule.
- Les contraintes (1.4) assurent la conservation de flot
- Les contraintes (1.5) et (1.6) assurent que chaque tournée commence et se termine au dépôt.
- La contrainte (1.7) définit la contrainte de capacité qui impose que la demande totale des clients de chaque tournée ne doit pas dépasser la capacité Q du véhicule.
- La contrainte (1.8) la définition les types de variables utilisées (contraintes de binarité sur les variables de décision x_{ijk}).

III.1.3 La complexité

Le VRP est un problème NP-difficile, ce qui signifie qu'il est peu probable qu'une solution optimale soit trouvée en temps polynomial. **(Dror et al, 1994)** ont montré que la complexité du VRP dépend du type de contraintes qui sont imposées. Ils ont montré que lorsque des contraintes de capacité sont ajoutées, le problème devient encore plus difficile à résoudre.

(Bodin et al, 1983) ont développé une méthode de résolution exacte pour le VRP, basée sur la programmation dynamique. Cette méthode est cependant limitée aux petites instances du problème.

Depuis lors, de nombreuses méthodes heuristiques ont été développées pour résoudre le VRP. Ces méthodes sont basées sur des approches telles que la recherche locale, la recherche tabou, les algorithmes génétiques, etc. [1]

III.1.4 Les méthodes de résolution

Les approches pour résoudre les problèmes d'optimisation, tels que les problèmes de tournées de véhicules, sont classées en deux catégories principales : les méthodes exactes et les méthodes heuristiques/métaheuristiques.

Les méthodes exactes garantissent de trouver la solution optimale. Cependant, ces méthodes peuvent être limitées en termes de temps de calcul et d'applicabilité aux problèmes de grande taille en raison de leur complexité. Parmi les méthodes exactes couramment utilisées, on trouve Branch and Bound et Branch and Cut.

D'autre part, les méthodes heuristiques et méta-heuristiques visent à fournir des solutions fiables dans un temps raisonnable, Parmi ces méthodes on trouve : L'algorithme génétique, Recherche Tabou et Colonies de fourmis.

III.1.4.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes, dites aussi complètes, assurent la détermination de solutions optimales pour les problèmes d'optimisation combinatoire, suite à l'exploration exhaustive par énumération de l'ensemble des solutions réalisables de ces problèmes.

Ces méthodes sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes de petite taille ou lorsque la précision de la solution est essentielle.

Parmi les aboutissements les plus récurrents nous citons : Programmation Linéaire, Programmation Dynamique, Approches Branch and Bound ...

III.1.4.1.1 Programmation linéaire

C'est une approche dédiée exclusivement aux programmes linéaires de type :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} z = C^T \cdot x \\ S. C \\ A \cdot x = b \\ x \geq 0 \end{array} \right.$$

Avec

n : Nombre de variables

m : Nombre de contraintes

$A = (a_{ij})$; $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$: Matrice de contraintes ($m \times n$) et $\text{Rang}(A) = m$;

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

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

La résolution de ce problème consiste à affecter des valeurs au vecteur $X = (X_1, \dots, X_n)$ de sorte que la fonction Z soit à son minimum, sans violation de la moindre contrainte.

En 1947 G. Dantzig a développé la méthode du simplexe. C'est la méthode de résolution de programmes linéaires la plus utilisée à nos jours. Elle s'avère pratique, simple et efficace jusqu'à ce que Klee et Minty, en 1972, mettent en évidence des exemples pour lesquels la complexité de l'algorithme du Simplexe croît exponentiellement avec la taille du problème à résoudre, raison pour laquelle les chercheurs se sont remis à explorer de nouvelles pistes de la recherche de méthodes de résolution efficaces.

III.1.4.1.2 Méthode de Branch and Bound

L'approche de Branch and Bound permet une exploration intégrale du domaine des solutions réalisables S d'une façon arborescente, où S est la racine de l'arbre et ses feuilles sont des sous-ensembles de S qui seront à leur tour des racines de nouvelles feuilles.

- **La séparation et l'évaluation.**

L'étape de séparation permet le passage de la racine à la feuille. Elle partitionne progressivement les ensembles non stériles des solutions en sous-ensembles de taille réduite tout en formant un recouvrement de l'ensemble de solutions S , ensuite on évalue chacun des sous-ensembles obtenus en leur associant la valeur du coût des solutions leur appartenant.

Le parcours de l'arborescence se fait de trois manières différentes :

- **En largeur**, le sommet à séparer est le premier créé
- **En profondeur**, le sommet à séparer est le dernier créé
- **En choisissant la stratégie** du meilleur d'abord.

La stratégie du parcours joue un rôle déterminant sur l'efficacité de l'algorithme.

En pratique, la stratégie du parcours en profondeur est la stratégie la plus répandue. En effet, elle permet de trouver très rapidement les solutions réalisables dont l'évaluation affine la borne supérieure et permet de couper plus vite les branches stériles.

L'injection de l'algorithme de génération de colonnes dans l'algorithme de Branch and Bound génère l'algorithme de Branch and Price, qui s'avère efficace pour les problèmes du VRP d'instances dépassant 50 villes.

III.1.4.1.3 Méthode de Branch and cut

La méthode de Branch and Cut est une approche exacte pour résoudre les problèmes de VRP qui combine la méthode de Branch and Bound avec des techniques de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE).

La méthode Branch and Cut commence également par une relaxation linéaire du problème de VRP, où les variables de décision sont des nombres réels plutôt que des nombres entiers.

Ensuite, la méthode utilise une technique de séparation pour identifier des contraintes valides qui ne sont pas satisfaites dans la relaxation linéaire. Ces contraintes sont appelées "cuts" en anglais.

Ensuite, la méthode Branch and Cut utilise la méthode de Branch and Bound pour explorer l'espace de recherche, tout en utilisant les cuts pour éliminer les sous-problèmes qui ne peuvent pas donner une solution optimale.

Les cuts sont ajoutés au modèle linéaire à chaque nœud de l'arbre, afin de renforcer les contraintes et d'éliminer les solutions infaisables.

La méthode Branch and Cut continue ainsi jusqu'à ce qu'une solution optimale soit trouvée ou que toutes les branches de l'arbre aient été explorées. Cette méthode est particulièrement efficace pour résoudre les problèmes de VRP avec des contraintes supplémentaires, telles que des contraintes de capacité et de temps.

Cependant, la méthode Branch and Cut peut être très coûteuse en temps de calcul pour les problèmes de grande taille. Elle nécessite également une connaissance approfondie de la modélisation mathématique et de la théorie des PLNE.

III.1.4.1.4 Programmation dynamique

La programmation dynamique est une technique de résolution de problèmes algorithmiques qui consiste à diviser un problème en sous-problèmes plus petits, à résoudre chaque sous-problème une seule fois, et à stocker les résultats pour une utilisation ultérieure. Cette méthode est souvent utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation, tels que les problèmes de VRP.

La programmation dynamique utilise une approche "bottom-up", où les résultats des sous-problèmes sont utilisés pour résoudre le problème global. Cette méthode est différente de la méthode "top-down" utilisée dans la méthode de Divide and Conquer, où le problème est divisé en sous-problèmes plus petits à partir du problème global.

Dans le VRPTW, le but est de planifier des tournées de véhicules pour livrer des marchandises ou des personnes dans des fenêtres de temps spécifiques.

La programmation dynamique peut être utilisée pour résoudre ce problème en utilisant une approche "bottom-up" pour résoudre les sous-problèmes.

Dans la programmation dynamique appliquée au VRPTW, on divise le problème en sous-problèmes plus petits en considérant chaque fenêtre de temps comme un point de décision. On résout ensuite chaque sous-problème en utilisant les résultats des sous-problèmes précédents, en prenant en compte les contraintes de capacité des véhicules et les contraintes de temps.

En utilisant cette approche, la programmation dynamique peut être utilisée pour trouver la solution optimale pour le VRPTW, en comparaison à d'autres méthodes de résolution telles que la méthode de Branch and Bound ou les heuristiques. [1]

III.1.4.2 Les méthodes approchées

Dans ce qui suit, nous récapitulons, les méthodes approchées les plus fréquentes dans la littérature, qui ont été utilisées pour résoudre le problème de tournées en général.

III.1.4.2.1 Les heuristiques

Le terme heuristique vient du verbe grec *heuriskein* signifiant trouver. Une heuristique permet de trouver une "bonne" solution, en un temps raisonnable, seulement elle n'offre aucune garantie sur l'optimalité de la solution trouvée.

Selon le processus de génération de solutions, nous distinguons principalement trois types d'heuristiques :

- **Heuristiques constructives** : Au fur et à mesure d'itérer le processus, la solution se construit. La solution ne peut être complètement définie qu'à la fin du processus. Par exemple, nous citons les algorithmes gloutons, le plus proche voisin ou le plus lointain voisin.
- **Heuristiques d'amélioration** : Elles nécessitent une solution de départ, qui s'améliore au cours du déroulement de l'algorithme, comme les algorithmes de recherche locale.
- **Heuristiques de deux phases** : Elles consistent en premier à générer une ou plusieurs solutions, auxquelles on applique une procédure d'amélioration

A. Les méthodes constructives

Les méthodes constructives sont des techniques d'heuristiques qui construisent une solution pas à pas, en ajoutant progressivement des éléments jusqu'à ce qu'une solution complète soit atteinte. Ces méthodes sont souvent utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire tels que le problème du voyageur de commerce, le problème d'affectation, ou le problème de sac à dos

- Méthode des économies

La méthode des économies utilise également le calcul des économies pour déterminer les fusions de routes améliorantes. Dans cette méthode, le nombre de véhicules est considéré comme une variable de décision, ce qui permet de trouver le nombre optimal de véhicules nécessaires pour desservir tous les clients tout en minimisant les coûts.

La méthode commence par une solution initiale où chaque client est desservi par une tournée différente. Ensuite, on calcule les économies pour chaque paire de sommets (i, j) dans l'ensemble des clients C , qui représentent le gain possible pour la fusion de routes entre les sommets i et j . Les économies sont calculées en évaluant $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$, où c_{i0} est le coût de déplacement du véhicule de l'entrepôt (sommets 0) au client i , c_{0j} est le coût de déplacement du client j à

L'entrepôt, et c_{ij} est le coût de déplacement du client i au client j .

Ensuite, on trie les économies par ordre décroissant et on choisit la fusion réalisant le gain le plus grand. On cherche ensuite à fusionner les routes deux à deux en cherchant le meilleur gain S_{ki} ou S_{jl} parmi toutes les fusions possibles qui peuvent être réalisées en formant une

route réalisable par la fusion de la route courante et d'une autre route se terminant par $(k, 0)$ ou commençant par $(0, l)$.

On continue ce processus de fusion jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de fusions améliorantes possibles.

- **Les méthodes d'insertion :**

Ces méthodes construisent une solution en insérant progressivement chaque client dans une tournée existante en minimisant le coût total de la tournée.

Ces méthodes construisent une solution en insérant progressivement chaque client dans une tournée existante en minimisant le coût total de la tournée.

Le processus général des méthodes d'insertion commence par une solution initiale, qui est souvent une tournée simple où les clients sont visités dans l'ordre où ils ont été donnés.

Ensuite, pour chaque client non visité, la méthode recherche la tournée existante dans laquelle l'insertion du client entraînera la plus petite augmentation du coût total de la tournée.

Plusieurs variantes des méthodes d'insertion existent, et elles diffèrent principalement par la façon dont elles évaluent le coût de l'insertion d'un client dans une tournée existante. Par exemple, certaines méthodes peuvent utiliser des critères tels que la distance supplémentaire parcourue, le temps supplémentaire requis ou le coût supplémentaire en carburant.

Une fois la tournée identifiée pour l'insertion du client, celui-ci est ajouté à la position optimale dans la tournée, ce qui entraîne la mise à jour des informations de la tournée, telles que les distances entre les clients et les dépôts, les fenêtres de temps, etc.

Ce processus d'insertion de clients est répété jusqu'à ce que tous les clients soient insérés dans les tournées existantes, formant ainsi une solution finale. Il convient de noter que les méthodes d'insertion peuvent être utilisées seules ou en combinaison avec d'autres heuristiques ou métaheuristiques pour améliorer la qualité de la solution obtenue.

B. Les méthodes à deux phases

Les méthodes à deux phases sont une approche en deux étapes pour résoudre les problèmes de programmation linéaire (LP) qui comportent des contraintes de contrôle de flux, souvent appelés problèmes de programmation linéaire en nombres entiers (MIP). Cette méthode consiste à résoudre un problème relaxé dans une première phase, suivi d'une deuxième phase pour traiter les contraintes de nombre entier.

• **L'algorithme de balayage (sweep) :**

L'algorithme de balayage, également connu sous le nom d'algorithme de sweep, peut être utilisé pour résoudre certaines variantes du problème de tournées de véhicules.

Dans la variante VRP à fenêtres de temps (VRPTW), chaque client doit être visité à une heure spécifique et les véhicules ne peuvent pas arriver en avance ou en retard par rapport à

cette heure. L'algorithme de balayage peut être utilisé pour planifier les tournées de manière à respecter les contraintes de temps. L'algorithme commence par trier les clients par ordre croissant de leur fenêtre de temps de début. Ensuite, la ligne de balayage est déplacée de gauche à droite à travers les clients triés. À chaque client, l'algorithme examine les événements qui se produisent à ce point, tels que l'arrivée d'un véhicule ou le début d'une fenêtre de temps.

- **Les algorithmes de pétales**

Les algorithmes de pétales (ou Petal algorithms en anglais) sont une famille d'algorithmes métaheuristiques utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Ces algorithmes sont inspirés par la manière dont les pétales d'une fleur se déploient, d'où leur nom. Le principe de base de l'algorithme de pétales consiste à diviser l'espace de recherche en plusieurs zones (pétales) autour d'une solution initiale. Chaque pétale représente une région de l'espace de recherche qui sera explorée de manière indépendante. Ensuite, l'algorithme utilise des heuristiques pour explorer chaque pétale et trouver la meilleure solution possible dans chaque région.

Les algorithmes de pétales ont l'avantage de pouvoir être utilisés pour résoudre des problèmes avec des contraintes multiples et complexes, tout en évitant les pièges des algorithmes de recherche locale traditionnels. Cependant, ils peuvent être sensibles à la qualité de la solution initiale et peuvent nécessiter une étape préliminaire pour générer une solution initiale de haute qualité.

C. Les méthodes d'améliorations :

Elles nécessitent une solution de départ, qui s'améliore au cours du déroulement de l'algorithme, comme les algorithmes de recherche locale.

Le but est de prendre une solution existante et de la modifier de manière itérative jusqu'à ce qu'une meilleure solution soit trouvée. Les méthodes d'amélioration se concentrent sur la recherche de solutions localement optimales en utilisant des techniques telles que la recherche locale, le recuit simulé, la recherche de voisinage variable, l'optimisation par essaim de particules, etc.

III.1.4.2.2 Les méta-heuristiques

Les métaheuristiques sont des algorithmes de recherche heuristique qui sont conçus pour explorer l'espace des solutions possibles de manière intelligente et efficace.

Elles sont donc particulièrement utiles pour résoudre des problèmes d'optimisation difficilement solubles par des méthodes exactes ou pour trouver rapidement une solution de qualité pour des problèmes de grande taille.

Il existe de nombreuses métaheuristiques différentes, chacune étant basée sur une stratégie de recherche différente. Les métaheuristiques les plus populaires comprennent :

A. Les métaheuristiques à solution unique :

Les métaheuristiques à solution unique sont des méthodes d'optimisation qui tentent de trouver une solution de qualité pour un seul jeu de données VRP à la fois, plutôt que d'explorer l'ensemble des solutions possibles.

Ces méthodes sont souvent utilisées pour résoudre des instances de VRP de grande taille ou de complexité élevée pour lesquelles l'exhaustivité n'est pas réalisable.

Le recuit simulé et la recherche tabou sont deux exemples de ces méthodes populaires. [3]

● La recherche Tabou :

L'idée fondamentale de la recherche tabou est de conserver une trace des solutions récemment visitées dans une liste tabou. Cette liste est utilisée lors des déplacements dans le voisinage de manière à ne pas revenir sur des solutions déjà visitées.

Sa principale particularité tient dans la mise en œuvre de mécanismes inspirés de la mémoire humaine. Le principe de base de la méthode est simple : la méthode tabou fonctionne avec une seule configuration courante à la fois, qui est actualisée au cours des itérations successives. A chaque itération, le mécanisme de passage d'une configuration, soit s , à la suivante, soit t , comporte deux étapes :

- On construit l'ensemble des voisins de s , c'est-à-dire l'ensemble des configurations accessibles en un seul mouvement élémentaire à partir de s

(Si cet ensemble est trop vaste, on applique une technique de réduction de sa taille : par exemple on a recours à une liste de candidats, où on extrait aléatoirement un sous-ensemble de voisins de taille fixée) ; soit $V(s)$ l'ensemble (ou le sous-ensemble) de ces voisins.
- On évalue la fonction objective du problème dans chacune des configurations appartenant à $V(s)$. La configuration t , qui succède à s dans la suite de solutions construite par la méthode tabou, est la configuration de $V(s)$ en laquelle F prend la valeur minimale. Notons que cette configuration t est adoptée même si elle est moins bonne que s . C'est grâce à cette particularité que la méthode tabou permet d'éviter le piège dans les minimaux locaux de f .

La mise à jour et l'exploitation d'une liste tabou est une étape importante dans la recherche tabou pour éviter de retomber sur des solutions déjà visitées et pour encourager l'exploration de nouveaux espaces de recherche.

La liste tabou contient les mouvements interdits, qui sont les inverses des m derniers mouvements effectués. En d'autres termes, si le mouvement $t \rightarrow s$ a été effectué lors de l'itération précédente, alors le mouvement inverse $s \rightarrow t$ sera ajouté à la liste tabou.

Ainsi, lors de la prochaine itération, le mouvement $s \rightarrow t$ sera interdit et ne sera pas considéré comme une solution possible. Cela permet de forcer l'algorithme à explorer d'autres espaces de recherche et à éviter les cycles. [1]

Il est important de noter que la taille de la liste tabou doit être choisie avec soin. Si la liste est trop petite, l'algorithme risque de retomber sur des solutions déjà visitées, tandis que si elle est trop grande, il peut ne pas être en mesure d'explorer suffisamment l'espace de recherche et peut prendre plus de temps pour converger vers une solution optimale.

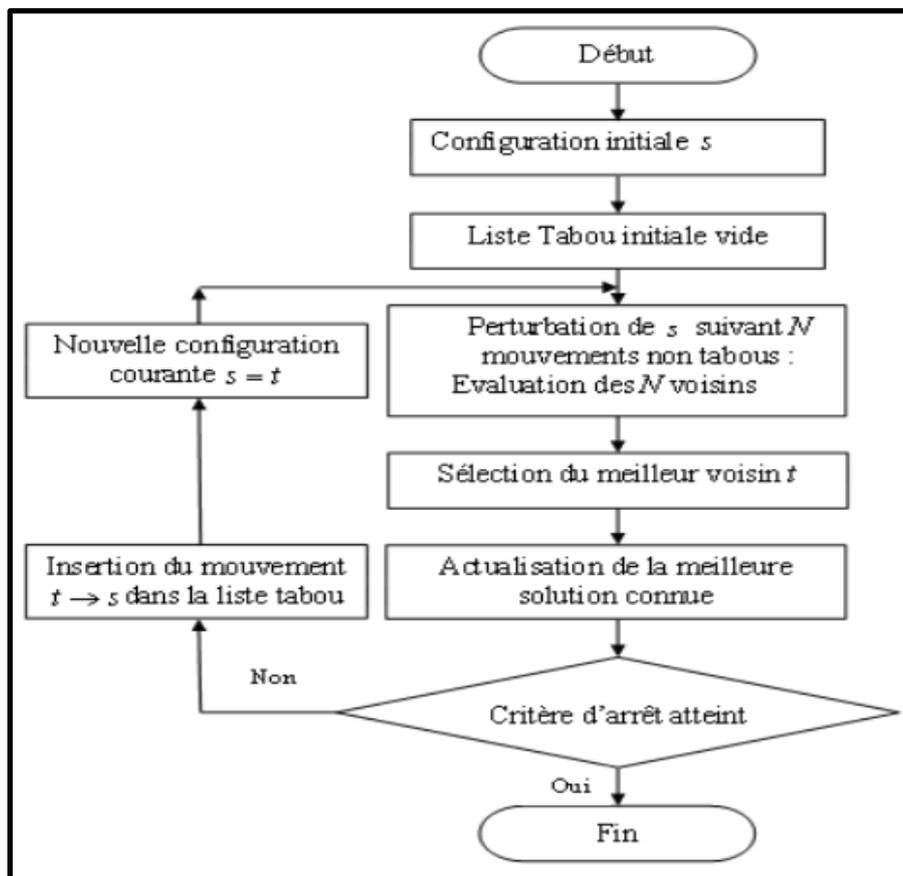


Figure 14: Fonctionnement de l'algorithme de la recherche tabou. [1]

- **Le recuit simulé :**

Le recuit simulé est une méthode d'optimisation stochastique inspirée du processus physique de recuit d'un métal. Cette méthode permet d'explorer un espace de recherche en acceptant

des solutions moins bonnes que la solution courante avec une certaine probabilité, ce qui permet d'éviter de rester bloqué dans un minimum local.

Le recuit simulé commence par une solution initiale et explore son voisinage en appliquant une perturbation aléatoire pour obtenir une nouvelle solution. Ensuite, la fonction objectif est évaluée pour déterminer si la nouvelle solution est meilleure que la solution courante ou non. Si la nouvelle solution est meilleure, elle est acceptée comme nouvelle solution courante. Si elle est moins bonne, elle peut être acceptée avec une certaine probabilité définie par une fonction de température, qui permet d'accepter des solutions moins bonnes au début de la recherche mais de les rejeter progressivement au fil des itérations.

La fonction de température est une fonction décroissante qui contrôle la probabilité d'accepter des solutions moins bonnes. Au début de la recherche, la température est élevée et la probabilité d'accepter des solutions moins bonnes est élevée, ce qui permet d'explorer l'espace de recherche de manière plus large. Au fil des itérations, la température diminue et la probabilité d'accepter des solutions moins bonnes diminue également, ce qui permet à l'algorithme de converger vers une solution optimale.

La recherche est arrêtée lorsqu'un critère d'arrêt est atteint, par exemple lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint ou lorsque la température atteint un seuil minimum.

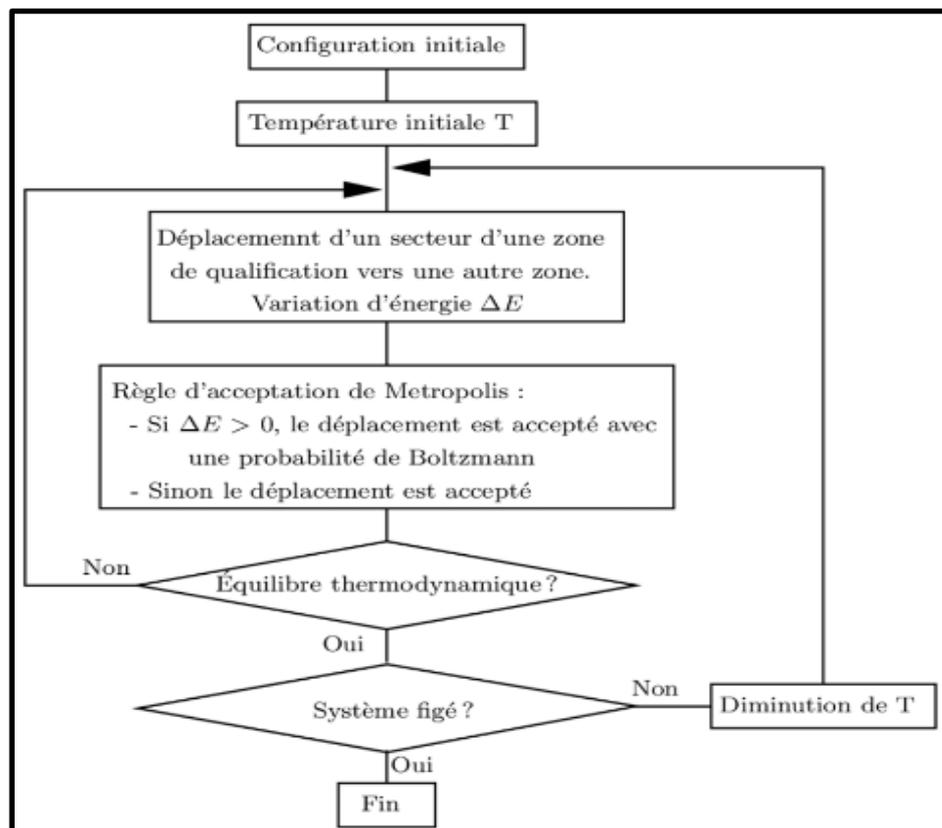


Figure 15: Fonctionnement de l'algorithme de recuit simulé.

B. Les métaheuristiques à population de solutions :

Les métaheuristiques à population de solutions sont des méthodes d'optimisation qui utilisent une population de solutions plutôt qu'une seule solution pour explorer l'espace de recherche et trouver une solution optimale. Ces méthodes sont particulièrement utiles pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire difficiles avec des espaces de recherche vastes et complexes.

Les métaheuristiques à population de solutions les plus connues sont l'algorithme génétique, l'optimisation par essaim de particules (PSO) et la méthode des colonies de fourmis.

- **Les algorithmes génétiques :**

Les algorithmes génétiques sont des outils puissants pour résoudre des problèmes d'optimisation, mais leur utilisation requiert également une certaine créativité et intuition pour trouver la représentation appropriée du problème et les paramètres d'optimisation efficaces

(Melanie Mitchell).

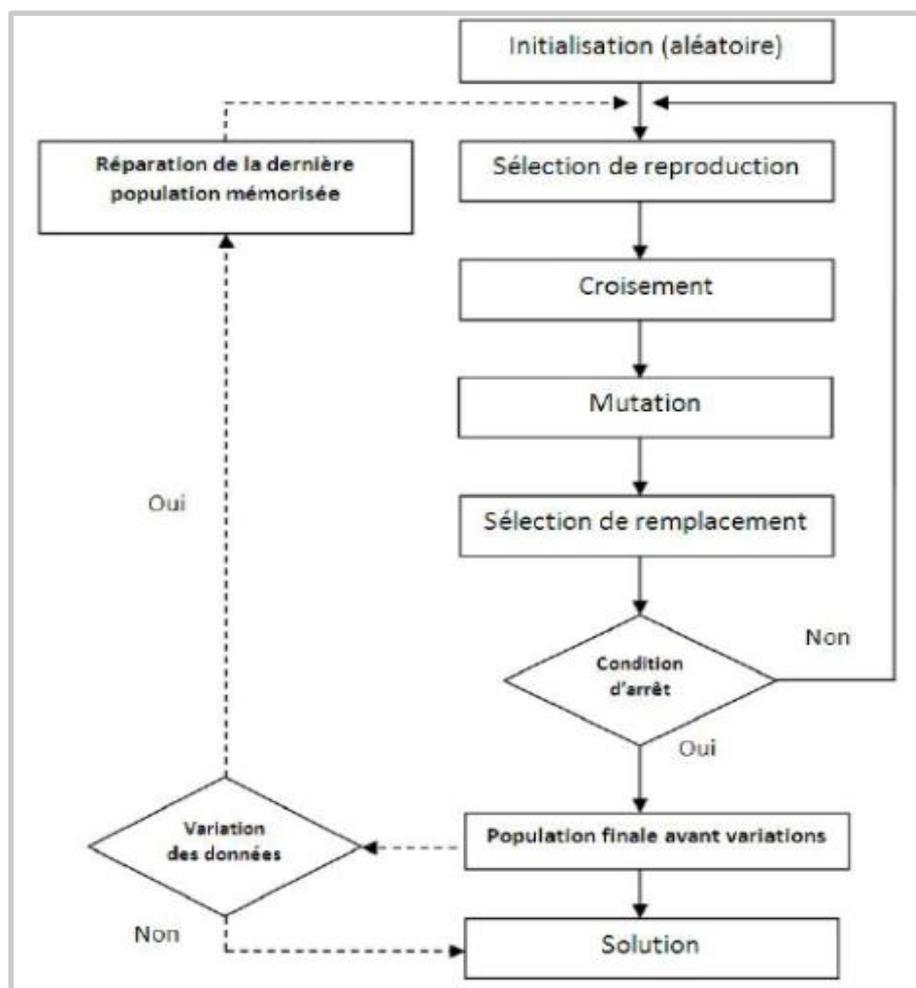


Figure 16: Fonctionnement des algorithmes génétiques.

- **Codage des données** : Cette étape consiste à associer à chaque point de l'espace de recherche une structure de données spécifique, appelée génotype ou ensemble de chromosomes, qui caractérisera chaque individu de la population.
- **Génération de la population initiale** : Il s'agit du choix des dispositifs de départ que nous allons faire évoluer. Ce choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme.
- **Fonction d'adaptation (Fitness)** : L'évaluation de la Fitness est généralement l'étape dans laquelle on mesure la performance de chaque individu. Pour pouvoir juger la qualité d'un individu et ainsi le comparer aux autres, il faut établir une mesure commune d'évaluation.
- **Sélection** : La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais, pendant le passage d'une génération à une autre. Ce processus est basé sur la performance de l'individu.
- **Croisement** : L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche et enrichit la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes.
- **Mutation** : L'opérateur de mutation est un processus où un changement mineur du code génétique est appliqué à un individu pour introduire de la diversité et ainsi éviter de tomber dans des optimums locaux.

- **Les colonies de fourmis :**

L'optimisation par colonies de fourmis est une approche inspirée du comportement collectif des fourmis. Ce comportement permet aux fourmis de minimiser la longueur du chemin entre la source de nourriture et la fourmilière. Lorsque la fourmi suit un chemin, elle dépose une trace de phéromone qui est utilisée par les fourmis suivantes.

Celles-ci ont d'autant plus tendance à choisir un chemin donné suivant que la concentration en phéromone y est forte. Il en résulte que leur action collective produit un chemin qui peut être le plus court.

Dans l'algorithme d'optimisation par colonies de fourmis, la construction d'une nouvelle solution est effectuée par une fourmi.

Dans les années 90, des chercheurs ont observé qu'une colonie de fourmis avait tendance à choisir le chemin le plus court entre deux sources de nourriture d'inégale longueur. Le modèle expliquant ce comportement est le suivant :

- Une fourmi appelée "éclaireuse" explore aléatoirement l'environnement autour de la colonie.
- Si elle trouve une source de nourriture, elle retourne au nid en laissant une piste de phéromones attractives sur son chemin.

- Les autres fourmis qui passent à proximité de la piste sont également attirées par les phéromones et ont tendance à la suivre.
- En rentrant au nid, les fourmis renforcent la piste en la parcourant à nouveau. Si deux pistes sont possibles pour atteindre la même source de nourriture, celle qui est la plus courte sera parcourue par plus de fourmis, donc renforcée davantage et donc de plus en plus attractive. La piste longue finira par disparaître car les phéromones sont volatiles à terme.
- Ainsi, l'ensemble de la colonie de fourmis détermine et choisit la piste la plus courte grâce à l'intelligence collective. [5]

Ces observations ont inspiré le développement d'algorithmes basés sur l'intelligence collective, tels que les algorithmes de colonies de fourmis, qui sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation difficile.

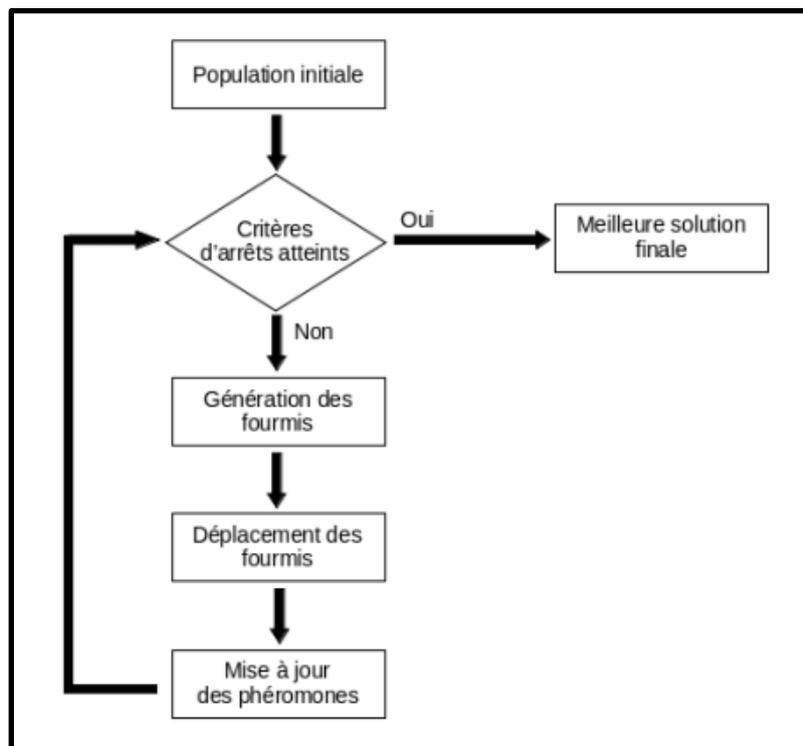


Figure 17: Fonctionnement des algorithmes des colonies de fourmis. [5]

La plupart des problèmes d'optimisation combinatoire, y compris le VRP, font partie de la classe NP-difficile, ce qui rend les méthodes de résolution exactes inefficaces en raison de la croissance exponentielle de la taille du domaine des solutions réalisables avec la taille du problème. Pour résoudre ces problèmes complexes, les chercheurs ont développé des méthodes approchées qui fournissent des solutions de qualité acceptable en un temps raisonnable, bien qu'elles ne garantissent pas leur optimalité. Les méthodes de résolution présentent des avantages et des inconvénients, et le choix de la méthode appropriée dépend de la complexité du problème et de la variante du VRP considérée.

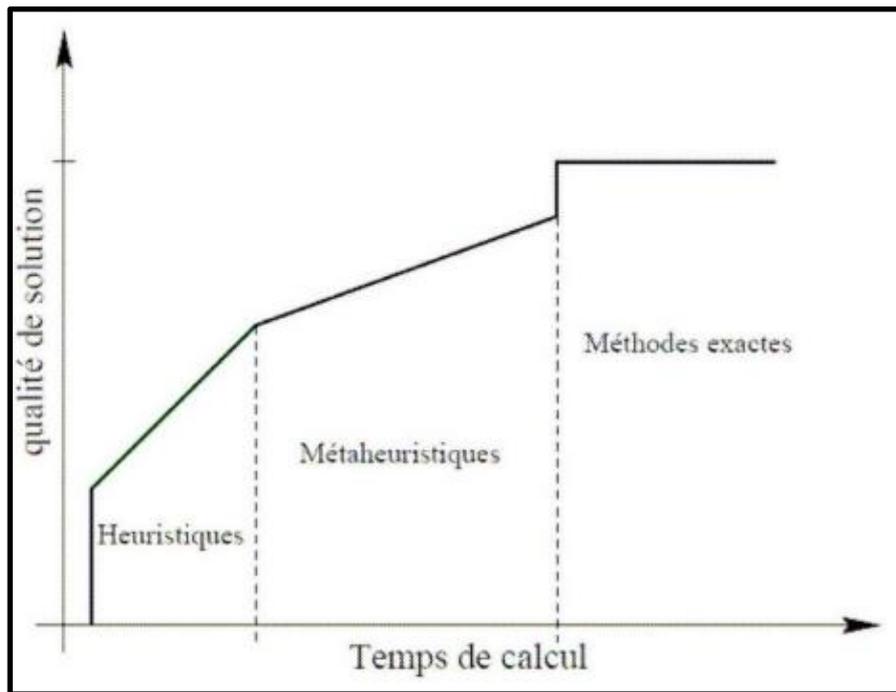


Figure 18: Compromis entre le temps de calcul et la qualité de la solution (thèse, CADET, 2003, page 16).

III.1.5 Les variantes du VRP :

Le VRP classique peut être modifié en ajoutant, supprimant ou combinant différentes contraintes et paramètres pour former des variantes qui modélisent des situations différentes. Certains des paramètres et des contraintes couramment utilisés pour les variantes du VRP sont les suivants :

Tableau 6: Variantes du problème de tournée de véhicules et ses contraintes.

| Paramètre | Options possibles |
|----------------------------|---|
| Réseau routier | <ul style="list-style-type: none"> - Symétriques - Asymétriques - Euclidienne - Non euclidienne |
| Source d'approvisionnement | <ul style="list-style-type: none"> - Un seul dépôt - Plusieurs dépôts. |

| | |
|--------------------|--|
| la demande | <ul style="list-style-type: none"> - Déterministe, stochastique ou dynamique - Objet sans/avec dimensions ou liquide |
| La clientèle | <ul style="list-style-type: none"> - Identifiable - Localisable - Potentielle |
| La flotte | <ul style="list-style-type: none"> - Un seul ou plusieurs véhicules - Homogène ou hétérogène - Un ou multi-compartiments |
| Tournées | <ul style="list-style-type: none"> - Longueur Restreinte ou non restreinte - Durée restreinte ou non restreinte - Une ou plusieurs tournées admises par véhicule |
| Visite aux clients | <ul style="list-style-type: none"> - Nombre de visites : unique ou multiple. - Horaires de visites : non définis, rendez-vous, fenêtres de temps souples ou rigides |
| Types de service | <ul style="list-style-type: none"> - Un seul type - Plusieurs mais uniques pour un type de véhicule - Plusieurs pour un même véhicule |
| Horizon de service | <ul style="list-style-type: none"> - Mono-période - Multi-périodes. |
| Coût | <ul style="list-style-type: none"> - Exprimé en fonction de la distance - Exprimé en fonction du temps - Exprimé en fonction du nombre de véhicules. - Une combinaison de ces critères |

Les objectifs visés peuvent également varier. Bien que la minimisation de la distance totale parcourue ou du temps de parcours soient les objectifs les plus couramment considérés, d'autres objectifs peuvent être rencontrés, tels que la minimisation du nombre de véhicules utilisés pour servir l'ensemble des clients, la minimisation des violations de contraintes, en

particulier pour les contraintes de fenêtres de temps "souples", ou encore la maximisation des gains lorsque la visite de la totalité de la clientèle est impossible, un gain étant associé à la visite d'un client.

Dans la suite, nous présentons une classification des variantes du VRP en fonction du type de contraintes, que nous détaillerons par la suite.

Tableau 7: classification des variantes de VRP selon le type de contraintes. [1]

| Type de contraintes | Variantes de VRP | Définition |
|---|--|--|
| VRP a contraintes Liées à la Flotte de Véhicules | VRP-C (Capacitated Vehicle Routing Problem) | C'est un problème de tournées de véhicules avec des contraintes de capacités. Les véhicules ont une capacité d'emport limitée (quantité, volume, poids, . . .). |
| | VRP-FL (Vehicle Routing Problem with Full Truckload) | C'est un VRP avec utilisation complète de la capacité du véhicule. |
| | VRP-HF (Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet) | Pour ce problème la flotte est composée de véhicules de types différents, qui se distinguent par la capacité, la puissance, le coût de transport. |
| | O-VRP (Open Vehicle Routing Problem) | Ce problème est identique au VRP, seulement le véhicule est libre de rejoindre ou pas le dépôt après la fin de la tournée. S'il choisit de reprendre le dépôt, il doit reprendre le parcours de la tournée dans le sens inverse. |
| | VRP-B (Vehicle Routing Problem Back) | Le VRP-B est un problème où le retour du véhicule au dépôt est exigé. Le véhicule doit rejoindre le dépôt aussitôt que le dernier client |

| | | |
|---|--|---|
| | | ait été servi sans reprendre le parcours de la tournée |
| VRP a contraintes Liées à la Demande des Clients | VRP a Demande Déterministe | C'est un problème fréquent pour les entreprises qui font des livraisons sur commande. En effet, le livreur connaît avant son départ du dépôt la quantité à livrer à chacun de ses clients. |
| | VRP a Demande Stochastique | Le livreur ne connaît pas la quantité à livrer au client, il la découvre au moment de le servir. Il estime approximativement la demande de chaque client par une fonction stochastique |
| | S-VRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem) | Ce problème consiste à visiter un client plusieurs fois afin de satisfaire entièrement sa demande. Exceptionnellement pour ce problème, la demande du client peut être supérieure à la capacité du véhicule. |
| | VRP-PD (Vehicle Routing Problem Pick-up and Deliveries) | C'est un problème de tournées de véhicules avec collecte et livraison. Avec ce genre de problème la durée du service est comptabilisée deux fois, car on doit effectuer une collecte et une livraison ou inversement. |
| VRP a contraintes Liées aux Dépôts | VRP-MD (Multi-DEPOT Vehicle Routing Problem) | Les véhicules peuvent s'approvisionner de plusieurs dépôts |
| | VRP-1P (Vehicle Routing | Les véhicules doivent |

| | | |
|---|---|---|
| | Problem) | s'approvisionner d'un seul dépôt. |
| VRP a contraintes Liées aux Produits | MP-VRP (Problème de Tournées de Véhicule à Produits Multiples) | Une gamme de produits doit être livrée aux différents clients par chaque véhicule en une seule tournée. |
| | 1-VRP (Problème de Tournées de Véhicule à un Seul Produit) | Un seul produit doit être livré aux différents clients par chaque véhicule en une seule tournée. |
| VRP a contraintes Liées au Temps | PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem) | Dans le problème de tournées de véhicules périodique, chaque client est périodiquement visité selon une certaine planification prédéfinie |
| | VRP à Temps de Service Déterministe | La durée du service est connue par le livreur avant d'entamer la tournée. |
| | VRP à Temps de Service Stochastique | Le livreur ne connaît pas la durée du service des clients, il l'a découvre au moment de les servir. Il peut définir une fonction stochastique pour approximer. |
| | VRP-TW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) | Le VRPTW est un des problèmes les plus étudiés. Dans un VRPTW, de nouvelles contraintes temporelles sont ajoutées : chaque client doit être servi dans un intervalle de temps durant lequel il est disponible pour être visité. |
| Problèmes de Tournées de Véhicules Fréquents | VRP Statique | Le VRP Statique est un problème dont toutes les composantes sont connues, |

| | | |
|--|--|--|
| | | fixées avant d'entamer la moindre tournée. Ce cas est obtenu soit par une étude rigoureuse de stationnarisation de l'ensemble des paramètres soit parce que le problème modélisé à l'origine un phénomène statique. |
| | DVRP (Dynamic Vehicle Routing Problem) | A l'opposé du VRP Statique, le VRP Dynamique a au moins une composante dynamique ou changeante au cours de son exécution. On peut avoir la demande qui ou la fenêtre de temps de servitude qui varient ou bien le nombre de clients à servir qui change. Dans ce cas, le problème devient plus complexe. |
| | SVRP (Stochastic Vehicle Routing Problem) | Le SVRP est un cas particulier des problèmes dynamiques. En effet, la variation de la composante considérée suit une loi probabiliste, donc la variation est mise sous forme d'un modèle mathématique, ce qui permet une bonne maîtrise de la variation qui facilite la résolution. |

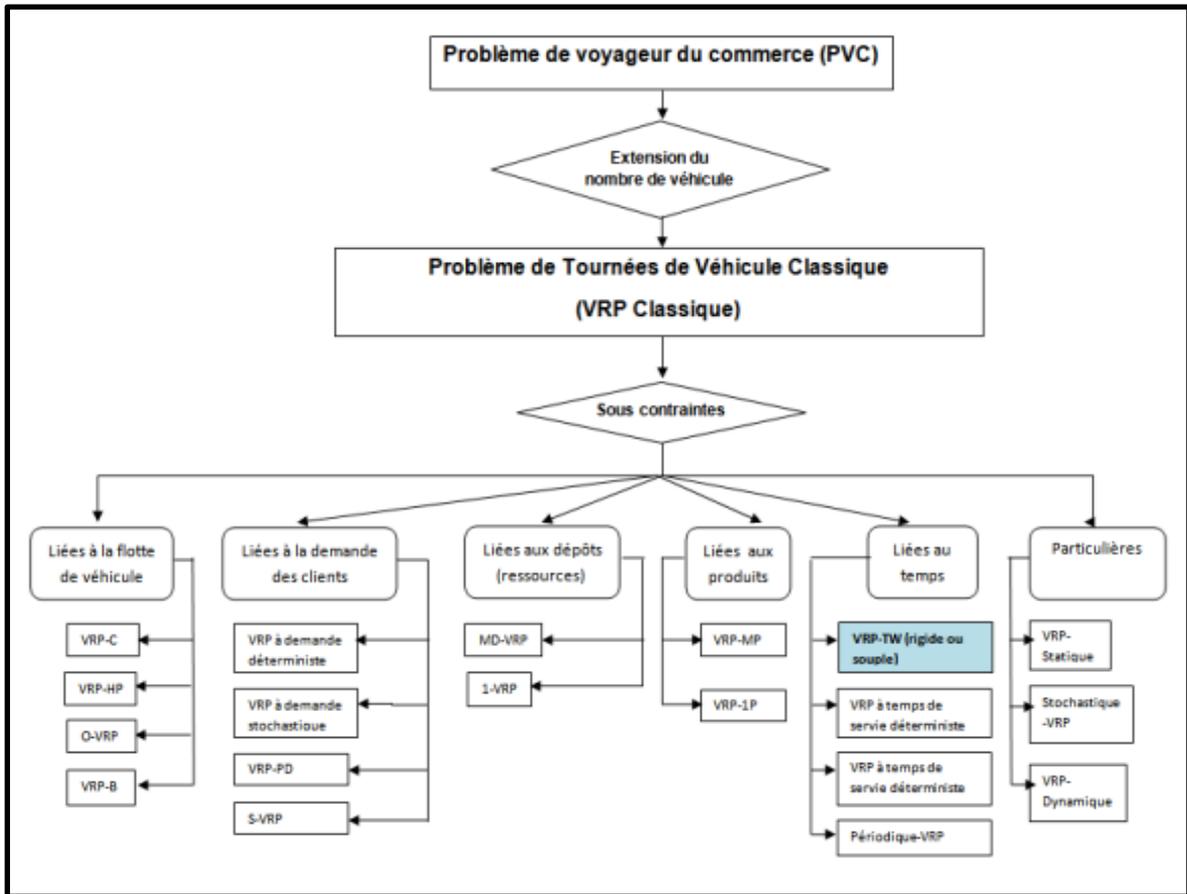


Figure 19:représentation globale des variantes du VRP.

La complexité de la résolution de ces problèmes est souvent liée à la recherche d'une solution qui satisfait simultanément toutes les contraintes en présence. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'appliquer des techniques d'optimisation plus avancées pour obtenir une solution optimale ou proche de l'optimum.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème du VRP, en présentant sa formulation mathématique et en énumérant les différentes méthodes de résolution disponibles, qu'elles soient exactes ou approchées.

Nous avons souligné que la plupart des problèmes d'optimisation combinatoire, y compris le VRP, appartiennent à la classe NP-difficile, et qu'il n'existe pas encore d'algorithme capable de les résoudre en temps polynomial.

Enfin, nous avons proposé une synthèse des différentes variantes du VRP, qui peut aider à choisir la variante la mieux adaptée à un cas réel particulier. Cette synthèse peut être utile pour notre propre cas réel, présenté dans ce mémoire.

CHAPITRE 3 :
RÉSOLUTION DE LA
PROBLÉMATIQUE

IV. CHAPITRE 3 : RÉOLUTION DE LA PROBLÉMATIQUE

Introduction

Le présent chapitre se focalise sur la mise en œuvre et la réalisation de la solution proposée, visant à répondre aux exigences de l'entreprise en réponse à la problématique présentée.

Notre approche méthodologique se déroule selon les étapes suivantes :

Dans un premier temps, nous procédons à la modélisation mathématique du problème de la planification de tournées de véhicules avec des fenêtres de temps.

Ensuite, nous exposons les algorithmes de résolution sélectionnés, en expliquant les raisons de leur choix et en décrivant leur mode de fonctionnement et leurs principes. Nous procédons enfin à une analyse des résultats obtenus.

Nous concluons en mettant en place un tableau de bord pour mieux gérer l'activité de transport et améliorer les performances de l'outil développé.

IV.1 La Modélisation mathématique

IV.1.1 Description du problème

Le problème que nous étudions est le VRP avec fenêtres de temps (Vehicle Routing Problem with Time Windows). Il s'agit de déterminer un ensemble de routes avec un coût minimum pour répondre aux demandes des clients, tout en tenant compte de contraintes temporelles.

Chaque client a une fenêtre de temps spécifique pendant laquelle il souhaite être servi.

De même, le dépôt central a également une fenêtre de temps, appelée "horizon de service" ou "temps d'ouverture de la journée", qui définit quand les véhicules peuvent effectuer leur tournée. [1]

En raison de ces contraintes temporelles, il est nécessaire d'utiliser plusieurs véhicules pour satisfaire les demandes des clients pendant l'horizon de service.

Une flotte de véhicules est disponible au dépôt central, noté 0, pour effectuer ces livraisons.

La résolution de ce problème consiste à concevoir l'ensemble des trajets tout en minimisant le nombre de véhicules et les coûts de transport, tout en respectant les contraintes temporelles et sociales. Les contraintes temporelles concernent les heures d'ouverture et de fermeture des clients, tandis que les contraintes sociales sont liées aux heures de conduite des chauffeurs, afin de garantir que la durée de chaque tournée ne dépasse pas un certain nombre d'heures.

IV.1.2 Formulation Mathématique

Le problème que nous étudions est représenté par un graphe simple $G = (N, A)$, où N est l'ensemble des positions des clients et du dépôt, et A est l'ensemble des arcs reliant les nœuds dans ce graphe.

Plus précisément, nous avons un ensemble $C = \{1, \dots, n\}$ de clients qui doivent être livrés à partir d'un seul dépôt. Les positions de ces clients, ainsi que les nœuds de départ et d'arrivée, sont définies comme $N = C \cup \{0, n + 1\}$, où 0 représente le point de départ et $n + 1$ représente le point d'arrivée au dépôt.

Chaque client $i \in C$ a une demande positive de produit q_i associée.

Au dépôt, une flotte de véhicules $V = \{1, \dots, m\}$ est disponible, où chaque véhicule possède une capacité Q qui est supérieure ou égale à la plus grande demande parmi tous les clients. Pour chaque paire de clients i et j , pour tous les i, j appartenant à N , nous connaissons le coût c_{ij} du transport direct entre ces clients qui est proportionnel à la distance à parcourir.

L'objectif est de minimiser la fonction objectif, la somme des coûts de transport des véhicules, tout en respectant des contraintes telles que la visite de chaque client une seule fois, les fenêtres de temps spécifiées pour chaque client et la capacité maximale des véhicules.

Les conditions suivantes sont également prises en compte :

- Tous les clients sont desservis par un seul dépôt.
- Le nombre et l'emplacement des clients sont prédéfinis.
- Chaque client n'est visité qu'une seule fois.
- Le nombre de véhicules disponibles est prédéterminé.
- La capacité du véhicule est définie et fixée pour toute la flotte (flotte homogène).
- La vitesse du véhicule est fixe
- Le coût de transport de chaque véhicule dépend de la distance parcourue
- Nous supposons que le réseau de transport est symétrique, c'est-à-dire que la distance entre les clients i et j est égale à la distance entre les clients j et i , notée $d_{ij} = d_{ji}$. Cette hypothèse de symétrie est couramment utilisée dans la modélisation du VRPTW pour simplifier les calculs et réduire la complexité du problème. En supposant que les distances sont symétriques, on évite de considérer chaque combinaison de clients deux fois

Dans ce problème, notre objectif est de trouver l'ensemble des tournées qui minimisent à la fois la distance totale parcourue et le coût total, pour un nombre minimal de véhicules partant d'un dépôt et y retournant.

Pour résoudre ce problème, nous définissons les variables de décision comme suit : $x_{ijk} = \{ 1, \text{ Si le véhicule } k \text{ part du sommet } i \text{ vers } j. 0, \text{ sinon } \forall i \in N; \forall j \in N; \forall k \in V;$

L'objectif de notre modèle est de minimiser le coût et la distance de toutes les tournées.

La fonction objectif est donc :

$$\text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk}$$

En prenant en considération les contraintes suivantes :

- Chaque client soit desservi une et une seule fois

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall 1 \leq j \leq n \dots\dots\dots (1)$$

- Le véhicule qui arrive chez un client est le même que celui qui part de ce client (conservation de flot)

$$\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n x_{ilk} = \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ljk} \dots\dots\dots (2)$$

- Chaque tournée commence et se termine au dépôt

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \dots\dots\dots (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \dots\dots\dots (4)$$

- La contrainte de capacité

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} * qi \leq Q \quad \forall 1 \leq k \leq m \dots\dots\dots (5)$$

- Les contraintes de binarité sur les variables de décision x_{ijk}

$$x_{ijk} \in (0,1) \quad \forall 0 \leq i, j \leq n; 1 \leq k \leq m \dots\dots\dots (6)$$

- La fonction de coût de la solution $X = x_{ijk} \forall i, j \in \text{Net} \forall k \in V$ est définie par :

$$\text{Cout}(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk}$$

- Le nombre de véhicules utilisée par la solution X est définie par :

$$\text{Nb véhicules}(X) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{0jk}$$

Les fonctions "coût" et "Nb véhicules" sont des fonctions de mesure qui permettent respectivement d'évaluer la solution en termes de distance totale parcourue et de nombre de véhicules utilisés.

Chaque client i est caractérisé par sa localisation, sa demande ainsi que l'intervalle de temps $\{e_i, l_i\}$ pendant lequel il peut être visité.

On suppose que la durée de déchargement est constante pour tous les clients.

Afin de prendre en compte les contraintes liées aux fenêtres de temps, on introduit les variables, constantes et équations suivantes :

Variables à déterminer :

- a_i = instant d'arrivée chez le client $i \in C$.
- b_i = instant de début de service chez le client $i \in C$.
- b_{0k} = instant auquel le véhicule k quitte le dépôt.
- $b_{n+1,k}$ = instant auquel le véhicule k retourne au dépôt.
- w_i = temps d'attente chez le client $i \in C$.

Constantes connues :

- e_i = borne inférieure de la fenêtre de temps du client $i \in C$.
- l_i = borne supérieure de la fenêtre de temps du client $i \in C$.
- c_{ij} = coût du déplacement de i à j ; $i, j \in C$.
- t_{ij} = le temps de parcours entre les deux clients i et j , ; $i, j \in C$.
- s_i = temps de service chez le client $i \in C$.

On autorise l'attente lorsqu'un véhicule arrive chez le client j avant l'heure prévue de début de service, c'est-à-dire avant e_j , suite à la fin du service chez le client $i \in C$.

On peut définir le temps de début de service chez le client $j \in C$ comme $b_j = \max \{e_j ; a_j\}$, où $a_j = \{b_i + s_i + t_{ij}\}$. Le temps d'attente chez le client j peut être calculé comme $w_j = b_j - a_j$.

Afin de prendre en compte les contraintes temporelles dans la formulation du VRP avec fenêtres de temps, on peut énoncer les contraintes suivantes :

Si $x_{ijk} = 1$, alors $b_i + s_i + t_{ij} \leq b_j$, pour tout $i, j \in C$ et $k \in V$ (7)

Si $x_{0jk} = 1$, alors $b_j \geq b_{0k} + t_{0j}$, pour tout $j \in C$ et $k \in V$ (8)

Si $x_{i,n+1,k} = 1$, alors $b_i + s_i + t_{i,n+1} \leq b_{n+1,k}$, pour tout $i \in C$ et $k \in V$ (9)

Les temps de début de service des clients $i \in C$ doivent être compris entre leur intervalle de temps $\{e_i, l_i\}$:

$e_i \leq b_i \leq l_i$ (10)

Le temps de début de service au dépôt doit être compris entre son intervalle de temps $\{e_0, l_0\}$:

$$e_0 \leq b_{0k} \leq l_0 \text{ pour tout } k \in V \dots\dots\dots (11)$$

$$e_{n+1} \leq b_{n+1,k} \leq l_{n+1} \text{ pour tout } k \in V \dots\dots\dots (12)$$

Le temps d'utilisation effectif des véhicules dans la solution X peut être exprimé comme suit :

$$\text{temps horaire}(X) = \sum_{k=1}^m (b_{n+1,k} - b_{0k}),$$

où $b_{n+1,k}$ et b_{0k} représentent respectivement le temps de début de service au dernier client et au dépôt pour le véhicule K.

Le modèle mathématique de notre problématique peut être formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
\text{Min}(f) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} \\
&\text{sous contraintes :} \\
\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} &= 1 \quad \forall 1 \leq j \leq n \quad (1) \\
\sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n x_{ilk} &= \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ljk} \quad (2) \\
\sum_{j=1}^n x_{0jk} &= 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad (3) \\
\sum_{i=1}^n x_{i0k} &= 1 \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad (4) \\
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ijk} * qi &\leq Q \quad \forall 1 \leq k \leq m \quad (5) \\
x_{ijk} = 1 &\Rightarrow b_i + s_i + t_{ij} \leq b_j, \text{ Pour tout } i, j \in C \text{ et } k \in V \quad (6) \\
x_{0jk} = 1 &\Rightarrow b_j \geq b_{0k} + t_{0j}, \text{ Pour tout } j \in C \text{ et } k \in V \quad (7) \\
x_{i,n+1,k} = 1 &\Rightarrow b_i + s_i + t_{i,n+1} \leq b_{n+1,k}, \text{ Pour tout } i \in C \text{ et } k \in V \quad (8) \\
e_i &\leq b_i \leq l_i \quad \text{pour tout } i \in C \quad (9) \\
e_0 &\leq b_{0,k} \leq l_0 \quad \text{Pour tout } k \in V \quad (10) \\
e_{n+1} &\leq b_{n+1,k} \leq l_{n+1} \quad \text{Pour tout } k \in V \quad (11) \\
x_{ijk} &\in (0,1) \quad \forall 0 \leq i, j \leq n; 1 \leq k \leq m \quad (12)
\end{aligned}$$

IV.1.3 Complexité du problème

Le VRPTW est une généralisation du VRP, qui bien que paraissant simple, est extrêmement difficile à résoudre. En effet, le VRP a été prouvé comme étant NP-difficile, ce qui implique qu'aucun algorithme déterministe efficace n'existe pour résoudre le problème en temps polynomial. Cette difficulté est également applicable au VRPTW, et bien qu'une solution optimale puisse être trouvée pour des instances de petite taille, il est vite impossible de trouver une solution pour des instances plus grandes.

IV.1.4 Vérification et Validation du modèle

1) Principe :

Cette procédure consiste en une étude mathématique visant à évaluer la qualité de la résolution numérique en vérifiant si la solution obtenue est réalisable ou si elle nécessite des ajustements pour répondre de manière optimale à la problématique posée.

Il s'agit essentiellement de vérifier si les concepts du programme sont corrects et si le modèle représente fidèlement la réalité.

Pour ce faire, deux approches sont généralement utilisées : la relaxation du modèle en remplaçant ou en supprimant des contraintes strictes, ou l'imposition de conditions aux limites en fonction de la formulation du problème, du nombre de variables et de la complexité du problème.

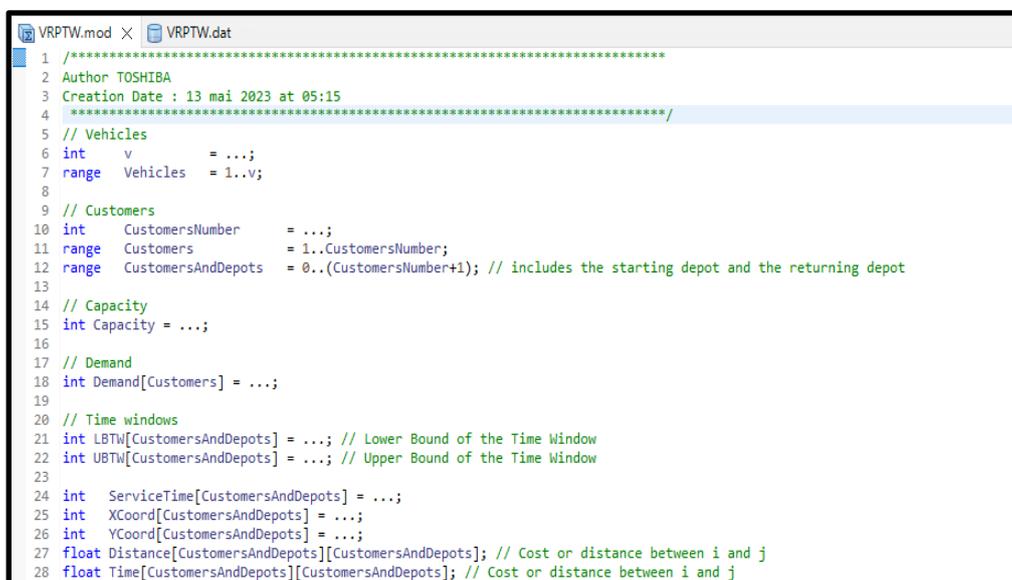
Dans notre cas (VRPTW), il est préférable de se concentrer sur les fenêtres de temps, qui peuvent être rigides lorsque le service doit être effectué impérativement pendant la fenêtre de temps ou relâchées lorsque le retard ou l'avance ne génère qu'une pénalité.

Afin de valider notre modèle, nous avons opté pour la relaxation des contraintes sur les fenêtres de temps, ce qui suppose que tous les clients peuvent être servis pendant l'intervalle de disponibilité du véhicule de livraison, avec des fenêtres plutôt souples et un horizon de service considérable.

Pour ce faire nous avons vérifié le modèle en utilisant le logiciel CPLEX [ANNEXE2]

2) Modélisation sous CPLEX et résultat de test :

Le modèle implémenté sous CPLEX ainsi que le résultat obtenu sont montrés dans les figures suivantes :



```
1 /*****  
2 Author TOSHIBA  
3 Creation Date : 13 mai 2023 at 05:15  
4 *****/  
5 // Vehicles  
6 int v = ...;  
7 range Vehicles = 1..v;  
8  
9 // Customers  
10 int CustomersNumber = ...;  
11 range Customers = 1..CustomersNumber;  
12 range CustomersAndDepots = 0..(CustomersNumber+1); // includes the starting depot and the returning depot  
13  
14 // Capacity  
15 int Capacity = ...;  
16  
17 // Demand  
18 int Demand[Customers] = ...;  
19  
20 // Time windows  
21 int LBTW[CustomersAndDepots] = ...; // Lower Bound of the Time Window  
22 int UBTW[CustomersAndDepots] = ...; // Upper Bound of the Time Window  
23  
24 int ServiceTime[CustomersAndDepots] = ...;  
25 int XCoord[CustomersAndDepots] = ...;  
26 int YCoord[CustomersAndDepots] = ...;  
27 float Distance[CustomersAndDepots][CustomersAndDepots]; // Cost or distance between i and j  
28 float Time[CustomersAndDepots][CustomersAndDepots]; // Cost or distance between i and j
```

Figure 20: déclaration des paramètres du modèle.

```

30 execute INITIALIZE {
31   for(var i in CustomersAndDepots) {
32     for(var j in CustomersAndDepots){
33       if (i == j) {
34         Distance[i][j] = 0;
35         Time[i][j] = 0;
36       } else {
37         Distance[i][j] = Math.floor(Math.sqrt(Math.pow(XCoord[i]-XCoord[j], 2) + Math.pow(YCoord[i]-YCoord[j], 2))*10)/10;
38         Time[i][j] = Distance [i][j] + ServiceTime[i];
39       }
40     }
41   }
42 }

```

Figure 21: procédure d'initialisation des paramètres.

```

44 // Decision variables
45 dvar boolean x[Vehicles][CustomersAndDepots][CustomersAndDepots]; // 1 if a vehicle drives directly from vertex i to vertex j
46 dvar int s[Vehicles][CustomersAndDepots]; // the time a vehicle starts to service a customer
47 dexpr float maxTimeSpentBetweenTwoCustomers = max(a,b in CustomersAndDepots)(UBTW[a] + Time[a][b] - LBTW[b]);

```

Figure 22: déclaration des variables de décision

```

*VRPTW.mod × VRPTW.dat
50 * MODEL*/
51 minimize sum(k in Vehicles, i,j in CustomersAndDepots) (Distance[i][j]*x[k][i][j]);
52
53 subject to {
54   forall(i in CustomersAndDepots, k in Vehicles)
55     x[k][i][i] == 0;
56
57   // Each customer is visited exactly once
58   forall (i in Customers)
59     sum(k in Vehicles, j in CustomersAndDepots) x[k][i][j] == 1;
60
61   // A vehicle can only be loaded up to it's capacity
62   forall(k in Vehicles)
63     sum(i in Customers, j in CustomersAndDepots)(Demand[i] * x[k][i][j]) <= Capacity;
64
65   // Each vehicle must leave the depot 0
66   forall(k in Vehicles)
67     sum (j in CustomersAndDepots)x[k][0][j] == 1;
68
69   // After a vehicle arrives at a customer it has to leave for another destination
70   forall(h in Customers, k in Vehicles)
71     sum(i in CustomersAndDepots)x[k][i][h] - sum(j in CustomersAndDepots)x[k][h][j] == 0;
72
73   // All vehicles must arrive at the depot n + 1
74   forall(k in Vehicles)
75     sum (i in CustomersAndDepots) x[k][i][CustomersNumber+1] == 1;
76
77   // The time windows are observed
78   forall(i in CustomersAndDepots, k in Vehicles)
79     LBTW[i] <= s[k][i] <= UBTW[i];
80
81   // From depot departs a number of vehicles equal to or smaller than v
82   forall(k in Vehicles, j in CustomersAndDepots)
83     sum (k in Vehicles, j in CustomersAndDepots) x[k][0][j] <= v;
84
85   // Vehicle departure time from a customer and its immediate successor
86   forall(i,j in CustomersAndDepots, k in Vehicles)
87     s[k][i] + Time[i][j] - maxTimeSpentBetweenTwoCustomers*(1 - x[k][i][j]) <= s[k][j];
88 };

```

Figure 23: les contraintes d'optimisation

```

90 execute DISPLAY {
91     writeln("Solutions: ");
92     for(var k in Vehicles)
93         for(var i in CustomersAndDepots)
94             for (var j in CustomersAndDepots)
95                 if(x[k][i][j] == 1)
96                     writeln("vehicle ", k, " from ", i, " to ", j);
97 }

```

Figure 24: boucle d'affichage de résultats

```

*VRPTW.mod  VRPTW.dat ×
1 v = 5;
2 CustomersNumber = 5;
3 Capacity = 200;
4
5 Demand = #[
6     1: 10,
7     2: 7,
8     3: 13,
9     4: 19,
10    5: 26
11 ]#;
12
13 ServiceTime = #[
14     0: 0,
15     1: 10,
16     2: 10,
17     3: 10,
18     4: 10,
19     5: 10,
20     6: 10
21 ]#;
22
23 XCoord = #[
24     0: 35,
25     1: 41,
26     2: 35,
27     3: 55,
28     4: 66,
29     5: 15,
30     6: 65
31 ]#;
32
33 YCoord = #[
34     0: 35,
35     1: 49,
36     2: 20,
37     3: 45,
38     4: 20,
39     5: 30,

```

```
43 LBTW = #[
44 0: 0,
45 1: 0,
46 2: 0,
47 3: 0,
48 4: 0,
49 5: 0,
50 6: 0
51 ]#;
52
53 UBTW = #[
54 0: 200,
55 1: 200,
56 2: 200,
57 3: 200,
58 4: 200,
59 5: 200,
60 6: 200
61 ]#;
```

Figure 25: importation des données

3) Résultats de test :

Nous avons choisi de tester notre modèle sur un échantillon de taille réduite, comportant 6 clients numérotés de 1 à 5, à chacun est attribuée une demande exprimée en tonne. Le but est de minimiser le nombre de véhicules en satisfaisant les besoins des clients tout en minimisant le coût total. Le dépôt, servant de point de départ et d'arrivée, est numéroté 0 pour le départ et 6 pour le retour.

Le résultat optimal obtenu est présenté ci-dessous :

```
« Journal de script (placer le code script ici pour l'exécuter)
// solution (optimal) with objective 225.7
Solutions:
vehicle 1 from 0 to 1
vehicle 1 from 1 to 3
vehicle 1 from 3 to 6
vehicle 2 from 0 to 6
vehicle 3 from 0 to 6
vehicle 4 from 0 to 6
vehicle 5 from 0 to 5
vehicle 5 from 2 to 4
vehicle 5 from 4 to 6
vehicle 5 from 5 to 2
```

Figure 26: résultat obtenu lors de l'exécution du programme.

CPLEX propose un résultat optimal avec une fonction objective de 225,7 Um, en utilisant seulement 2 véhicules parmi les 5 disponibles, et ce en moins d'une seconde d'exécution. Toutes les contraintes ont été satisfaites, ce qui nous permet d'affirmer que le modèle mathématique est vérifié.

IV.2 La résolution du modèle mathématique :

IV.2.1 Choix de la méthode de la résolution :

Notre étude porte sur la résolution du VRPTW, un problème complexe de complexité NP difficile pour lequel de nombreuses approches ont été proposées dans la littérature.

Pour notre part, nous avons choisi de nous concentrer sur les méthodes de résolution approchées, en particulier les métaheuristiques. Ces dernières sont connues pour leurs performances de haut niveau, car elles ont été développées pour fournir des résultats acceptables dans un temps limité.

Nous avons donc choisi de proposer deux solutions basées sur les algorithmes génétiques (AG) et les algorithmes de colonies de fourmis (ACO).

Les algorithmes génétiques ont été choisis pour leur simplicité d'implémentation, leur capacité à traiter des espaces de recherche importants et leur capacité à éliminer les solutions non valides.

Les colonies de fourmis ont été sélectionnées pour leur facilité de mise en œuvre, leur capacité à s'adapter aux changements dynamiques du graphe et leur capacité à fournir des solutions optimales simultanément pour tous les objectifs du problème.

La combinaison de ces deux approches permettra de garantir des résultats fiables pour la résolution de notre problème de VRPTW.

IV.2.2 Première solution : L'algorithme génétique (AG) :

Dans le chapitre 2, nous avons brièvement introduit le concept d'algorithmes génétiques.

Dans cette section, nous allons détailler notre méthodologie de travail en expliquant les étapes de l'algorithme génétique que nous avons utilisé pour résoudre le problème VRPTW, Voici notre procédure de travail :

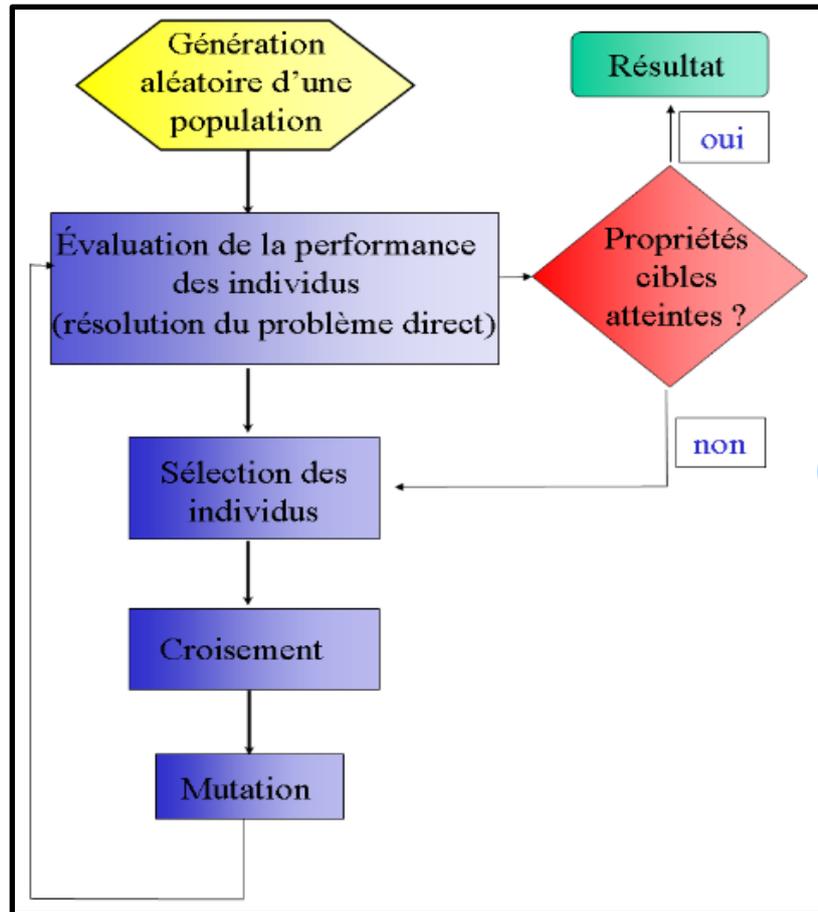


Figure 27: schématisation de la procédure de travail.

Notre démarche en approche génétique s'est déroulé comme suit :

- **La construction d'une population initiale :** Cette population sera créée en respectant les contraintes du problème VRPTW. On peut également utiliser des méthodes heuristiques simples pour obtenir des individus de bonne qualité et accroître la vitesse de convergence. Cependant, cela peut empêcher l'algorithme de se concentrer sur d'autres parties de l'espace de recherche qui pourraient contenir l'optimum. Dans notre approche, nous avons opté pour une génération aléatoire de la population initiale

Le codage est une étape cruciale qui permet de représenter les solutions sous forme de chromosomes. Nous avons utilisé le « codage par liste de permutation » qui consiste à représenter un chromosome comme une suite (permutation) de nœuds. Chaque nœud représente un client et l'ordre dans lequel ils sont visités par un véhicule est donné par l'indice qui leur est associé dans la permutation. L'indice 0 représente le dépôt et les autres indices représentent les clients à servir.

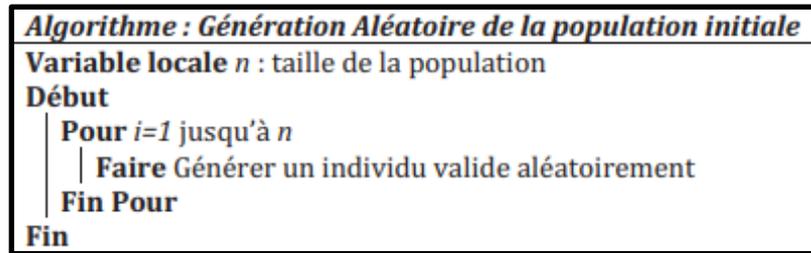


Figure 28: : Algorithme de génération de la population initiale

- **Évaluation des chromosomes :** Consiste à calculer leur qualité en fonction des critères de performance définis pour le problème VRPTW. Dans notre cas, ces critères incluent la durée totale de la tournée, le nombre de véhicules utilisés, le respect des fenêtres de temps et la distance totale parcourue.

Pour chaque chromosome, nous simulons la tournée des véhicules en respectant les contraintes du problème, puis nous calculons les critères de performance.

Si le chromosome ne satisfait pas toutes les contraintes, il est considéré comme non valide et sa qualité est affectée d'une valeur élevée, ce qui signifie qu'il est peu performant.

L'évaluation des chromosomes est importante car elle permet de mesurer la qualité des solutions générées par l'algorithme génétique et de guider la sélection des chromosomes les plus prometteurs pour la reproduction et la mutation.

- **La sélection :**

Chaque génération de l'algorithme nécessite une opération de sélection pour former une nouvelle population intermédiaire, à partir de la population de la génération courante i .

Il existe différentes techniques de sélection, et nous avons opté pour la plus simple, appelée "classement". Cette méthode consiste à classer les n chromosomes de la population selon l'ordre croissant de leur évaluation respective. Ensuite, seuls les m premiers individus sont sélectionnés. Ainsi, seuls les meilleurs individus sont conservés pour la suite de l'algorithme.

- **Croisement :**

Cet opérateur permet de combiner les gènes de deux parents pour créer de nouveaux descendants. L'objectif est que les enfants héritent des meilleures caractéristiques de leurs parents. Pour ce faire, nous définissons une position de croisement P . Lors de l'opération de croisement, les portions d'ADN situées avant la position P d'un parent sont combinées avec les portions d'ADN situées après la position P de l'autre parent pour créer deux descendants

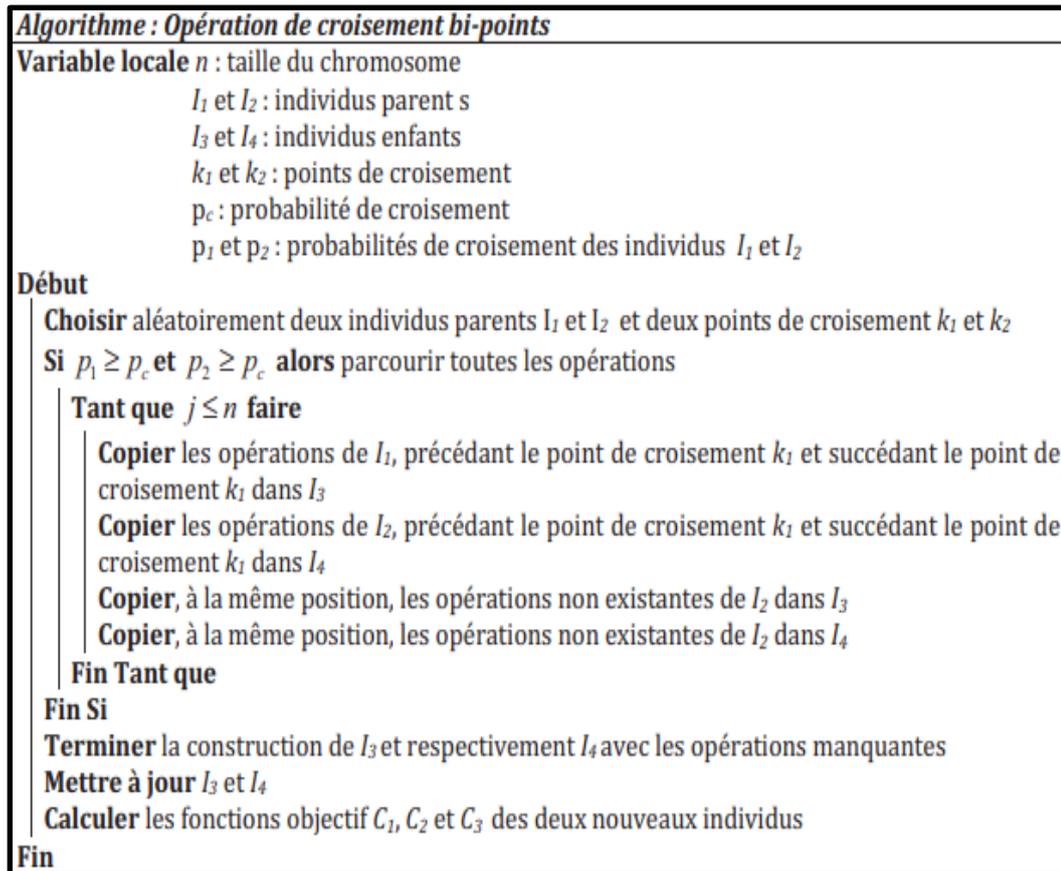


Figure 29: Algorithme de croisement à un point k .

Mutation : La mutation est un opérateur qui permet de modifier un chromosome en échangeant les valeurs de deux allèles choisis au hasard.

Cette opération vise à éviter une convergence trop rapide de l'algorithme génétique vers un minimum local en explorant de nouvelles solutions potentielles. Il est important de choisir une valeur de mutation relativement faible afin de ne pas basculer dans une recherche aléatoire et de préserver les principes de sélection et d'évolution de l'algorithme.

L'algorithme que nous avons utilisé pour la mutation est le suivant :

| Algorithme : Opération de mutation bi-points | |
|---|--|
| Variable locale | n : taille du chromosome I_1 : individu I_2 : individu muté k_1 et k_2 : points de mutation p_m : probabilité de mutation p : probabilité de mutation de l'individu |
| Début | Choisir aléatoirement un individu I_1 et deux points de mutation k_1 et k_2 correspondant respectivement aux opérations O_i et O_j Si $p \geq p_m$ alors Permuter les opérations O_i et O_j Fin Si Mettre à jour I_2 Calculer les fonctions objectif C_1 , C_2 et C_3 du nouvel individu |
| Fin | |

Figure 30: Algorithme de mutation.

IV.2.3 Deuxième solution : MACS-VRPTW :

Dans cette partie, nous utiliserons MACS-VRPTW (Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows), une variation bien connue de l'optimisation par colonie de fourmis (ACO), pour résoudre le VRPTW.

MACS-VRPTW (Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows) est une approche basée sur l'optimisation par colonie de fourmis (ACO) utilisée pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules avec fenêtres de temps.

MACS-VRPTW est organisé avec une hiérarchie de colonies de fourmis artificielles conçues pour optimiser successivement une fonction à objectifs multiples :

La première colonie minimise le nombre de véhicules tandis que la deuxième colonie minimise les distances parcourues. La coopération entre les colonies s'effectue par échange d'informations grâce à une mise à jour de phéromones.

Nous démontrons que MACS-VRPTW est compétitif avec les meilleures méthodes existantes connues, tant en termes de qualité des solutions que de temps de calcul. **L'algorithme :**

MACS-VRPTW est une extension des algorithmes de colonies de fourmis avec pour objectif d'optimiser deux fonctions objectives, ce qui nécessite deux colonies distinctes : la première, appelée "ACS-VEI", vise à minimiser le nombre de véhicules, tandis que la deuxième, "ACS-TIME", vise à minimiser la distance totale parcourue, c'est-à-dire à optimiser le temps de transport.

La figure suivante présente le principe de l'optimisation à objectifs multiples :

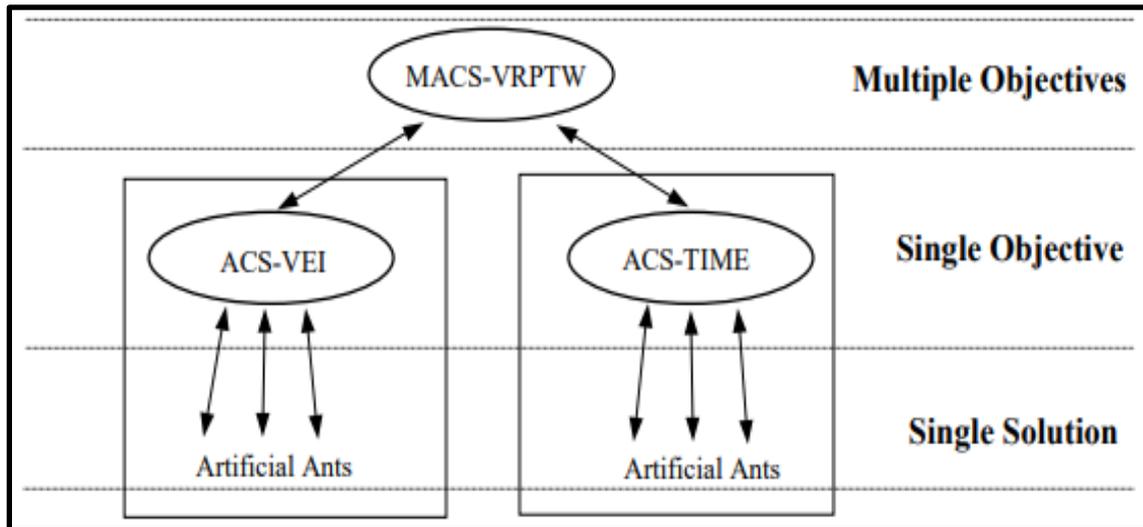


Figure 31: Architecture du système MACS-VRPTW.

```

/* MACS-VRPTW: Multiple Ant Colony System for Vehicle Routing Problems with Time Windows */
Procedure MACS-VRPTW ()
1. /* Initialization */
   /*  $\psi^*$  is the best feasible solution: lowest number of vehicles and shortest travel time
   #active_vehicles( $\psi$ ) computes the number of active vehicles in the feasible solution  $\psi$  */
    $\psi^*$   $\leftarrow$  feasible initial solution with unlimited number of vehicles produced
   with a nearest neighbor heuristic
2. /* Main loop */
   Repeat
     v  $\leftarrow$  #active_vehicles( $\psi^*$ )
     Activate ACS-VEI(v - 1)
     Activate ACS-TIME(v)
     While ACS-VEI and ACS-TIME are active
       Wait an improved solution  $\psi$  from ACS-VEI or ACS-TIME
        $\psi^* \leftarrow \psi$ 
       if #active_vehicles( $\psi^*$ ) < v then
         kill ACS-TIME and ACS-VEI
       End While
   until a stopping criterion is met
  
```

Figure 32: Algorithme MACS-VRPTW.

Dans l'algorithme MACS-VRPTW (Figures 32 et 33), les deux objectifs sont optimisés simultanément en coordonnant les activités de deux colonies basées sur ACS. L'objectif de la

première colonie, ACS-VEI, est de réduire le nombre de véhicules utilisés, tandis que la deuxième colonie, ACS-TIME, optimise les solutions réalisables trouvées par ACS-VEI.

Les deux colonies utilisent des pistes de phéromones indépendantes mais collaborent en partageant la variable gb ψ^{gb} gérée par MACS-VRPTW. Initialement, ψ^{gb} est une solution VRPTW réalisable trouvée avec une heuristique du plus proche voisin.

Ensuite, ψ^{gb} est amélioré par les deux colonies. Lorsque ACS-VEI est activé, il tente de trouver une solution réalisable avec un véhicule de moins que le nombre de véhicules utilisés dans ψ^{gb} .

L'objectif d'ACS-TIME est d'optimiser le temps de déplacement total des solutions qui utilisent autant de véhicules que ceux utilisés dans ψ^{gb} .

ψ^{gb} est mis à jour chaque fois que l'une des colonies calcule une solution réalisable améliorée. Dans le cas où la solution améliorée contient moins de véhicules que ceux utilisés dans ψ^{gb} , MACS-VRPTW arrête ACS-TIME et ACS-VEI. Ensuite, le processus est itéré et deux nouvelles colonies sont activées, travaillant avec le nouveau nombre réduit de véhicules.

ACS-TIME et ACS-VEI :

Les principes de fonctionnement des colonies ACS-VEI et ACS-TIME sont décrits dans les Figures suivantes :

```

/* ACS-TIME: Travel time minimization. */
Procedure ACS-TIME (v)
/* Parameter v is the smallest number of vehicles for which a feasible solution has been computed */
1. /* Initialization */
   initialize pheromone and data structures using v
2. /* Cycle */
   Repeat
     for each ant k
       /* construct a solution  $\psi^k$  */
       new_active_ant(k, local_search=TRUE, 0)
     end for each
     /* update the best solution if it is improved */
     if  $\exists k : \psi^k$  is feasible and  $J_{\psi^k} < J_{\psi^{gb}}$  then
       send  $\psi^k$  to MACS-VRPTW
     /* perform global updating according to Equation 2 */
      $\tau_{ij} = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho / J_{\psi^{gb}}$   $\forall (i, j) \in \psi^{gb}$ 
   until a stopping criterion is met

```

Figure 33: la procédure ACS-Time.

La colonie ACS-TIME (Figure 35) est une colonie basée sur ACS traditionnelle dont l'objectif est de calculer un parcours aussi court que possible.

Dans ACS-TIME, m fourmis artificielles sont activées pour construire des solutions du problème, ψ^1, \dots, ψ^m . Chaque solution est construite en appelant la procédure new active ant, similaire à la procédure constructive ACS conçue pour le TSP. Une fois que ψ^1, \dots, ψ^m ont été calculées, elles sont comparées à ψ^{gb} et, si une solution est meilleure, elle est envoyée à MACS-VRPTW.

MACS-VRPTW utilise cette solution pour mettre à jour ψ^{gb} . Après la génération des solutions, les mises à jour globales sont effectuées à l'aide de ψ^{gb} .

La colonie ACS-VEI (Figure 36) recherche une solution réalisable en maximisant le nombre de clients visités. ACS-VEI commence son calcul en utilisant $v - 1$ véhicules, c'est-à-dire un véhicule de moins que le plus petit nombre de véhicules pour lesquels une solution réalisable a été calculée (c'est-à-dire le nombre de véhicules dans ψ^{gb}). Pendant cette recherche, la colonie produit des solutions irréalisables dans lesquelles certains clients ne sont pas visités. Dans ACS-VEI, la solution calculée depuis le début de l'essai avec le plus grand nombre de clients visités est stockée dans la variable $\psi^{ACS-VEI}$. Une solution est meilleure que $\psi^{ACS-VEI}$ uniquement lorsque le nombre de clients visités est augmenté.

```

/* ACS-VEI: Number of vehicles minimization. */
Procedure ACS-VEI (s)
  /* Parameter s is set to v-1, that is, one vehicle less than the smallest number of vehicles for which a feasible solution
  has been computed
  #visited_customers(ψ) computes the number of customers that have been visited in solution ψ */
1. /* Initialization */
  initialize pheromone and data structures using s
  ψACS-VEI ← initial solution with s vehicles produced with a nearest neighbor
  heuristic. /* ψACS-VEI is not necessary feasible */
2. /* Cycle */
  Repeat
    for each ant k
      /* construct a solution ψk */
      new_active_ant(k, local_search=FALSE, IN)
      ∀ customer j ∈ ψk: INj ← INj + 1
    end for each
    /* update the best solution if it is improved */
    if ∃ k : #visited_customers(ψk) > #visited_customers(ψACS-VEI) then
      ψACS-VEI ← ψk
      ∀ j: INj ← 0 /* reset IN */
      if ψACS-VEI is feasible then
        send ψACS-VEI to MACS-VRPTW
      /* perform global updating according to Equation 2 using both ψACS-VEI and ψe */
      τij = (1 - ρ) · τij + ρ / JvACS-VEI    ∀(i, j) ∈ ψACS-VEI
      τij = (1 - ρ) · τij + ρ / Jve        ∀(i, j) ∈ ψe
  until a stopping criterion is met

```

Figure 34: la procédure ACS-VEI.

IV.3 III.3 Expérimentation :

Dans cette partie on présente l’outil utilisé pour l’implémentation des deux solutions proposées et on illustre les résultats obtenus dans les deux cas :

IV.3.1 Présentation de l’outil et l’environnement de développement :

- **Python** : c’est un langage de programmation interprété, le code source est exécuté ligne par ligne à l’aide d’un interpréteur sans nécessiter de compilation préalable.
- **Visual Studio Code** : (VS Code) est un environnement de développement intégré (IDE) gratuit et open-source développé par Microsoft. Il offre une interface utilisateur claire et intuitive avec des panneaux latéraux personnalisables, une barre de menus et une barre d’outils.

- **L'environnement matériel :** Le PC HP que nous avons utilisé est équipé d'un processeur Intel Core i7-6600U, de 16 Go de RAM DDR4 2133 MHz, d'un stockage SSD de 512 Go, d'une carte graphique Intel HD 520, fonctionnant sous Windows 10

IV.3.2 Résultats obtenus :

Dans cette phase de calcul, notre objectif est de déterminer la solution qui minimise notre fonction objective. Cette fonction vise à organiser une journée de service pour 785 clients, où chaque client a une demande spécifique exprimée en kilogrammes à satisfaire le jour même. Afin de prendre en compte les coûts de transport, nous avons préalablement établi une matrice de distances entre les différents nœuds, car le coût total du transport est directement lié aux distances parcourues par les véhicules utilisés.

- **Résultats obtenus par l'algorithme génétique :**

En utilisant l'algorithme génétique avec 60000 générations, nous avons obtenu les résultats suivants :

Meilleure solution trouvée :

```

Total vehicles: 22
Working Hours: 557.7269903474535
Total travel distance: 586.2493991832648
Cost: 23143.976389530715

Vehicle 1 Route (41 customers):
- depart - BNA644 - CPA117 - BADR017 - AGB006 - BADR635 - CPA187 - BEA018 - AGB009 - AGB022 - BNA614 - CPA430 - CNEP512 - CNEP510 - BEA117 - BADR457 - BNA634 - CPA199
- BNA615 - BADR456 - BADR649 - CPA155 - CNEPDG - CNEP216 - BADR903 - CPA119 - BNA648 - ABC161 - TRESOR10001 - BNA136 - CPA098 - BDL196 - CPA173 - BADR053 - CPA191 - CNEP606
- NATIXIS167 - APC BOUOUAOU - ABC167 - BNA279 - BADR366 - FRANSABK0901 - depart

Vehicle 2 Route (38 customers):
- depart - SGA505 - CPA827 - CASH0600 - BADR056 - BNA616 - BNA148 - BDL114 - ABC021 - BDL168 - BADR269 - BEA100 - BEA005 - BNA650 - CNEP600 - BNA103 - FRANSABK - NATIXIS162
- TRESOR6001 - BNA620 - BADR624 - EBK1607 - CNEP152 - SGA203 - ANEP REGIE - BNA851 - BDL083 - SAGPS - BNA132 - MOBILISBOUSADA - BNA590 - BDL745 - EBK601 - BEACALTRAM - TB207
- BNA582 - CPA128 - CNEP115 - BEA016 - depart

Vehicle 3 Route (24 customers):
- depart - TB205 - EBK1606 - CPA053 - BEA031 - CPA111 - BADR582 - CNEP127 - BNA438 - CNEP202 - BNA589 - BDL110 - CPA122 - BDL161 - REGIE EPH - COMMUNE BIRINE - CPA143
- CHANGEMENT DE COURIER ENTRE ALGER ET CONSTANTINE - ELBARAKA111 - CNEP210 - CNEP199 - CPA826 - CNEP132 - BNA858 - BEA098 - depart

Vehicle 4 Route (31 customers):
- depart - BNA654 - AGB018 - EBK1702 - BADR463 - TB601 - BDL147 - BDL143 - CNEP002 - BEA004 - BNA626 - BADR640 - NATIXIS001 - CPA192 - AGB002 - HTFA102 - BDL083 - BADR275
- BDL190 - SGA204 - AGB213 - ELBARAKA205 - BADR153 - BADR465 - APC TIDJELABINE - CNEP111 - BEA111 - CNEP607 - BEADRAO - BEA089 - HTFA106 - BADR180 - depart

Vehicle 5 Route (38 customers):
- depart - TB213 - BADR652 - BADR625 - CNAN Med SPA - CNEP116 - BDL122 - BDL DCH064 - BADR634 - CPA178 - BADR368 - CNEP103 - CPA120 - AGB016 - BADR357 - BADR848 - ABA5307
- CPA015 - CPA126 - CNEP129 - BDL148 - BDL175 - BNA100 - BADR460 - BADR461 - CNEP122 - BEA068 - BDL478 - BEAFORMATION - BDL135 - SGA451 - EPH CHORFA - BNA601 - AGB008 - BEA027
- AGB003 - BDL845 - CHANGEMENT DE COURRIER ORAN - BEA020 - depart

Vehicle 6 Route (21 customers):
- depart - CNEP162 - CPA110 - BNA444 - BADR459 - BNA581 - BADR447 - CPA315 - BNA857 - CNEP502 - BNA261 - BADR442 - CPA179 - BNA147 - BNA587 - BNA901 - CNEP203 - CASH - SGA503
- ECOLE DES CADETS - CPA189 - TRESOR15001 - depart

Vehicle 7 Route (44 customers):
- depart - BEA017 - BDL159 - BNA139 - TB161 - BNA611 - BDL177 - BEA006 - BDL130 - BEA024 - BNA639 - BEA047 - BADR449 - BADR266 - BADR183 - BNA135 - BADR621 - BADR633 - BNA609
- CPA115 - BADR359 - BDL195 - BNA627 - AGB014 - GHARDAIA - BNA636 - ABC164 - CPA138 - CNEP108 - BADR428 - BNA260 - CPA123 - EPH THENIA - BDL150 - CNEP109 - BDL105 - SGA031 - BNA640
- BNA621 - SGA853 - BDL120 - BADR650 - DTP CHLEF - ELBARAKA411 - BNA850 - depart

Vehicle 8 Route (40 customers):
- depart - BADRSAPS - BDL846 - TRESOR17001 - SGA036 - BNA617 - BEAARCHIVE - CPA822 - ABC163 - BNA145 - BADR427 - BADR436 - BNA152 - BADR444 - BDL184 - BEADMP - CNEP107 - BADR850
- BNA610 - CNEP004 - BDL142 - CNEP366 - AGB025 - CNEP206 - BNA138 - CPA159 - BADR367 - BADR361 - NATIXIS061 - BADR653 - AGB010 - CNEP651 - BADRGRE - TB211 - BDL831 - BADR648
- EBK HASSIBA - EBK00UBA - CPA139 - SGA011 - CPA153 - depart

Vehicle 9 Route (31 customers):
- depart - CPA141 - CNEP117 - CPA057 - BADR574 - CNEP367 - BADR197 - AGB021 - BADR267 - FRANSABK0601 - CNEP211 - BADR576 - BNA638 - AGB024 - CPA365 - BDL150 - BNA170 - CNEP509
- BADR431 - BDL060 - CNEP155 - BNA436 - BDL165 - BADR579 - CNEP204 - BADR364 - SGA501 - BEADCT - NATIXIS021 - CNEP130 - CPA160 - CPA108 - depart

```

Vehicle 10 Route (28 customers):
- depart - BDL160 - CNEP121 - CPA196 - BEADRCR - BADR572 - BDL179 - CPA000 - BADR623 - BNA427 - BNA602 - SGA630 - DUAC - CPA040 - ABA5301 - BDL155 - BADR429 - CNEP154 - BNA441 - BDL181 - CPA828 - BDL153 - CPA106 - BNA196 - CPA602 - CNEP126 - BADR276 - CASH ASSURANCE - INFOR - depart

Vehicle 11 Route (50 customers):
- depart - BDL194 - BADR026 - BEA025 - BDL187 - BNA643 - BDL DCR075 - CPA145 - NATIXIS151 - IHMT - BDL604 - BNA153 - CNEP100 - BADR369 - BEA010 - TB204 - BADR101 - BADR176 - BNA605 - BNA641 - CPA707 - CNEP112 - BNA179 - NATIXIS156 - BADR655 - BDL364 - BNA440 - TB209 - BEABvd MED V - CPA705 - BNA584 - CNEP511 - BNA119 - BNA577 - BDL166 - BDL170 - FRANSBK1607 - FRANSABK1 - BDL162 - AG0023 - NATIXIS163 - BDL144 - CPA174 - BNA628 - AG0007 - BNA629 - CNEP605 - AG0005 - BNA608 - CNEP118 - SGA261 - AG0026 - depart

Vehicle 12 Route (42 customers):
- depart - BADR622 - BEA025 - CNEP205 - CPA704 - BNA141 - CPA184 - BNA151 - BADR656 - BDL187 - BDL039 - CNEP208 - BADR637 - BNA701 - BDL176 - CNEP151 - BADR426 - CNEP201 - CPA162 - CPA104 - BNA460 - CPA056 - CPA163 - BADR264 - BNA176 - ABA5302 - BEA002 - BADR573 - BADR575 - CNEP161 - BNA128 - BDL939 - CNEP215 - BEA030 - BEA015 - BDL106 - BADR618 - CNEP131 - TRESOR97001 - SGA225 - TB208 - BADR631 - TRESOR90001 - depart

Vehicle 13 Route (28 customers):
- depart - BADR054 - CNEP119 - SGA251 - BNA619 - BEA090 - BDL115 - BNA108 - CNEP214 - BADR365 - AG0121 - CPA157 - CPA116 - BEA091 - CPA136 - BNA849 - BNA603 - CPA161 - BNA462 - BDL844 - BNA183 - BADR163 - BADR653 - BDL121 - SGA - BDL140 - BNA272 - BEA038 - Citibank001 - depart

Vehicle 14 Route (48 customers):
- depart - DEP - CPA169 - BNA642 - SGA502 - BEA086 - TB206 - AG0001 - SGA00035 - BNP700 - AG0210 - BDL025 DDFE - BNA637 - BNA633 - CPA105 - NATIXIS091 - CNEP603 - BNA442 - CPA102 - BEA102 - BEA120 - REGIE F - ABC162 - BEADRA0 - BNA437 - AG0117 - SGA506 - BADR115 - AG0017 - BNA632 - APC LARBATACH - CPA003 - BNA104 - BDL747 - CPA022 - BADR462 - BNA165 - BEA001 - HSBK100 - BEA037 - AG0108 - BNA356 - BDL171 - BADR638 - BNA167 - BDL173 - BADR606 - CNEP217 - BNA635 - depart

Vehicle 15 Route (30 customers):
- depart - ABB BLIDA JOURNAL - CACHE ASSURANCE - BDL192 - BNA278 - BNA268 - BEADRCR - BNA511 - BDL156 - CNEP601 - BADR002 - BDL139 - BADR905 - SGA852 - BDL163 - CNEP652 - BNA645 - BNA430 - ELBARAKA110 - BDL110 - BNA127 - CPA370 - BADR581 - DTP BOUIRA - CPA183 - CPA185 - CPA059 - EBK - BADR006 - BADR585 - CPA029 - depart

Vehicle 16 Route (39 customers):
- depart - CPA156 - CNEP005 - BDL152 - BADR441 - CNEP158 - BNA161 - BNA624 - ABA5300 - ELBARAKA10 - CPA065 - BEADOS - BDL109 - BNA631 - BADR363 - BEA012 - BDL111 - ABC151 - ELBARAKA407 - BADR584 - CNEP368 - NATIXIS168 - DSP DJELFA - MOBILIS MSILA - WILAYA - BADR015+500 - BDL145 - CNEP207 - BDL133 - BEADGFT F3 - CPA006 - BNA109 - CPA142 - BNA599 - ABC168 - BNA149 - BADR857 - BEA112 - BNA578 - CNEP218 - depart

Vehicle 17 Route (40 customers):
- depart - AG0011 - TB08A - CPA094 - FRANSBK1606 - BNA140 - CNEP123 - BADR265 - BADR271 - BADR433 - BADR009 - CPA164 - BADR425 - BDL735 - BDL157 - EBK1602 - NATIXIS062 - CNEP101 - BADR647 - MOBILIS - BDL127 - CNEP104 - BADR011 - BNA708 - BADR181 - BDL038 - BADR281 - CPA054 - BADR042 - CPA001 - BDL112 - BDL117 - BADR464 - CPA121 - CPA302 - AG0107 - BEA041 - BEA026 - CNEP219 - BNA612 - depart

Vehicle 18 Route (44 customers):
- depart - BNA1220 - CNEP001 - BNA586 - BADR362 - CNEP150 - CNEP120 - BNA651 - BNA187 - BADR636 - EBK901 - CNEP213 - CPA125 - DEP BOUIRA - BNA144 - NATIXIS06 - BDL174 - SGA201 - CPA134 - BADR437 - BADR639 - BDL108 - BNA576 - CPA112 - BADR358 - BADR432 - BNA262 - ABA5310 - BNA428 - BNA011 - BDL134 - SGA504 - TRESOR28001 - TB215 - BADR571 - CPA149 - BNA431 - AG0012 - ABC165 - BADR578 - CPA101 - BADR626 - BDL089 - BEAO-5 - APC - depart

Vehicle 19 Route (27 customers):
- depart - BADR443 - BEA013 - HBTF105 - CNEP160 - BNA190 - CPA193 - BNA150 - BNA623 - FIN13 - FRANSBK1501 - BDL164 - BDL104 - CPA124 - SGA851 - BDL119 - BNA445 - CPA146 - BADR435 - BNA622 - TB203 - CPA631 - CPA823 - BDL151 - BDL095 - BEA019 - CNEP106 - CNEP105 - depart

Vehicle 20 Route (36 customers):
- depart - BADR277 - TRESOR20001 - CPA004 - CPADRCR - CNEP159 - BADR846 - BDL183 - BNA625 - CPA107 - SGA202 - BNA439 - BADR172 - TB202 - CPA900 - DOU BOUMERDES - SAIDA - CNA114 - CNEP003 - BNA588 - BNA585 - CPA027 - TRESOR90001 - CNEP110 - BADR050 - TPW99 - CPA020 - BNA646 - CNEP209 - BNA858 - BDL123 - BEA008 - BDL182 - CPA463 - TB203 - BADR638 - TRESOR42001 - depart

Vehicle 21 Route (28 customers):
- depart - CPA114 - BEA040 - CNEP212 - BADR273 - BEAECONOMAT - CPA065ABC163 - HBTF101 - FRANSBK1608 - CPA131 - BADR279 - BADR434 - CPA175 - EBK1605 - TRESOR44001 - BEA095 - CNEP602 - CPA132 - BNA625 - BDL VISA CARTE - CPA061 - BADR629 - FRANSBK1604 - BNA653 - BADR856 - BADR060 - FGCHPI - APC TIMEZIT - ABC061 - depart

Vehicle 22 Route (38 customers):
- depart - TB201 - BEA022 - TRESOR26001 - BNA275 - CNEP024 - BADR588 - ABC166 - BADR440 - BADR852 - BEA118 - AG0201 - CPA118 - AG0004 - CPA135 - BDL154 - TB210 - BADR278 - TRESOR35001 - BNA583 - CNEP200 - TRESOR16001 - AG0026 - BEA002 - CPA154 - CNEP153 - ABC091 - BADR136 - BNA630 - BDL070 - EBK1601 - BNA195 - ABC101 - BNA118 - BNA194 - BNA607 - CPA070 - BNA191 - BEA034 - depart

Figure 35: L'ordre de passage des véhicules pour les tournées.

Ces résultats ont été obtenus après une exploration itérative et une optimisation du problème à l'aide de l'algorithme génétique sur une période de 6000 générations.

● Résultats obtenus par MACS :

Total vehicles: 20
Working Hours: 574.2955328423773
Total travel distance: 547.8909137108926
Cost: 21122.18644655327

Vehicle 1 Route (33 customers):
- depart - BDL109 - BNA628 - CPA111 - BADR639 - BDL112 - BEA015 - CNEP152 - BADR431 - BEAARCHIVE - BDL VISA CARTE - CNEP162 - CNEP209 - AG0005 - BADR584 - BDL364 - BNA651 - MOBILIS - BADR115 - HBTF105 - BADR440 - NATIXIS167 - ABC091 - CNEP114 - BADR856 - BEA005 - BDL839 - BNA849 - BNA620 - CNEP06 - BADR457 - NATIXIS151 - CPA160 - BADR011 - depart

Vehicle 2 Route (56 customers):
- depart - CNEP206 - BNA587 - BDL108 - BNA616 - BEA102 - BNA635 - NATIXIS163 - BEAECONOMAT - CPA125 - AG0025 - CPA121 - FRANSBK1604 - BNA179 - BNA153 - CPA136 - CNEP603 - SGA202 - BADR434 - AG0210 - BNA581 - BDL745 - ABC161 - TB201 - BNA654 - BDL DCR075 - AG0004 - BADR637 - CPA020 - BNA165 - CNEP130 - CPA175 - BNA641 - BNA576 - BADR197 - TB204 - BNA650 - ABC168 - CNEP110 - BNA104 - AG0024 - BEADRAO - BNA119 - BDL165 - CPA120 - CNEP211 - BDL187 - CPA057 - CNEP109 - FRANSABK - BEA037 - BDL182 - CNEP120 - TB203 - CPA193 - CPA027 - CNEP204 - depart

Vehicle 3 Route (29 customers):
- depart - CNEP509 - BDL478 - SGA00035 - ABA5302 - BNA176 - BDL162 - CPA065 - CNEP100 - BADR441 - SGA201 - SGA853 - BDL845 - TB209 - CPA130 - SGA630 - BDL134 - BEA090 - BNA603 - ABC101 - BADR618 - BNA196 - BADR903 - BADR575 - SGA851 - CNEP083 - HBTF106 - BDL160 - CNEP213 - depart

Vehicle 4 Route (44 customers):
- depart - CNEP201 - APC - BDL144 - HBTF101 - CPA110 - TB213 - CPA707 - CNEP367 - CPA315 - CNEP203 - BDL145 - CNEP158 - BNA145 - CPA053 - BEA068 - HBTF102 - APC TIMEZIT - BNA151 - BNA653 - BNA279 - BDL122 - NATIXIS021 - BNA441 - BADR009 - CPA826 - BADR275 - AG0021 - CPA104 - CNEP115 - BADR576 - BADRGRE - BADR852 - CPA187 - BNA599 - TB206 - AG0017 - BEA016 - CNEP118 - BADR635 - BNA167 - CPA105 - ABA5300 - BEA008 - TRESOR20001 - depart

Vehicle 5 Route (36 customers):
- depart - CNEP127 - BDL177 - BADR361 - CNEP368 - BNA586 - BEA040 - BDL123 - BDL106 - CNEP123 - BADR429 - BADR266 - BEA026 - BDL196 - BADR464 - CNEP218 - CPA189 - BADR623 - BEABvd MED V - BDL110 - CNEP600 - BEA118 - BEA013 - BNA103 - BNA140 - BDL153 - CNEP202 - COMMUNE BIRINE - CPA705 - CPA463 - BADR136 - BADR432 - BADR050 - ABC021 - BNA442 - BNA445 - NATIXIS091 - depart

Vehicle 6 Route (30 customers):
- depart - CPA370 - ABC151 - AG0007 - BADR176 - CPA173 - BNA149 - CPA146 - BDL179 - BNA147 - CPA192 - BDL104 - AG0117 - BNA589 - BADR365 - BADR857 - BDL083 - BEA027 - CNEP024 - BNA629 - CACHE ASSURANCE - BDL164 - CPA155 - BNA601 - EBK1601 - BADR633 - CNEP150 - AG0213 - BNA260 - SGA261 - EBK1702 - depart

Vehicle 7 Route (34 customers):
- depart - SGA036 - BADR461 - EBK1602 - DUAC - EBK601 - CNEP131 - BDL120 - BADR606 - BNA152 - EPH THENIA - BDL119 - BDL143 - BADR026 - BNA262 - BADR269 - DOU BOUMERDES - BNA195 - EBK1607 - BEA025 - CNEP511 - EPH CHORFA - CPA098 - BNA430 - CNEP160 - BDL025 DDFE - BDL174 - CNEP116 - BDL170 - TRESOR001 - CNEP200 - DEP - CNEP212 - CPA601 - ABA5310 - depart

Vehicle 8 Route (26 customers):
- depart - BADR631 - BNA581 - EBKQUBA - CNEP219 - DEP BOUIRA - FRANSBK1501 - BADR278 - TB203 - CPA040 - FGCHPI - CPA154 - SGA031 - BADR366 - BEA086 - BNA610 - BNA611 - BADR015+500 - BNA356 - AG0009 - CNEP366 - BDL158 - BEA004 - BDL184 - BEA022 - BADR581 - TB215 - depart

Vehicle 9 Route (39 customers):
- depart - BNA170 - BADR648 - BDL181 - BDL171 - ELBARAKA110 - CNEP604 - BADR435 - CPA178 - BADR650 - CNEP154 - BDL115 - BADR656 - CNEP161 - CNEP108 - ABA5301 - BNA135 - BADR629 - CNEP101 - BNA426 - CPA102 - ABA5307 - BNA614 - BNP700 - CNEP105 - BDL747 - BNA161 - CNEP210 - BNA583 - GHARDAIA - CNEP155 - BDL140 - TRESOR16001 - ABC164 - TRESOR42001 - CHANGEMENT DE COURRIER ORAN - AG0006 - BEA017 - BADR654 - TRESOR17001 - depart

Vehicle 10 Route (42 customers):
- depart - ELBARAKA10 - BNA643 - CNEP208 - BDL194 - BADR163 - BNA607 - CPA145 - BNA431 - CPA828 - CPA169 - AGB026 - BADR153 - BDL176 - TPW99 - BADR101 - CPA112 - BNA632 - BDL939 - BNA633 - ELBARAKA111 - BADR357 - BADR625 - CNAN Med SPA - CPA119 - CPA115 - BNA630 - CNEP652 - BADR276 - TRESOR26001 - BADR647 - CPA070 - BDL150 - BEADMP - FRANSBK1607 - TBDBA - CNEP111 - NATIXIS162 - BADR172 - BADR624 - BDL133 - INHT - BNA275 - depart

Vehicle 11 Route (25 customers):
- depart - ABC061 - BADR367 - SGA504 - EBK - SGA225 - BEA095 - ELBARAKA407 - CPA126 - CASH - BADR056 - CPA602 - BADR443 - BNA460 - BEA111 - CPA056 - CPA015 - BADR369 - BDL151 - CPA132 - BEA041 - CNEP512 - BNA261 - TRESOR35001 - ABC165 - CPA196 - depart

Vehicle 12 Route (42 customers):
- depart - BADR358 - BNA626 - CPADRC - CPA822 - BNA278 - BADR183 - BNA625 - BEA012 - AGB011 - CNEP801 - ABC166 - ELBARAKA205 - BDL138 - CNEP129 - BNA590 - CPA183 - BEA112 - BEA018 - BEA038 - BDL139 - EBK901 - BNA439 - SGA203 - BEA019 - AGB201 - BNA708 - CPA004 - SGA011 - BNA190 - CNEP602 - BADR462 - BADR588 - AGB016 - BADR579 - APC TIDJELABINE - REGIE EPH - FRANSBK1606 - BNA646 - CASH ASSURANCE - REGIE F - BNA858 - CNEP151 - depart

Vehicle 13 Route (41 customers):
- depart - BNA640 - BNA141 - ABC162 - BNA428 - BADR578 - BNA605 - SAIDAL - TRESOR10001 - BNA621 - FNI3 - BNA622 - BDL168 - BADR279 - BDL135 - CPA139 - TB161 - BNA609 - CPA142 - TRESOR90001 - CPA117 - CNEP119 - CPA191 - BNA634 - BNA601 - AGB018 - BNA642 - CNEP150 - EBK1606 - BADR653 - CPA101 - DTP BOUIRA - CPA116 - BNA582 - CPA124 - BNA648 - BNA144 - CPA141 - FRANSBK0901 - BDL155 - BNA268 - BADR626 - depart

Vehicle 14 Route (27 customers):
- depart - BADR460 - CPA079 - BADR180 - CPA174 - BDL105 - CNEP217 - BNA127 - BNA118 - CPA161 - SGA501 - BADR447 - BADR850 - BDL089 - ELBARAKA411 - DSP DJELFA - BDL083 - CNEP607 - CNEP606 - BEA001 - CNEP107 - BADR264 - TB001 - ANEP REGIE - BNA612 - ECOLE DES CADETS - EBK1605 - CNEP802 - depart

Vehicle 15 Route (37 customers):
- depart - BNA639 - AGB023 - SGA503 - TRESOR97001 - TB202 - BDL190 - BEAD05 - BDL DCH064 - BEA117 - BNA578 - SGA - CPA827 - NATIXIS166 - BNA637 - BNA150 - BADR571 - CNEP207 - BDL173 - DTP CHLEF - BADR437 - CPA059 - BADR848 - BNA1220 - BDL163 - CPA156 - CPA157 - BDL844 - BNA701 - BADR622 - BADR459 - NATIXIS062 - BADR277 - CNEP153 - BEADRC - BADR267 - BEA020 - depart

Vehicle 16 Route (40 customers):
- depart - BEA101 - BADR649 - CPA001 - BNA615 - CPA128 - BDL060 - CPA365 - CPA118 - BDL127 - BADR905 - CPA003 - BDL604 - CPA134 - CPA184 - BADR853 - CNEP106 - BADR640 - BADR638 - SGA506 - BNA139 - BNA624 - CPA135 - AGB022 - ABC167 - CPA094 - BDL152 - CNEP805 - BADR582 - BADR573 - BADR585 - BNA644 - CPA006 - SGA451 - BADR002 - BADR271 - BADR425 - CNEP103 - BDL111 - BADR053 - BADR463 - depart

Vehicle 17 Route (47 customers):
- depart - BNA638 - CNEP132 - WILAYA - BADR652 - MOBILISBOUSAADA - BNA619 - BDL175 - BADR427 - BADR636 - BDL107 - TB205 - CPA430 - CNEP502 - BNA857 - BADR630 - BDL192 - BADR433 - BADR042 - BEA010 - BDL070 - AGB001 - BNA136 - CPA114 - BDL142 - BDL156 - BNA138 - CNEP216 - BNA608 - AGB010 - CPA704 - BDL095 - BDL117 - BADR449 - CPA179 - BADR442 - BDL646 - NATIXIS168 - BEA006 - TRESOR15001 - BDL159 - BNA631 - BADR363 - CNEP122 - BNA128 - SGA502 - APC LARBATACH - AGB008 - depart

Vehicle 18 Route (48 customers):
- depart - CPA153 - TRESOR44001 - BNA462 - BNA444 - CPA185 - TB207 - CPA054 - BEADCT - BADR436 - BEA002 - BADR572 - CNEP214 - BADR621 - CPA162 - BEA047 - CPA159 - BDL154 - BNA272 - CPA065ABC163 - CNEP601 - BNA194 - APC BOUDOUAOU - BEADGFT F3 - CPA107 - BEACALTRAM - BNA636 - NATIXIS00G - BNA645 - BNA188 - CPA164 - BEA120 - BADR444 - AGB014 - BEAFORMATION - TRESOR98001 - CNEP104 - CPA163 - BADR281 - SGA204 - CPA123 - BDL157 - BNA437 - BNA438 - CPA900 - AGB108 - BADR362 - BNA617 - INFOR - depart

Vehicle 19 Route (53 customers):
- depart - BEADRAP - BNA627 - BADR060 - AGB121 - BEA091 - BEA002 - AGB0026 - CASH0600 - BADR426 - BADR265 - CNEP159 - BDL838 - BNA427 - NATIXIS001 - AGB002 - CNEP605 - BADR465 - BADRSAPS - BADR574 - CPA122 - BEA0-S - CNEP117 - BADR364 - CPA108 - BADR855 - BNA183 - BADR181 - TB211 - BNA160 - BDL831 - CPA143 - ABC163 - CPA823 - BADR428 - EBK HASSIBA - BEA089 - BADR017 - Citibank001 - AGB107 - BEADRAC - CPA000 - CPA022 - BDL114 - BNA602 - BNA148 - BDL195 - HSBCT100 - BDL166 - BNA187 - BNA132 - BEA024 - BDL735 - BADR273 - depart

Vehicle 20 Route (57 customers):
- depart - BADR456 - AGB003 - BEA034 - NATIXIS061 - CPA302 - BNA588 - FRANSABK1 - BADR359 - FRANSABK1608 - BNA850 - BDL148 - TB208 - AGB012 - BEA030 - CNEP112 - SGA505 - CHANGEMENT DE COURIER ENTRE ALGER ET CONSTANTINE - CNEP205 - BDL183 - CNEP199 - CPA199 - CPA131 - TB210 - BNA623 - BNA011 - BNA577 - BNA584 - SGA852 - BEA098 - BDL147 - BDL161 - BEA100 - BNA189 - CNEP651 - SGA251 - BADR634 - CNEP121 - SAGPS - CPA106 - BADR846 - BNA901 - BEA031 - TRESOR28001 - CPA149 - BNA585 - MOBILIS MSILA - BNA440 - CNEP215 - BDL118 - BDL121 - CNEP126 - BADR368 - BNA191 - ABB BLIDA JOURNAL - CPA831 - FRANSABK0601 - BADR006 - depart

Figure 36: L'ordre de passage des véhicules pour les tournées.

● Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme génétique :

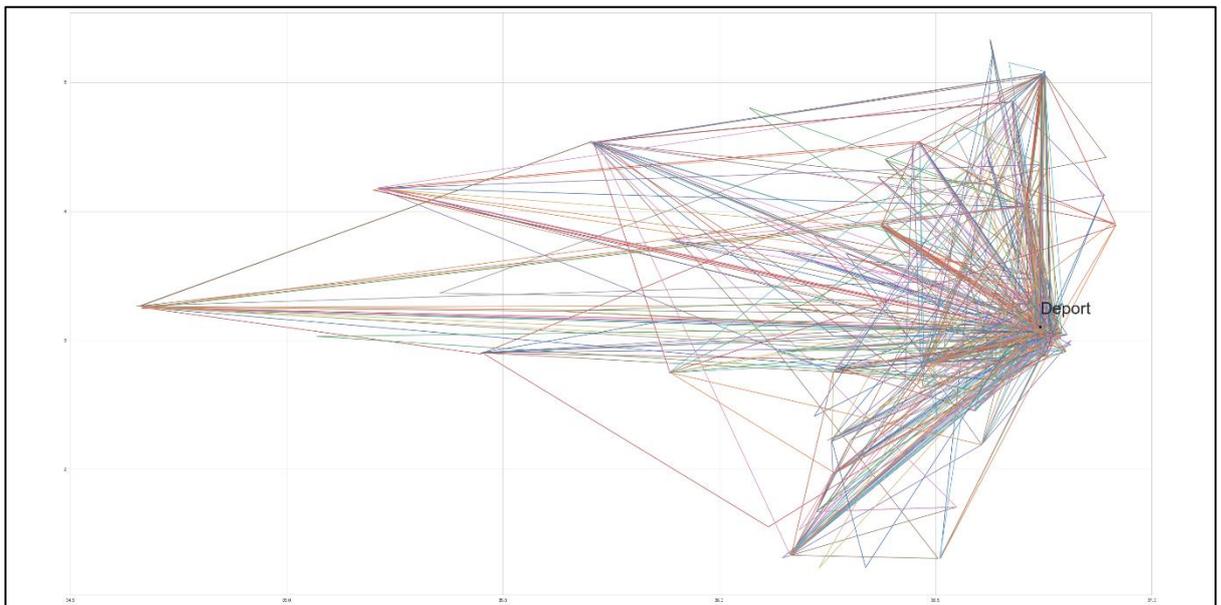


Figure 37: Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme génétique.

- Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme MACS :

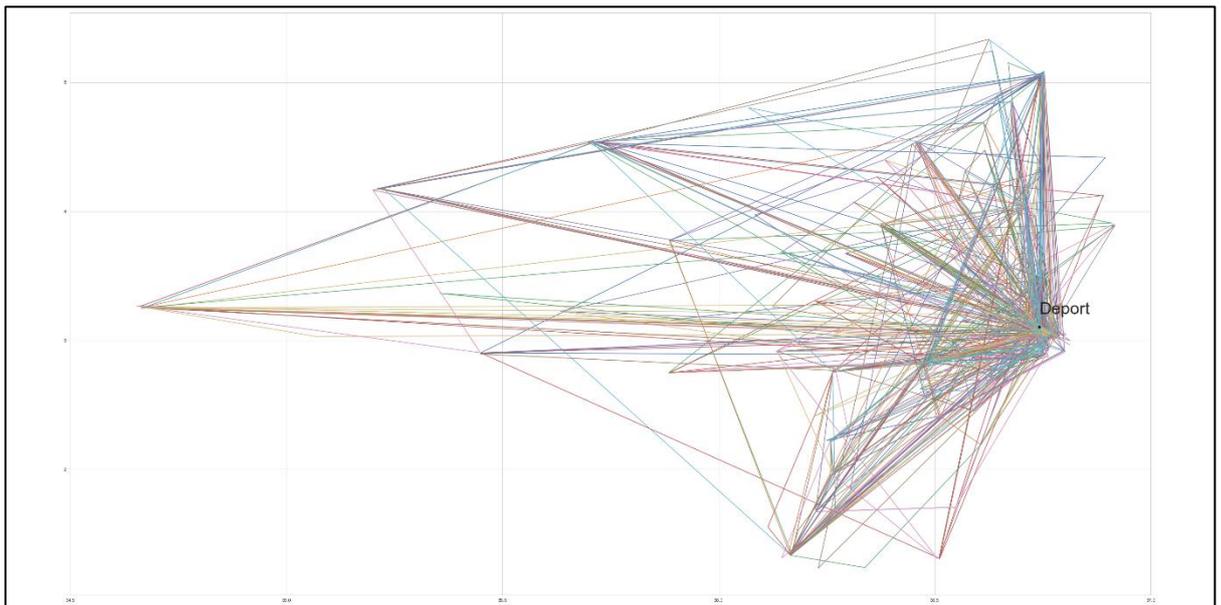


Figure 38: Fenêtre graphique de l'exécution pour l'algorithme MACS.

IV.3.3 Analyse et critiques :

Nous avons utilisé deux métaheuristiques, AG-VRPTW et MACS-VRPTW, pour résoudre le problème de VRPTW. Dans cette section, nous analyserons et critiquerons ces deux méthodes en fonction de leurs performances, de leur efficacité et de leur adaptabilité au modèle.

Tableau 8: valeurs des fonctions objectives obtenues.

| Paramètres de comparaison | Solution 1 : algorithme génétique VRPTW | Solution 2 : MACS VRPTW (colonie de fourmis) |
|----------------------------------|---|--|
| Nombre de véhicules employés | 22 | 20 |
| Distance totale parcourue (km) | 586.249399 | 574.29553 |
| Cout total des tournées (Um) | 23143.97638 | 21122.18644 |
| Temps d'exécution de la solution | 31min 10sec | 38min 34sec |

En termes de nombre de véhicules employés, la méthode MACS VRPTW (colonie de fourmis) est plus efficace, utilisant 20 véhicules par rapport aux 22 véhicules utilisés par

l'algorithme génétique VRPTW. Cela indique que la méthode des fourmis est plus efficace pour regrouper les clients dans un nombre réduit de véhicules.

En ce qui concerne la distance totale parcourue et le coût total des tournées, la méthode MACS VRPTW obtient de meilleurs résultats. Elle parvient à réduire la distance totale parcourue à 574.29553 km et le coût total des tournées à 21122.18644 Um, par rapport à l'algorithme génétique VRPTW qui a une distance totale parcourue de 586.249399 km et un coût total des tournées de 23143.97638 Um. Ainsi, la méthode MACS VRPTW permet d'optimiser davantage ces deux critères.

En ce qui concerne le temps d'exécution, l'algorithme génétique VRPTW est plus rapide, avec un temps d'exécution de 31 minutes 10 secondes, tandis que la méthode MACS VRPTW nécessite 38 minutes 34 secondes pour générer la solution. Cela peut indiquer que l'algorithme génétique VRPTW est plus efficace en termes de temps d'exécution.

En résumé, la méthode MACS VRPTW se distingue en termes de nombre de véhicules employés, de distance totale parcourue et de coût total des tournées, offrant de meilleurs résultats. Cependant, l'algorithme génétique VRPTW est plus rapide en termes de temps d'exécution. La sélection de la méthode dépendra donc des priorités spécifiques, telles que l'optimisation des coûts ou l'efficacité temporelle.

IV.3.4 Jeux de données : benchmark de Solomon :

Nous souhaitons évaluer la performance des deux solutions que nous avons proposées pour résoudre le problème de tournées des véhicules avec contraintes de fenêtres de temps (VRPTW).

Pour ce faire, nous avons utilisé un ensemble d'instances de problèmes du VRPTW proposées par Solomon en 1987, qui sont devenues des benchmarks couramment utilisés dans la littérature.

Ces instances ont été largement étudiées dans la communauté de recherche en optimisation pour évaluer et comparer les performances des méthodes de résolution du VRPTW, Voici les trois types d'instances de problèmes VRPTW de Solomon que nous avons utilisé pour évaluer les performances des deux solutions :

- **Instances de type R :** Ces instances comportent plusieurs bases de départ et d'arrivée. Elles sont caractérisées par la lettre "R" suivie d'un nombre pour identifier chaque instance spécifique
- **Instances de type C :** Ces instances ont une seule base de départ et d'arrivée. Elles sont caractérisées par la lettre "C" suivie d'un nombre pour identifier chaque instance spécifique.

- **Instances de type RC** : Ces instances combinent les caractéristiques des instances de type R et C, c'est-à-dire qu'elles ont à la fois plusieurs bases de départ et d'arrivée ainsi qu'une seule base de départ et d'arrivée. Elles sont caractérisées par les lettres "RC" suivies d'un nombre pour identifier chaque instance spécifique.

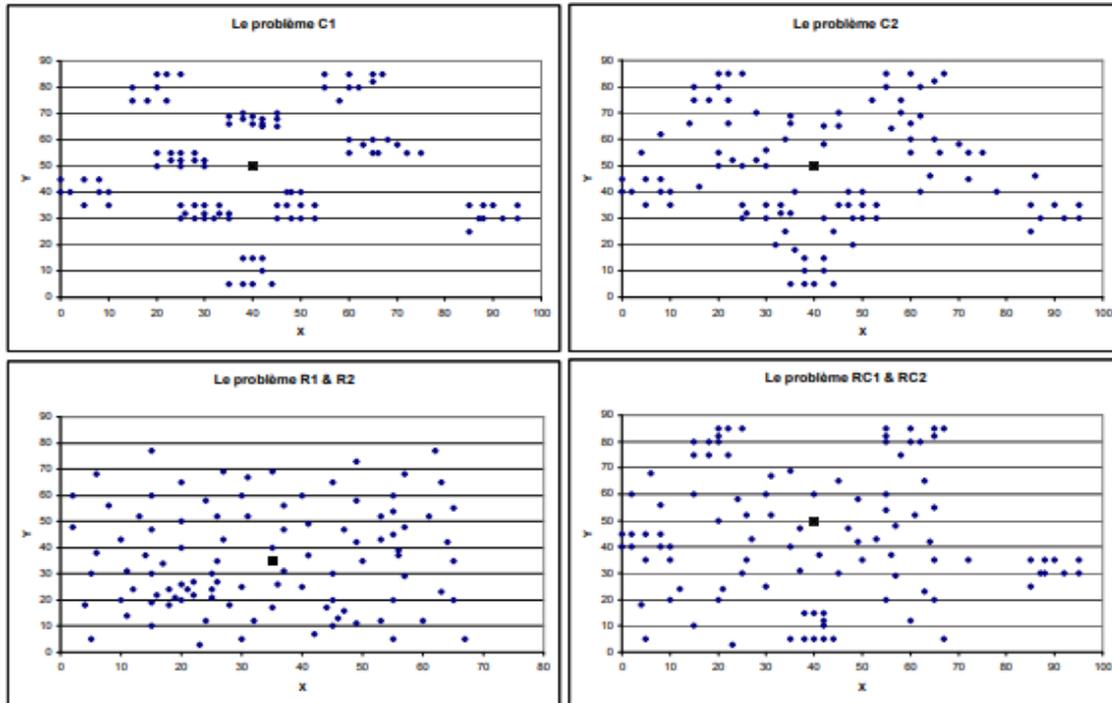


Figure 39: Les jeux de tests de Solomon pour le VRPTW.

Tableau 9: résultat de benchmark de Solomon.

| Algorithme colonie de fourmis | | Algorithme génétique | | | déviation entre les résultats | |
|-------------------------------|-------------|----------------------|-----------|-------------|-------------------------------|----------|
| Instances | Nb véhicule | Distance | Instances | Nb véhicule | | Distance |
| C101 | 10 | 803,6568 | C101 | 12 | 3021,0578 | 73% |
| C102 | 10 | 1030,984 | C102 | 12 | 4012,9698 | 74% |
| C103 | 10 | 1320,5587 | C103 | 13 | 6498,25874 | 80% |
| C104 | 10 | 1310,5684 | C104 | 10 | 6298,0278 | 79% |
| C105 | 10 | 836,254 | C105 | 12 | 3339,07852 | 75% |
| C106 | 10 | 989,5421 | C106 | 12 | 4421,8965 | 78% |
| C107 | 10 | 887,254 | C107 | 12 | 3287,9651 | 73% |
| C108 | 10 | 922,362 | C108 | 12 | 3107,3284 | 70% |
| C109 | 10 | 1089,365 | C109 | 11 | 4289,79 | 75% |
| C201 | 3 | 700,325 | C201 | 4 | 3469,0745 | 80% |
| C202 | 4 | 996,554 | C202 | 4 | 4989,057 | 80% |
| C203 | 4 | 2054,652 | C203 | 6 | 10651,8974 | 81% |
| C204 | 4 | 1895,317 | C204 | 7 | 11004,879 | 83% |
| C205 | 3 | 898,321 | C205 | 4 | 4608,28285 | 81% |
| C206 | 3 | 902,3214 | C206 | 5 | 5274,0986 | 83% |
| C207 | 3 | 936,214 | C207 | 4 | 5396,714 | 83% |
| C208 | 3 | 811,254 | C208 | 5 | 4687,3124 | 83% |
| R101 | 17 | 1657,325 | R101 | 20 | 3157,00587 | 48% |
| R102 | 17 | 1599,3254 | R102 | 21 | 1658,3254 | 4% |
| R103 | 13 | 1398,327 | R103 | 20 | 1602,02478 | 13% |
| R104 | 10 | 1096,3838 | R104 | 13 | 2104,9687 | 48% |
| R105 | 13 | 1469,657 | R105 | 18 | 1969,3785 | 25% |
| R106 | 11 | 1562,3247 | R106 | 15 | 2147,0587 | 27% |
| R107 | 11 | 1269,3217 | R107 | 12 | 1863,874 | 32% |
| R108 | 11 | 1127,78789 | R108 | 14 | 1652,9697 | 32% |
| R109 | 12 | 1265,25747 | R109 | 13 | 2198,4173 | 42% |
| R110 | 10 | 1198,321 | R110 | 12 | 2107,986 | 43% |
| R111 | 10 | 1302,2145 | R111 | 13 | 2498,6985 | 48% |
| R112 | 10 | 1078,65228 | R112 | 13 | 1378,1578 | 22% |
| R201 | 4 | 1896,05238 | R201 | 5 | 3014,77805 | 37% |
| R202 | 3 | 2098,65702 | R202 | 5 | 3497,586 | 40% |
| R203 | 3 | 1752,9208 | R203 | 4 | 3279,0785 | 47% |
| R204 | 3 | 1908,8744 | R204 | 5 | 2498,60887 | 24% |
| R206 | 3 | 1823,225 | R206 | 5 | 3098,7841 | 41% |
| R207 | 3 | 1987,254 | R207 | 5 | 2748,69024 | 28% |
| R208 | 3 | 1756,21202 | R208 | 5 | 2104,087 | 17% |
| R209 | 3 | 1698,325 | R209 | 4 | 3287,0968 | 48% |
| R210 | 3 | 1745,6581 | R210 | 4 | 3078,99807 | 43% |
| R211 | 3 | 1753,21405 | R211 | 5 | 3278,7896 | 47% |
| RC101 | 14 | 1689,325 | RC101 | 25 | 4158,6955 | 59% |
| RC102 | 12 | 1598,625 | RC102 | 20 | 4058,987 | 61% |
| RC103 | 11 | 1523,90874 | RC103 | 20 | 3982,904363 | 62% |
| RC104 | 11 | 1208,04785 | RC104 | 18 | 3698,0475 | 67% |
| RC105 | 14 | 1692,374105 | RC105 | 16 | 3498,88705 | 52% |
| RC106 | 12 | 1598,5217 | RC106 | 12 | 3194,0786 | 50% |
| RC107 | 12 | 1498,025471 | RC107 | 15 | 4169,878934 | 64% |
| RC108 | 12 | 1498,36587 | RC108 | 17 | 3897,548 | 62% |
| RC201 | 3 | 2030,5047 | RC201 | 12 | 3997,01569 | 49% |
| RC202 | 3 | 2398,2014 | RC202 | 10 | 4108,9946 | 42% |
| RC203 | 3 | 1769,201458 | RC203 | 10 | 3007,9815 | 41% |
| RC204 | 3 | 1698,0257 | RC204 | 7 | 2004,642 | 15% |
| RC205 | 4 | 1869,014703 | RC205 | 9 | 2107,651 | 11% |
| RC206 | 4 | 2396,2398 | RC206 | 9 | 2499,08746 | 4% |
| RC207 | 3 | 2221,089 | RC207 | 9 | 4298,46473 | 48% |
| RC208 | 3 | 1598,087 | RC208 | 9 | 2000,6321 | 20% |

Ce tableau propose une comparaison des performances d'optimisation des tournées pour les instances de Solomon en utilisant les deux métaheuristiques précédemment présentées. Le principal critère utilisé pour la comparaison est le taux de déviation entre les résultats obtenus pour chaque type d'instance et l'optimisation de la distance totale parcourue. Ce taux de déviation est calculé de la manière suivante :

$$dev = \frac{\text{distance calculée par la solution 1} - \text{distance calculée par la solution 2}}{\text{distance calculée par la solution 1}} * 100$$

En réalité, il est difficile de comparer les résultats des deux métaheuristiques car, comme nous l'avons observé lors de l'analyse des résultats du AME, les temps d'exécution des méthodes de résolution diffèrent. Cependant, à partir des résultats présentés dans le tableau, nous pouvons noter que l'algorithme MACS-VRPTW est capable de fournir de bons résultats pour le problème de VRPTW classique, tandis que l'algorithme génétique produit des résultats satisfaisants mais non compétitifs dans certains échantillons.

Pour les deux groupes (C1, C2), les résultats obtenus sont moins satisfaisants, avec un taux de déviation supérieur à 65% pour toutes les instances.

En ce qui concerne les groupes (R1, R2), nous avons obtenu des résultats compétitifs en termes de distance, avec un taux de déviation compris entre 5% et 50%.

En revanche, pour les autres groupes (RC1, RC2), les résultats obtenus sont encourageants, avec un taux de déviation variant entre 20% et 60% pour plusieurs instances.

En conclusion, ces résultats confirment que l'algorithme MACS-VRPTW est fiable et capable de fournir des performances intéressantes.

IV.4 Elaboration d'un tableau de bord :

Nous avons entrepris une étude approfondie sur l'optimisation du processus de transport au sein de l'ANEP Messagerie Express. Pour améliorer continuellement l'efficacité et la qualité des opérations de transport, j'ai choisi de développer un tableau de bord qui servira de véritable outil d'aide à la décision pour les responsables de la messagerie express.

Au cours de cette étude, j'explorerai les différentes étapes nécessaires à la réalisation de ce tableau de bord, Pour élaborer le tableau de bord, j'ai suivi les étapes suivantes :

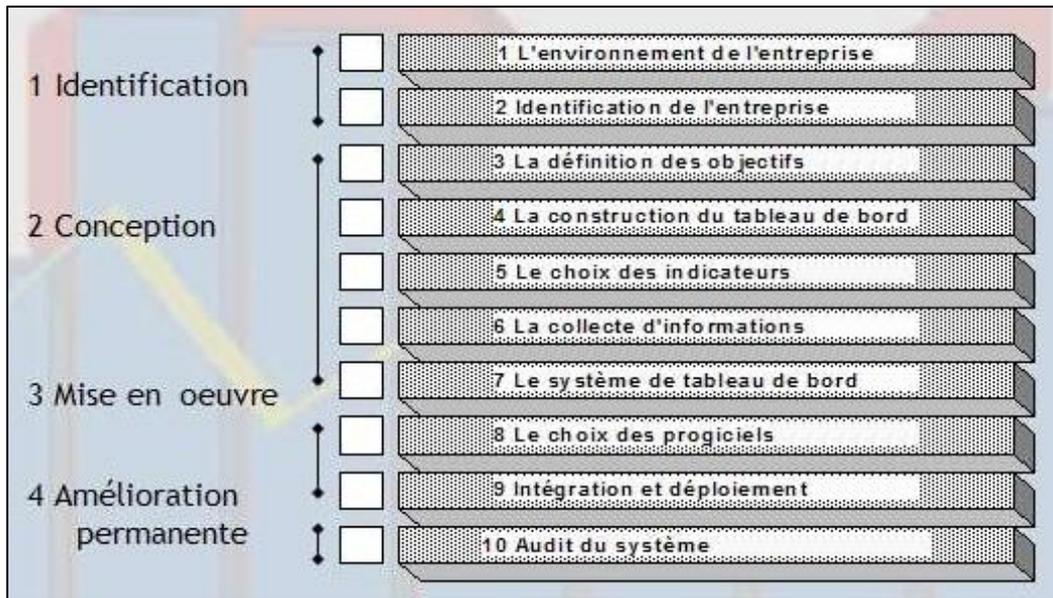


Figure 40:étapes d'élaboration d'un tableau de bord.

IV.4.1 Phase 1 : Identification

On cherche à identifier et comprendre les éléments clés liés à l'environnement et à l'entreprise. Cette phase permet d'obtenir une vision globale de la situation actuelle, des objectifs, des défis et des besoins spécifiques de l'entreprise en matière de tableau de bord.

- **Etape 1 : Environnement de l'entreprise**

Dans cette première étape, nous nous familiariserons avec l'environnement de l'entreprise de l'entreprise. Nous analyserons les facteurs internes et externes qui peuvent influencer le processus de transport. L'analyse SWOT présentée dans le premier chapitre s'est avérée extrêmement précieuse.

- **Etape 2 : Identification de l'entreprise**

Dans cette étape, nous procéderons à une analyse approfondie de l'entreprise pour comprendre ses objectifs, ses stratégies, ses processus opérationnels ainsi que les défis et les opportunités auxquels elle est confrontée. nous avons défini une liste d'objectifs clés qui résumant la stratégie de l'ANEP Messagerie Express. Ces objectifs comprennent l'améliorer l'efficacité opérationnelle, Accroître la satisfaction client, Réduire les coûts, Renforcer la compétitivité et Favoriser l'innovation

IV.4.2 Phase 2 : Conception

Cette phase consiste à concevoir le tableau de bord en se basant sur les objectifs définis précédemment.

- **Etape 3 : Définition des objectifs**

nous avons formulé ces objectifs de manière SMART, c'est-à-dire spécifique, mesurable, atteignable, réaliste et temporellement défini. Cela permet d'assurer leur faisabilité et leur pertinence dans le contexte de l'entreprise.

Nous les avons résumés aux points suivants :

- **Augmenter le taux de livraison à temps.**
 - Mesurable : Atteindre un taux de livraison à temps de 95 %.
 - Atteignable : Mettre en place des processus efficaces et des méthodes de suivi pour améliorer la ponctualité des livraisons.
 - Réaliste : Envisager des améliorations logistiques et opérationnelles réalisables pour réduire les retards.
 - Temporellement défini : Atteindre un taux de livraison à temps de 95 % d'ici la fin de l'année fiscale.

- **Réduire les coûts de transport.**
 - Mesurable : Réaliser une réduction de 10 % des coûts de transport annuels.
 - Atteignable : Identifier des opportunités de consolidation des envois, d'optimisation des itinéraires et de négociation de contrats avec les fournisseurs.
 - Réaliste : Évaluer les options de réduction des coûts sans compromettre la qualité et la rapidité du service.
 - Temporellement défini : Atteindre une réduction de 10 % des coûts de transport d'ici la fin de l'exercice financier.

- **Réduire le nombre de réclamations clients liées à des dommages ou des pertes de colis.**
 - Mesurable : Réduire le taux de réclamations clients de 20 % par rapport à l'année précédente.
 - Atteignable : Mettre en place des procédures de manipulation des colis plus rigoureuses, améliorer les contrôles qualité et offrir un meilleur suivi des colis.
 - Réaliste : Investir dans des formations pour le personnel chargé du traitement des colis afin de réduire les erreurs et les incidents.
 - Temporellement défini : Réduire le taux de réclamations clients de 20 % d'ici la fin de l'exercice fiscal en cours.

- **Améliorer l'efficacité des opérations de tri et de distribution des colis.**
 - Mesurable : Réduire le temps moyen de traitement des colis de 10 %.
 - Atteignable : Intégrer des technologies de suivi et de gestion des colis, optimiser les flux de travail et automatiser les tâches répétitives.
 - Réaliste : Évaluer les opportunités d'amélioration de l'efficacité tout en maintenant la qualité du service.
 - Temporellement défini : Réduire le temps moyen de traitement des colis de 10 % d'ici la fin du trimestre en cours.

- **Etape 4 : Construction du tableau de bord**

L'étape 4 vise à construire un tableau de bord spécifique pour suivre l'activité transport. Ce tableau de bord permettra de visualiser les indicateurs clés et les informations pertinentes liées au transport des colis,

- **Etape 5 : Le choix des indicateurs**

L'étape 5 du processus consiste à sélectionner les indicateurs pertinents pour évaluer et mesurer la performance de l'ANEP Messagerie Express. Lors le choix des KPI, nous avons considéré les éléments suivants :

- **Alignement avec les objectifs :**
 - Taux de livraisons effectuées dans les délais convenus
 - Réduction du nombre de réclamations clients
 - Amélioration du temps moyen de transit
- **Pertinence :**
 - Nombre total de livraisons réalisées par jour/semaine/mois
 - Taux de satisfaction client basé sur des enquêtes ou des retours d'information
 - Pourcentage de livraisons effectuées sans erreur d'adresse ou de destinataire
- **Mesurabilité :**
 - Collecte et analyse des données sur le nombre de livraisons quotidiennes/hebdomadaires/mensuelles
 - Suivi des réclamations clients et des mesures correctives prises
 - Utilisation de systèmes de suivi GPS pour mesurer le temps de transit des colis
- **Pertinence temporelle :**
 - Mesure régulière du taux de livraisons à temps pour un suivi en temps réel

- Évaluation mensuelle/trimestrielle des réclamations clients pour identifier les tendances
- Suivi continu du taux de satisfaction client pour détecter les variations
- **Limitation du nombre d'indicateurs :**
- Sélection des indicateurs clés les plus significatifs pour avoir une vue d'ensemble de la performance
- Éviter de surcharger le tableau de bord avec un grand nombre d'indicateurs

1) **Pourcentage de livraisons effectuées à temps :** Ce KPI indique le taux de livraisons qui ont respecté les délais de livraison convenus avec les clients. Il peut être mesuré sur une base quotidienne, hebdomadaire, mensuelle

| Indicateur | Objectif | Formule |
|--|--|---|
| Pourcentage de livraisons effectuées à temps | Taux de livraisons effectuées dans les délais convenus | $(\text{Nombre de livraisons effectuées à temps} / \text{Nombre total de livraisons}) \times 100$ |

2) **Coût moyen par livraison :** Il permet de mesurer le coût moyen associé à chaque livraison effectuée par l'entreprise. On prend en compte l'ensemble des coûts liés au processus de transport, tels que le carburant, les frais de personnel, les frais d'entretien, etc.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| Coût moyen par livraison | Réduction des coûts de transport | $\text{Coût total des transports} / \text{Nombre total de livraisons}$ |

3) **Taux de réclamations clients :** Il mesure le pourcentage de réclamations ou de plaintes émises par les clients de l'entreprise par rapport au nombre total de livraisons effectuées. Il permet d'évaluer la satisfaction des clients et la qualité du service de transport fourni.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Taux de réclamations clients | Amélioration de la qualité de | (Nombre de réclamations |

| | | |
|--|---------|---|
| | service | clients / Nombre total de livraisons) x 100 |
|--|---------|---|

- 4) Distance moyenne de livraison :** Il permet d'évaluer l'efficacité de livraison de l'entreprise en termes de distance parcourue. Une distance moyenne de livraison plus faible indique une optimisation des trajets.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|-------------------------------|---|--|
| Distance moyenne de livraison | Optimisation des itinéraires de livraison | Distance totale parcourue pour les livraisons / Nombre total de livraisons |

- 5) Taux de satisfaction client :** Il permet d'évaluer la qualité du service fourni et la satisfaction globale des clients.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|-----------------------------|---------------------|---|
| Taux de satisfaction client | Satisfaction client | (Nombre de clients satisfaits / Nombre total de clients interrogés) x 100 |

- 6) Taux d'utilisation des véhicules :** Ce KPI mesure le pourcentage de véhicules qui sont effectivement utilisés de l'activité de transport. Il permet d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des véhicules disponibles.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Taux d'utilisation des véhicules | Utilisation efficace des ressources | (Nombre de véhicules utilisés / Nombre total de véhicules disponibles) x 100 |

- 7) Taux de remplissage des véhicules :** Ce KPI mesure le pourcentage de la capacité maximale des véhicules de l'entreprise utilisé pour transporter les marchandises réelles. Il permet d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de l'espace dans les véhicules de transport.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|-----------------------------------|--|---|
| Taux de remplissage des véhicules | Utilisation optimale de l'espace de chargement | (Volume réel des marchandises transportées / Capacité maximale du |

| | | |
|--|--|-----------------|
| | | véhicule) x 100 |
|--|--|-----------------|

8) Nombre d'incidents ou d'accidents liés au transport : Ce KPI mesure le nombre d'incidents ou d'accidents survenus lors du processus de transport. Il permet de surveiller la sécurité et la fiabilité des opérations de transport de l'entreprise.

| Indicateur | Objectif | Formule |
|---|--------------------------------|---|
| Nombre d'incidents ou d'accidents liés au transport | Respect des normes de sécurité | Nombre total d'incidents ou d'accidents |

● Etape 6 : Collecte des informations

La collecte des informations est réalisée à l'aide de différents outils et systèmes.

Les sources de données qui vont alimenter notre tableau de bord qui sont principalement:

- Systèmes de suivi GPS : Les véhicules de l'entreprise sont équipés de dispositifs de suivi GPS qui permettent de collecter des données telles que la localisation en temps réel, les itinéraires parcourus, la vitesse de déplacement, etc.
- Enquêtes de satisfaction client : Pour collecter des données sur la satisfaction des clients, des enquêtes sont réalisées, que ce soit sous forme de questionnaires en ligne, d'appels téléphoniques ou de sondages. Les clients peuvent fournir leurs opinions sur différents aspects du service de livraison, tels que la ponctualité, la qualité des colis, la courtoisie des chauffeurs, etc.
- Données financières : Les données financières, telles que les coûts de transport, les dépenses liées aux carburants, les coûts d'entretien des véhicules, etc. Elles sont collectées à partir des systèmes de gestion financière de l'entreprise.
- Systèmes de gestion des ressources humaines : Les informations sur le personnel, telles que les heures de travail, les absences, les performances individuelles, sont collectées à partir des systèmes de gestion des ressources humaines de l'entreprise.

● Etape 7 : Le système de tableau de bord

Un système de tableau de bord efficace permet de visualiser les indicateurs clés de performance de manière claire et concise. nous avons pris en compte les éléments suivants :

- Choix de la plateforme
- Conception visuelle
- Sélection des indicateurs clés
- Automatisation des données

- Personnalisation des vues

IV.4.3 Phase 3 : Mise en œuvre

Cette phase consiste à mettre en place concrètement le système de tableau de bord et à l'intégrer dans le fonctionnement quotidien de l'entreprise

- **Etape 8 : Le choix des progiciels**

Nous avons choisi le logiciel de la business intelligence (PowerBI) qui offre des fonctionnalités avancées de visualisation et d'analyse des données.

- **Etape 9 : Intégration et déploiement**

Nous avons mis en place des mécanismes pour collecter les données pertinentes à partir de différentes sources :

- Les systèmes de gestion des livraisons
- Les systèmes de suivi des véhicules (GPS)
- Les bases de données clients, etc.

IV.4.4 Phase 4 : Amélioration permanente

Cette phase a pour objectif d'optimiser continuellement le processus de transport. Cette phase implique un cycle continu d'évaluation, d'analyse et de mise en œuvre de mesures correctives pour améliorer la performance globale de l'entreprise.

- **Etape 10 : Audit**

Cela inclut l'analyse des données du tableau de bord, la revue des indicateurs clés et l'identification des domaines d'amélioration potentiels et sur la base des résultats de l'audit. Une fois les opportunités d'amélioration identifiées, nous avons élaboré un plan d'action détaillé pour mettre en œuvre les mesures correctives nécessaires.

Une fois les mesures correctives mises en œuvre, nous avons suivi attentivement les résultats obtenus.

L'évaluation des résultats permettra de déterminer si les actions correctives ont atteint les objectifs fixés et s'ils ont eu un impact positif sur la performance globale de l'entreprise.

Les résultats de l'évaluation et de l'évaluation des actions correctives serviront de base pour identifier de nouvelles opportunités d'amélioration et lancer de nouveaux cycles d'audit, d'analyse et de mise en œuvre de mesures correctives.

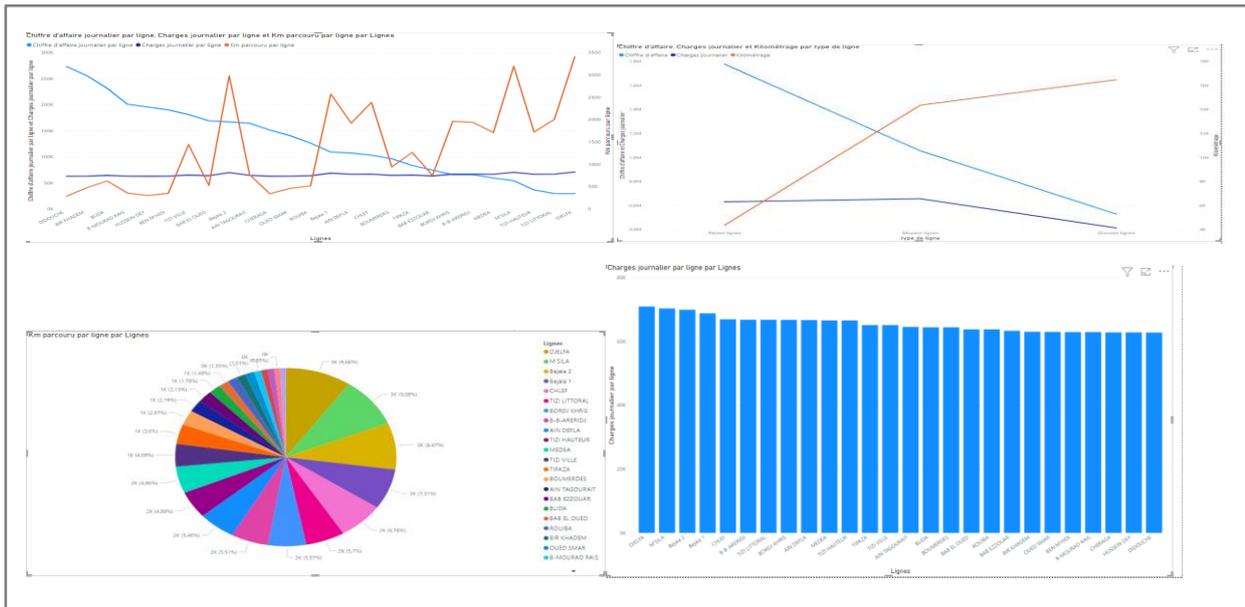


Figure 41: Principaux KPI du tableau de bord sous power BI.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons notre approche de résolution en trois parties :

Dans la première section, nous avons mis en place un modèle mathématique adapté à notre approche et décrivant au mieux les contraintes du terrain en matière du transport en livraison directe. Nous l'avons validé par la suite en utilisant un outil d'optimisation linéaire « Cplex » sur un échantillon réduit de données.

La deuxième section de ce chapitre est dédiée à l'explication des algorithmes de résolution que nous avons choisis pour élaborer un plan de transport. Nous avons utilisé deux métaheuristiques : l'algorithme génétique et la colonie de fourmis. Nous justifions notre choix et évaluons leurs performances à travers les jeux de données proposés par Solomon.

Enfin, la dernière partie est consacrée à la mise en place d'un tableau de bord, qui sert d'outil de pilotage et de suivi de la performance de l'activité logistique de transport.

V. Conclusion générale

L'ANEP Messagerie Express évolue dans un environnement où la rigueur dans la gestion des coûts et la satisfaction des clients est primordiale. Son marché est caractérisé par une concurrence de plus en plus intense. Afin de maintenir sa stratégie de capture de parts de marché et de devenir leader, l'ANEP Messagerie Express doit impérativement maîtriser ses activités.

Au niveau de l'AME, notre travail consiste à trouver un meilleur modèle pour optimiser les tournées de véhicules visant à optimiser les itinéraires des véhicules de livraison, afin de répondre à la problématique soulevée par la direction de l'AME concernant sa politique de distribution.

Dans un premier temps, un diagnostic a été mené pour déterminer les anomalies présentes nécessitant le recours à une nouvelle configuration d'emploi des ressources pour assurer le transport de marchandises. Ce diagnostic n'a pu être posé qu'après une première phase d'observation. Ainsi, notre première mission en tant que stagiaires a été de découvrir les différents services. A cet effet, des entretiens ont été tenus avec différents collaborateurs. Cela nous a permis d'acquérir une connaissance profonde de la structure actuelle, des différentes parties prenantes ainsi que des pratiques opérationnelles de ces dernières.

Par la suite, notre attention s'est portée sur les activités liées au projet, ce qui nous a amené à effectuer plusieurs visites sur site. Ces visites nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des opérations et de mieux cerner la problématique à laquelle nous faisons face.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons adopté une méthodologie en plusieurs étapes, mobilisant différents outils d'analyse. Notre démarche méthodologique se résume en quatre étapes principales :

Dans la première étape, nous avons entrepris la modélisation mathématique du problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps. Nous avons spécifié l'ensemble des paramètres et des contraintes associés au problème, mettant ainsi en évidence sa complexité.

L'étape suivante consistait à résoudre le modèle proposé. Étant donné que le modèle était complexe et qu'il n'admettait pas de solution exacte dans un temps de calcul polynomial, nous avons dû recourir à des méthodes de résolution approchées. Nous avons alors présenté deux approches métaheuristiques : les "Algorithmes génétiques" et les "colonies de Fourmis"

Ensuite, nous avons analysé et comparé les résultats obtenus par les deux approches et nous avons présenté les jeux de tests dynamiques (les benchmarks) proposés par Solomon, que nous avons utilisés pour évaluer notre approche.

Nous avons clôturé en dernière étape par la mise en place d'un tableau de bord pour mieux piloter l'activité de transport et rendre l'outil conçu plus performant.

En conclusion de ce mémoire de projet de fin d'étude, il est évident que ce travail a été une expérience enrichissante qui nous a permis de développer de nouvelles compétences et connaissances.

Tout au long de sa réalisation, nous avons mis en pratique les enseignements de notre formation d'ingénieur. Nous avons acquis une meilleure compréhension du fonctionnement d'une entreprise, nous avons réalisé des modélisations conceptuelles et mathématiques, et nous avons également mis en œuvre des solutions informatiques.

Ce projet nous a permis de consolider nos compétences techniques et de renforcer notre capacité à résoudre des problèmes complexes. Nous sommes fiers du travail accompli et des résultats obtenus, et nous sommes convaincus que cette expérience sera un atout précieux pour notre future carrière professionnelle.

Nous concluons ce mémoire de projet de fin d'étude en soulignant les bénéfices que ce projet nous a apportés en termes d'expérience et de connaissances.

Tout au long de sa réalisation, ce travail a été une expérience enrichissante, nous permettant de développer de nouvelles compétences et connaissances. Ce projet nous a offert l'opportunité de mettre en pratique tout ce que nous avons appris au cours de notre formation d'ingénieur, en partant de la capacité de comprendre et d'analyser le fonctionnement d'une entreprise, en passant par la modélisation conceptuelle et mathématique, jusqu'à l'aboutissement du codage informatique.

Bibliographie

VI. Bibliographie

- [1] AKLI, Meriem. Problème de tournées de véhicules avec contraintes et fenêtre de temps. Thèse de magister : Département mathématique. Tizi Ouzou : Université De Mouloud Mammeri, 2013.
- [2] DROR, M., LAPORTE, G., TRUDEAU, P. I. Vehicle Routing with Stochastic Demands: Properties and Solution Frameworks. Transportation Science, 2019.
- [3] AOUADJ, Ayache. Résolution du problème de tournées de véhicules avec fenêtre de temps. Thèse de master académique : Département de l'informatique. Msila Université Mohammed Boudiaf Msila, 2019.
- [4] CERNY, Vreyfus. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem. An efficient simulation algorithm[en ligne]. 1985. [Consulté le 08/03/2020].
- [5] CORNE, David. New Ideas in Optimization : Macs-Vrptw: A Multiple Ant Colony System For Vehicle Routing Problems With Time Windows. Thèse de doctorat : Mathématique, London : université de McGraw-Hill,1999.
- [6] GRID, Maroua. Bee life Parallèle sur GPU pour résoudre le problème dynamique des tournées de véhicules avec une contrainte de capacité. Thèse de doctorat : Département de l'informatique, Biskra : Université Mohamed Khider Biskra, 2018.
- [7] HAJ-Rachid, Ahmed. Différentes opératrices évolutionnaires de permutation : sélections, croisements et mutations. Mémoire de License : informatique. Besançon : Université de Franche-Comte, 2010.
- [8] HOUSROUM, Haiyan. Une approche génétique pour la résolution du problème VRPTW dynamique. Thèse de doctorat : Département mathématique. Arras : l'Université d'Artois, 2005.

[9] LAYEB, Abdeslam. Utilisation des Approches d'Optimisation Combinatoire pour La Vérification des Applications Temps Réel. Thèse Doctorat : informatique. Constantine : Université Mentouri de Constantine, 2010.

[10] MOUSSA, Ibrahim. Modèle de résolution approchées et efficaces pour les problèmes de réseaux de transport et de télécommunication. Thèse de doctorat : département de l'informatique. Amiens : Université De Picardie Jules Verne, 2015.

[11] PATRICK, Meyer. Problème de Tournées de Véhicules avec Fenêtre de temps et application. Thèse de magister : Mathématique. Liège : Université de Liège, 1999.

[12] GIOSA, I.D., TANSINI, I.L., VIERA, I.O. New assignment algorithms for the multi-depot vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 2002.

[13] JUNG, S., HAGHANI, A., Genetic Algorithm for a Pickup and Delivery Problem with Time Windows. Journal of the Transportation Research Board, 2000.

[14] LE BOUTHILLIER, Alexandrer. UML-Modeling of a Cooperative Architecture applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows.

[15] LI, H., LIM, A. A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. International Journal on Artificial Intelligence Tools [en ligne], 2003.

[16] HARBAOUI, Dridi Imen. Optimisation heuristique pour la résolution du m-PDPTW statique et dynamique. Thèse magister : Département informatique. Lille : Ecole Centrale de Lille, 2010.

[17] REGO, Chris. Le Problème de tournées de éhicules : étude et résolution approchée. Étude et résolution approchée [en ligne]. 1994. [Consulté le 20/03/2020].

[18] MOUSSA, Ibrahim. Modèle de résolution approchées et efficaces pour les problèmes de réseaux de transport et de télécommunication. Thèse de doctorat : département de l'informatique. Amiens : Université De Picardie Jules Verne, 2015.

[19] FEDERGRUEN, A., SIMCHI-LEVI, D. Chapter 4 Analysis of vehicle routing and inventory-routing problems, Handbooks in Operations Research and Management Science [en ligne]. 1995, vol. 8 [consulté le 6 Avril 2019].

Annexes

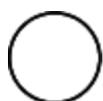
VII. Annexes

Annexe 2 : le langage BPMN

La norme BPMN (Business process model and notation) est employée pour modéliser des processus métier sous forme d'organigrammes clairs qui peuvent être partagés à l'échelle de toute une entreprise. Les symboles des diagrammes BPMN sont répartis en quatre catégories : les objets de flux, les objets de connexion, les couloirs et les artefacts.

Types d'événement BPMN

Les événements représentent un événement dans un processus métier.



Symbole Événement de début : marque la première étape d'un processus.



Symbole Événement intermédiaire : représente tout événement se produisant entre un événement de début et un événement de fin.



Symbole Événement de fin : marque la dernière étape d'un processus.

Symboles d'événement BPMN

Chacun de ces événements peut être modifié pour représenter les détails spécifiques de son processus. Les exemples ci-dessous sont représentés dans des événements de début, mais ils peuvent être combinés avec n'importe quel type d'événement. Les symboles d'événements les plus courants représentent les situations suivantes :



Symbole Message : déclenche le processus, facilite les processus intermédiaires ou achève le processus.



Symbole Minuterie : une heure ou une date, unique ou récurrente, déclenche le processus, facilite les processus intermédiaires ou achève le processus.



Symbole Escalade : une étape réagit à une escalade et passe à une autre fonction dans l'entreprise. Cet événement n'est utilisé que dans un sous-processus d'événement. Une escalade se produit lorsqu'une personne ayant un niveau de responsabilité supérieur au sein de l'organisation devient impliquée dans un processus.



Symbole Conditionnel : un processus démarre ou se poursuit lorsqu'une condition ou une règle métier est respectée.



Symbole Lien : sous-processus s'inscrivant dans un processus plus important.



Symbole Erreur : erreur détectée au début, au milieu ou à la fin d'un processus. Un sous-processus d'événement déclenchant une erreur interrompt toujours le processus qui le contient.



Symbole Annulation : réaction suite à une transaction annulée au sein d'un sous-processus. Dans un événement de fin, le symbole Annulation représente l'annulation déclenchée d'un processus.



Symbole Compensation : retour en arrière déclenché lorsque des opérations échouent partiellement.



Symbole Signal : signal répercuté à travers différents processus. Le symbole Signal peut démarrer un processus, le faciliter ou l'achever.



Symbole Multiple : déclencheurs multiples qui initient un processus.



Symbole Instance multiple parallèle : instance de processus qui ne démarre, ne continue ou ne se termine que lorsque tous les événements possibles ont eu lieu.



Symbole Fin : déclenche l'interruption immédiate d'une étape dans un processus. Toutes les instances liées prennent fin en même temps.

- **Symbole activités BPMN**

Les activités décrivent le type de travail que suppose une instance particulière d'un processus. Il existe quatre types d'activités BPMN : les tâches, les sous-processus.



Symbole Tâche : une tâche est le niveau le plus élémentaire d'une activité, et elle ne peut pas être décomposée en éléments plus simples. Par exemple, un processus de routine matinale peut inclure la tâche d'allumer son ordinateur.



Symbole Sous-processus : un groupe de tâches qui s'agencent particulièrement bien. Il existe deux vues différentes pour les sous-processus. La première est la vue réduite. Elle est associée au signe « + » qui permet d'afficher plus de détails. La seconde est la vue élargie du sous-processus. Elle est suffisamment grande pour afficher toutes les tâches qui décrivent en détail le sous-processus.

- **Symboles de branchement BPMN**

Les branchements sont des symboles qui séparent et combinent des flux dans un schéma BPMN. Il existe plusieurs types de branchements :



Symbole Exclusif : évalue l'état du processus métier et, en fonction des cas, sépare le flux en un ou plusieurs chemins s'excluant mutuellement. Par exemple, un rapport sera écrit si le supérieur hiérarchique donne son accord ; aucun rapport ne sera écrit s'il ne le donne pas.



Symbole Dépendant d'un événement : un branchement basé sur un événement est semblable à un branchement exclusif – tous deux impliquent un chemin dans le flux. Toutefois, dans le cas d'un branchement dépendant d'un événement, vous évaluez l'événement qui s'est produit, et non la condition qui a été remplie. Par exemple, il peut être préférable d'attendre que le PDG soit arrivé au bureau avant d'envoyer un e-mail. Si le PDG n'arrive pas, l'e-mail ne sera pas envoyé.



Symbole Parallèle : ce type de branchement se distingue des autres en ce qu'il ne dépend pas de conditions ou d'événements. Au lieu de cela, les branchements parallèles sont utilisés pour représenter deux tâches simultanées

dans un processus métier. Par exemple, un service marketing qui génère de nouveaux prospects tout en contactant des prospects existants.



Symbole Inclusif : décompose le schéma de procédé en un ou plusieurs processus. Par exemple, un branchement inclusif pourrait représenter des actions commerciales engagées suite aux résultats d'une enquête consommateurs. Un processus peut être déclenché si le client est satisfait du produit A. Un autre est déclenché si le client indique qu'il est satisfait du produit B, et un troisième s'il n'est pas satisfait du produit A.



Symbole Dépendant d'un événement exclusif : démarre un nouveau processus à chaque occurrence d'un événement ultérieur.



Symbole Complexe : ces branchements ne sont utilisés que pour les flux les plus complexes dans un processus métier. Le cas typique d'utilisation d'un branchement complexe est lorsque plusieurs branchements sont nécessaires pour décrire le processus métier.



Symbole Dépendant d'un événement parallèle : comme leur nom l'indique, ces branchements sont semblables à des branchements parallèles. Ils permettent le déroulement de plusieurs processus simultanément, mais contrairement aux branchements parallèles, ces processus dépendent d'un événement.

- **Objets de connexion dans un diagramme BPMN**

Les objets de connexion sont des lignes qui relient des objets de flux BPMN. Il en existe trois types différents : les flux séquentiels, les flux de message et les associations.



Symbole Flux séquentiel : relie les objets du flux en une séquence adéquate.

○ — — ▸ **Symbole Flux de message** : représente les messages d'un participant du processus à un autre.

..... **Symbole Association** : montre les relations entre les artefacts et les objets de flux.

- **Couloirs dans un diagramme BPMN**

On utilise les couloirs pour organiser les différents aspects d'un processus dans un diagramme BPMN. Ils regroupent visuellement des objets, chaque aspect d'un processus étant ajouté dans un couloir séparé. Ces éléments peuvent être disposés horizontalement ou verticalement. Les couloirs servent à organiser les activités en catégories séparées, mais peuvent aussi révéler des retards, des manques d'efficacité, ainsi que les personnes responsables à chaque étape d'un processus.



- **Artefacts dans un diagramme BPMN**

Les artefacts représentent les informations pertinentes pour le schéma dans son ensemble, mais pas pour chaque élément individuellement. Les trois types d'artefact sont les annotations, les groupes et les objets de données qui peuvent être utilisés dans un diagramme BPMN. Tous trois sont utilisés pour compléter et décrire un processus BPMN.

Les annotations permettent au créateur du schéma de décrire des éléments supplémentaires du flux.

Les groupes organisent les tâches ou processus importants dans le processus global.

Les objets de données représentent les données intégrées dans le processus, les données résultant du processus, les données devant être collectées et les données devant être stockées.



Symbole Entrée de données : représente les exigences des données dont dépendent les tâches du processus métier.



Symbole Sortie de données : montre l'information produite suite à un processus métier.



Symbole Collecte de données : représente l'information recueillie dans un processus métier.



Symbole Stockage des données : représente la possibilité de stocker des données associées à un processus métier ou d'y accéder.

Annexe 2 : Le Cplex

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio regroupe un ensemble d'outils pour la programmation mathématique et la programmation par contraintes. Il associe :

- Un environnement de développement intégré (Integrated Development Environment-IDE) nommé Cplex Studio IDE.
- Un langage de modélisation : le langage OPL (Optimization Programming Language),
- Deux solveurs : IBM ILOG CPLEX pour la programmation mathématique (résolution de programmes linéaires en nombres fractionnaires, mixtes ou entiers et de programmes quadratiques) et IBM ILOG CP Optimizer pour la programmation par contraintes.

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé le langage OPL. Il s'agit d'un langage de modélisation qui permet d'écrire facilement des programmes linéaires (ou quadratiques) grâce à une syntaxe proche de la formulation mathématique. Par ailleurs OPL donne la

possibilité de séparer le modèle des données, de ce fait un même modèle peut être facilement testé avec différentes données.

L'OPL fonctionne par projets et chaque projet est constitué de plusieurs types de fichiers :

- Un fichier modèle (.mod) qui contient le modèle à résoudre.
- Un fichier de données (facultatif) qui contient les données pour un modèle.
- Un fichier de paramètres (.ops) (facultatif) qui permet de paramétrer le solveur cplex.
- Un fichier de configuration d'exécution (.oplproject) qui indique à l'idée ce qu'il doit faire quand l'utilisateur demande l'exécution du projet. C'est-à-dire quel est le modèle à résoudre et quels sont les paramètres et les données.

Pour résoudre un problème linéaire sur Cplex, il faut ouvrir un fichier projet OPL et procéder ainsi

Etape 1: Ecrire le modèle

Pour écrire un modèle mathématique sur Cplex, il faut respecter la syntaxe suivante :

OPL connaît les types entiers (int), entiers positifs (int+), flottants (float) et flottants positifs (float+).

Les variables de décision se définissent en utilisant le mot clé dvar suivi de leur type.

La fonction objectif est précédée du mot clé "minimize" ou "maximize" en fonction du sens d'optimisation.

Les contraintes sont dans un bloc entre accolades et précédées des mots clés "subject to".

- les principaux opérateurs numériques et logiques sont :
 - +, -, *, / pour l'addition, la soustraction, la multiplication et la division.
 - Div et mod pour la division entière et le modulo.
 - <=, >= et == pour les comparaisons.
- les commentaires sont soit entourés de /* ... */ (comme en C), soit précédés de //(comme en C++) s'ils sont sur une seule ligne.

Etape 2 : Résoudre le modèle

Pour lancer la résolution il faut faire un clic droit sur "Configuration d'exécution" dans l'onglet Projets OPL puis "exécuter / configuration d'exécution par défaut". Le bouton exécuter dans la barre d'outils permet de lancer une nouvelle fois la dernière configuration exécutée. Une fois le modèle résolu, plusieurs informations s'affichent dans les onglets situés en bas de la fenêtre principale (sous le fichier modèle). Par exemple :

- L'onglet "solution" donne des informations sur la solution (optimalité, coût de la fonction objectif, valeur des variables à l'optimalité...).

- L'onglet "journal du moteur" affiche la sortie de Cplex.
- L'onglet "statistique" montre différentes mesures liées à la résolution (nombre d'itérations du simplexe, nombres de nœuds de branchement...).

Annexe 3 : Python

Python est un langage de programmation interprété et libre (open source) créé par Guido van Rossum en 1990.

Il s'agit d'un langage multi-paradigme, ce qui signifie qu'au lieu d'imposer aux développeurs un type de programmation précis, il leur laisse adopter celui de leur choix. Il permet ainsi la programmation orientée objet, impérative structurée ou encore fonctionnelle.

Python est un langage puissant et riche en fonctionnalités.

, il existe également un grand nombre de bibliothèques qui aident construire des programmes dans des domaines particulier comme la bibliothèque PULP pour la résolution des modèles mathématiques.

Ce logiciel permet de faire :

- De petits programmes très simples, appelés **scripts**, chargés d'une mission très précise sur votre ordinateur ;
- Des programmes complets, comme des jeux, des suites bureautiques, des logiciels multimédias, des clients de messagerie...
- Des projets très complexes, comme des progiciels (ensemble de plusieurs logiciels pouvant fonctionner ensemble, principalement utilisés dans le monde professionnel).

Voici quelques-unes des fonctionnalités offertes par Python et ses bibliothèques :

- Créer des interfaces graphiques.
- Faire circuler des informations au travers d'un réseau.
- Dialoguer d'une façon avancée avec votre système d'exploitation.