

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel

L'entreprise NUMILOG

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel
Option : Management d'innovation

**La conception et la mise en place d'un outil informatique
d'aide à la décision pour l'optimisation des flux de transport**

Réalisé par :

Imene Fatima Zohra FERFERA

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2019)

Composition du Jury :

Président	Mme Sofia AIT BOUAAZA	Maitre-Assistant A	ENP
Examineur	Mme Bahia BOUCHAFAA	Maitre de Conférences A	ENP
Promoteur	M. Wassim BENHASSINE	Maitre de Conférences A	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	Maitre-Assistant A	ENP
Co-Promoteur	M. Seddik KHAMEN	Responsable d'exploitation	NUMILOG

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Industriel
L'entreprise NUMILOG

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Industriel
Option : Management d'innovation

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

Réalisé par :

Imene Fatima Zohra FERFERA

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2019)

Composition du Jury :

Président	Mme Sofia AIT BOUAAZA	Maitre-Assistant A	ENP
Examineur	Mme Bahia BOUCHAFAA	Maitre de Conférences A	ENP
Promoteur	M. Wassim BENHASSINE	Maitre de Conférences A	ENP
Promoteur	M. Ali BOUKABOUS	Maitre-Assistant A	ENP
Co-Promoteur	M. Seddik KHAMEN	Responsable d'exploitation	NUMILOG

DEDICACE

Je dédie ce travail

À mes parents,

Qui m'ont tant aimée, gâtée et soutenue pendant vingt-quatre longues années. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

Puisse dieu le tout puissant vous donner santé, bonheur et longue vie.

À la mémoire de mes grand-mères,

Qui ont été toujours présentes dans mon esprit et dans mon cœur. Je vous dédie aujourd'hui ma réussite. Que Dieu vous accueille dans son éternel paradis.

À Fma,

Qui a toujours cru en moi et m'a toujours poussé à devenir une personne meilleure. Je ne te remercierai jamais assez pour tout ce que tu as fait pour moi. Je te souhaite tout le bonheur du monde et beaucoup de réussite.

À ma famille, mes proches et mes amies,

Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours. Vos prières, vos encouragements et votre soutien m'ont toujours été d'un grand secours.

REMERCIEMENTS

Avant toute personne, je remercie le bon Dieu de m'avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce modeste travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mes promoteurs Mr. BENHASSINE et Mr BOUKABOUS, qui m'ont encadré et dirigé ce mémoire. Je vous remercie pour vos efforts, vos recommandations nécessaires pour mener à bien notre travail et surtout pour votre patience.

Je remercie également Mme BOUAAZA, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire ainsi que Mme BOUCHAFAA, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements les plus profonds vont également à mes encadreurs au niveau de l'entreprise NUMILOG, à savoir Mr Sadik KHAMEN et Mr Hacen ALILI pour l'assistance technique qu'ils m'ont prodiguée dans l'élaboration du présent travail.

Je tiens à remercier également l'ensemble des enseignants du département du génie industriel pour les connaissances transmises durant mon cursus.

RESUMES ET MOTS CLES

مختصر :

يعد قطاع الخدمات اللوجستية وخدمات النقل قطاعًا ديناميكيًا للغاية يتطلب مرونة وتفاعلية كبيرين فيما يتعلق بمعالجة الطلبات. يرتبط الأداء المتصور لشركة توفير خدمات النقل ارتباطًا وثيقًا بقدرتها على التحكم في تدفقات النقل لديها.

. للقيام بذلك ، سنقوم Numilog بالهدف من هذا العمل هو تصميم أداة دعم القرار لتحسين تدفق النقل داخل ومكعب ستيرن لتحديد إشكالاتنا وتوجيهه process approach بإجراء تشخيص خارجي وداخلي باستخدام البحوث الجغرافية . ثم سنقترح منهجية قرار مبتكرة ونمذجة رياضية مناسبة. ثم يتم حل النموذج باستخدام مزيج من خوارزميات. أخيرًا، نحكم على صحة النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة أدواتنا.

الكلمات المفتاحية: دعم القرار ، تحسين تدفق النقل ، النمذجة الرياضية خوارزميات.

Abstract:

The logistics and transport service sector is a very dynamic sector that requires great flexibility and reactivity in terms of the treatment of requests. The perceived performance of a transport service of Provider Company is closely associated with its ability to control its transport flows.

The objective of this work is to design a decision support tool to optimize transport flows within Numilog. To do this, we will conduct an external and internal diagnosis using the process approach and Stern's cube to identify our problems and guide our state of the art. We will then propose an innovative resolution methodology and an appropriate mathematical modeling. Then, the model is solved using a combination of heuristic and metaheuristic algorithms. Finally, we review the validity of the results obtained by our tool.

Keywords: decision-support, transport flow optimization, mathematical modeling, heuristics. metaheuristics

Résumé :

Le secteur de prestation de service logistique et de transport est un secteur très dynamique qui nécessite une grande flexibilité et réactivité en termes de traitement des demandes. La performance perçue pour une entreprise prestataire de services de transport est liée étroitement à sa capacité à maîtriser ses flux de transport.

L'objectif de ce travail est de concevoir un outil d'aide à la décision pour optimiser les flux de transport au sein de Numilog. Pour ce faire, nous allons mener un diagnostic externe et interne en utilisant l'approche processus et le cube de Stern afin de cerner notre problématique et orienter notre état de l'art. Nous allons par la suite proposer une méthodologie de résolution innovante et une modélisation mathématique adéquate. Le modèle est ensuite résolu en utilisant une combinaison d'algorithmes heuristiques et métaheuristiques, tout en jugeant la validité des résultats obtenus par notre outil.

Mots clés : aide à la décision, optimisation des flux de transport, modélisation mathématique, heuristiques, métaheuristiques.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTES DES ABREVIATIONS	13
INTRODUCTION GENERALE.....	13
I. CHAPITRE 1 : ETUDE DE L'EXISTANT	17
I.1 Présentation de Cevital	17
I.1.1 L'importance stratégique de l'organisation logistique	17
I.2 Numilog	18
I.2.1 La naissance et le développement de Numilog	18
I.2.2 Activité	18
I.2.3 Les moyens et infrastructures de Numilog.....	19
I.3 Environnement de l'entreprise.....	20
I.3.1 La logistique en Algérie.....	20
I.3.2 Les prestataires et le marché de la logistique en Algérie	21
I.4 Diagnostic	22
I.4.1 Diagnostic externe	22
I.4.2 Diagnostic interne.....	23
I.4.3 Résultat du diagnostic.....	36
I.5 Enoncé de la problématique.....	37
II. CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART	39
II.1 Problème de tournée de véhicule (VRP)	40
II.1.1 Description du problème.....	40
II.1.2 Formulation mathématique	40
II.1.3 La complexité	42
II.1.4 Les méthodes de résolution.....	43
II.1.4.1 Les méthodes exactes	43
II.1.4.1.1 Méthode de Branch and Bound	44
II.1.4.1.2 Méthode de Branch and cut.....	44
II.1.4.1.3 Programmation dynamique	44
II.1.4.2 Les heuristiques	44
II.1.4.2.1 L'heuristique « groupe en premier, route en second ».....	45

II.1.4.2.2	L’heuristique « route en premier, groupe en second»	45
II.1.4.2.3	Algorithme de gain	45
II.1.4.2.4	Algorithme en pétale	45
II.1.4.3	Les métaheuristiques	46
II.1.4.3.1	Recherche locale	46
II.1.4.3.2	Méthode du recuit simulé	47
II.1.4.3.3	Recherche tabou	48
II.1.4.3.4	Colonie de fourmis	50
II.1.4.3.5	Algorithmes génétiques	50
II.1.5	Variantes du VRP	53
II.1.5.1	VRPTW	54
II.1.5.2	MPVRP	55
II.1.5.3	VRPCD	55
II.1.5.4	MTVRP	55
II.1.5.5	VRPCS	56
II.1.5.6	VRPPD	56
II.1.5.7	MDVRP	56
II.1.5.8	VRPHF	56
II.1.5.9	SDVRP	57
II.2	Problème de collecte et de distribution	57
II.2.1	Description du problème	57
II.2.2	Les variantes du PDP	57
II.3	Les principales variantes	58
II.3.1	1-1-PDPTW	58
II.3.1.1	Description du problème	58
II.3.1.2	Formulation mathématique	59
II.3.1.3	Méthodes de résolution	61
II.3.2	SDVRP	62
II.3.2.1	Description du problème	62
II.3.2.2	Formulation mathématique	62
II.3.2.3	Méthodes de résolution	64
II.3.3	MDVRP	65
II.3.3.1	Description du problème	65
II.3.3.2	Formulation mathématique	65

II.3.3.3	Méthodes de résolution	68
II.4	Evaluation des différents problèmes.....	69
III.	CHAPITRE 3 : RESOLUTION DE LA PROBLEMATIQUE	76
III.1	La méthode de résolution.....	77
III.1.1	Analyse du processus de prise de décision.....	77
III.1.2	Explication de la méthodologie de résolution	81
III.1.3	Description et formulation du problème	83
III.1.3.1	Description du problème.....	83
III.1.3.2	Formulation mathématique	84
III.1.3.3	La complexité du modèle.....	88
III.1.3.4	La vérification du modèle	88
III.2	La résolution du modèle mathématique.....	90
III.2.1	Construction d'une solution initiale	91
III.2.1.1	CHEAPEST INSERTION heuristique.....	92
III.2.1.1.1	L'algorithme	92
III.2.1.1.2	Un exemple	92
III.2.1.1.3	Résultat obtenu par l'heuristique sur notre échantillon	93
III.2.1.2	Christofides.....	94
III.2.1.2.1	L'algorithme	94
III.2.1.2.2	Exemple :	94
III.2.1.2.3	Résultat du test	94
III.2.2	Optimisation de la solution initiale par Guided Local Search	95
III.2.2.1	Description de l'algorithme GLS	95
III.2.2.2	L'algorithme du GLS.....	95
III.2.2.3	Adaptation de la métaheuristique à notre problème	96
III.2.2.4	Résultats obtenus avec GLS.....	97
III.2.3	Evaluation des algorithmes utilisés	97
III.3	Présentation de l'outil	99
III.3.1	L'architecture de l'outil	99
III.3.2	Exemple illustratif	100
III.4	La validation du modèle	102
III.4.1	La validation du modèle	102
III.4.2	Perspectives de l'étude	103
	CONCLUSION GENERALE	106

BIBLIOGRAPHIE	109
ANNEXES	113

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : Les moyens et infrastructure de NUMILOG	20
Table 2: Périmètre des flux considérés.....	24
Table 3: Pondération des causes	36
Table 4:classement des causes.....	36
Table 5:Classification des variantes du VRP.	54
Table 6:Evaluation des modèles de transport	72
Table 7:Un tableau illustrant les résultats obtenus pour l'ensemble des tests.	98

LISTE DES FIGURES

Figure 1:Cartographie du macro-processus du service de transport.....	25
Figure 2:Cartographie du processus de planification.	26
Figure 3: Modélisation du processus (1) de la planification.	26
Figure 4: Modélisation du processus (2) de la planification.	27
Figure 5:Cartographie du processus de réalisation.	28
Figure 6:Modélisation du processus (1) de la réalisation	28
Figure 7: Modélisation du processus (1) de la réalisation	29
Figure 8: cartographie	30
Figure 9:Modélisation du processus de gestion des chauffeurs	30
Figure 10:Cartographie du processus gestion de la relation client.....	31
Figure 11:Modélisation du processus de gestion de la relation client.....	31
Figure 12: Le macro processus	32
Figure 13:Cartographie globale du macro-processus du transport.	33
Figure 14:Schéma illustratif d'un VRP classique (Dréo et al, 2005).	40
Figure 15:Algorithme de la méthode recherche locale (Dréo et al, 2005).....	46
Figure 16:Algorithme de la méthode du recuit simulé (Dréo et al, 2005)	48
Figure 17:Algorithme de la recherche tabou (Dréo et al, 2005).	49
Figure 18:Algorithme de la méthode colonie de fourmis (Dréo et al, 2005).	50
Figure 19:Algorithme de la méthode colonie de fourmis (Dréo et al, 2005).	52
Figure 20:Méthodes de résolution du VRP	53
Figure 21:Schéma illustratif d'un probleme de PDP (Dréo et al, 2005).	58
Figure 22: Exemple illustratif de l'importance du SDVRP (Belenguer, 2000).	62
Figure 23:Schéma illustratif d'un problème de MDVRP (Salhi et al, 1997).	65
Figure 24:Schéma illustratif d'un problème de VRPPD (Niazy et al, 2012).	70
Figure 25:Schéma récapitulatif des résultats de la recherche bibliographique.	74
Figure 26:Processus de prise de décision pour l'élaboration d'un plan de transport	78
Figure 27:Schéma illustratif d'un plan de transport.	79
Figure 28:Etapes de prises de décision.....	79
Figure 29:Schéma du plan de transport qui prend en considération la nature des chemins.	80
Figure 30:Transformation des données.....	80
Figure 31:Nouvelle notion de distance entre deux sommets composés.	82
Figure 32:Algorithme de préparation des données.....	83
Figure 33:Nouvelle présentation du graphe support.	83
Figure 34: Test de vérification: déclaration des paramètres et des variables de décision.....	89
Figure 35: Test de vérification: introduction des contraintes et de la fonction objectif	90
Figure 36: Les résultats de la simulation	90
Figure 37: Heuristique de Federgruen et Simchi-Levi (1995).	91
Figure 38: Exemple de l'algorithme de CHEAPEST INSERTION (Lehuédé, 2015).	93
Figure 39: Résultat obtenu en utilisant CHEAPEST INSERTION.....	93
Figure 40: Exemple du déroulement de CRISTOPHIDES algorithme.	94
Figure 41: Résultat obtenu en utilisant CRISTOPHIDES.	95
Figure 42:la stratégie de la méthode GLS pour explorer l'espace des solutions.....	95
Figure 43: Résultat obtenu en combinant CHEAPEST INSERTION+ GLS.	97

Figure 44: Résultat obtenu en combinant CRISTOPHIDES+ GLS.	97
Figure 45: Architecture globale de l'algorithme.	100
Figure 46: Démonstration (1) : l'introduction des OT.	101
Figure 47: Démonstration (2): l'introduction des contraintes temporelles.	101
Figure 48: Démonstration (3) : affichage des résultats	102

LISTES DES ABREVIATIONS

CDG : Contrôle De Gestion.

DC : Direction Commercial.

DFC : Direction des Finances et de Comptabilité.

DRH : Direction Des Ressources Humaines.

DSI : Direction Des Systèmes Informatiques.

GLS : Guided Local Search

MDVRP: Multi-Depot Vehicle Routing Problem

MPVRP: Multi-Period Vehicle Routing Problem

MTVRP: Multi-Trip Vehicle Routing Problem

SDVRP: Split Delivery Vehicle Routing Problem

TMS: Transport Management Système.

TRIZ : Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs.

VRP: Vehicle Routing Problem.

VRPCD: Vehicle Routing Problem with Cross Docking

VRPCS: Vehicle Routing Problem with Crew Scheduling

VRPHF: Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet

VRPPD: The Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivering

VRPTW: Vehicle Routing Problem with Time Window.

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie et à l'instar des autres secteurs économiques, le secteur des transports, qui comprend le réseau routier, le réseau ferroviaire, le transport aérien, maritime et urbain connaît une véritable mutation. Un grand nombre de projets ont été réalisés ou sont en phase de réalisation, afin de rendre ce secteur plus performant et plus efficace dans sa contribution dans le développement économique du pays.

Le rôle déterminant des infrastructures du secteur des transports dans la relance économique ont fait l'objet de modernisation. Ainsi 120 000 Km d'autoroutes et 24 000 Km de routes sont réalisés et 73.000 km de routes avaient fait l'objet de réfection.

Parallèlement à cela, des secteurs économiques qualifiés de prioritaires et d'une importance vitale représentent aujourd'hui des domaines d'investissements prometteurs. Il s'agit, en premier lieu, de l'industrie agro-alimentaire qui connaît un développement remarquable depuis une quinzaine d'années et les perspectives de croissance sont encore plus importantes pour le futur, compte tenu de l'importance de la demande algérienne et des possibilités d'exportations dans certains secteurs.

Ce programme d'envergure nécessite une logistique appropriée qui doit répondre aux attentes de tous les opérateurs nationaux (publics et privés) qui par la force des choses ont compris que le vecteur logistique dans toute sa composante devient incontournable. C'est sous cette optique que les pouvoirs publics s'attendent à asseoir un plan logistique pour accompagner l'élan du développement économique du pays, à travers la mise en place des systèmes d'information plus adéquats et faciles à l'accès (traitements électroniques des formalités administratives, etc..) et ce pour une meilleure synchronisation des intervenants dans la chaîne logistique nationale et surtout également la mise en place des plateformes régionales.

L'enjeu stratégique est bien appréhendé par le groupe Cevital (1er groupe agro industriel) puisqu'il a intégré la logistique et le transport routier dans sa chaîne de valeurs par la création de la filiale Numilog.

C'est un véritable défi auquel le groupe Cevital s'est lancé par la création de la filiale Numilog. Cette filiale doit répondre en premier lieu aux besoins du groupe et puis aux attentes des autres opérateurs économiques en second lieu.

L'objectif de Numilog s'articule autour de l'équation suivante : comment réduire, dans un cadre concurrentiel, les coûts et les délais de mise à disposition des marchandises et avec une meilleure prestation de service ?

Sachant pertinemment qu'avec les mutations et les évolutions rapides de l'environnement économique et social que connaît l'Algérie, ce sont les besoins des marchés qui imposent leurs exigences à la logistique d'être présente là où il faut, juste à temps et au moindre coût.

Certes, Numilog en tant qu'acteur économique dans ce paysage ne peut nullement se démarquer de cette logique et se doit de s'adapter à ce contexte. Or il se trouve que la chaîne logistique de Numilog soit confrontée à certaines contraintes vues la complexité de son réseau de distribution. Il s'agit notamment de l'organisation et de l'optimisation de sa flotte.

Nous avons procédé à diagnostiquer l'ensemble des processus de Numilog (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.

En ayant en vue ce diagnostic, nous nous sommes rendu compte de la complexité de cette problématique conjuguée de surcroît à l'absence d'une méthode existante dans la littérature. Ceci nous a mené à développer notre propre méthode de résolution qui est innovante et permettra l'optimisation des flux de transport de Numilog. Nous allons faire ressortir cette démarche de résolution tout le long de notre travail.

Pour ce faire, nous agissons sur deux aspects importants :

- Le premier aspect consiste à concevoir des itinéraires qui garantissent un coût de transport minimum et qui respectent également un certain nombre de contraintes d'ordre social et temporel.
- Le deuxième aspect consiste à réduire le nombre total de véhicules mobilisés.

Afin d'apprécier le cheminement de notre réflexion, le présent document est structuré en trois chapitres répartis comme suit :

- **Le premier chapitre** a pour objectif de présenter l'étude de l'existant effectuée au sein de l'entreprise. Nous commençons par une présentation générale de NUMILOG et son secteur d'activité. Par la suite, nous présentons un diagnostic externe et interne de

l'entreprise. Finalement, nous exposons d'une manière claire la problématique qui fait l'objet de ce travail.

- **Le deuxième chapitre** sera dédié à une recherche, dans la littérature scientifique, des éléments adéquats qui permettront de résoudre la problématique de notre mémoire. Nous commençons par présenter d'une façon générale certains problèmes de transport connus, nous allons par la suite détailler les modèles qui peuvent représenter une éventuelle solution pour notre problème. Nous concluons ce chapitre par une étude évaluative des modèles en question. Cette étude nous a conduits à affirmer la nécessité de créer notre propre modèle de résolution.
- **Le troisième chapitre** sera consacré à notre apport personnel qui consiste à présenter notre méthode de résolution. Cette méthode se répartit en quatre étapes.
 - Dans la première étape, nous présentons une analyse exhaustive du processus de prise de décision suivi pour la création d'un plan de transport. Cette analyse, nous a conduits à développer notre propre approche de résolution ainsi que l'introduction de la modélisation mathématique.
 - La deuxième étape est consacrée à l'explication détaillée des algorithmes heuristiques et métaheuristique utilisés afin de résoudre le problème mathématique en question.
 - Dans la troisième étape nous présentons notre outil d'aide à la décision et nous illustrons son mode de fonctionnement.
 - Dans la quatrième étape nous validons le modèle mathématique et présentons des suggestions en vue d'améliorer la conception et l'utilisation de l'outil d'aide à la décision conçu.

CHAPITRE 1 :
ETUDE DE L'EXISTANT

I. CHAPITRE 1 : ETUDE DE L'EXISTANT

Introduction

Ce chapitre est réparti en trois parties :

- Dans la première partie, nous allons présenter l'entreprise mère Cevital ainsi que sa filiale Numilog dans laquelle nous avons effectué notre stage.
- La deuxième partie, consiste à faire un diagnostic interne et externe de Numilog à fin de pouvoir détecter les pistes d'amélioration.
- La dernière partie porte sur l'exposition de notre problématique.

I.1 Présentation de Cevital

Cevital est le premier groupe agro-alimentaire en Algérie et troisième à l'échelle africaine, avec un chiffre d'affaire de plus de 4 milliards de dollars (2016). Le groupe a traversé d'importantes étapes historiques pour atteindre sa taille et sa notoriété actuelle pour regrouper aujourd'hui 26 filiales aux activités diversifiées : agro-alimentaire, grande distribution, automobile, industrie, et logistique...etc.

Il accapare plus de 60% du marché algérien du sucre et des huiles végétales, avec une volonté de se tourner désormais vers l'exportation avec de capacités de production en forte croissance.

I.1.1 L'importance stratégique de l'organisation logistique

Cevital porte une attention particulière à la logistique puisqu'elle est considérée comme étant une partie intégrante dans sa politique de développement. L'importance de ce domaine dans le business, son impact dans la réduction des coûts et l'augmentation des manœuvres de compétitivité sont autant de facteurs pour lesquels, le groupe a œuvré à mettre en place un réseau logistique capable de jalonner l'ensemble des activités qui viennent en amont et en aval de la chaîne de valeur. C'est ainsi qu'en amont, le groupe s'est doté d'une flotte maritime, de trois navires en propriété et d'autres affrétés, représenté par sa filiale Nolis (créée en 2000) assurant l'approvisionnement en matières premières importées, en particulier d'Amérique latine.

En aval, il a créé un vaste réseau de transport routier, d'entreposage, avec une filiale de spécialité logistique Numilog (créée en 2007), et de grande distribution représenté par la filiale Numidis (créée en 2007) qui projette le développement d'une chaîne de supermarchés et d'hypermarchés assistée par l'expertise d'une autre filiale Sierra Cevital (créée en 2011), cette dernière est une joint-venture entre le groupe Cevital et l'entreprise brésilienne Sonae-Sierra spécialisée dans le développement et la gestion de centres commerciaux.

I.2 Numilog

I.2.1 La naissance et le développement de Numilog

Bien avant la création de Numilog, le groupe Cevital faisait appel à des prestataires logistiques externes pour assurer le transport de ses différentes marchandises. Alors que sur le plan de la logistique, chacune de ses filiales était dotée de sa propre structure. Le coût était pesant sur la trésorerie des filiales. L'un des objectifs de la création de Numilog était justement d'aller vers un allègement du coût lié au transport et de subvenir aux besoins en matière de logistique. Après une tentative peu concluante (propositions coûteuses) de travailler en Algérie avec des prestataires européens, le groupe a créé la filiale logistique Numilog en 2007 et l'a liée à la Business strategic Unit.

Au début, la mission de Numilog était d'accompagner le déploiement de la filiale de distribution Numidis. Elle comptait alors 30 personnes et un entrepôt qui gérait les stocks sur tableur. Mais depuis, Numilog s'est largement étoffée et travaille pour d'autres filiales du groupe.

Numilog offre une prestation complète allant du stockage jusqu'à la distribution des produits à travers le territoire national. Elle se place comme un acteur incontournable de la chaîne logistique qui accompagne les industriels de différents secteurs dans la consolidation de leurs flux marchandises et l'optimisation de leurs activités, offrant des solutions adaptées en matière de Supply Chain, grâce aux infrastructures et outils modernes (géolocalisation, traçabilité, technologies de pointe...).

En 2019, Numilog compte un effectif global de plus de 1341 collaborateurs, avec une flotte de plus de 453 véhicules qui permettent 500 livraisons quotidiennes pour les grossistes, distributeurs, centres commerciaux et relais auto routier et une capacité de stockage qui atteint 150 000 palettes dont 35 000 sous température dirigée.

I.2.2 Activité

Numilog déploie ses activités autour de trois missions principales :

- Accompagner la croissance des activités du groupe Cevital en matière logistiques et de transport.
- Proposer aux acteurs économiques et industriels en Algérie des prestations de transport et/ou logistiques à travers tout le territoire.
- Proposer un accompagnement en conseil et solutions logistiques.

Numilog accompagne ses clients dans leur développement grâce à son savoir-faire et son expérience capitalisée dans le domaine, en termes de planification et d'organisation des

opérations de transport et de logistique. L'entreprise emploie des responsables franco-algériens de spécialistes logistiques très expérimentés avec des contrats de droit français et expatriés en Algérie pour insuffler une culture de l'excellence opérationnelle en logistique au pays.

Le transport et la logistique sont les deux moteurs de l'activité de Numilog. Ce sont deux métiers intrinsèquement liés, dans une relation de complémentarité des services fournis par Numilog. En d'autres termes, la logistique exige une rigueur dans la planification afin de ne négliger aucun aspect relevant de ce domaine. Le transport, quant à lui, est le mode d'exécution de la planification établie, prenant en charge les marchandises des clients de la plateforme logistique aux Centres logistiques Régionaux (CLR).

- **L'activité de logistique :**

Elle consiste en une gestion rigoureuse des flux marchandises (Stockage, préparation de commandes, logistique du froid) avec une traçabilité complète de ces flux. Elle vise notamment une gestion optimale des stocks de manière à assurer la disponibilité permanente des produits. Elle permet par ailleurs un accompagnement sur mesure pour chaque secteur d'activités.

- **L'activité de transport :**

Elle assure une distribution répondant aux besoins et aux exigences des clients autrement dit être présent là où il faut, juste à temps et au moindre coût. Elle offre des solutions performantes pour une optimisation des schémas de transport et des moyens suffisants et géo-localisés pour absorber les variations importantes d'activités. Elle vise notamment une distribution en flux tendu sur l'ensemble du territoire national.

I.2.3 Les moyens et infrastructures de Numilog

Le **tableau 1** suivant fait regrouper les différentes informations concernant les moyens et les infrastructures dont dispose Numilog.

Table 1 : Les moyens et infrastructure de NUMILOG

Implantations internationales	Numilog dispose de deux filiales implantées en Maroc et en France.
Implantations nationales	<p>7 agences de transport implantées à : BOUIRA, CONSTANTINE, ORAN, SETIF, BEJAIA, TIZI OUZOU et à ALGER</p> <p>5 plateformes logistiques couvrant 180 000 m2 de surface logistique implantées à : BOUIRA, ORAN, CONSTANTINE, SETIF et à BEJAIA.</p> <p>22 Centres logistiques régionaux implémentés : ALGER, EUCALYPTUS, BLIDA, KOLEA, ANNABA, BATNA, CONTANTINE, EL OUED, SETIF, BEJAIA, CONSTANTINE, HASSI AMEUR, ORAN, OUED R’HIOU, SBA, MOSTAGANEM, MASCARA, TELEMECEN, TIARET.</p>
Capital humain	1431 Collaborateurs dont 762 conducteurs titulaires du Brevet Professionnel Conducteur
Flotte propre	<p>Une flotte propre de 453 véhicules composée de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maraichers. • Plateaux. • Porte-conteneurs. • Camions sous température dirigée.
Moyens techniques	<ul style="list-style-type: none"> • TMS : Transport Management System • WMS : Warehouse Management System • Géolocalisation • Check température • 4 Centres de maintenance technique

I.3 Environnement de l’entreprise

Dans cette partie de notre travail on essayera de décrire d’une manière succincte le paysage de la logistique en Algérie et comment il se présente ainsi que les prestataires qui activent dans cette sphère.

I.3.1 La logistique en Algérie

La logistique en Algérie se confinait à quelques zones extra-portuaires pour décongestionner les ports du fait de leur inadaptation aux expéditions de masse des conteneurs (le tirant d’eau et le linéaire du quai). Cet état de fait s’est répercuté négativement sur la structure du coût de

la logistique de transport des marchandises puisque ce dernier représente actuellement 35% du cout global. Chose qui est énorme.

Dans le rapport mondial et dans son édition du mardi 24 juillet 2018 ce dernier a classé l'Algérie au rang de la 117ème place sur 160 pays avec un score de 2.45 points. Ainsi, l'Algérie a perdu 42 places par rapport à l'étude de 2016 (2.77 points), qui la classait à la 75ème place.

Pour parer à ces inconvénients et donner plus d'importance au créneau de la logistique et son intégration dans le développement économique du pays, l'Algérie a investi dans la réalisation des ports, aéroports et des axes routiers et autoroutiers. Cette démarche s'inscrit dans une ambition volontariste des instances publiques afin de rendre le cout de la logistique plus rationnel avoisinant ainsi les 15% d'ici l'horizon 2025.

I.3.2 Les prestataires et le marché de la logistique en Algérie

Deux grands axes configurent le schéma des prestations de la logistique en Algérie. Le premier propose des solutions complètes du bout en bout (door to door) autrement dit allant des ports ou entrepôts jusqu'à la distribution finale. Le second se limite aux opérations de transport.

- **Les prestataires Logistiques**

Peut nombreux sur la scène national du fait de la culture des entreprises nationales qui prévaut. En effet, peu d'entreprises favorisent l'externalisation de leur activité logistique pour pouvoir se recentrer autour du cœur du métier. Ceci s'explique notamment par le manque de professionnels dans le domaine qui n'ont pas su tailler une place dans le marché sous un label de renommé. Néanmoins cinq entreprises partagent le marché de la logistique. Il s'agit de la Société Nationale de Transport Routier (SNTR). Numilog, la Flèche bleue algérienne, Anderson Logistique et Universal transit.

- **Les prestataires de transport**

Cet axe regroupe :

- La société nationale de transport routier par abréviation SNTR : C'est le premier opérateur de transport routier du pays. Il détient 20 % du marché du transport. Il a pu diversifier ses activités allant jusqu'à l'affrètement, le transit et le stockage, en parfaite concurrence avec les autres entreprises privées de même vocation.
- Les opérateurs de transport privés : ils détiennent plus de 80 % du marché du transport. C'est un axe atomisé et informel mais très dynamique. Il compte de milliers d'opérateurs, la plupart d'entre eux étant des artisans propriétaires

d'un ou deux camions et offre des prestations de transport à des prix défiant toute concurrence avec de très faibles niveaux d'assurance et de qualité

- Les entreprises disposant de leur propre moyen de transport : ce segment est encore plus important, puisqu'il couvre environ 40 % de la demande.

S'agissant de l'intégration des services logistiques dans l'économie nationale, l'Algérie veut inverser la tendance en encourageant les entreprises à externaliser le transport et les autres opérations afférentes à la logistique au profit des sociétés spécialisées par des moyens attractifs surtout sur le plan fiscal et ce pour booster ce créneau et que sa contribution dans le PIB du pays soit considérable.

I.4 Diagnostic

Faire le diagnostic permet à l'entreprise d'évaluer les atouts dont elle dispose. De toute évidence, le diagnostic favorise aussi l'identification des faiblesses qui pourraient constituer un frein ou un obstacle pour tout projet d'avenir. Certes, l'entreprise vit dans un environnement interne et externe qu'elle doit maîtriser. C'est en cela que le diagnostic prend toute son importance dans la mesure où il se prononce si oui ou non un plan de développement connaîtra un échec et si un investissement envisagé en vaut la peine. Pour ce faire, nous avons tenté de diagnostiquer Numilog en externe et en interne.

I.4.1 Diagnostic externe

Dans cette partie, nous analysons l'environnement de Numilog. En effet, l'environnement d'une entreprise est formé d'un ensemble d'organisations, d'acteurs, et de faits dont l'existence peut influencer le comportement et les performances de cette entreprise ; et son analyse répond à un double objectif :

- L'évaluation des différents éléments susceptibles d'affecter son activité.
- L'identification des opportunités ou des menaces environnementales.

Dans le cas de Numilog, nous avons pu constater les éléments suivants :

- **La désorganisation du marché de transport terrestre**

Il est constitué d'une multitude d'artisans, voire des milliers. Ils opèrent souvent dans l'informel.

- **L'émergence de certains opérateurs professionnels**

L'apparition de certains professionnels, à l'instar de Anderson National Express, Global Fret, impose à Numilog la différenciation sur le plan prix et qualité et la diversification par rapport à ces concurrents.

- **La concurrence déloyale**

Le marché de transport terrestre est tellement atomisé à telle enseigne que ces opérateurs offrent leurs services à des prix défiant toute concurrence avec de très faibles niveaux d'assurance et de qualité.

- **Les exigences réglementaires**

L'entreprise se doit de se conformer aux lois et textes réglementaires régissant l'activité de transport de marchandise.

- **Le respect des normes environnementales et de sécurité**

Numilog doit œuvrer sur le respect de l'environnement par la mise en place d'une flotte de camions répondant aux normes internationales (en matière des émissions atmosphériques, bruits, etc...). Numilog doit s'engager également sur la sécurité au travail en mettant en place des procédures appropriées à chaque processus.

I.4.2 Diagnostic interne

Pour réaliser ce diagnostic interne nous avons suivi la démarche d'approche processus [ANNEXE1] et nous avons modélisé les processus en utilisant le BPMN [ANNEXE2]. La démarche se présente comme suit :

Etape1 : Le cadrage du champ d'analyse

Dans cette étape, nous proposons un cadrage à notre analyse. Pour ce faire, nous définissons les bornes des flux à étudier. Cette définition des bornes de flux a pour objectif de définir le périmètre de la chaîne logistique à considérer pour l'analyse.

Géographiquement, Numilog est implantée en Algérie, au Maroc, en France et prochainement en Tunisie. Chaque filiale travaille sur un système local indépendant. Nous nous intéresserons à Numilog Algérie. Cette dernière offre une prestation complète allant de stockage jusqu'à la distribution des produits aux moyens d'une flotte de plus de 450 camions, 4 plates-formes et 22 centres logistiques régionaux. A partir de cela, nous pouvons définir les bornes de flux comme suit :

1) Organisation

Le périmètre de l'analyse va correspondre à l'ensemble des activités concernant uniquement les opérations de transport. Nous allons focaliser notre diagnostic, précisément, sur l'activité du service Syncro et nous allons exclure les activités de la logistique.

2) Géographie

Sur le plan géographique, aucune limite particulière n'a été fixée du fait que la planification et le traitement de tous les ordres de transport (commande client) se font au niveau central et plus exactement au niveau du service Syncro. A ce titre, Numilog dessert tout le territoire national.

3) Service

Numilog est une entreprise de prestation de service. Pour atteindre son objectif cardinal qui est la satisfaction des besoins de sa clientèle en lui assurant un service fait répondant à ses attentes, l'entreprise possède une flotte diversifiée et spécialisée. Elle dispose de 4 types de véhicule : Maraichers ; Plateaux ; Porte-conteneurs : Camions sous température dirigée. Le **tableau 2** suivant fait ressortir la définition des bornes de flux rempli dans le contexte de Numilog.

Table 2: Périmètre des flux considérés

Périmètre des flux considérés	
Géographique	Aucune limite fixée
Produit	Tout type de la flotte confondu
Organisation	Transport : le service synchro

Etape 2 : l'identification des processus clés qui constituent l'activité de transport

A partir de la définition du périmètre d'analyse et sur la base des entretiens effectués avec le staffing, nous avons pu identifier les processus clés de transport qui sont :

- 1) **Processus de planification** : la finalité de ce processus consiste à donner une certaine visibilité et stabilité au service des opérations. Cela permet une meilleure anticipation des commandes et une meilleure réactivité du personnel dédié à ces opérations. Elle permet également la mise en place des plans de transport en parfaite adéquation avec les commandes pour les réaliser.
- 2) **Processus de réalisation** : affecter le camion adéquat pour satisfaire chaque ordre de transport.
- 3) **Processus de gestion de la relation client** : le processus interfère en amont et en aval de la gestion de la commande pour s'assurer de la satisfaction des clients.
- 4) **Processus de gestion des conducteurs** : la matrice chauffeurs/camions est très importante dans la mesure où le chauffeur se doit de connaître parfaitement son engin.

La cartographie montrée dans la **figure1** suivante représente le positionnement de ces processus dans le macro-processus qui régit l'activité de transport au sein de Numilog.

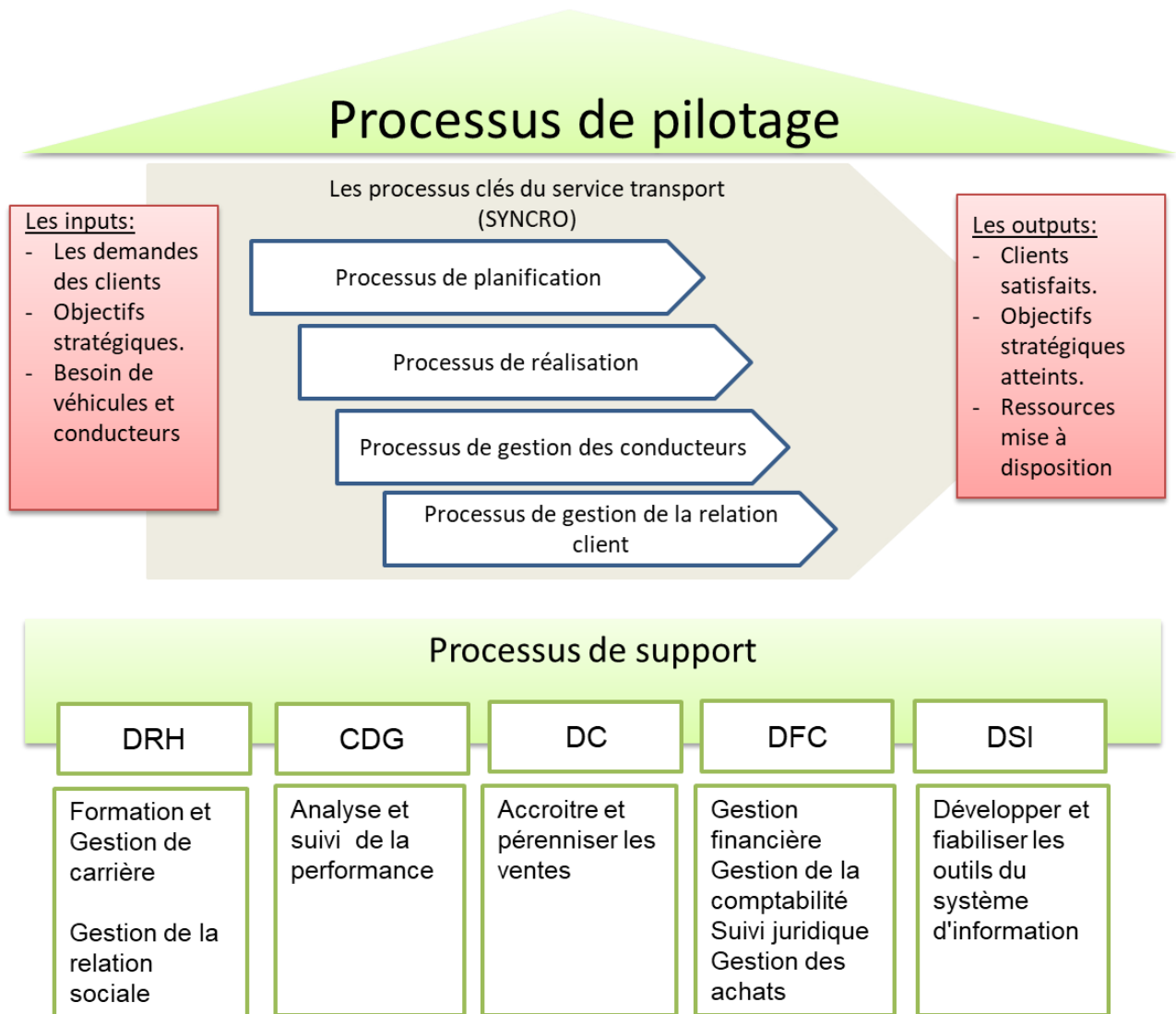


Figure 1: Cartographie du macro-processus du service de transport.

Etape 3 : la formalisation et la description de chaque processus

Chacun de ces processus a fait l'objet d'une macro description qui identifie la valeur ajoutée, les principales macro-activités, les supports utilisés et les liaisons avec les autres processus clefs de l'entreprise.

1) Processus de planification

Le processus de planification est un processus très important au niveau de la tour de contrôle de Numilog. Son principal objectif est d'optimiser les méthodes de prévision et de garantir une aisance de gestion de l'ensemble des moyens de l'entreprise. Ce processus comporte deux principales activités qui sont : l'élaboration des plans prévisionnels et la transformation de ces prévisions en un plan de transport. La **figure 2** représente une cartographie de ce processus :

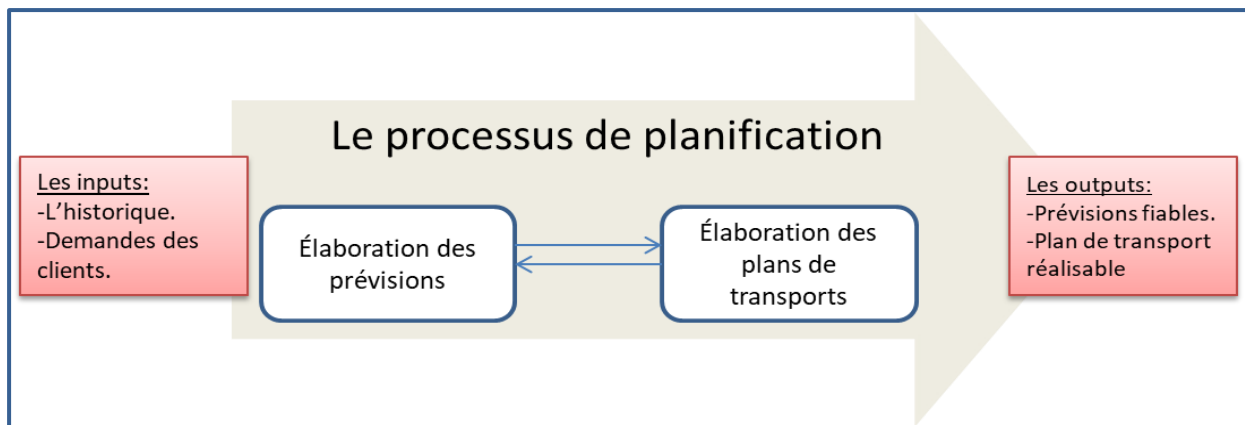


Figure 2:Cartographie du processus de planification.

- Le développement des méthodes et des techniques pour l'élaboration des prévisions : Cette activité consiste à trier l'historique des OT, puis faire une étude exhaustive sur ces données afin de trouver un modèle prévisionnel adéquat.

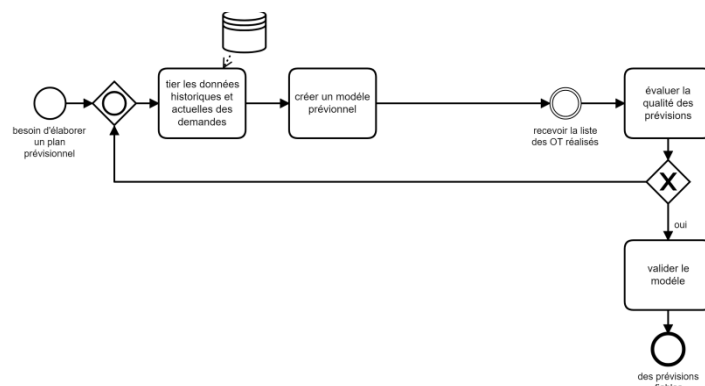


Figure 3: Modélisation du processus (1) de la planification.

- La traduction du plan prévisionnel en un plan de transport réalisable : Avoir un plan de transport optimal est l'un des principaux objectifs de Numilog, car il a une influence directe sur la rentabilité de l'entreprise. Un plan de transport optimal est un plan qui obéit à un certain nombre d'exigences et normes :
 - Il doit satisfaire toute les demandes.
 - Il doit tenir compte des spécifications du réseau de transport de l'entreprise, plus précisément aux emplacements des dépôts (agences).
 - Il doit respecter les règles sociales de l'entreprise qui limitent la durée de conduite des chauffeurs.

- Il doit garantir un minimum de perte pour l'entreprise, autrement dit, il doit assurer un minimum roulage à vide.

Ainsi la mise en place du plan de transport nécessite le cheminement illustré . Une fois que le plan prévisionnel soit établi, il faudra le transformer en un plan de transport. Pour ce faire, il faut trouver le meilleur ordonnancement des visites des wilayas qui garantit un cheminement avec un minimal roulage à vide ; tout en respectant les exigences précédentes. Par la suite, le plan est envoyé au service des opérations ou il doit être validé. Si le plan de transport est réalisable, il va être exécuté ; sinon il fera l'objet d'une correction avant de l'envoyer encore une fois au service des opérations.

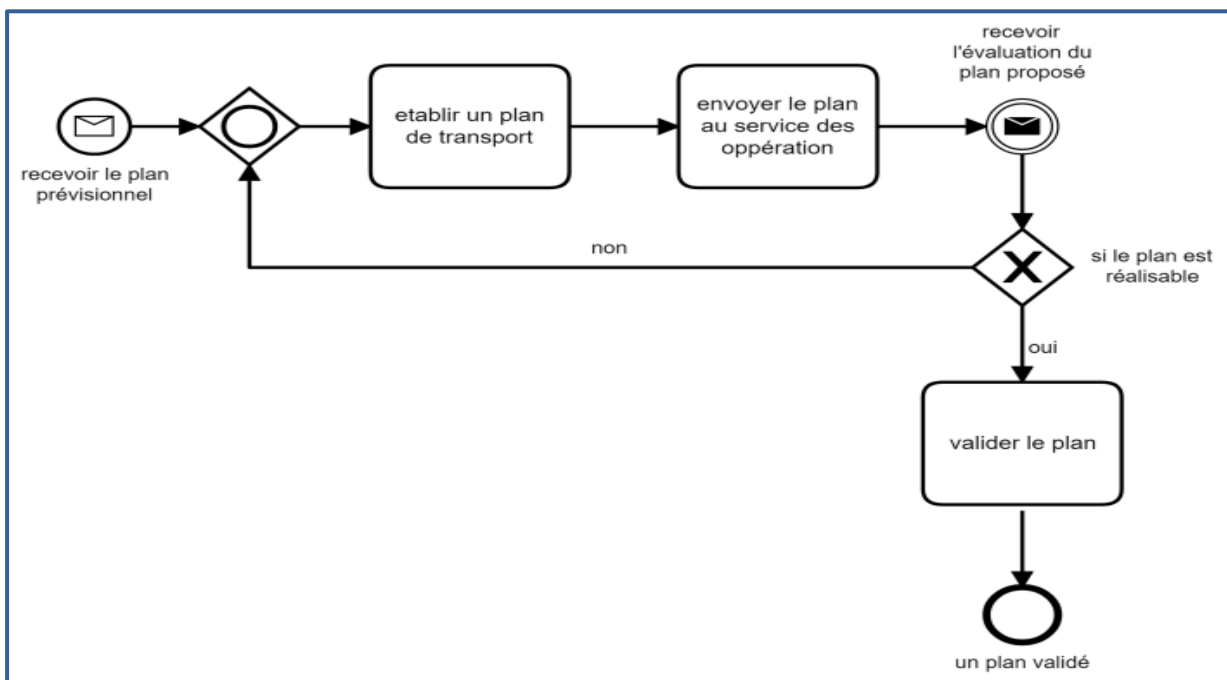


Figure 4: Modélisation du processus (2) de la planification.

Processus de réalisation

Ce processus est assuré par le service des opérations. Il permet d'affecter les ressources matérielles (les véhicules) nécessaires pour la réalisation du plan de transport.

Le processus comporte deux activités. La première est la validation du plan de transport. La seconde est réalisation du plan de transport.

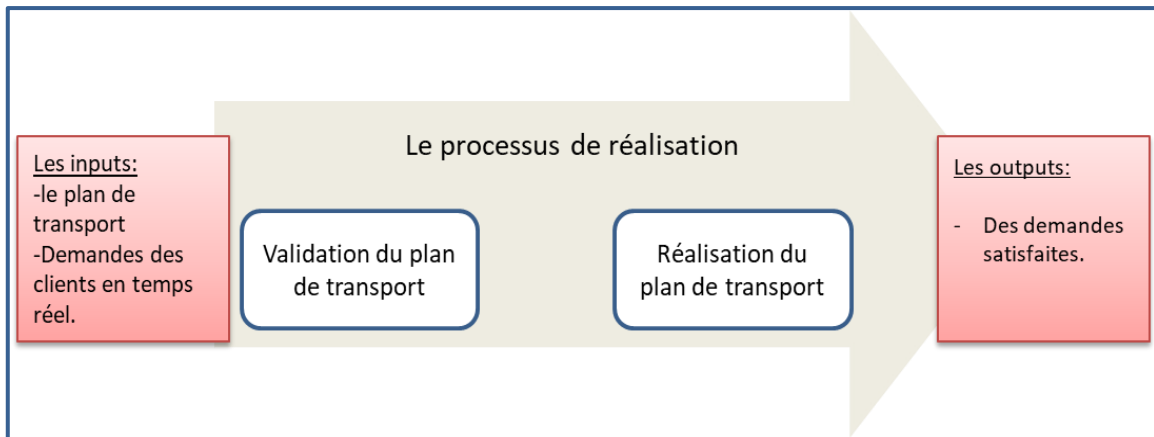


Figure 5:Cartographie du processus de réalisation.

- **La validation du plan de transport**

Le plan de transport doit être validé avant d'être exécuté autrement dit il doit être vérifié s'il est opérationnellement faisable en considérant la réalité du terrain.

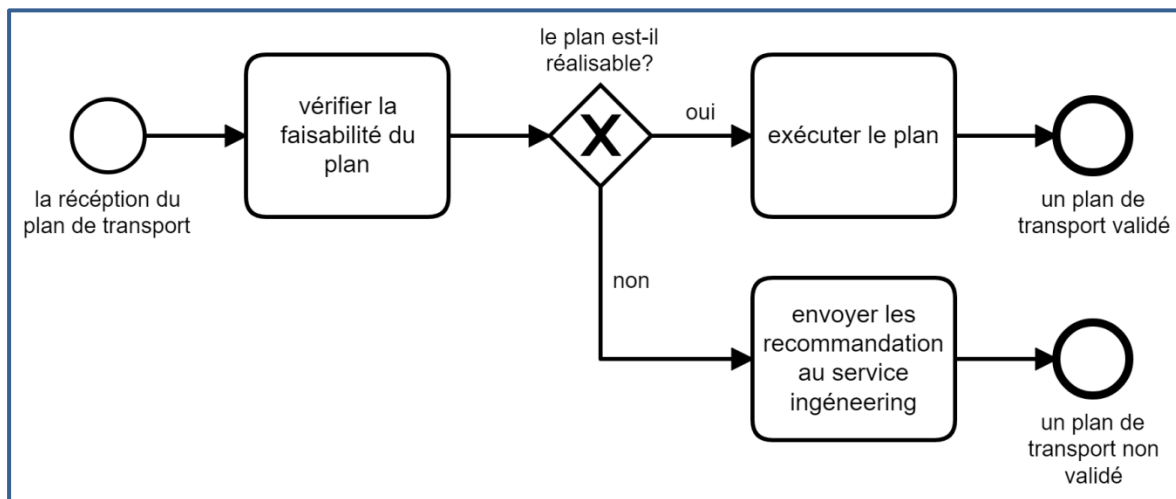


Figure 6:Modélisation du processus (1) de la réalisation

- **La réalisation du plan de transport**

Pour concrétiser le plan de transport, le service des opérations doit distinguer entre deux types des flux, à savoir les flux fixes et les flux variables.

- **Les flux fixes** : ce sont généralement les demandes provenant des différentes entreprises du groupe Cevital. Ces flux quotidiens assurent la transportation des produits du groupe depuis les usines vers les plateformes, ou vers les centres logistiques régionales (CLR).
- **Les flux variables** : ils regroupent toutes les demandes qui sont moins fréquentes que reçoit Numilog.

Une fois les flux distingués, la réalisation du plan de transport se fait selon les étapes suivantes tout en tenant compte du type de la demande.

Si les demandes sont planifiées, une vérification du positionnement de l'ensemble de la flotte se fait, ensuite ils cherchent la ressource disponible la plus proche à qui on affecte la réalisation de cette demande, à ce niveau un OT non affecté est créé sur le TMS et envoyé à l'agence qui gère la ressource affecté. Après, avoir affecté un chauffeur à l'OT, le TMS est actualisé. A partir de là, le suivie de l'OT se fait en temps réel jusqu'à sa satisfaction. La dernière étape consiste à actualiser le TMS une fois que la demande soit accomplie.

Si les demandes ne sont pas planifiées, une vérification de la disponibilité de la flotte s'impose. Si l'entreprise ne dispose pas de véhicules disponibles alors la demande du client est refusée sinon on procède de la même façon que pour les demandes planifiées.

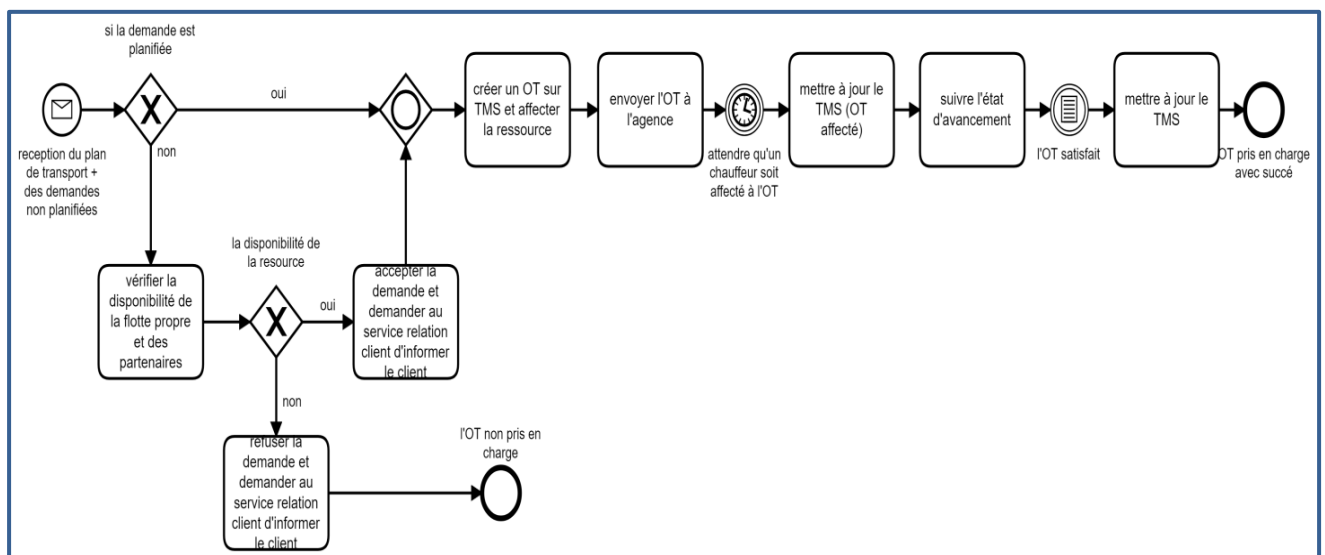


Figure 7: Modélisation du processus (1) de la réalisation

2) Processus de la gestion des conducteurs

La ressource humaine est un élément important au sein des entreprises, qui exige un mode de gestion spécifié. Ce processus consiste à affecter le bon chauffeur au bon OT et se fait au niveau des agences. Cette affectation doit tenir compte, pour chaque chauffeur, des normes et spécifications suivantes :

- Du temps préalablement conduit.
- Des périodes de repos ; un chauffeur doit conduire 12jr et se reposer 3 jours.
- De la période des congés.

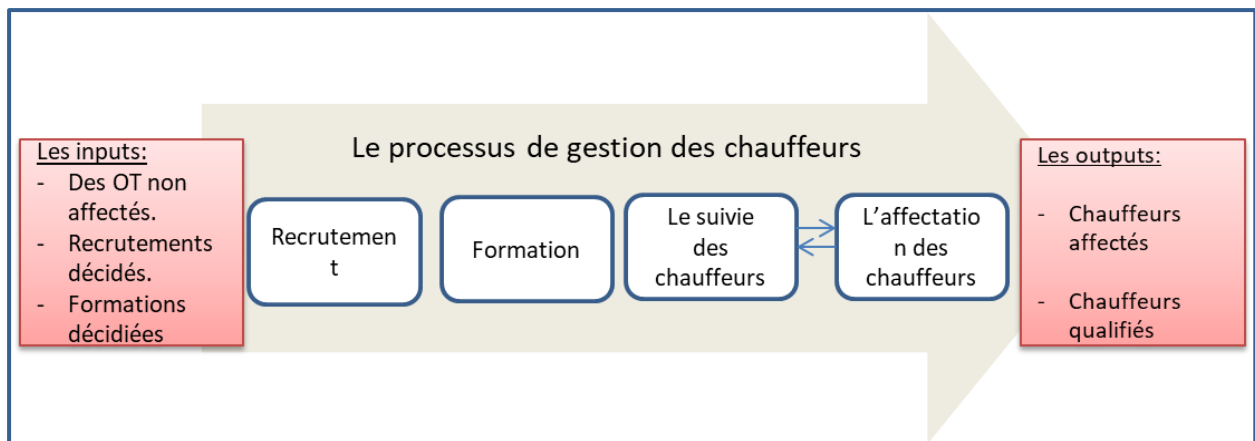


Figure 8: cartographie

Ce processus est déclenché dès que l'agence reçoit un OT non affecté. La première étape du processus consiste à vérifier la disponibilité des chauffeurs et affecter le chauffeur qui répond aux critères précédant. Une fois que l'OT est accompli, le TMS est mis à jour et le bon de livraison est envoyé au service de comptabilité pour le lancer la procédure de paiement.

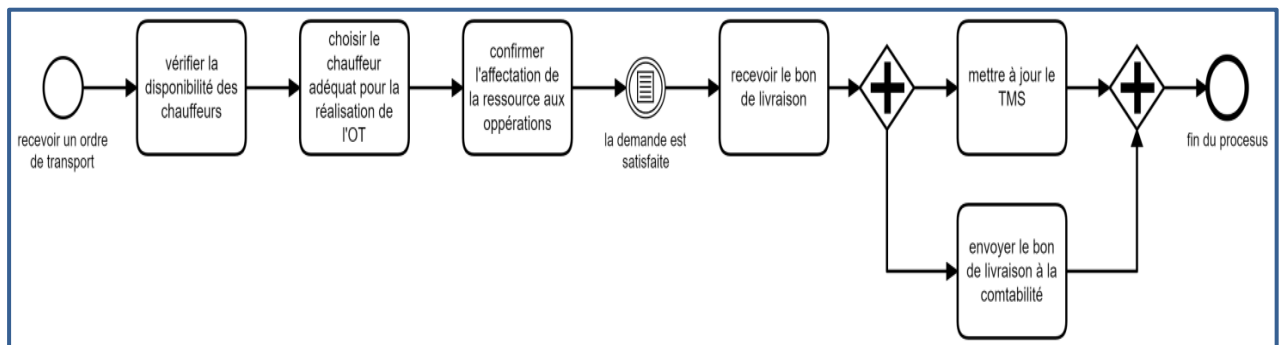


Figure 9: Modélisation du processus de gestion des chauffeurs

3) Processus de la gestion la relation client

Ce processus interfère en amont et en aval des processus précédents. Il consiste à répondre aux préoccupations des clients et gérer leurs réclamations. La cartographie et la modélisation relatives à ce processus sont illustrées par les, respectivement.

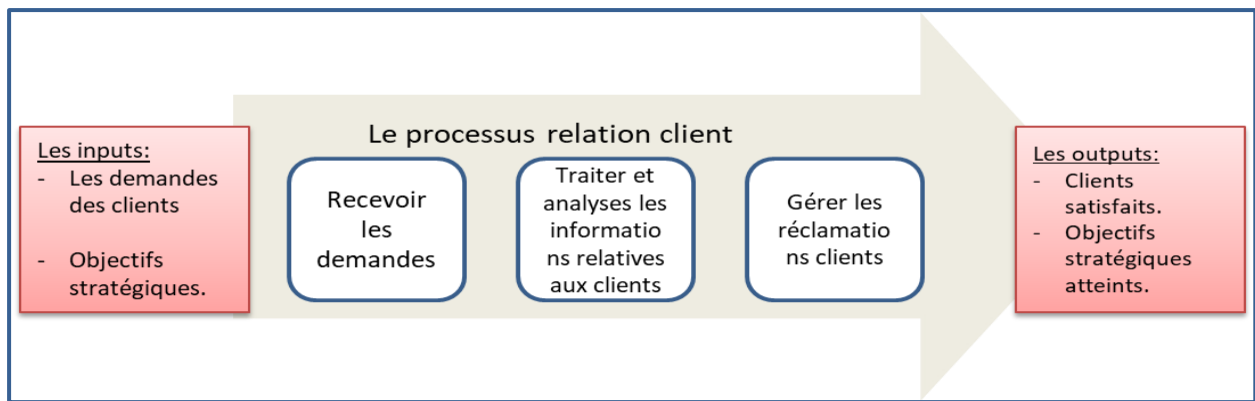


Figure 10:Cartographie du processus gestion de la relation client.

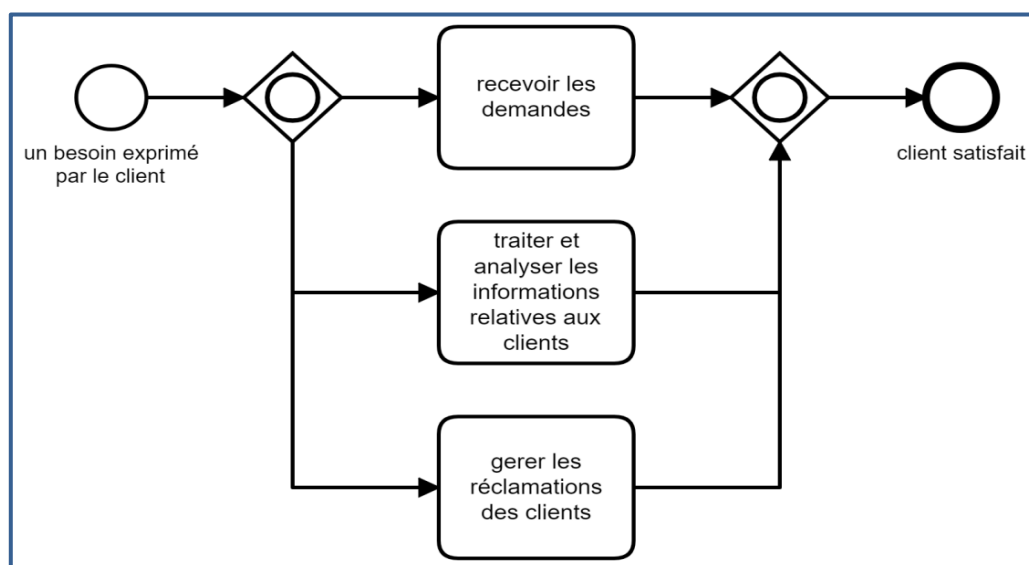


Figure 11:Modélisation du processus de gestion de la relation client.

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

L'élaboration d'une cartographie globale permet de formaliser les liaisons entre ces différents processus clefs qui interagissent et facilite l'identification des interrelations entre eux pour mettre en avant les éventuels dysfonctionnements. La cartographie globale du macro-processus de transport se présente comme suit :

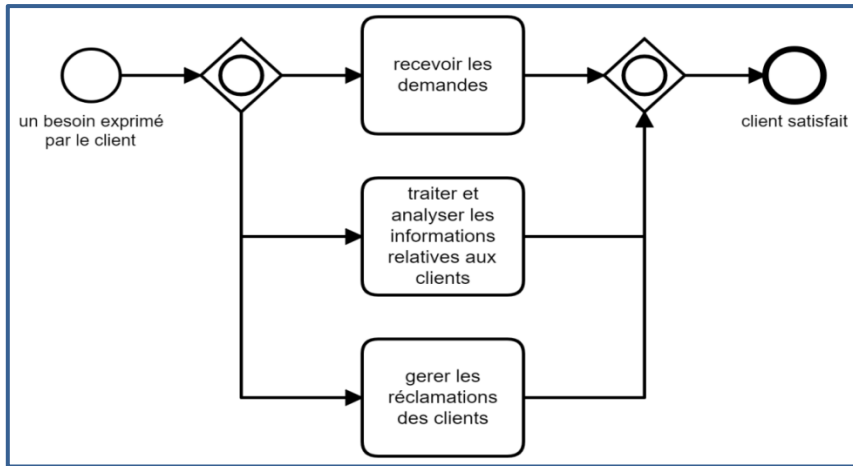


Figure 12: Le macro processus

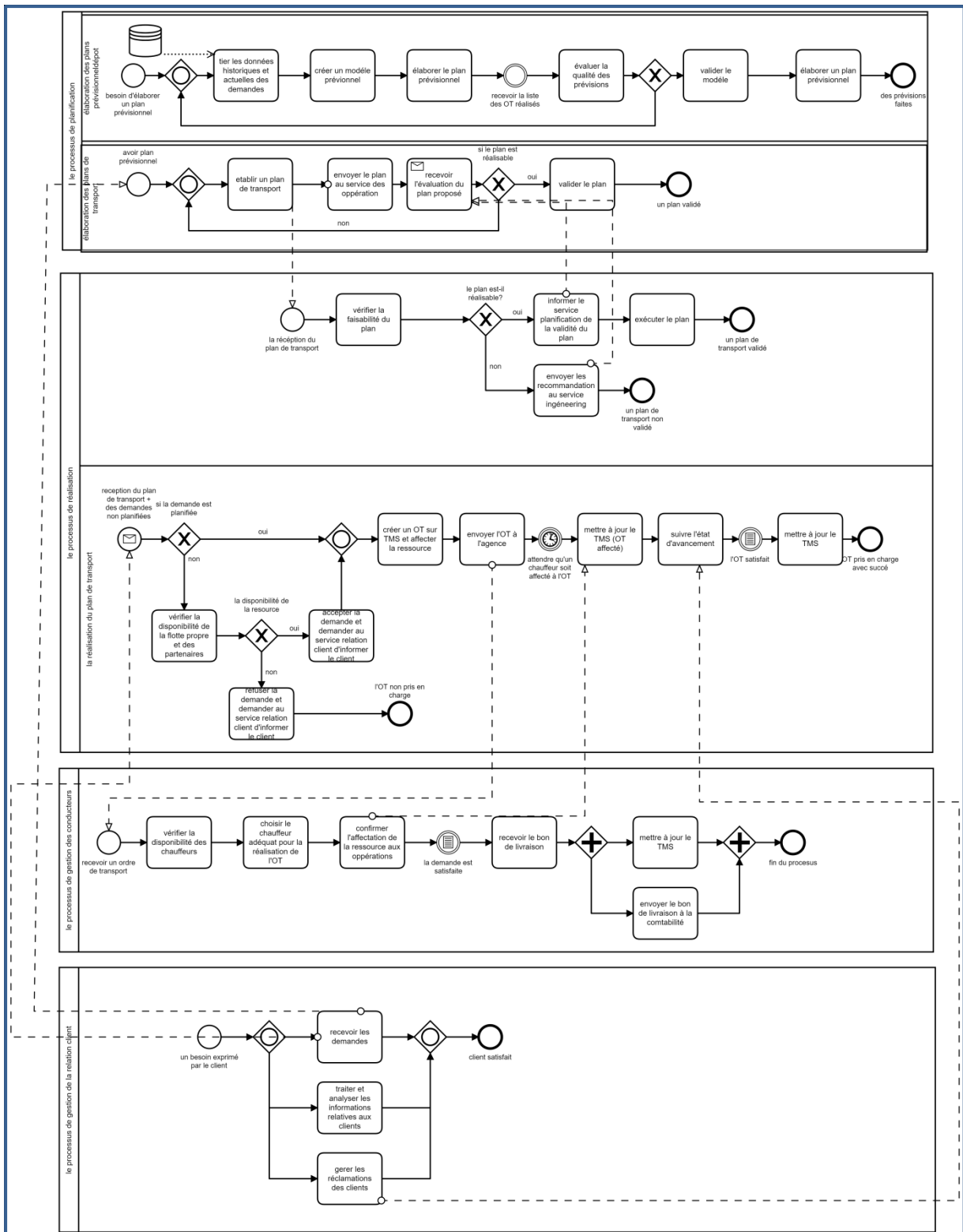


Figure 13:Cartographie globale du macro-processus du transport.

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**

Les plans de transport élaborés sont dans la plupart des cas non applicables, ce qui fait que l'affectation des véhicules se fait en même temps pour les demandes prévus et celle qui surgissent au fur et à mesure.

Ce problème affecte considérablement la rentabilité de l'entreprise d'une part et d'autre part la sérénité du service de transport dans sa globalité, car l'entreprise reçoit en moyenne 150 demandes dans un laps de temps estimé entre 13h et 16h.

Par voie de conséquence il est impossible de pouvoir construire des itinéraires qui permettent de réduire les coûts de façon optimale.

- **Dysfonctionnement 2**

Un autre dysfonctionnement que nous avons décelé est le fait que les règles sociales ne sont pas respectées. En effet, ces nouvelles règles sociales délimitent les heures de conduite des chauffeurs à 10 h de repos pour 9h de conduite et imposent qu'un chauffeur conduit 12 jours et se repose 3 jours. Mais en réalité, les tournées élaborées pour chaque véhicule ne dépasse pas deux jours dans la plus part des cas. Ceci engendre une perte importante pour l'entreprise en terme financier car les tournées peuvent être encore plus rentable si leurs durée était plus longue.

- **Dysfonctionnement 3**

Les fonctionnalités du TMS ne sont pas toutes exploitées. Le TMS, étant un outil d'aide à la gestion du transport, offre un ensemble de fonctionnalités qui permet d'améliorer l'organisation du transport et faciliter sa gestion. Cependant, à Numilog son utilisation demeure faiblement exploitée et ce malgré les différentes tentatives de la direction.

- **Dysfonctionnement 4**

Le temps total d'une tournée ne peut être estimé d'une manière fiable en dépit de son importance dans l'élaboration du plan de transport. En effet, plus ce temps est bien estimé, plus on aura une visibilité sur la disponibilité des moyens de transport d'où une meilleure maîtrise de la gestion.

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 décelé à savoir la faisabilité des plans de transport établis.

Néanmoins, pour régler un dysfonctionnement, il faut d'abord identifier de façon certaine la cause afin de traiter le problème à sa source et de ne pas se méprendre sur les solutions à apporter.

Pour cela, nous utilisons un outil nommé « le cube de Stern », qui permet d'identifier et de classer les causes rattachées à ce dysfonctionnement [ANNEXE3].

Les étapes de l'analyse des causes sont établies comme suit :

- **La première étape** consiste à identifier les causes probables de ce dysfonctionnement. Nous avons pu constater les causes suivantes :
 - **Cause 1** : Le service planification n'arrive toujours pas à trouver une méthode basé sur un fondement technique pour élaborer des plans de transport optimaux et surtout réalisables.
 - **Cause 2** : la grande variabilité liée à la nature du secteur d'activité de Numilog. Pour mener à bien son activité, l'entreprise doit gérer plusieurs facteurs interne (absentéisme, retrait de permis d'un chauffeur,...) et externe (la météo, l'état des routes, le trafic...). Ces facteurs ont un impact direct sur la réalisation des plans de transport.
 - **Cause 3** : Au niveau du service des opérations le choix des itinéraires pour chaque camion est fait en se basant essentiellement sur l'intuition et l'expérience des membres du service. Si ces pratiques se veulent valables dans une conjoncture donnée, elles ne peuvent l'être dans une conjoncture ou l'entreprise œuvre pour atteindre un niveau d'efficacité et de compétitivité de taille basée sur des méthodes techniques et scientifiques. Ce qui engendre une certaine résistance au changement et au renouveau de la part de certains employés.
- **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 ?

Et ensuite nous allons attribuer pour chacun des critères une note entre 0 et 3.

Table 3: Pondération des causes

Critère	Urgence	importance	Pouvoir d'action	Capacité à trouver une solution
Cause 1	3	3	1	2
Cause 2	1	2	1	1
Cause 3	2	3	2	1

- **La troisième étape** consiste à additionner les points obtenus pour chacune des causes identifiées et les classer :

Table 4: classement des causes

Critère	Urgence	importance	Pouvoir d'action	Capacité à trouver une solution	total	Ordre
Cause 1	3	3	1	2	9	Cause 1
Cause 2	1	2	1	1	5	Cause 3
Cause 3	2	3	2	1	8	Cause 2

- **La quatrième étape** consiste à évaluer les résultats :

D'après les résultats précédant, nous constatons que la première cause « l'absence d'une méthode fiable pour créer des plans de transport » a obtenu le plus de points. Cependant, nous remarquons que la première et la troisième cause sont étroitement liée, en d'autres termes, l'absence d'une méthode fiable pour aboutir à un plan de transport réalisable a mis les membres de l'équipe des opérations dans l'obligation de construire des tournées intuitivement et inversement ces mêmes membres qui ont appris les mêmes habitudes dans leurs gestion quotidienne se disent que tout nouveau ne peut être ni faisable ni réalisable et que toute nouveauté n'est pas forcément la bienvenue. De ce fait, nous allons axer nos effort pour trouver une solution à ces deux causes, que nous jugeons toutes les deux de la même importance.

I.4.3 Résultat du diagnostic

Durant notre période d'analyse nous avons constaté, que dans la plus part des cas, le choix des itinéraires pour chaque véhicule se fait d'une façon intuitive. Sachant pertinemment que les études des itinéraires sont la pierre angulaire de toute entreprise de transport et qui sont une partie prenante dans l'Engineering de transport. C'est sous cette optique que nous avons jugé opportun et en même temps impératif d'asseoir une méthode basée sur un fondement technique pour élaborer les plans de transport.

I.5 Énoncé de la problématique

Numilog, filiale du Groupe Cevital, est une entreprise de prestation de service. Sa mission cardinale est de répondre aux besoins de ses clients en termes de Logistique et de Transport selon des standards de qualité, d'hygiène, de sécurité et d'environnement. Les grandes mutations qui caractérisent l'environnement économique du pays ont astreint Numilog à se lancer dans un nouveau défi stratégique. Ce défi s'inscrit dans une prospective d'asseoir une stratégie visant la pérennité de la filiale, son développement en harmonie avec l'évolution de son environnement politique, économique, technologique et social. Aussi, la consolidation de sa position de leader en matière de transport et de la logistique, le renforcement de sa notoriété, de son éthique, de son expérience, de la qualité de ses prestations de service, du respect des lois et la réglementation régissant l'activité de transport et de la logistique, et bien entendu le client.

Pour ce faire, l'entreprise a opté pour asseoir un nouveau concept d'optimisation des flux de transport (rotations des camions) en vue de rendre ces opérations plus rentables (maîtrise des coûts) plus efficaces (atteinte des objectifs) et efficaces (aller vers l'amélioration continue) ceci d'une part, et d'autre part, répondre aux besoins de l'entreprise mère Cevital et surtout élargir l'éventail de son carnet de clientèle qui lui permettra de s'ouvrir sur de nouveaux marchés.

La problématique que nous traitons dans le cadre de ce mémoire repose sur la question suivante: *Comment concevoir un outil qui permet d'établir des plans de transport optimaux afin de réduire les coûts de transport et rendre ainsi Numilog compétitive sur le marché?*

Notre hypothèse de résolution consiste à trouver, dans la littérature, un problème de transport applicable et adapté à la spécification du réseau de distribution de Numilog, qui sera utilisé pour arriver à établir des plans de transport optimaux.

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre s'articulait autour de trois principales parties : la première partie portait sur une présentation générale de l'entreprise ainsi que son secteur d'activité. La deuxième partie consistait à présenter un diagnostic externe et interne de Numilog en utilisant l'approche processus. La troisième partie, était consacrée à l'élaboration de la problématique de notre projet.

CHAPITRE 2 :

ETAT DE L'ART

II. CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART

Introduction

Les systèmes de transport utilisés pour le ramassage et la distribution de bien ou de service ont fait l'objet ces dernières années de nombreuses études dans la communauté scientifique. Compte tenu des fluctuations et de la tendance à la hausse du prix du carburant et accessoires, les couts de transport représentent une part de plus en plus importante dans la structure du prix final de la prestation. Dès lors les entreprises se trouvent contraintes de maîtriser ces couts au sein leurs chaines logistiques globales pour gagner en efficacité et en compétitivité, vu qu'un meilleur routage et une meilleure planification peuvent permettre d'atteindre un niveau plus élevé de satisfaction de la clientèle.

En effet, en matière de transport de marchandise on distingue généralement deux types d'activité : le transport à charge pleine et le transport à charge partielle.

Dans le transport à charge pleine, on suppose que l'activité d'un véhicule se décompose en une suite de déplacement entre les origines et les destinations des marchandises à transporter. Pour chaque déplacement, les marchandises destinées à un seul client sont à bord du véhicule. Généralement, les types de problèmes qui traitent ce mode de transport est communément connu sous le nom de problème de ramassage et de livraison PDP (*pickup and delivery problem*)

Dans le transport à charge partielle, chaque véhicule dessert un ensemble de client à partir d'un dépôt où les marchandises, qui leur sont destinées, sont chargées. Un des problèmes cruciaux en transport de marchandise à charge partielle est le problème de tournées de véhicules VRP (*vehicle routing problem*). Ce problème consiste à déterminer un ensemble optimal de circuits de distribution ou de ramassage à partir de un ou plusieurs dépôts afin de desservir un ensemble de clients ou de fournisseurs.

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur l'ensemble des problèmes de transport à charge partielle, plus précisément le problème de tournée de véhicules ; ainsi que ceux à charge pleine.

Ce chapitre comportera cinq parties qui se résument comme suit :

Dans la première partie nous introduirons le problème de tournée de véhicules VRP, sa formulation mathématique, ses méthodes de résolution ainsi qu'une classification de ses différentes variantes.

Dans la deuxième partie nous nous intéresserons au problème de ramassage et de livraison PDP, en expliquant ses hypothèses de base, sa formulation mathématique ainsi que ses méthodes de résolution.

Dans la troisième partie nous allons détailler les types de problème que nous jugeons être une probable solution à la problématique de notre mémoire.

Dans la quatrième partie nous allons évaluer chaque type de modèle en expliquant les avantages qu'il présente et en identifiant ses limites.

La cinquième partie sera dédiée à la présentation d'une synthèse de ce chapitre qui résume les étapes de la recherche bibliographique que nous avons menée, ainsi que ses principales conclusions.

II.1 Problème de tournée de véhicule (VRP)

II.1.1 Description du problème

Depuis sa proposition dans les années 1950, le VRP a reçu beaucoup d'attention en raison de son intérêt théorique et pratique ([Federgruen et al, 1995](#)). Le problème classique d'élaboration des tournées de véhicules consiste à construire des routes avec un coût minimum afin qu'un ensemble de véhicules puissent visiter exactement une fois un ensemble de clients géographiquement distribués ([Niazy et al, 2012](#)), comme il est illustré par la

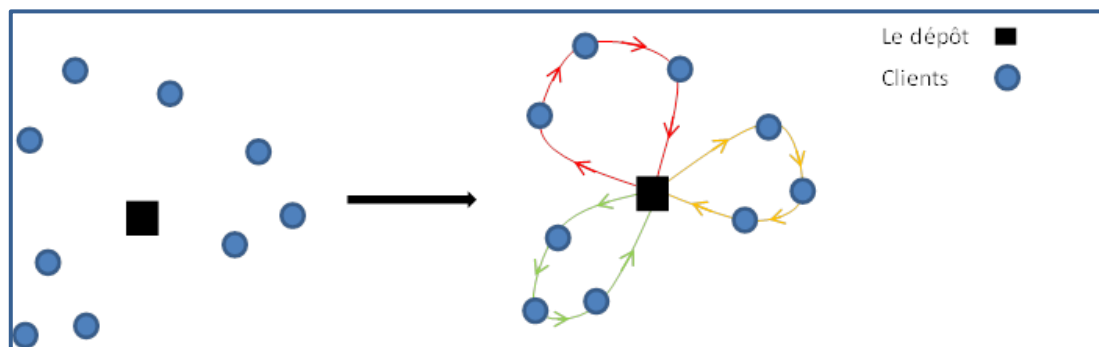


Figure 14: Schéma illustratif d'un VRP classique ([Dréo et al, 2005](#)).

II.1.2 Formulation mathématique

Le VRP peut être un problème de collecte et ou de distribution. Dans tous ces cas, chaque client est affecté à une tournée assurée par un seul véhicule ([LeBouthillier, 2000](#)). Une solution à ce problème consiste à confectionner l'ensemble des trajets assurant la visite des clients. Les trajets proposés doivent respecter les différentes capacités des véhicules et

satisfaire les quantités demandées par les clients ou à livrer à ces derniers (**Laporte et al, 2012**).

Le critère le plus utilisé dans ce genre de problème est la minimisation de la distance totale parcourue par un nombre minimum de véhicules.

Soit $G = (S, A)$ un graphe orienté où $S = \{1, \dots, n\}$ est un ensemble de sommets représentant des villes avec le dépôt situé au sommet 1, et A est l'ensemble des arcs. A chaque arc (i, j) on associe une valeur c_{ij} . Dans certains contextes, c_{ij} peut être interprétée comme un coût ou un temps de déplacement et $V = \{1, \dots, v\}$ est l'ensemble des véhicules qui sont supposés tous identiques et ont la même capacité Q . Le VRP consiste à concevoir un ensemble d'itinéraires de véhicules les moins coûteux (**Giosa et al, 2002**) de telle sorte que :

- Chaque ville de $S \setminus \{1\}$ soit visitée exactement une fois par exactement un seul véhicule.
- Tous les itinéraires commencent et prennent fin au dépôt.
- Certaines contraintes secondaires soient respectées.
- Les conditions secondaires les plus courantes sont les suivantes :
 - Restrictions de capacité : un poids non négatif (ou demande) q_i est attaché à chaque ville et la somme des poids de tout itinéraire d'un véhicule ne doit pas dépasser la capacité de ce véhicule Q .
 - Le nombre de villes sur n'importe quelle route est délimité ci-dessus par Q .
 - Restrictions temporelles totales : la longueur de toute route ne peut dépasser une borne L prescrite ; cette longueur est constituée des temps de trajet interurbains c_{ij} et des temps d'arrêt à chaque ville i sur la route.

Les données du problème :

n : le nombre de sommets.

v : le nombre de véhicule.

c_{ij} : le cout de déplacement de i vers j .

q_i : la demande associée au client i .

Q : capacité du véhicule.

Les variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le camion } k \text{ part du sommet } i \text{ vers } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, n} \quad \forall j = \overline{1, n} \quad \forall k = \overline{1, v}$$

La fonction objectif :

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

Le modèle mathématique s'écrit comme suit :

$$(A) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} x_{ijk} \quad (1.1) \\ \sum_{k=1}^v \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, n}; \quad (1.2) \\ \sum_{i=0}^n x_{ipk} - \sum_{j=0}^n x_{pjk} = 0, \quad \forall p = \overline{1, n}, \forall k = \overline{1, v}; \quad (1.3) \\ \sum_{j=1}^n x_{ojk} = 1, \forall k = \overline{1, v}; \quad (1.4) \\ \sum_{j=1}^n x_{jok} = 1, \forall k = \overline{1, v}; \quad (1.5) \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^n q_i x_{ijk} \leq Q, \forall k = \overline{1, v}; \quad (1.6) \\ x_{ijk} \in [0,1], \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (1.7) \end{array} \right.$$

- L'équation (1.1) représente l'objectif qui est de minimiser la somme des couts de parcours.
- L'équation (1.2) impose que chaque client soit servi une seule fois par un seul véhicule.
- L'équation (1.3) assure que le véhicule qui arrive chez un client est le même que celui qui part de ce client.
- L'équation (1.4) assure que chaque véhicule ne sort qu'une seule fois du dépôt.
- L'équation (1.5) assure le retour unique au dépôt pour chaque véhicule.
- L'équation (1.6) 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.
- L'équation (1.7) la définition des types de variables utilisées.

II.1.3 La complexité

Le VRP est un problème connu de programmation en nombres entiers (Salhi et al, 1979), ces problèmes sont de nature NP-difficile, car ils peuvent rarement être résolus par un algorithme polynomial en temps d'exécution ce qui signifie que le temps de calcul requis pour résoudre ce problème augmente exponentiellement avec la taille du problème (Dror et al, 1994 ; Bodin et al, 1979).

Le nombre de solutions possibles pour le VRP est de l'ordre de $n!$ où n est le nombre des clients à desservir. Il est donc tout à fait possible de déterminer une solution optimale pour des instances de petite taille, mais cela devient rapidement irréalisable pour des instances de moyenne ou de grande taille.

II.1.4 Les méthodes de résolution

Comme nous venons de voir, trouver une solution exacte demande un temps de résolution énorme qui augmente avec l'augmentation des nœuds à visiter (**Lu et al, 2006**).

Dans le cas réel, et plus précisément dans le domaine industriel, l'entreprise aura un grand nombre de clients à satisfaire ce qui rend les méthodes de résolution exactes obsolètes. De ce fait, il était impératif de trouver un compromis entre le temps de résolution et la qualité de la solution trouvée. L'intérêt scientifique s'est donc porté sur le développement des méthodes de résolution dites « approchées » qui permettent d'obtenir des solutions de bonne qualité avec des temps de résolution acceptables pour des instances de grande taille (**Seshadri, 2018**).

Les méthodes approchées se divisent en deux grandes parties : les heuristiques et les méta-heuristiques. Ces méthodes donnent une stratégie de bon sens pour se déplacer intelligemment dans l'espace de solution afin d'obtenir une solution approximative dans un temps raisonnable. En effet, les heuristiques sont très spécifiques et dépendent des problèmes à résoudre (**Sumichras et al, 1995**) ; cette spécification se reflète principalement dans la façon de choisir le meilleur voisinage ce qui signifie comment faire pour trouver la prochaine meilleure solution. Malheureusement, la solution trouvée par une heuristique peut souvent être un optimum local. Des heuristiques plus avancées ont été développées, donnant naissance à une nouvelle catégorie d'algorithmes, appelée : les méta-heuristiques, dans le but de trouver un optimum global. Une méta-heuristique est un cadre algorithmique de haut niveau indépendant du problème qui fournit un ensemble de directives ou de stratégies pour développer des algorithmes d'optimisation qui à la fois parcourent la zone de recherche et explorent les régions prometteuses pour balayer tout l'ensemble des solutions.

II.1.4.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes reposent sur l'utilisation d'algorithmes qui mènent de façon sûre vers la solution optimale. Le principe essentiel de ces méthodes est d'énumérer de manière implicite l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Malgré l'important temps de calcul que nécessitent, généralement, ces approches, plusieurs méthodes ont été développées.

II.1.4.1.1 Méthode de Branch and Bound

Connue aussi sous le nom de méthode de la recherche arborescente ou de la procédure de séparation et d'évaluation (**Clausen, 1999**), cette méthode consiste en la construction d'un arbre de recherche qui sera exploré de manière à éviter les branches inutiles qui sont des branches contenant des solutions non intéressantes ou carrément non réalisables.

L'exploration se fait avec des évaluations des branches et des comparaisons avec une valeur seuil du critère à optimiser. Cette technique donne de bons résultats pour les problèmes d'ordonnancement de petites tailles, mais dans le cas contraire, elle risque de générer des branches très étendues.

II.1.4.1.2 Méthode de Branch and cut

Elle est aussi appelée méthode de programmation en nombres entiers (**Bouzgarrou, 1998**). L'algorithme construit une arborescence nommée *l'arbre du "Branch and Cut"*, les sous-problèmes qui forment l'arbre sont appelés *des nœuds*. Il existe trois types de nœuds dans l'arbre du "Branch and Cut":

- Le nœud courant qui est en train d'être traité.
- Les nœuds actifs qui sont dans la liste d'attente des problèmes.
- Les nœuds inactifs qui ont été élagués au cours du déroulement de l'algorithme.

Le principe est de partir d'une solution admissible entière du problème, et à l'aide du simplexe par exemple, d'aller vers une autre solution admissible entière jusqu'à l'optimum.

II.1.4.1.3 Programmation dynamique

Cette méthode se base sur le principe de Bellman : «Si C est un point qui appartient au chemin optimal entre A et B , alors la portion de ce même chemin allant de A à C est le chemin optimal entre A et C . » (**Borne et al 1998**).

Pour obtenir le chemin optimal du problème, il suffit donc de construire les différents sous chemins optimaux. Cette méthode a été utilisée dans (**Rego et al. 1994**) pour la résolution de problèmes allant de 10 à 25 clients.

II.1.4.2 Les heuristiques

Vu que les méthodes exactes restreignent le nombre des clients envisageables dans les problèmes et impliquent, dans la plupart des cas, un temps de calcul important, l'élaboration et l'utilisation des heuristiques se sont avérées d'une grande utilité. Ces méthodes permettent de gérer des problèmes de grandes tailles avec des temps de résolution et des résultats acceptables et admissibles. Parmi les heuristiques qui traitent le VRP, nous citons :

II.1.4.2.1 L'heuristique « groupe en premier, route en second »

C'est une des heuristiques les plus connues. Elle se base sur l'aspect géométrique du problème. Elle consiste à créer des groupes de clients qui sont géographiquement voisins puis à confectionner les tournées à l'intérieur de ces derniers (LeBouthillier, 2000).

II.1.4.2.2 L'heuristique « route en premier, groupe en second »

Le principe de cette heuristique est de construire des tournées comportant un grand nombre de clients, qui sont réellement non réalisables, puis de les subdiviser en de petites tournées pour obtenir des solutions acceptables pour le VRP (Bodin et al, 1979 ; Golden et al, 1984).

II.1.4.2.3 Algorithme de gain

L'algorithme des gains de Clarke et Wright (Clarke et al, 1964) est une des méthodes les plus connues pour le VRP. Dans une version parallèle de cet algorithme, où le nombre de véhicules est une variable de décision, ce dernier nécessite le calcul du gain possible sur l'arc (i,j) et la fusion de route comme suit:

- Créer n routes $(0,i,0)$ pour $i = 1, \dots, n$. (Ces routes partent du dépôt 0 et y retournent en passant par les clients i).
- Evaluer le gain de chaque fusion de routes possibles. Pour évaluer le gain d'une fusion de route on calcule $S_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$ pour $i, j = \overline{1, n}$ et $i \neq j$, sachant que c_{ij} est le coût de l'arc (i,j) .
- Trier les gains en ordre décroissant et choisir la fusion qui permet d'avoir le gain le plus important.

Pour étendre les routes par fusion, considérer tour à tour chaque route $(0, i, \dots, j, 0)$ pour déterminer le premier gain S_{ki} ou S_{ij} qui peut être utilisé pour former une route réalisable, par la fusion de la route courante et d'une autre se terminant par $(k,0)$ ou commençant par $(0,l)$

Ainsi l'algorithme fonctionne comme suit :

Pour un gain S_{ij} donné, trouver s'il existe deux routes, une partant de $(0,j)$ et l'autre se terminant à $(i,0)$ qui puissent être fusionnées pour former une route réalisable. Dans ce cas, combiner ces deux routes en effaçant $(0,j)$ et $(i,0)$ et en introduisant (i,j) . Lorsqu'il n'y a plus de fusion qui améliore le gain, l'algorithme s'arrête.

II.1.4.2.4 Algorithme en pétale

Cet algorithme de balayage génère plusieurs routes, appelées pétales, pour ensuite faire une sélection en résolvant un problème de partitionnement (Ryan et al, 1993). Notons que si les

routes correspondent à des secteurs continus des arcs, alors le problème peut être résolu en temps polynomial.

II.1.4.3 Les métaheuristiques

Les métaheuristiques constituent un ensemble de méthode permettant de concevoir des algorithmes dont le but est de résoudre des problèmes d'optimisation (Li et al, 2003).

Il s'agit généralement de méthodes stochastiques, c'est-à-dire aléatoires, et itératives dont le but est de converger vers un extremum d'une fonction et préférentiellement vers un extremum global. L'intérêt des métaheuristiques est de couvrir une large gamme de problèmes. Elles s'inspirent souvent des évolutions observées dans les systèmes naturels.

II.1.4.3.1 Recherche locale

Cette méthode se base sur le choix d'une solution voisine meilleure à chaque itération. Si le voisin n'est pas meilleur que la solution courante, un autre ensemble de voisins est créé. Ce processus de voisinage sera répété jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisant au(x) critère(s) imposé(s) ou une stagnation prolongée de la valeur de la solution. Pour ce faire, cette méthode utilise des heuristiques pour effectuer des permutations entre arcs appartenant à une même tournée ou à des tournées différentes.

Les heuristiques λ -opt sont les heuristiques de recherche locale les plus connues et les plus utilisées. Elles ont été utilisées dan pour la résolution du VRP.

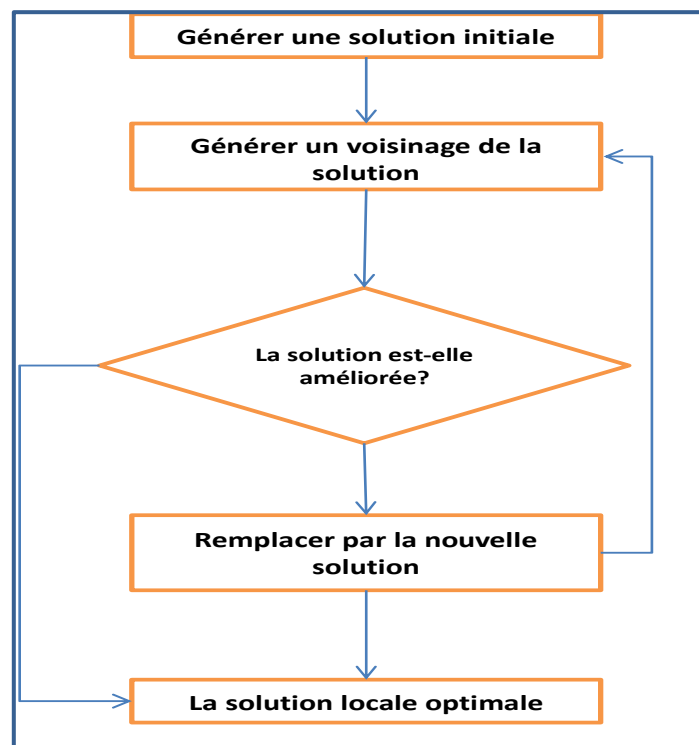


Figure 15:Algorithme de la méthode recherche locale (Dréo et al, 2005).

II.1.4.3.2 Méthode du recuit simulé

Le recuit simulé est une métaheuristique particulière qui tend à imiter le processus de recuit utilisé en métallurgie. Un cristal présente forcément des défauts, mais afin d'améliorer la pureté, on le chauffe brutalement et on le laisse refroidir lentement.

Ce procédé permet de réduire la quantité de défauts et par conséquent d'augmenter sa pureté. En effet, initialement le cristal est dans un état d'énergie minimal, mais il s'agit d'un minimum local. Le chauffage aide le système à sortir de ce puits de potentiel pour tomber dans un autre puits plus profond. Pour éviter de se retrouver piégé dans un autre état d'énergie correspondant à un minimum local, il faut effectuer le refroidissement de façon très lente.

Le recuit simulé considère la situation d'un problème quelconque comme l'état d'un système physique dont l'énergie physique correspond à la fonction qu'on souhaite optimiser. La température T est un paramètre dont dépend la convergence du système vers l'état d'énergie minimal.

En pratique la technique exploite l'algorithme de Metropolis, qui permet de décrire le comportement d'un système en équilibre thermodynamique à une certaine température T : partant d'une configuration donnée, on fait subir au système une modification élémentaire.

Si cette transformation a pour effet de diminuer la fonction objectif du système, elle est acceptée ; si elle provoque au contraire une augmentation ΔE de la fonction objectif, elle peut être acceptée tout de même, avec la probabilité $e^{(-\Delta E/T)}$.

On itère ensuite ce procédé, en gardant la température T constante, jusqu'à ce que l'équilibre thermodynamique soit atteint, concrétant au bout d'un nombre suffisant de modifications. On abaisse alors la température, avant d'effectuer une nouvelle série de transformation :

la loi de décroissance par paliers de la température est souvent empirique, tout comme le critère d'arrêt du programme.

L'organigramme du recuit simulé est représenté dans le schéma suivant

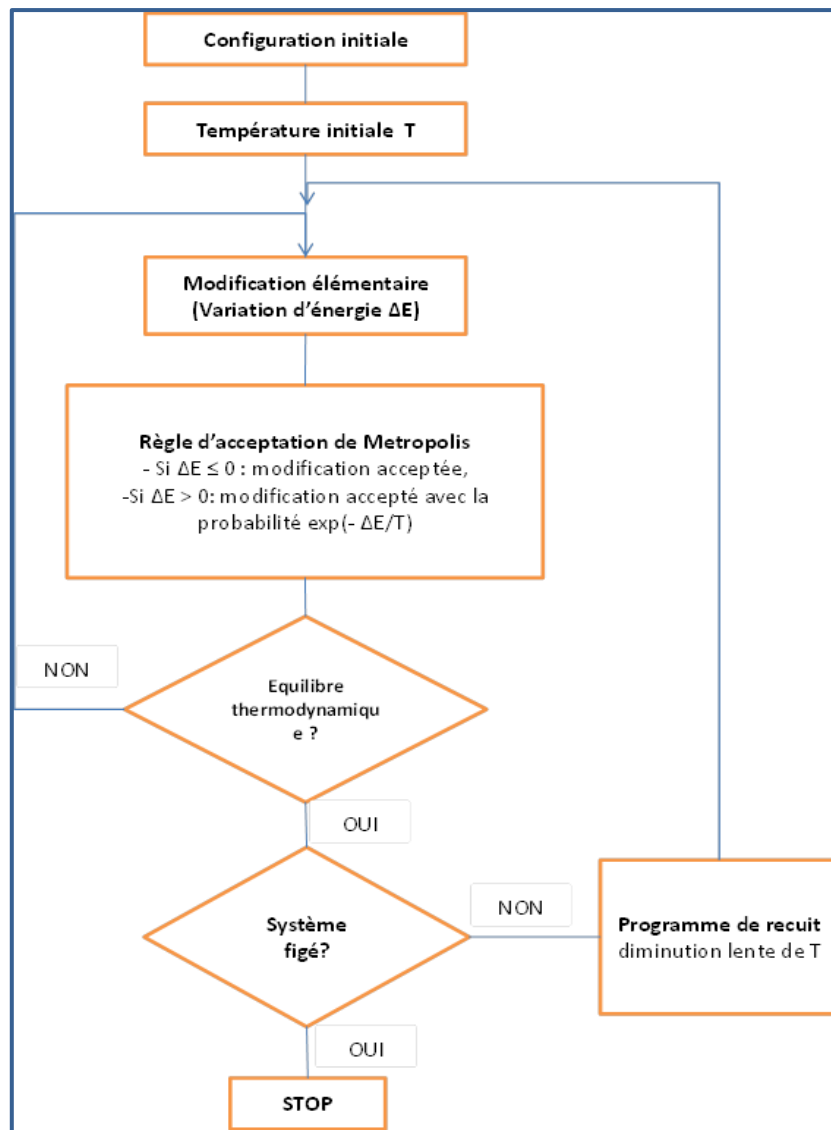


Figure 16:Algorithme de la méthode du recuit simulé (Dréo et al, 2005)

II.1.4.3.3 Recherche tabou

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 : comme le recuit simulé, 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 objectif du problème en 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 .

Telle quelle, la procédure précédente est importante, car il y a un risque important de retourner à une configuration déjà retenue lors d'une itération précédente, ce qui engendre un cycle. Pour éviter ce phénomène on tient à jour et on exploite, à chaque itération, une liste de mouvements interdits, la liste de tabou ou liste tabou : cette liste contient m mouvements ($t \rightarrow s$), qui sont les inverses des m derniers mouvements ($s \rightarrow t$) effectués. L'organigramme de cet algorithme est représenté sur la.

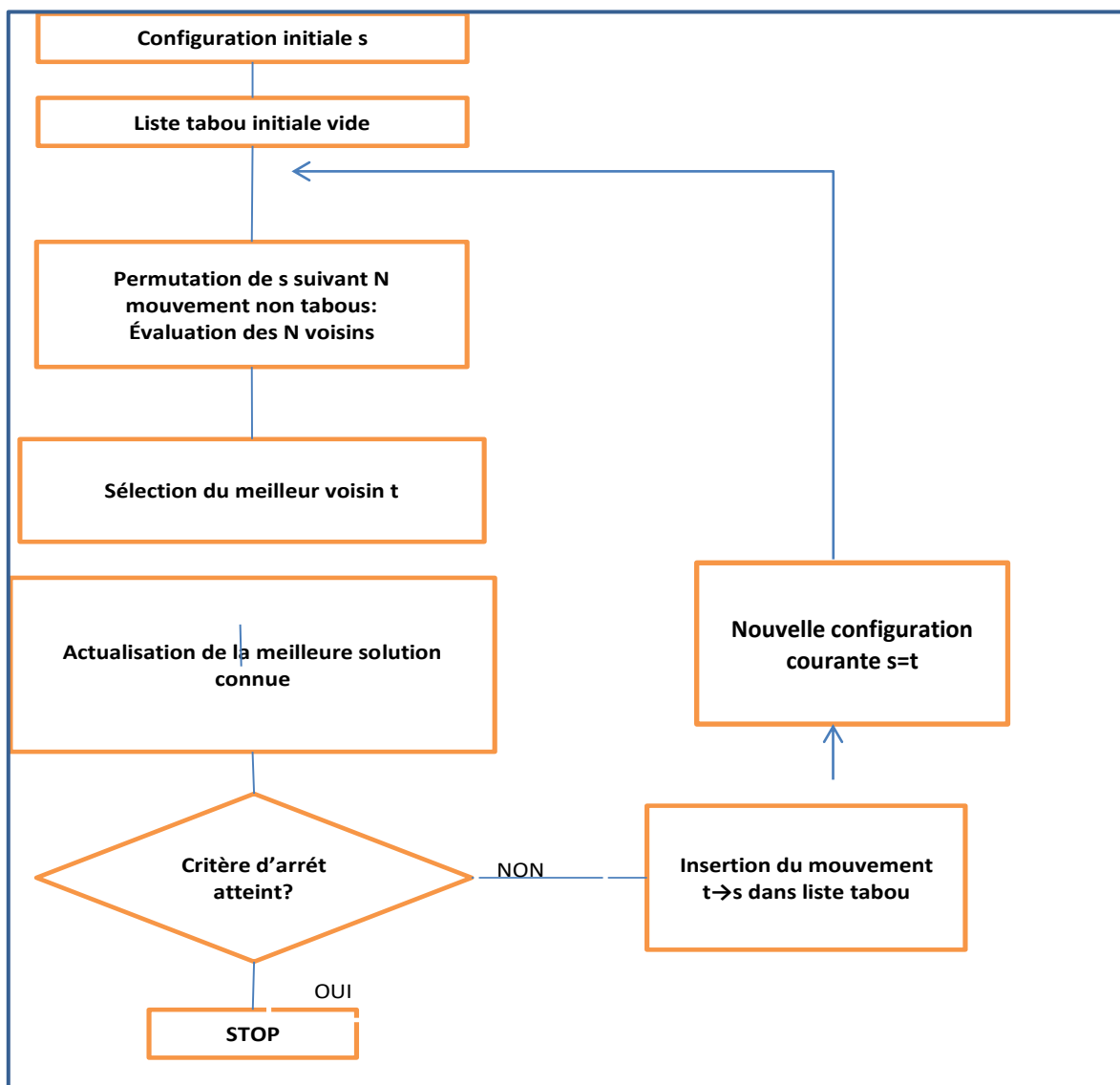


Figure 17: Algorithme de la recherche tabou (Dréo et al, 2005).

II.1.4.3.4 Colonie de fourmis

L'optimisation par colonies de fourmis (OCF) est une métaheuristique qui s'inspire de l'intelligence collective des fourmis. Les insectes, et en particulier les fourmis, ont été largement étudiés par les biologistes. La conclusion de leurs observations montre que lors de leurs déplacements, les fourmis sécrètent des substances chimiques appelées phéromones qu'elles déposent sur le chemin pour chercher de la nourriture. Plus un trajet a été emprunté et plus il contient de phéromones. La concentration en phéromones est d'autant plus grande que la longueur du trajet est courte, l'évaporation des phéromones y est moins importante. C'est donc la piste la plus courte qui devient la plus attractive. L'émergence du chemin le plus court est rendue possible grâce à l'organisation communautaire des fourmis. La colonie trouve ainsi le chemin le plus court pour obtenir sa source de nourriture.

L'organigramme de l'algorithme se présente comme suit :

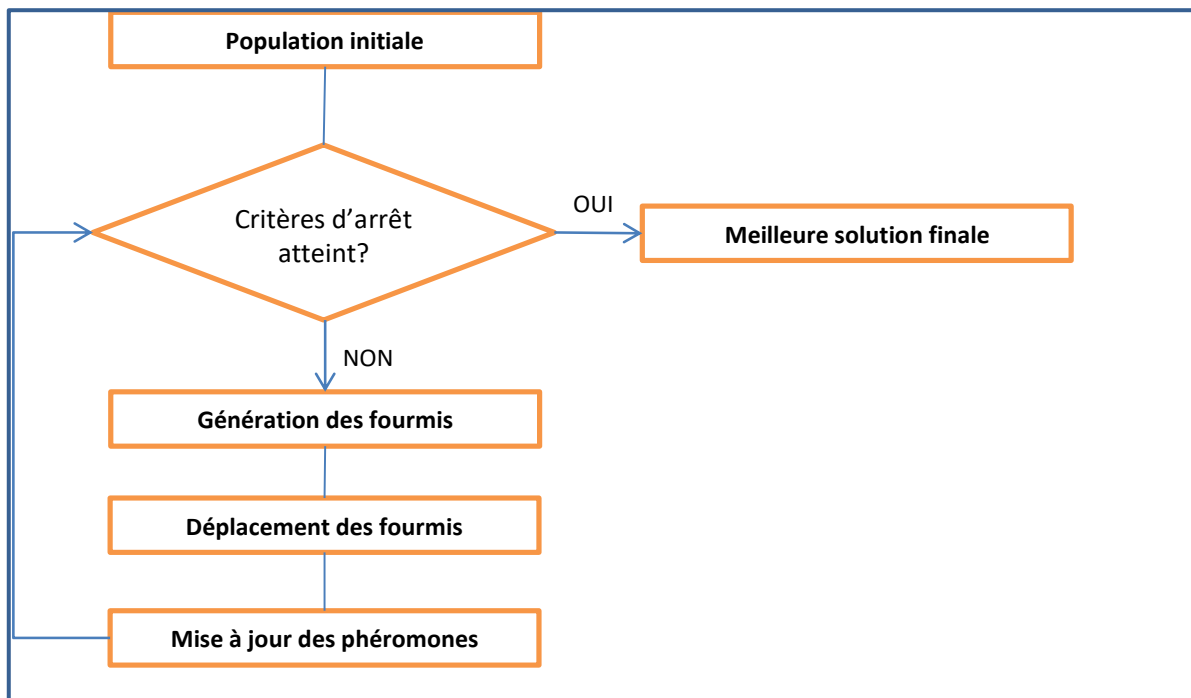


Figure 18:Algorithme de la méthode colonie de fourmis (Dréo et al, 2005).

II.1.4.3.5 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont des métaheuristiques évolutionnaire qui se proposent de résoudre des problèmes d'optimisation en s'appuyant sur les idées de Darwin concernant la sélection naturelle. En effet le brassage s'effectue grâce à l'existence de plusieurs opérations qui interviennent lors de la reproduction sexuée.

Les chromosomes de deux individus fusionnent aléatoirement en échangeant leurs gènes et donc leurs informations comme la couleur des yeux, la taille... selon Darwin, au fil des

générations, les gènes conservés au sein d'une population donnée sont ceux qui sont les mieux adaptés aux besoins de l'espèce vis-à-vis de l'environnement. De même pour une population initiale de solutions potentielles évolue au cours des générations : les individus se transforment grâce aux processus génétiques pour se rapprocher, via des sélections et mutations, de la solution exacte.

Le principe d'un algorithme génétique se décrit comme suit :

On choisit au hasard un ensemble de N points dans un espace de recherche, qui constitue la population initiale. Chaque individu x de cette population possède une certaine performance, qui mesure son degré d'adaptation à l'objectif visé : dans le cas de la minimisation d'une fonction objectif f , x est autant plus performant que $f(x)$ est plus petit. Un algorithme génétique consiste à faire évoluer progressivement, par générations successives, la composition de la population, en maintenant sa taille constante. Au cours des générations, l'objectif visé est d'améliorer globalement la performance des individus. Un individu pourra être une liste d'entier pour des problèmes combinatoires, un vecteur de nombres réels pour des problèmes numériques ou une chaîne de nombres binaires pour les problèmes booléens. Le passage d'une génération à la suivante se déroule en quatre phases : une phase de sélection, une phase de reproduction, une phase d'évaluation des performances et une phase de remplacement.

La phase de sélection désigne les individus qui participent à la reproduction. Ils sont choisis d'autant qu'ils sont performants. Les individus sélectionnés sont ensuite disponibles pour la phase de reproduction qui consiste à appliquer des opérations de variations sur des copies des individus sélectionnés pour en engendrer de nouveaux.

Les performances des nouveaux individus sont ensuite évaluées, durant la phase d'évaluation, à partir des objectifs fixés. Enfin la phase de remplacement qui consiste à choisir les membres de la nouvelle génération.

L'algorithme est interrompu après un certain nombre de générations selon un critère d'arrêt à préciser. Comme le montre le schéma montré en.

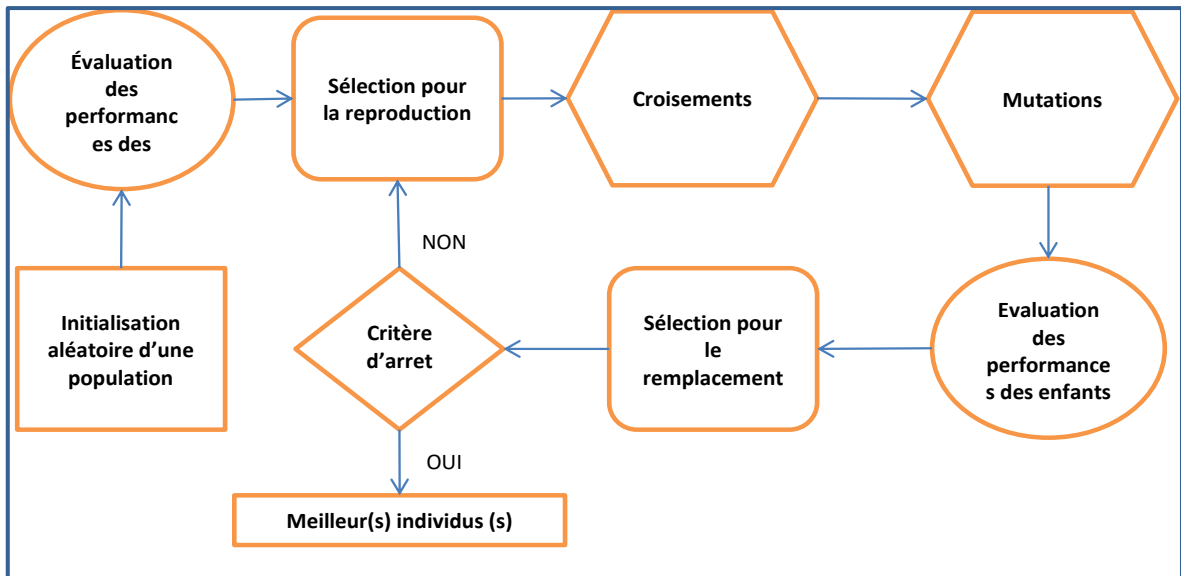


Figure 19:Algorithme de la méthode colonie de fourmis (Dréo et al, 2005).

Le schéma suivant regroupe toutes les différentes méthodes de résolution :

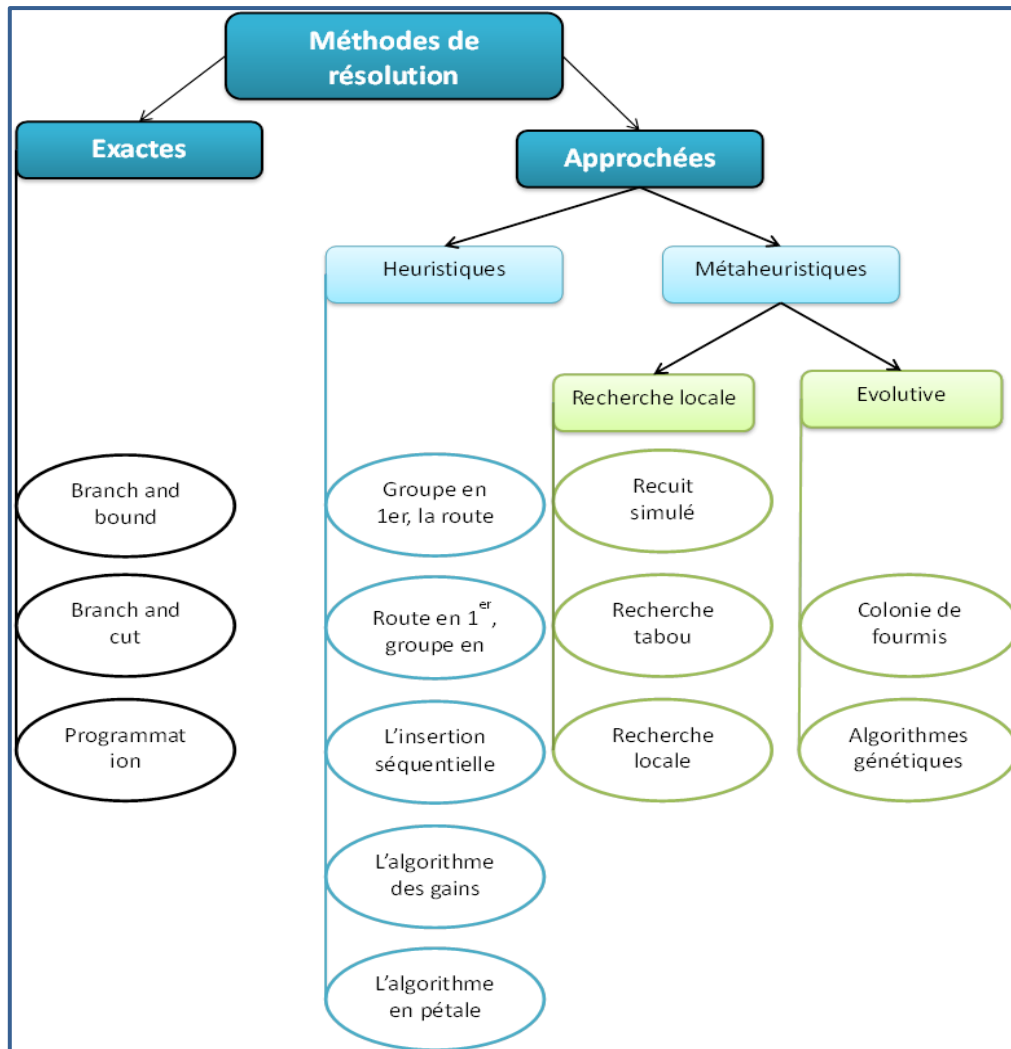


Figure 20: Méthodes de résolution du VRP

II.1.5 Variantes du VRP

L'objectif cardinal de VRP est la livraison physique de biens ou de services en suivant un chemin optimal. La conception d'itinéraires optimaux vers les différents nœuds doit se faire en assurant coût minimum, et en respectant un certain nombre de contraintes.

Le cas classique du VRP repose sur certaines suppositions comme celles d'avoir un seul parcours par véhicule, un parc homogène de véhicules, un seul dépôt, etc. Or, dans la réalité, il y a quelques difficultés typiques comme avoir des clients ou des biens incompatibles avec certains types de véhicules, véhicules situés dans des dépôts différents, heure de service spécifiée pour chaque client ou un véhicule effectuant plusieurs trajets ; ce qui a conduit à la définition de nombreuses variantes du VRP, avec des attributs différents et de nouvelles hypothèses. Les nouvelles contraintes considérées dépendent essentiellement de la nature du système de routage et celle des marchandises à transporter, des caractéristiques des véhicules et des clients, de fréquences des visites et des délais imposés.

Une nouvelle approche de classification des différentes variantes du VRP avec des contraintes d'ordonnement a été proposée par les auteurs du livre « métaheuristique pour l'ordonnement multicritère et les problèmes de transport ». Selon ces auteurs, les VRPs peuvent être classés en deux grandes catégories selon le type de contraintes prises en considération :

- **Classe 1** : les VRP avec contraintes temporelles.
- **Classe 2** : les VRP avec des contraintes de disponibilité des ressources.

Dans le cadre de notre travail, nous considérons également les VRP avec des contraintes qui prennent en considération les caractéristiques du réseau de distribution de l'entreprise. Nous allons donc ajouter une troisième classe pour la classification proposée précédemment. Le suivant représente la classification des variantes du VRP :

Table 5: Classification des variantes du VRP.

	Classe	Sous-classe	Problèmes
Classe 3 : VRP avec des contraintes des caractéristiques du réseau de distribution. CLASSIFICATION DES VARIANTES DU VRP	VRP avec contraintes temporelles	VRP avec contraintes de temps alloué	VRPTW
			MPVRP
		VRP avec contraintes de précédences	PDVRP
			VRPCD
	VRP avec des contraintes de disponibilité des ressources		MTVRP
			VRPCS
	VRP avec des contraintes des caractéristiques du réseau de distribution		MDVRP
			SDVRP
			VRPHF

II.1.5.1 VRPTW

Le VRPTW est une généralisation du VRP où le service pour chaque client commence dans un intervalle de temps donné, appelé fenêtre temporelle. Les fenêtres temporelles sont dites

souples lorsqu'elles peuvent être considérées comme non contraignantes pour un coût de pénalité. Ils sont durs lorsqu'ils ne peuvent pas être violés, c'est-à-dire que si un véhicule arrive trop tôt chez un client, il doit attendre que la fenêtre horaire s'ouvre ; et il n'est pas permis d'arriver en retard.

II.1.5.2 MPVRP

Lorsque les clients exigent d'être desservis à différentes périodes, la planification des tournées doit être établie globalement sur celle-ci pour minimiser le cout total. Dans le cas le plus simple, les combinaisons de période de visites acceptable par les clients sont connues à priori. Le MPVRP consiste alors à gérer des calendriers de demandes et à planifier des plans de livraison sur plusieurs périodes tout en minimisant le cout total. Plus précisément, il s'agit de déterminer, à chaque période, le sous-ensemble des clients à visiter et la liste des commandes qui seront rapporté aux autres périodes.

Le MPVRP diffère du VRP classique par la considération de :

- Un horizon de planification constitué de périodes consécutives.
- Une fréquence de service par client quand le client demande à être servi plus qu'une fois dans l'horizon de planification.
- Un ensemble de calendriers différents, autrement dit les combinaisons de jours au cours desquels le client peut être servi.

II.1.5.3 VRPCD

Dans un VRP avec transbordement, l'activité des véhicules est décomposée entre des tournées de ramassage des marchandises et de livraison. Des marchandises destinées à un même client ayant des origines possiblement différents passent par un point intermédiaire qui peut être un terminal de consolidation *hub* ou une plate-forme intermodale de stockage temporaire.

Les terminaux offrent des services de chargement, déchargement des véhicules, d'éclatement, de tri, de consolidation et de transfert des marchandises. Les marchandises provenant des différents points d'origine sont déchargées, triées, consolidées, chargées dans les véhicules qui assurent la livraison de ces marchandises à leurs destinations, sans nécessité d'un stockage intermédiaire. L'absence de stockage conduit à parler de gestion du terminal ou de la plate-forme en *cross-dock*. Ce type de gestion implique donc une synchronisation des tournées de livraison et de ramassage.

II.1.5.4 MTPVRP

Affecter une seule tournée aux véhicules peut être considéré comme une hypothèse restrictive. C'est pourquoi, dans le MTPVRP, un même véhicule peut effectuer plusieurs tournées au court de la période de planification tout en respectant des contraintes temporelles supplémentaires

telles que celles relatives aux heures d'ouverture des clients. Ce problème peut être considéré comme une extension du VRPTW. Le MTVRP est doté d'une pertinence évidente puisque des économies d'échelles peuvent être réalisées lorsque les véhicules disponibles sont tous utilisés. Par rapport au VRPTW, nous prenons en compte dans MTVRP des contraintes additionnelles relatives à l'ordonnement des tournées de véhicules.

II.1.5.5 VRPCS

Le niveau de fatigue a un impact certain sur la sécurité routière. Afin de minimiser le nombre d'accidents de la route et de fournir un cadre de travail plus serein plusieurs pays ont adaptés des législations qui règlementent la durée de conduite des chauffeurs sur une semaine de travail. Ces réglementations, imposées soit par l'employeur ou par des textes juridiques, portent notamment sur la durée des périodes quotidiennes de travail, le nombre et la durée de période de repos par jour et par semaine, le temps maximum de conduite, la rémunération des heures supplémentaires de travail...

Du point de vue académique, la prise en compte des contraintes liées à l'emploi du temps des chauffeurs revient à ordonner et répartir les périodes de temps de travail des différentes équipes en plus de générer des tournées admissibles dans le domaine du transport des marchandises, le problème résultant de la combinaison du VRP avec l'établissement des horaires de travail des chauffeurs est complexe. Ce problème est connu sous le nom de problème de tournée de véhicules avec contraintes d'ordonnement des équipes de travail VRPCS.

II.1.5.6 VRPPD

Le problème de collecte et de livraison a les mêmes propriétés que le VRP. Il ajoute à celles-ci le fait que chaque client introduit deux positions géographiquement différentes : la première pour le ramassage du produit et la deuxième pour la livraison de ce dernier. Ceci va directement induire une contrainte de précedence à ajouter au problème du VRP classique sachant que, dans une tournée, chaque opération de livraison doit être précédée par l'opération de ramassage respective.

II.1.5.7 MDVRP

Dans ce type de problème, plusieurs dépôts géographiquement distribués existent. Une tournée, dans ce genre de problème, est assurée par un véhicule qui part et revient au même dépôt initial.

II.1.5.8 VRPHF

La seule différence entre un VRPHF et un VRP est que la flotte de véhicule est hétérogène. Une flotte de véhicules hétérogènes est composée de véhicules qui sont de types différents.

Les véhicules peuvent être différenciés par leurs coûts de transport, leurs capacités de transport, leurs vitesses, leurs tailles, ...

II.1.5.9 SDVRP

Dans ce genre de problème, la demande du client peut être satisfaite sur plusieurs tournées; pour cela un client peut être visité plusieurs fois s'il s'avère nécessaire. Dans ce type de problème, et contrairement aux autres, la demande d'un ou plusieurs clients peut excéder la capacité du véhicule.

II.2 Problème de collecte et de distribution

II.2.1 Description du problème

Au cours des dernières décennies, des recherches approfondies ont été consacrées aux aspects de modélisation ainsi qu'aux méthodes d'optimisation dans le domaine du routage des véhicules. Le transport de marchandises, en particulier, qui comprend à la fois les ramassages et les livraisons, a fait l'objet d'une attention considérable.

Ce type de problème constitue une famille importante de problèmes de transport dans lequel des marchandises ou des passagers doivent être transportés de différentes origines à différentes destinations. Ces problèmes sont généralement définis sur un graphique dont les sommets représentent les origines ou les destinations des différentes marchandises à transporter.

le PDP est aussi classé par les problèmes NP-difficile ce qui signifie qu'un algorithme efficace pour résoudre le problème à l'optimalité n'est pas disponible. Par conséquent, la résolution du problème par un algorithme exact prend beaucoup de temps.

II.2.2 Les variantes du PDP

Les variantes PDP peuvent être classées en trois grandes catégories selon le type de demande et la structure des routes considérées. Dans le cas de plusieurs-à-plusieurs (*many to many*) ; chaque produit peut avoir des origines et des destinations multiples et n'importe quel endroit peut être l'origine ou la destination de plusieurs produits. Ces problèmes se posent, par exemple, dans le repositionnement de l'inventaire entre magasins de détail ou dans la gestion des systèmes de vélos.

Les problèmes de un à plusieurs (*one-to-many*) sont caractérisés par la présence de certaines marchandises à livrer d'un dépôt à de nombreux clients et d'autres marchandises à récupérer chez les clients et à transporter au dépôt. Ceux-ci ont des applications, par exemple, dans la distribution de boissons et la collecte de canettes et de bouteilles vides. Elles surviennent également dans les systèmes de logistique en amont et en aval où, en plus de livrer de nouveaux produits, il faut planifier la collecte des produits usagés ou défectueux.

Enfin, dans le cas de problèmes un à un (one-to-one), chaque marchandise a une origine et une destination uniques entre lesquelles elle doit être transportée. Les applications typiques de ces problèmes sont le transport en charge partielle.

II.3 Les principales variantes

Dans cette partie, nous allons présenter trois variantes du VRP qui, selon notre réflexion peuvent être appliquée pour résoudre la problématique contenue dans le sujet de notre mémoire. La première variante à traiter est le 1-1-PDP avec fenêtres de temps, la seconde est le SDVRP et enfin le MDVRP qui est la troisième variante.

II.3.1 1-1-PDPTW

II.3.1.1 Description du problème

Le problème de collecte et de distribution avec les fenêtres de temps (PDPTW) peut être décrit comme suit : Un ensemble de demandes de transport qui est connu à l'avance doit être satisfait par un parc de véhicules donné. Chaque demande est caractérisée par son lieu de ramassage (origine), son lieu de livraison (destination) et la taille du chargement à transporter de l'origine à la destination. Pour chaque lieu de collecte et de distribution, une fenêtre temporelle et les temps de chargement et de déchargement sont spécifiés.

La capacité de charge, la longueur maximale de son intervalle de fonctionnement, un emplacement de départ et un emplacement d'arrivée sont indiqués pour chaque véhicule. Afin que les demandes soient satisfaites, un ensemble d'itinéraires doit être planifié de manière à ce que chaque demande soit transportée à partir du point de départ, son origine, à sa destination par un seul véhicule. Schéma illustratif du problème de PDP est illustré par la .

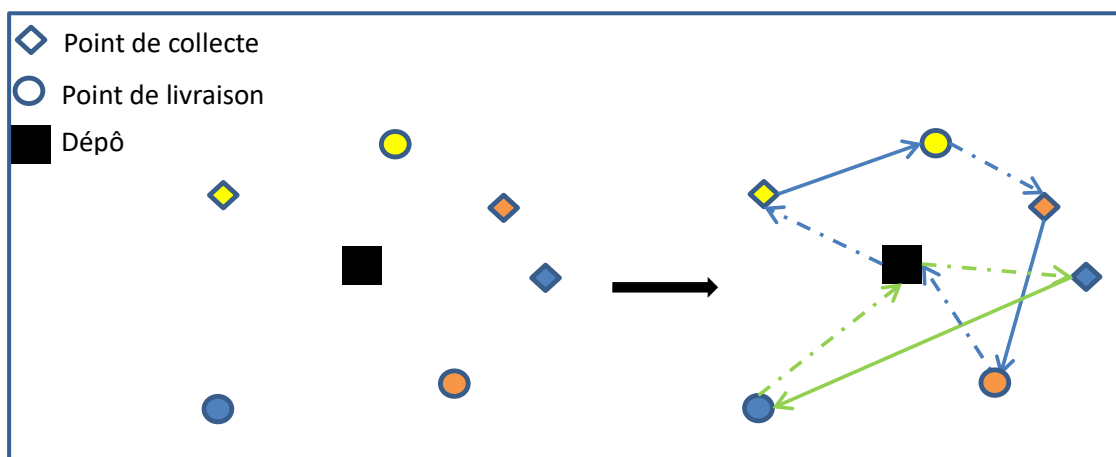


Figure 21:Schéma illustratif d'un probleme de PDP (Dréo et al, 2005).

Fondamentalement, le PDPTW diffère du VRPTW par les contraintes supplémentaires de préséance, c'est-à-dire la restriction selon laquelle l'origine de chaque demande (le point de ramassage) être visitée avant la destination correspondante (le point de livraison).

II.3.1.2 Formulation mathématique

Dans ce problème, un ensemble de routes doit être construit afin de satisfaire les demandes de transport. Une flotte de véhicules est disponible pour exploiter les lignes en question. Chaque véhicule a une capacité donnée et doit commencer et finir sa tournée à partir du dépôt. Chaque demande de transport spécifie la taille du chargement à transporter, l'endroit où il doit être ramassé et l'endroit où il doit être livré. Chaque chargement doit être transporté par un et un seul véhicule depuis son origine vers sa destination sans transbordement ailleurs.

L'objectif est donc de servir toutes les demandes des clients, en minimisant le coût total de transport. Ce coût est relatif au nombre de véhicules utilisés et à la distance parcourue par chaque véhicule.

Les données du problème :

N : Ensemble des nœuds fournisseurs, clients et dépôt.

N' : Ensemble des nœuds fournisseurs et clients.

N^+ : Ensemble des nœuds fournisseurs.

N^- : Ensemble des nœuds clients.

v : Le nombre de véhicules.

d_{ij}^k : La distance entre le sommet i et le sommet j parcourue par le véhicule k .

t_{ij}^k : Temps mis par le véhicule k pour aller du nœud i au nœud j .

$[e_i, l_i]$: Fenêtre de temps du nœud i .

s_i : Temps d'arrêt au nœud i .

q_i : Quantité à traiter au nœud i ; si $q_i > 0$ le nœud est fournisseur ; si $q_i < 0$ le nœud est un client.

Q : Capacité du véhicule.

i : Indice des nœuds de prédécesseurs.

j : Indice des nœuds de successeurs.

A_i : Temps d'arrivée au nœud i .

D_i : Temps de départ du nœud i .

Les variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le camion } k \text{ part du sommet } i \text{ vers } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall i = \overline{1, n} \quad \forall j = \overline{1, n} \quad \forall k = \overline{1, v}$$

y_{ik} est la quantité de la demande du sommet i livrée par véhicule k .

La fonction objectif :

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

Le modèle mathématique du PDPTW s'écrit comme suit :

$$(B) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} x_{ijk} \quad (2.1) \\ \sum_{k=1}^v \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, n}; \quad (2.2) \\ \sum_{k=1}^v \sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall j = \overline{1, n}; \quad (2.3) \\ \sum_{j=1}^n x_{i0k} = 1, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.4) \\ \sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.5) \\ \sum_{i=1}^n x_{ipk} - \sum_{j=1}^n x_{pjk} = 0, \quad \forall p = \overline{1, n}, \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.6) \\ x_{ijk} = 1 \Rightarrow y_{jk} = y_{ik} + q_j, \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.7) \\ y_{0k} = 0, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.8) \\ Q_k \geq y_{jk} \geq 0, \quad \forall j = \overline{1, n}, \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.9) \\ D_w \leq D_z, \quad \forall w \in N^+, \forall z \in N^- \quad (2.10) \\ D_0 = 0 \quad (2.11) \\ x_{ijk} = 1 \Rightarrow D_i + t_{ijk} \leq D_j, \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (2.12) \\ x_{ijk} \in [0,1], \quad \forall i, j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v}; \quad (2.13) \end{array} \right.$$

- La fonction objectif (2.1) assure la minimisation des coûts de déplacement
- Les équations (2.2) et (2.3) assurent que chaque nœud n'est servi qu'une seule fois par un et un seul véhicule.
- Les équations (2.4) et (2.5) assurent qu'un véhicule ne sort du dépôt et n'y revient qu'une seule fois.

- L'équation (2.6) assure la continuité d'une tournée par un véhicule : le nœud visité doit
- Impérativement être quitté.
- Les équations (2.7), (2.8) et (2.9) assurent le non dépassement de la capacité de transport d'un véhicule.
- Les équations (2.10), (2.11) et (2.12) assurent le respect des précédences. Un client ne doit pas être visité avant son fournisseur.

II.3.1.3 Méthodes de résolution

Vu que le VRP est un problème NP-difficile le PDPTW, étant une extension de ce dernier à laquelle sont additionnées des différentes contraintes de précédences, est aussi un problème NP-Difficile. Depuis son introduction dans la littérature, le PDPTW a connu un grand intérêt scientifique et plusieurs algorithmes et méthodes ont été proposés pour le résoudre.

(**Sol et al, 1994**) ont proposé un algorithme de branch and price pour résoudre le PDPTW et ce en minimisant le nombre de véhicules nécessaires pour satisfaire toutes les demandes de transport et la distance totale parcourue.

(**Jung et al, 2000**) ont développé un algorithme génétique qui résout le PDPTW dans lequel un véhicule fait une seule tournée et les fenêtres de temps ne sont pas respectées impérativement. La fonction objectif est une pondération du coût et des pénalisations causées par la satisfaction d'une demande de transport en dehors de sa fenêtre de temps.

(**Lu et al, 2006**) ont arboré une heuristique de construction basée sur le principe d'insertion ayant pour fonction objectif, la minimisation du coût total, incluant les coûts fixes des véhicules et les frais de déplacement qui sont proportionnels à la distance de déplacement.

Une nouvelle métaheuristique se basant sur un algorithme de recherche tabou intégré dans un recuit simulé, a été développée par (**Li et al, 2003**) pour résoudre le PDPTW, ceci en recherchant, à partir de la meilleure solution courante s'il y a amélioration pendant plusieurs itérations. La fonction objectif est une pondération du nombre de véhicules, de la distance totale parcourue, du temps total et du temps d'attente.

D'autres travaux ont aussi utilisé la recherche tabou pour la résolution du PDPTW, ayant pour objectif de maximiser le nombre de demandes affectées aux véhicules et de réduire le coût total du voyage.

(**Li et al, 2002**) ont développé une méthode appelée « Squeaky wheel » pour résoudre le PDPTW avec une recherche locale. Dans ce travail les auteurs cherchent à minimiser la taille de la flotte de véhicules, la distance parcourue, la durée totale et les temps d'attente. Ils ont utilisé l'heuristique d'insertion de Solomon pour construire une solution.

II.3.2 SDVRP

II.3.2.1 Description du problème

Le VRP comprend une flotte de véhicules ayant des caractéristiques fixes (vitesse, capacité, etc.) stationnés dans un dépôt central et un ensemble de points géographiquement dispersés (villes, entrepôts, écoles, clients, etc.) ayant des demandes fixes. Des véhicules sont utilisés pour visiter et satisfaire pleinement la demande de ces points. Le problème d'optimisation consiste à déterminer quels clients sont visités par chaque véhicule et quel itinéraire le véhicule suivra pour desservir les clients assignés, tout en minimisant les coûts opérationnels de la flotte, comme la distance parcourue, la consommation d'essence et la dépréciation du véhicule. Les itinéraires sont conçus pour débiter et se terminer au dépôt, la demande de chaque client est entièrement satisfaite par un seul véhicule, et la demande totale satisfaite par un itinéraire ne peut dépasser la capacité du véhicule.

Cependant, en réalité, il peut y avoir des cas où la demande d'un client dépasse la capacité du véhicule ou une économie en termes de distance totale ou de nombre de véhicules peut être obtenue en servant les clients avec plus d'un véhicule.

Le SDVRP assouplit les restrictions forçant des livraisons uniques aux clients et permet à plusieurs véhicules de satisfaire la demande des clients (Belenguer, 2000). Il est donc considéré comme une version relaxée du VRP où la demande de chaque client peut être satisfaite par plusieurs véhicules et par conséquent chaque client va être visité au moins une fois.

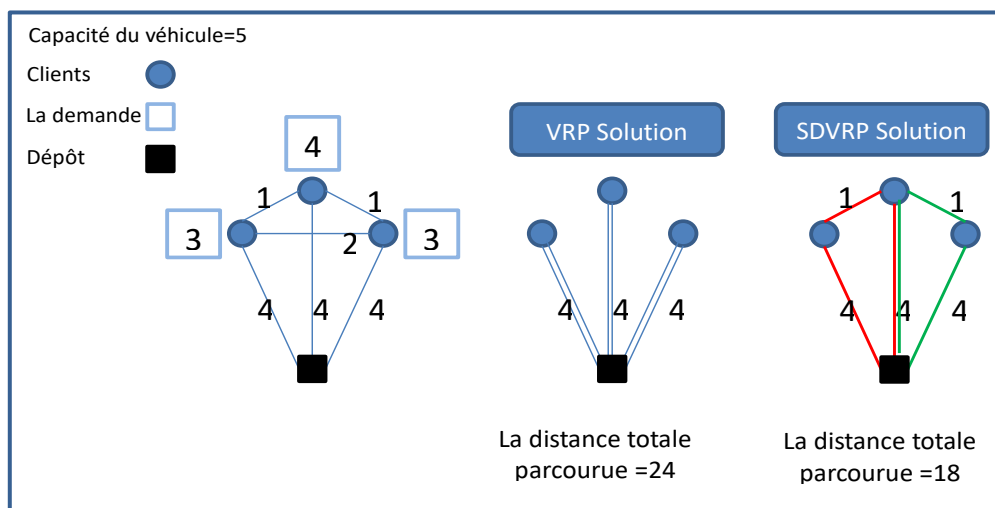


Figure 22: Exemple illustratif de l'importance du SDVRP (Belenguer, 2000).

II.3.2.2 Formulation mathématique

Considérons le graphe $G=(S, A)$, où S est l'ensemble des sommets, c'est-à-dire $S=\{0,1, \dots, n\}$. 0 représente le dépôt, et les autres sommets représentent les clients. A est l'ensemble des

arêtes avec $A = \{(i,j), i \text{ et } j \in V, i < j\}$. c_{ij} est la longueur (ou le cout) de l'arête (i, j) , q_i représente la demande du client i , où $i \in S - \{0\}$.

On suppose que les véhicules du parc sont homogènes et la capacité de charge maximale d'un véhicule est Q . Chaque véhicule commence et termine sa tournée au dépôt. Les demandes des clients doivent être entièrement satisfaites. Le poids de transport d'un véhicule sur chaque itinéraire ne peut être supérieur à Q .

Les données du problème :

n : le nombre de sommets.

v : le nombre de véhicule.

c_{ij} : le cout de déplacement de i vers j .

q_i : la demande associée au client i .

Q : capacité du véhicule.

C : cout fixe engendré par la mobilisation d'un véhicule.

Les variables de décision :

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

y_{ik} est la quantité de la demande du sommet i livrée par véhicule v .

La fonction objectif :

Minimiser la distance totale parcourue ainsi que le nombre total des véhicules mobilisés.

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

Le modèle mathématique du SDVRP se présente comme suit :

$$(C) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} x_{ijk} + C \sum_{i=1}^n x_{oi} \quad (3.1) \\ \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^v x_{ij}^k \geq 1, \quad j = 0, 1, \dots, n; \quad (3.2) \\ \sum_{i=0}^n x_{ip}^k - \sum_{j=0}^n x_{pj}^k = 0, \quad p = 0, 1, \dots, n; k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.3) \\ \sum_{i \in S - \{0\}} \sum_{j \in S - \{0\}} x_{ij}^k \leq |S| - 1, \quad k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.4) \\ y_{ik} \leq q_i \sum_{j=0}^n x_{ij}^k, \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.5) \\ \sum_{k=1}^v y_{ik} = q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3.6) \\ \sum_{i=1}^v y_{iv} \leq Q, \quad k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.7) \\ x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.8) \\ y_{ik} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, v; \quad (3.9) \end{array} \right.$$

- La fonction objectif (3.1) est de minimiser les distances totales parcourues par les véhicules ainsi que le nombre de véhicules utilisés.
- L'équation (3.2) indique que chaque point client peut être visité au moins une fois.
- L'équation (3.3) est la contrainte de conservation du débit.
- L'équation (3.4) est la contrainte d'élimination de la sous-route.
- L'équation (3.5) indique que le point client n'est desservi par le véhicule que si le véhicule se rend au point client.
- L'équation (3.6) garantit que toutes les demandes des clients sont satisfaites.
- L'équation (3.7) garantit que chaque véhicule ne dépasse pas sa capacité de charge maximale.

II.3.2.3 Méthodes de résolution

Dror et Trudeau ont introduit le problème du SDVRP (**Dror et al, 1989**) et ont montré comment cette relaxation du VRP standard pourrait mener à d'importantes économies, tant sur la distance totale parcourue que sur le nombre de véhicules à utiliser. Malgré cet assouplissement, le problème demeure un problème difficile NP-difficile.

Par la suite ils (**Dror et al, 1994**) présentent une formulation entière du SDVRP et développent différentes classes d'inégalités valables. Certaines de ces contraintes sont utilisées dans un algorithme de plan de coupe qui résout de manière optimale une petite instance (avec 10 clients).

(**Federgruen et Simchi-Levi, 1995**) abordent la question en traitant un client dont la demande q_i d'un client est équivalente à celle de q clients dont la demande de chacun est égale à une unité, qui se trouvent tous au même endroit.

(**Sierksma et Tijssen, 1998**) proposent un algorithme heuristique pour trouver les routes des hélicoptères. Ils utilisent des instances avec jusqu'à 50 plates-formes et construisent un algorithme exact basé sur des techniques de génération de colonnes.

(**Mullaseril et al, 1997**) proposent un algorithme heuristique pour un problème de routage de l'arc de capacité avec des fenêtres temporelles de contraintes, dans lequel la demande d'un arc peut être divisée.

II.3.3 MDVRP

II.3.3.1 Description du problème

Le problème de distribution est généralement formulé comme le problème de génération de tournées de véhicules. Néanmoins, il y a une hypothèse rigide considérée dans toutes les autres variantes du VRP. Selon cette hypothèse il n'existe qu'un seul dépôt, donc si une entreprise de logistique possède plus d'un dépôt, le VRP n'est plus adapté. Pour remédier à cette limitation, cette restriction est levée et une nouvelle variante du VRP a été définie : le MDVRP.

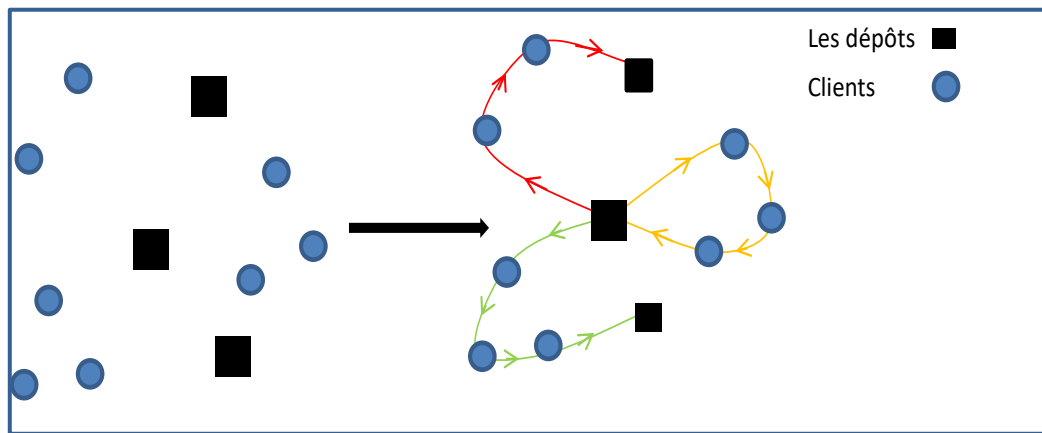


Figure 23:Schéma illustratif d'un problème de MDVRP (Salhi et al, 1997).

II.3.3.2 Formulation mathématique

Dans le MDVRP, les clients sont servis par plusieurs véhicules ; chacun d'eux est situé dans l'un des nombreux dépôts établis à différents endroits. On suppose que le nombre de véhicules disponibles est prédéterminé ainsi que le nombre et l'emplacement des dépôts. On suppose également que chaque véhicule part d'un dépôt et il n'est pas nécessaire de retourner au même dépôt, c'est-à-dire que le dépôt final peut être différent du dépôt initial. Le nombre et l'emplacement du client doivent être prédéfinis, la vitesse du véhicule est fixe.

Pour définir le problème, on considère un graphe complet $G = (A,E)$ où A est l'ensemble des sommets, il regroupe les clients ainsi que les différents dépôts et E est l'ensemble des arêtes du graphe. Les hypothèses les plus importantes de ce problème sont les suivantes :

- Le nombre de véhicules disponibles est prédéterminé et la capacité du véhicule est définie et fixée.
- Le nombre et l'emplacement des dépôts sont définis plus tôt.
- Chaque véhicule part d'un dépôt et il n'est pas nécessaire de retourner au même dépôt, c'est-à-dire le dépôt fini peut être différent du dépôt commencé.
- Le nombre et la localisation du client sont prédéfinis, la vitesse du véhicule est fixe.

- Le coût de transport de chaque véhicule dépend de la distance parcourue.
- Le réseau de transport est considéré comme symétrique, c'est-à-dire $d_{ij} = d_{ji}$.

Les données du problème :

n : le nombre de sommets.

v : le nombre de véhicule.

c_{ij} : le cout de déplacement du client i vers le client j .

c'_{di} : le cout de déplacement du dépôt d vers le client i .

q_i : la demande associée au client i .

Q : capacité du véhicule.

$[e_i, l_i]$: La fenêtre du temps du client i .

T_i : Le temps d'arrivé au client i .

ρ_i : La pénalité pour unité de temps de retard imposée par le client i .

N : L'ensemble des clients.

B : un sous-ensemble des clients.

V : L'ensemble des véhicules.

D : L'ensemble des dépôts.

M : un très grand nombre positif.

Les variables de décision :

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

$$y_{dik} = \begin{cases} 1, & \text{Si un camion } k \text{ part directement dépôt } d \text{ vers le client } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_{idk} = \begin{cases} 1, & \text{Si un camion } k \text{ part directement du client } i \text{ vers le dépôt } d. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Δa_i : le temps perdu du au non-respect des délais en raison d'un service anticipé.

Δb_i : le temps perdu du au non-respect des délais en raison en raison d'un retard de service.

$$\begin{aligned}
\min(f) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1 \text{ et } j \neq i}^N \sum_{k=1}^V c_{ij} x_{ijk} + \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^V c'_{di} y_{ijk} + \sum_{i=1}^N \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V c''_{di} z_{ijk} + \sum_{i=1}^N \rho_i (\Delta a_i + \Delta b_i) \quad (4.1) \\
&\quad \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V y_{dik} + \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^N \sum_{k=1}^V x_{ijk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, N} \quad (4.2) \\
&\quad \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^N \sum_{k=1}^V x_{ijk} + \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V z_{idk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, N} \quad (4.3) \\
&\quad \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V y_{dik} - \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^N z_{idk} = 0, \quad \forall k = \overline{1, V} \quad (4.4) \\
&\quad \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V q_i y_{dik} - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^N q_j x_{ijk} \leq c_k, \quad \forall k = \overline{1, V} \quad (4.5) \\
&\quad \sum_{d=1}^D y_{dik} + \sum_{j=1 \text{ et } j \neq i}^N x_{jik} - \sum_{j=1 \text{ et } j \neq i}^N x_{ijk} - \sum_{d=1}^D z_{idk} = 0, \quad \forall i = \overline{1, N}, \forall k = \overline{1, V} \quad (4.6) \\
&\quad M * \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^V y_{dik} \geq \sum_{i=1}^N \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^N x_{ijk}, \quad \forall k = \overline{1, V} \quad (4.7) \\
&\quad \sum_{i \in B}^N \sum_{j \in B \text{ et } i \neq j}^N x_{ijk} \leq |B| - 1, \quad \forall k = \overline{1, V}, \forall B \subseteq A, |B| \geq 2 \quad (4.8) \\
&\quad \Delta a_i \geq e_i - T_i, \quad \forall i = \overline{1, N} \quad (4.9) \\
&\quad \Delta b_i \geq T_i - l_i, \quad \forall i = \overline{1, N} \quad (4.10) \\
&\quad x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j = \overline{1, N}, i \neq j \quad (4.11) \\
&\quad y_{dik} \in \{0,1\} \quad \forall i = \overline{1, N}, \forall k = \overline{1, V}, \forall d = \overline{1, D} \quad (4.12) \\
&\quad z_{idk} \in \{0,1\} \quad \forall i = \overline{1, N}, \forall k = \overline{1, V}, \forall d = \overline{1, D} \quad (4.13)
\end{aligned}$$

- La fonction objectif (4.1) se compose de quatre parties qui sont les suivantes : le coût nécessaire pour voyager entre les clients, le coût nécessaire pour voyager entre le dépôt et les premiers clients et le coût nécessaire pour voyager entre les derniers clients et les dépôts dans chaque itinéraire et en dernier le coût pour ne pas servir les clients à temps et qui devrait être minimisé.
- Les contraintes (4.2) et (4.3) garantissent que chaque client doit être visité une fois dans chaque période de temps. La contrainte (4.2) révèle qu'un arc ne peut être parcouru par un véhicule, à moins que ce véhicule ne parte d'un seul dépôt et qu'il amène un client à se trouver au début du parcours après un dépôt ou après l'autre client. Dans la contrainte (4.3), cet itinéraire consiste en l'itinéraire du client vers l'autre client et du client vers le dépôt, c'est-à-dire que chaque client peut être relié à un dépôt ou à un client. Ces deux contraintes conduisent à servir tous les clients.
- La contrainte (4.4) est liée au départ et à l'arrivée de chaque itinéraire et certifie que chaque itinéraire part du dépôt unique et se termine au dépôt unique.
- La contrainte (4.5) est liée à la capacité de chaque véhicule de telle sorte que les demandes totales des clients ne violent pas la capacité du véhicule.

- La contrainte (4.6) implique que les entrées et les sorties des clients sont égales et que chaque client reçoit un seul service.
- La contrainte (4.7) garantit qu'un arc ne peut pas être parcouru par le véhicule à moins que ce véhicule ne parte du seul dépôt.
- La contrainte (4.8) limite la génération de sous-tours.
- La contrainte (4.9) indique que tous les véhicules disponibles doivent être utilisés.
- Les contraintes (4.10) et (4.11) sont liées aux fenêtres temporelles.
- Les contraintes de (4.12) à (4.14) sont liées au montant autorisé pour les variables de prise de décision du modèle qui sont toutes limitées à zéro et un.

II.3.3.3 Méthodes de résolution

Le MDVRP est NP-difficile ce qui signifie qu'un algorithme efficace pour résoudre le problème à l'optimalité n'est pas disponible. Par conséquent, la résolution du problème demande l'utilisation des algorithmes heuristiques et méta-heuristiques.

Comparativement aux autres variantes du VRP, le nombre de projets de recherche sur le MDVRP est moins élevé. Toutefois, nous allons citer quelques algorithmes de résolution :

(**Sumichrast et Markham, 1995**) ont formulé le problème du transport des matières premières de sources multiples, des dépôts, vers un ensemble d'usines comme le MDVRP.

Une approche heuristique basée sur la méthode d'économie de (**Clarke et Wright, 1964**) a été développée et ses performances ont été évaluées par comparaison avec la limite inférieure.

(**Renaud et al, 1996**) ont adopté une méthode heuristique pour traiter le MDVRP. La méthode a d'abord construit une première solution réalisable, puis le processus d'amélioration à l'aide de la recherche tabou.

(**Salhi et Sari, 1997**) ont proposé une méthode heuristique à trois niveaux pour résoudre le MDVRP. Le premier niveau était la construction d'une première solution réalisable. Les deuxième et troisième niveaux devaient améliorer les itinéraires dans chaque dépôt, c'est-à-dire les itinéraires intra-dépôts et les itinéraires dans tous les dépôts, c'est-à-dire les itinéraires inter-dépôts.

(**Hadjiconstantinou et Baldacci, 1998**) ont formulé le problème de fournir des services de maintenance à un ensemble de clients sous la forme de PVRP à plusieurs dépôts (MDPVRP). Les auteurs ont décomposé le PRPDSM en quatre niveaux, puis ont utilisé une méthode heuristique pour résoudre le problème. Le premier niveau consistait à déterminer quels clients sont desservis par quels dépôts. Le deuxième niveau consistait à résoudre un PVRP pour chaque dépôt. Au troisième niveau, un PRP classique pour chaque dépôt pour chaque jour de la période donnée a été résolu. Au dernier niveau, un TSP classique pour chaque itinéraire a été abordé.

(**Su et al, 1999**) a proposé un système dynamique de contrôle et d'ordonnancement des véhicules pour résoudre le MDVRP. Toutes les décisions de contrôle ont été prises en

fonction de l'état en temps réel du système, comme l'emplacement, la quantité et la date d'échéance de la demande.

(Giosa et al, 2002) ont étudié le VRPTW à plusieurs dépôts (MDVRPTW), qui est également une extension du MDVRP. Les auteurs ont conçu et comparé six heuristiques pour assigner les clients à tout en utilisant la même heuristique VRP pour chaque dépôt.

II.4 Evaluation des différents problèmes

La dernière étape de notre recherche s'articulera autour de l'évaluation des différents problèmes de transport cités dans la partie précédente. En effet, dans un premier temps, nous avons fait une analyse exhaustive du mode de fonctionnement de Numilog. Cette analyse a porté essentiellement sur les composantes de la chaîne de transport de l'entreprise en identifiant ses différentes caractéristiques et propriétés. Dans un second temps, nous avons fait une recherche bibliographique sur les problèmes de transport existants que nous avons cité d'une manière succincte. Par la suite nous avons sélectionné un ensemble de problèmes qui, selon notre réflexion, se rapproche le plus à la problématique de Numilog. Nous les avons expliqués et détaillé leurs hypothèses. Et enfin, nous procéderons à une analyse critique en confrontant chaque type de problèmes avec les contraintes du terrain et les spécifications de notre cas.

Numilog, étant une entreprise de logistique et de transport, est chargée de satisfaire les demandes de ses clients en transportant une marchandise d'un point A vers un point B. De ce fait, le PDPTW semble le problème adéquat qui correspond le plus à la problématique de l'entreprise. Le grand avantage de ce modèle est la prise en considération des contraintes de précédences. Pour chaque demande (OT), on distingue une wilaya de départ là où se fait le chargement de la marchandise et une autre wilaya d'arrivée qui correspond au lieu de déchargement de cette marchandise. Contrairement au VRPPD, le PDP assure un déplacement direct du point de ramassage au point de livraison. Dans VRPPD, le véhicule peut passer par un point de ramassage puis par un point de livraison, comme il peut passer par plusieurs points de ramassage, avant de livrer comme il est illustré dans le schéma de la.

Cette hypothèse (Niazy et al, 2012) découle du fait que la demande d'un un client peut être très grande par rapport à la quantité fournis par le fournisseur. Et donc pour satisfaire cette demande il faut passer par plusieurs fournisseurs avant de livrer finalement le client. Ce cas ne correspond nullement à notre cas étudié. Numilog n'assure qu'un transport direct de la marchandise, d'un seul client, partant d'une wilaya A vers une wilaya B ; et la quantité, associée à chaque demande, correspond simplement aux nombres de camions nécessaires pour satisfaire cet OT où chaque camion est emmené à faire un voyage direct.

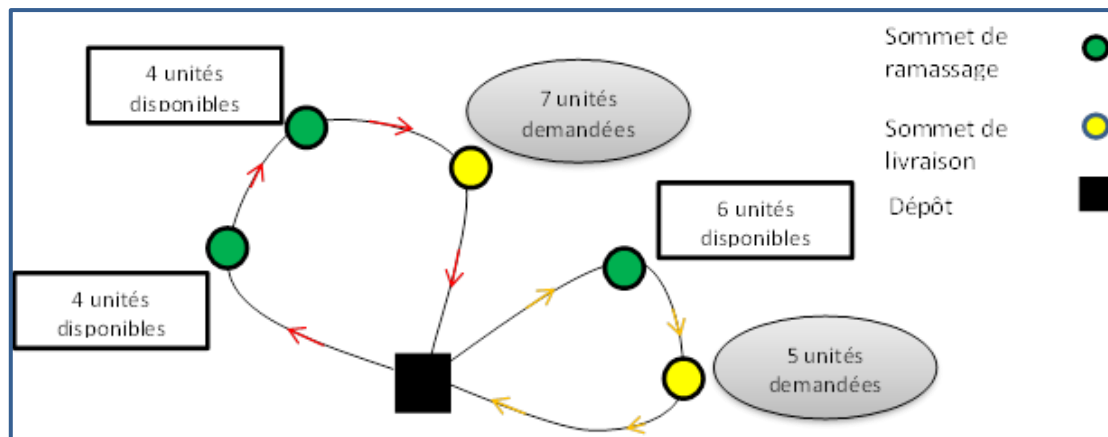


Figure 24: Schéma illustratif d'un problème de VRPPD (Niazy et al, 2012).

En considérant les délais de livraison fixés par le client et ses horaires de travail, nous ajoutons des contraintes temporelles. Pour chaque client on fixe une fenêtre de temps, de telle sorte que les visites de ramassage ou de livraison soient effectuées dans cette plage horaire. Une notion fortement présente à Numilog, étant donné que les clients exigent que les opérations de ramassage et de livraison se fassent durant leurs heures d'ouverture.

Cependant, dans les problèmes de PDPTW on considère deux sous-ensembles distincts. Un sous-ensemble qui regroupe les fournisseurs (les points de ramassage), et un autre sous-ensemble qui regroupe les clients (les points de livraison). Or, à Numilog, le traitement d'une demande se fait en considérant sa wilaya de départ et la wilaya d'arrivée. Si on considère deux demandes A et B ; A a pour wilaya de départ Alger et Oran comme wilaya d'arrivée, tandis que la demande B démarre d'Oran et livre à Mostaganem. Dans ce cas, la wilaya d'Oran est considérée comme un fournisseur (un point de départ) et en même temps un client (un point d'arrivé). Et par conséquent, on ne peut pas, en quelque sorte, construire un graphe biparti où il existe une partition de son ensemble de sommets en deux sous-ensembles, un sous-ensemble qui regroupe les wilayas de départ tandis que le deuxième regroupe les wilayas d'arrivé.

Un autre inconvénient de ce type de problème est le fait, d'exiger qu'un sommet ne peut être visité qu'une et une seule fois. Une hypothèse qui est loin d'être applicable dans le cas réel, car Numilog reçoit souvent des OT qui ont pour origine une même wilaya, et de différentes wilayas d'arrivées.

Le dernier désavantage, est le fait de ne considérer qu'un seul dépôt. Or, Numilog dispose de sept agences où chaque agence peut être considérée comme dépôt étant donné que chaque véhicule doit retourner à son agence après la fin de sa tournée.

Le SDVRP est un nouveau problème de transport. Dans ce type de problèmes la restriction d'une visite unique pour chaque sommet est levée. Chaque sommet, peut être visité plusieurs

fois jusqu'à ce que sa demande soit entièrement satisfaite. En appliquant ce modèle, une même wilaya peut être visitée à plusieurs reprises sans aucun problème.

Il est important de souligner que, selon plusieurs études, le SDVRP permet de diminuer les coûts de transport considérablement. Numilog en est une preuve. En effet, l'entreprise a pu augmenter son chiffre d'affaires simplement en fixant des doubles rotations sur certaines routes. Chose qui ne peut être réalisée que si on suppose qu'il n'y a aucune restriction sur le nombre de visites de chaque sommet. Ce qui correspond totalement à l'hypothèse de base du SDVRP. On peut donc affirmer que l'application de ce modèle est nécessaire pour aboutir à un plan de transport optimal.

Néanmoins, les contraintes de précédences sont inexistantes dans ce type de problème. Ici, on considère simplement un ensemble d'emplacements géographiques à visiter, où chaque emplacement peut être visité plusieurs fois. Tous les sommets sont supposés identiques, et l'ordre des visites ne dépend que sur un seul critère : minimiser la distance totale parcourue. Or, dans notre cas, l'élaboration de l'ordre des visites dépend de deux critères. Le premier critère est celui de satisfaire la demande, tandis que le deuxième critère est la minimisation des coûts de transport. Ce point va être détaillé dans le chapitre suivant.

Tout comme le PDP, le SDVRP, ne considère qu'un seul dépôt. Or, Numilog dispose de 7 agences et chaque véhicule doit retourner à son agence.

Nous tenons à préciser que le problème de VRPTW, bien qu'il ait été détaillé dans la partie précédente, ne figure pas dans cette partie d'évaluation. Cela revient au fait que les contraintes temporelles ont une grande importance dans la résolution de notre problématique, et qu'il fallait absolument voir comment la considération de ce type de contraintes va changer la formulation et surtout les méthodes de résolution d'un problème de tournée de véhicule.

Le MDVRP est la variante du VRP qui fait abstraction de l'hypothèse restrictive d'avoir un seul dépôt. Le modèle MDVRP reflète fidèlement le cas où l'entreprise dispose d'une flotte de véhicules dispersée dans plusieurs parcs, ce qui est, justement, le cas de Numilog. Elle dispose de sept agences qui font office de sept dépôts. Cependant, cette variante présente un certain nombre de limites et inconvénients. Tout d'abord, le MDVRP n'impose pas le retour du véhicule au même dépôt du départ. Si nous traduisons cela pratiquement, nous trouvons que si un véhicule démarre de l'agence d'Alger (le dépôt d'Alger), il pourra finir sa tournée à l'agence d'El-Kheroub (le dépôt d'El-Kheroub) et donc le chauffeur se trouve loin de plusieurs centaines de kilomètres de sa wilaya de résidence, ce qui est contre les règles sociales de Numilog. Un chauffeur doit, donc impérativement, revenir à son dépôt de départ. Une autre limite du MDVRP réside dans le fait d'imposer, comme dans tous les VRP, une visite unique pour chaque sommet. Le modèle ne prend pas également en considération les contraintes de précédence, chose qui rend la modélisation des demandes des clients impossible.

Nous synthétisons les résultats de notre évaluation dans le **tableau 4** suivant, dans lequel nous présentons les avantages et les inconvénients de chaque type de problème :

Table 6: Evaluation des modèles de transport

Le problème	Les avantages	Les inconvénients
PDPTW	<ul style="list-style-type: none"> - l'ordonnancement des visites, en tenant compte des contraintes de précédences. Pour chaque demande, le fournisseur (le sommet de ramassage) doit être impérativement visité avant le client (le sommet de livraison). - garantir un transport direct des marchandises. Une fois que la marchandise est chargée dans un véhicule, ce dernier doit se déplacer directement vers le point de livraison de cette marchandise. - les opérations de collecte et de livraison doivent se faire pendant des plages horaires prédéfinies. 	<ul style="list-style-type: none"> - les sommets sont divisés en deux sous-ensembles distincts à savoir le sous-ensemble des fournisseurs et le sous-ensemble des clients. - chaque sommet ne peut être visité qu'une et une seule fois. - les véhicules ne peuvent démarrer que d'un seul emplacement (la considération d'un seul dépôt)
SDVRP	<ul style="list-style-type: none"> - Ce problème permet plusieurs visites au même sommet, chose qui peut diminuer les coûts de transports considérablement. - La possibilité de faire des doubles rotations. 	<ul style="list-style-type: none"> - ne prend pas en considération les contraintes de précédences. - Les véhicules ne peuvent démarrer que d'un seul emplacement (la considération d'un seul dépôt)
MDVRP	<ul style="list-style-type: none"> - La possibilité d'avoir plusieurs point de départs (plusieurs dépôts) 	<ul style="list-style-type: none"> - Les contraintes de précédence sans pas considérées. - Un sommet ne peut être visité qu'une et une seule fois. - Le dépôt d'arrivé peut être différent du celui du départ.

Les résultats de l'évaluation nous confirment que chaque modèle ne peut répondre que partiellement à notre problématique. En effet, après plus de trois mois de recherche, nous sommes arrivés au résultat suivant :

Nous ne pouvons pas opter pour un quelconque modèle présent dans la littérature sans que d'importantes contraintes, qui garantissent la cohérence et l'applicabilité de la solution trouvée par ce modèle sur le terrain, soient non-respectées.

Pour créer un plan de transport qui répond aux normes et exigences de Numilog, nous allons créer un nouveau modèle. Ce modèle va être un modèle hybride, adapté au mode de fonctionnement de Numilog, qui :

- Regroupe l'ensemble des avantages du : SDVRP, PDPTW et MDVRP
 - La prise en considération des contraintes de précédences.
 - La non-restriction sur le nombre des visites de chaque sommet.
 - La considération de plusieurs dépôts.
- Respecte les règles sociales imposées par Numilog.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par identifier les deux grandes catégories de problème de transport, à savoir les problèmes de transport à charge pleine et les problèmes de transport à charge partielles. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux deux types de problème de transport : le problème de tournées de véhicules VRP et le problème de ramassage et de livraison PDP. Nous avons exposé la définition de chaque problème, sa complexité, sa formulation mathématique, et enfin les méthodes exactes et approchées de sa résolution.

Nous avons également proposé une classification des principales variantes du VRP, en détaillant les problèmes qui, selon notre réflexion, se rapprochent le plus à notre problématique.

Ensuite nous avons évalué chaque type de problème, en confrontant ses hypothèses avec le mode de fonctionnement de Numilog, ses normes et ses exigences. Chaque modèle présente un ensemble d'avantages et d'inconvénients, qui ont fait que chacun de ces modèles répondait que partiellement à notre problématique. Ce qui nous a emmenés à affirmer l'importance de créer un nouveau modèle adapté à notre cas d'étude afin de pouvoir élaborer un plan de transport qui répond au besoin de Numilog. Le modèle adapté sera un modèle hybride qui englobe un ensemble des propriétés de trois problèmes : le PDPTW, le SDVRP et enfin le MDVRP.

Le schéma illustratif dans la synthèse la métrologie qui a guidé notre recherche :

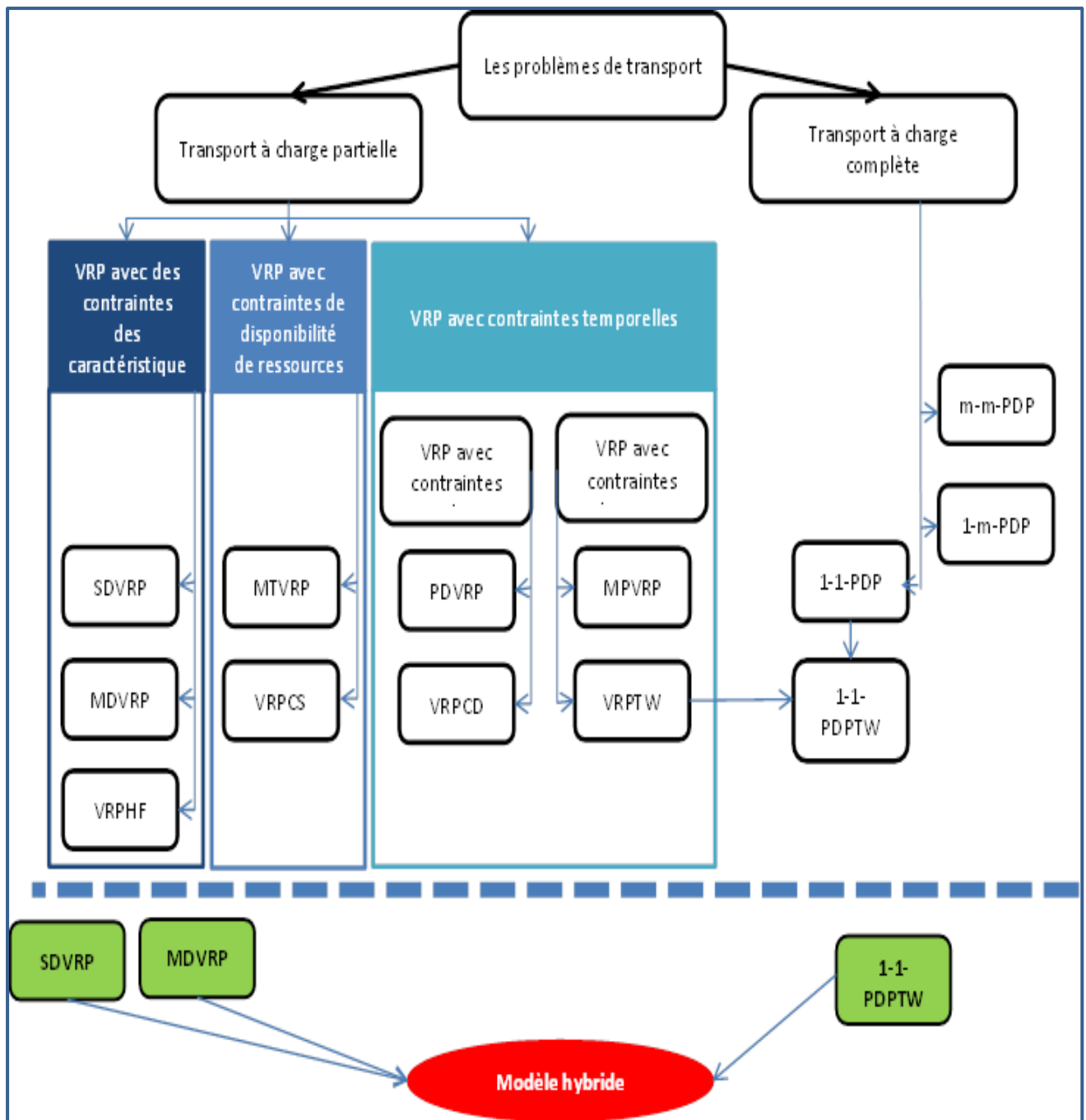


Figure 25:Schéma récapitulatif des résultats de la recherche bibliographique.

CHAPITRE 3 :
RESOLUTION DE LA
PROBLEMATIQUE

III. CHAPITRE 3 : RESOLUTION DE LA PROBLEMATIQUE

Introduction

Notre objectif, comme nous l'avons précisé dans le chapitre précédent, est de construire un modèle hybride. Notre recherche bibliographique nous a mené à conclure que le modèle doit regrouper certaines caractéristiques du PDP, du SDVRP et enfin celles du MDVRP. Nous sommes, donc, amené à créer un modèle qui prend en considération l'ensemble des contraintes de précédences. Contrairement au VRP, ce modèle doit permettre des visites multiples pour chaque wilaya. Il doit également considéré les spécifications du réseau de distribution de Numilog, plus précisément le nombre et l'emplacement des dépôts. Mais avec du recul, et surtout avec beaucoup de tentatives malheureusement vouées à l'échec, nous nous sommes rendu compte d'une notion, plutôt évidente, mais qui s'est avérée la clé de notre problématique. En effet, notre but ultime est de mettre en place un outil d'aide à la décision afin d'assister le planificateur dans le processus de prise de décisions. Le modèle mathématique n'est qu'un moyen pour parvenir à une représentation fidèle à la réalité du terrain ; il fallait donc comprendre et analyser chaque étape du processus décisionnel avant de passer au modèle. Partant de cette piste de réflexion, notre méthode de résolution va être scindée en quatre sections.

La première section va porter sur l'explication de la méthode utilisée. Elle se présente comme suit : nous allons commencer par analyser exhaustivement les étapes de prise de décision pour l'ensemble des demandes. Ensuite, nous allons détailler notre approche de résolution. Nous présenterons par la suite un modèle mathématique adapté à notre logique de résolution et nous allons mettre en évidence sa complexité.

La deuxième section va porter sur les algorithmes de résolution utilisés. Cette partie se résume comme suit : Tout d'abord, nous expliquerons les heuristiques utilisées pour trouver une solution faisable. Puis, nous optimiserons les résultats en utilisant une métaheuristique. Nous terminons cette partie par la justification des méthodes et algorithmes utilisés.

La troisième section sera consacrée à la présentation de notre outil. Nous présentons l'architecture globale de l'algorithme ainsi qu'un exemple démonstratif.

La quatrième section consiste à valider le modèle et suggérer certaines pistes d'améliorations afin de rendre l'outil d'aide à la décision conçu plus performant.

III.1 La méthode de résolution

Cette partie est consacrée essentiellement à l'explication de toutes les étapes de notre approche de résolution allant de l'analyse du mécanisme de prise de décision qui prévaut actuellement, jusqu'à la création du modèle mathématique.

Après avoir effectué une recherche bibliographique, nous n'avons trouvé aucun modèle qui correspond à notre cas d'étude. Notre première idée était alors de combiner entre les trois modèles cités plus haut. Or, cela s'est avéré très difficile à le concrétiser sur le plan opérationnel. Dès lors il fallait impérativement chercher d'autres issues au problème posé. A l'issue de nos recherches, nous avons abouti à notre modélisation en suivant les étapes suivantes :

III.1.1 Analyse du processus de prise de décision

Dans la gestion courante de la réalité des problèmes d'ordonnement des transports, des décisions doivent constamment être prises pour trouver une solution qui satisfait les demandes des clients sans toutefois outrepasser les contraintes du problème. Dans un tel contexte, il est impératif de prendre des décisions justes, efficaces et dans un temps records.

A Numilog, les décisions les plus importantes sont celles qui concernent la détermination des itinéraires à emprunter par chaque véhicule. En effet, construire les plans de transport est un processus clé au sein de l'entreprise.

Ce processus a un impact très important, et surtout direct, sur la rentabilité de l'entreprise. Son importance agit sur deux grands aspects à savoir : l'efficacité et la stabilité globale de l'entreprise. En effet, plus les itinéraires construits sont optimaux, plus l'entreprise diminue considérablement ses coûts de transport et plus elle augmente sa marge bénéficiaire.

En outre, plus le taux de réalité du plan de transport est élevé, mieux l'entreprise maîtrise ses moyens matériels et immatériels ; chose qui entrainera une stabilité et une aisance de gestion.

Le processus de prise de décision comporte quatre activités principales:

La première activité consiste à regrouper les demandes reçues par rapport au type de véhicule commandé. A chaque demande est associée un ordre de transport (OT) qui est caractérisé par une wilaya de départ, une wilaya d'arrivée et le nombre de camion à envoyer. La finalité de cette étape est de présenter les demandes, de tous les clients confondus mais d'un seul type de véhicule, sous forme d'un tableau qui contient tous les OT. Le tableau est de l'ordre de $[48] \times [48]$: les lignes indiquent les wilayas de départs, les colonnes les wilayas d'arrivées, et les cases représentent le nombre de camions à envoyer.

La deuxième activité comprend les critères d'élaboration des tournées. Nous identifions deux critères : le premier est la satisfaction de tous les clients, quitte à faire appel à des camions affrétés. Le deuxième critère est la minimisation des kilométrages à vide.

La troisième activité consiste à l'élaboration effective des tournées. A ce niveau il est dressé un plan de transport fait sur la base des OT, tout en respectant les critères précédant ainsi que les spécifications du réseau de transport de Numilog.

La quatrième et dernière étape consiste à valider le plan par le directeur de transport et le service des opérations.

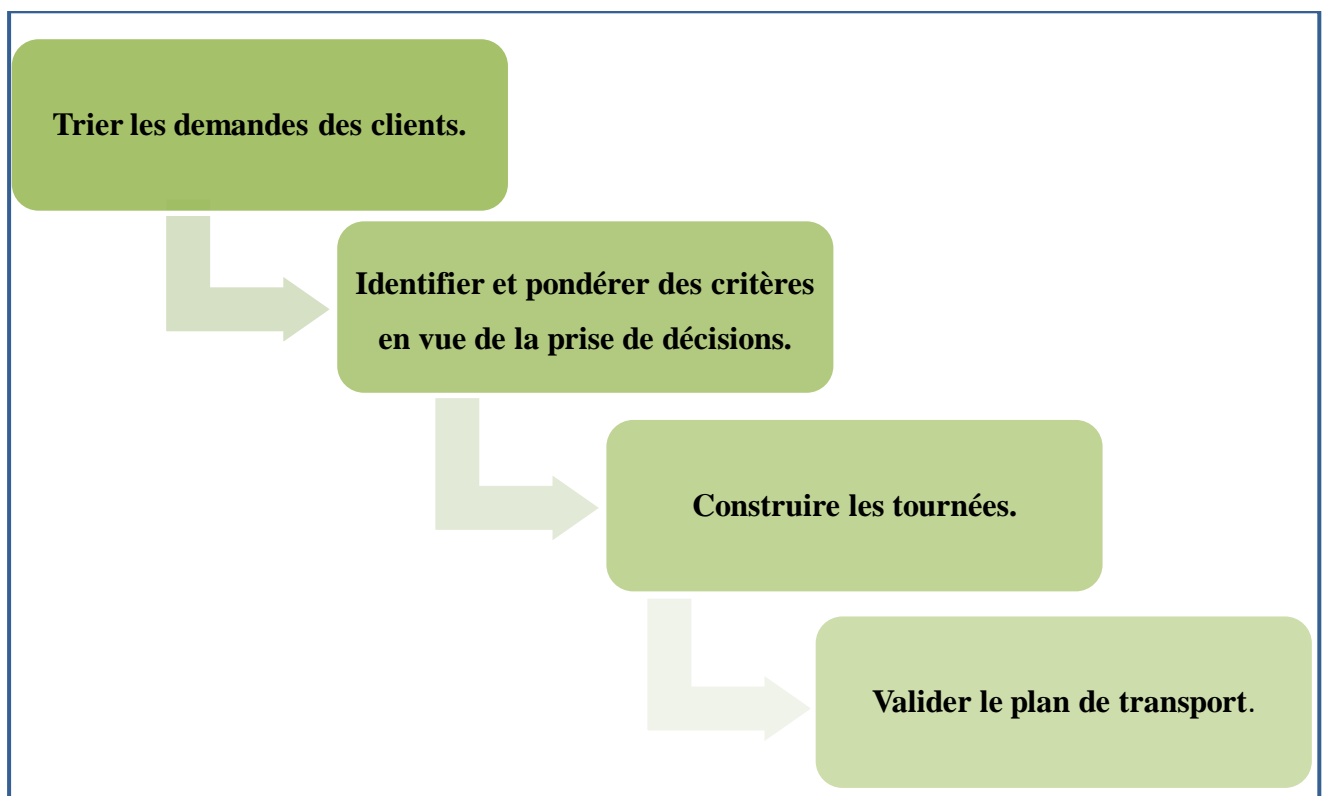


Figure 26:Processus de prise de décision pour l'élaboration d'un plan de transport

Dans le cadre de notre analyse, nous nous intéressons particulièrement à la troisième étape du processus global . Opérationnellement, construire les tournées revient à ordonnancer les OT. Cet ordonnancement est régit par la considération des contraintes de précédences et les contraintes temporelles et enfin la minimisation du roulage à vide. Ainsi, on affecte à chaque véhicule un certain nombre d'emplacements, ordonné chronologiquement, à visiter.

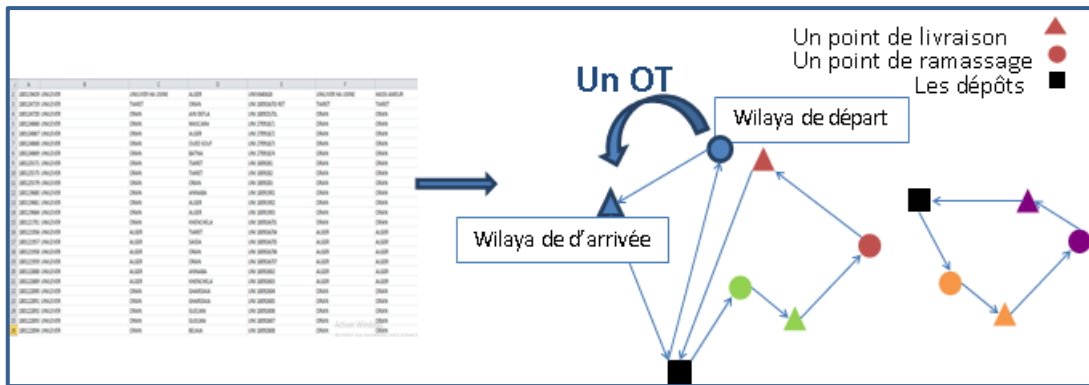


Figure 27:Schéma illustratif d'un plan de transport.

A ce niveau nous avons remarqué, qu'en effet il existe deux types d'itinéraires qu'un camion peut emprunter : un itinéraire choisi et un autre imposé . Le premier type est un itinéraire déterminé par l'entreprise ; l'ordonnancement des visites se fait après avoir évalué la faisabilité et le gain de chaque route. Le deuxième type, est un chemin imposé par le client ; une fois que nous choisissons de desservir le client numéro1, par exemple, nous devons obligatoirement se déplacer de son point de ramassage vers son point de livraison.

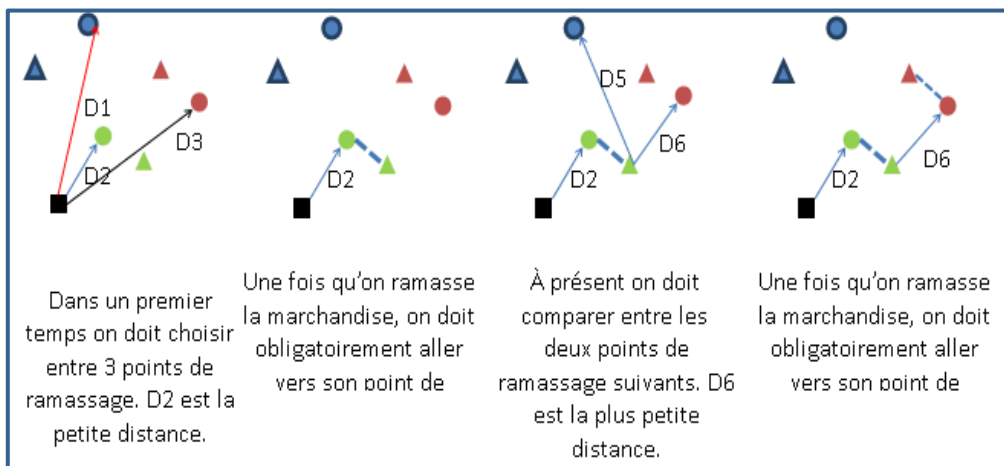


Figure 28:Etapes de prises de décision

Une représentation qui reflète fidèlement la réalité du terrain doit spécifier la nature du flux entre les différents emplacements géographiques. Une schématisation précise d'un plan de transport est représentée comme suit :

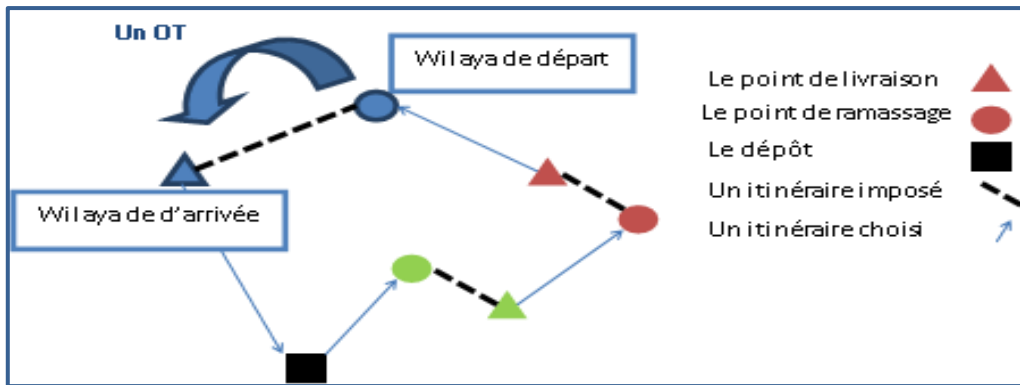


Figure 29:Schéma du plan de transport qui prend en considération la nature des chemins.

Ainsi, nous pouvons délimiter le champ décisionnel. Ce dernier va se limiter uniquement à déterminer deux niveaux de décision :

- Le premier niveau concerne l'affectation des OT aux agences. Certes depuis la création de la tour de contrôle, la gestion des véhicules est indépendante des agences ; l'affectation et la gestion des véhicules se fait au niveau de la tour. Cependant, un chauffeur doit toujours retourner à sa wilaya de départ, autrement dit à la wilaya où se trouve l'agence responsable de son affectation.
- Le deuxième niveau décisionnel porte sur l'ordonnancement des demandes. Plus précisément, l'ordonnancement des points de ramassages.

En se basant sur ce constat, nous avons eu une idée qui permet de contourner les contraintes de précédences et de simplifier d'avantage la modélisation mathématique. Au lieu de considérer les différentes wilayas qu'un camion doit visiter lors de sa tournée, nous considérons, plutôt les ordres de transport qu'il assure. Cette réflexion nous mène à considérer la wilaya de départ et celle d'arrivée de chaque OT comme étant un seul emplacement géographique à visiter. Par conséquent, nous redéfinissons le graphe sur lequel nous traitons le problème. Les sommets du graphe vont représenter l'ensemble des demandes plutôt que des wilayas comme illustré dans la figure suivante :

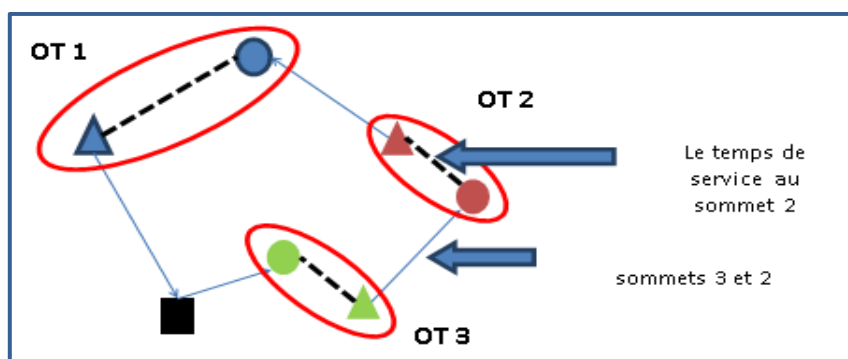


Figure 30:Transformation des données.

III.1.2 Explication de la méthodologie de résolution

En suivant cette logique de résolution, les sommets vont correspondre aux demandes des clients. Or dans la réalité, chaque sommet comporte deux localités distinctes. La question qu'on se pose d'ores et déjà est : comment pourrions nous concrétiser cette idée ?

Pour y répondre, nous avons utilisé une notion que nous avons apprise lors d'un cours de TRIZ. En effet, la TRIZ est une méthode de résolution des problèmes techniques qui favorise l'innovation. C'est une démarche qui permet d'aboutir à des solutions innovantes en appliquant un de ses 40 principes. Ces principes sont des familles de solutions ayant déjà résolu des problèmes. Et le fait d'examiner ces solutions existantes et de les appliquer sur de nouveaux problèmes peut aboutir à des solutions innovantes.

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas appliqué la démarche complète de la TRIZ. Cependant, nous avons utilisé un de ses principes. Il s'agit du vingt-deuxième principe qui consiste à transformer un problème en une opportunité. Nous devons, donc, utiliser des facteurs néfastes pour obtenir un effet positif. En faisant la projection de ce principe sur notre cas d'étude, nous constatant que le facteur qualifié de néfaste réside dans le fait de ne pas pouvoir séparer les destinations de départs de celles d'arrivées. Les 48 wilayas peuvent être un lieu de ramassage, ou un lieu de livraison.

Nous avons pu transformer cet inconvénient en un avantage en évaluant cette situation d'un autre angle. En effet, quelle que soit la demande du client nous connaissons parfaitement le lieu de départ et celui d'arrivé ; autrement dit, nous avons un nombre limité d'OT distincts. Si chaque wilaya peut être un lieu de départ et un lieu d'arrivé, nous aurons donc 2 256 ordres de transport possibles, qui est un arrangement de 2 parmi 48 :

$$A_{48}^2 = \frac{48!}{(48 - 2)!} = 47 * 48 = 2256$$

Ajoutons à ces 2256 sommets l'OT, 7 autres sommets qui représentent les agences (les parks de véhicules). Notons que les sommets qui représentent les dépôts sont des sommets non-composés, chaque dépôt est indiqué par la wilaya ou il se situe. Nous aurons donc au final un ensemble de 2 263 sommets au total.

La notion de la demande reste la même ; à titre d'exemple, si le client demande 3 camions pour aller d'un point A vers un point B, cela revient à dire que la demande du sommet qui représente l'OT en question est égale à 3.

Tandis que la notion de distance entre les sommets va subir un changement. Si avant, calculer la distance entre deux sommets revient à avoir la distance entre la wilaya de départ et la wilaya d'arrivée mais cela n'est plus valable, actuellement. Pour avoir la distance entre deux sommets, il faut plutôt comparer la wilaya d'arrivé du premier sommet avec la wilaya de départ du deuxième sommet. Le calcul de la distance entre un dépôt et un sommet qui

représente un OT se fait également de la même manière. La seule exception dans le fait qu'un dépôt est un sommet simple, donc on calcule directement la distance entre la wilaya où il se situe et la wilaya de ramassage de l'OT en question.

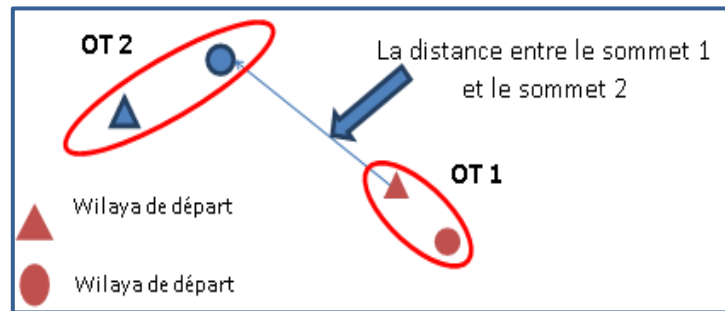


Figure 31: Nouvelle notion de distance entre deux sommets composés.

Nous tenons à préciser que la distance au sein d'un même sommet, c'est-à-dire entre la wilaya de départ et la wilaya d'arrivée, nous nous importe peu, car il s'agit d'un itinéraire imposé d'une part, et d'une autre part car ce n'est pas une distance que nous cherchons à minimiser vu que l'entreprise est payée pour chaque kilomètre parcouru.

Quant à la notion du temps du trajet, elle reste la même entre les sommets. Le temps nécessaire pour se rendre d'un sommet vers un autre revient à calculer le temps nécessaire pour se rendre de la wilaya d'arrivée du premier sommet vers celle de départ du deuxième sommet. Cependant, le temps de trajet au sein d'un sommet, c'est-à-dire entre la wilaya de départ et celle d'arrivée d'un même OT, est considéré comme un temps de service du sommet.

Afin d'avoir ces informations, nous avons développé un algorithme qui permet de transformer les données et les mettre sous un format adéquat. Dans un terme plus technique, le but de cet algorithme est de construire deux matrices :

- La première matrice est celle qui renvoie les distances entre les sommets composés. C'est une matrice carrée à 2256 lignes, elle est donc de dimension de 2256×2256 et comporte 5 089 536 éléments qui représentent les distances comme déjà mentionné.
- La deuxième matrice est une matrice qui contient les informations des sommets. Pour chaque sommet composé, nous indiquons le service au sommet qui est le temps nécessaire pour satisfaire l'OT, nous indiquons aussi la wilaya de départ et la wilaya d'arrivée. Cette matrice est de dimension de 2256×4 et comporte 9 024 éléments.

L'algorithme de préparation des données a comme entrées : une table des distances entre les 48 wilayas, et une table des temps qui indique le temps nécessaire pour se déplacer d'une wilaya vers une autre. Dans un premier temps, Nous avons codé l'algorithme sur C++ pour une version d'essai afin de valider la logique algorithmique suivie. Par la suite nous l'avons

reprogrammé sur Python [ANNEXE4] car il y a un grand nombre de données à manipuler et nous avons besoin d'un logiciel de programmation puissant et relativement simple à apprendre. La figure suivante fait ressortir le résultat obtenu :

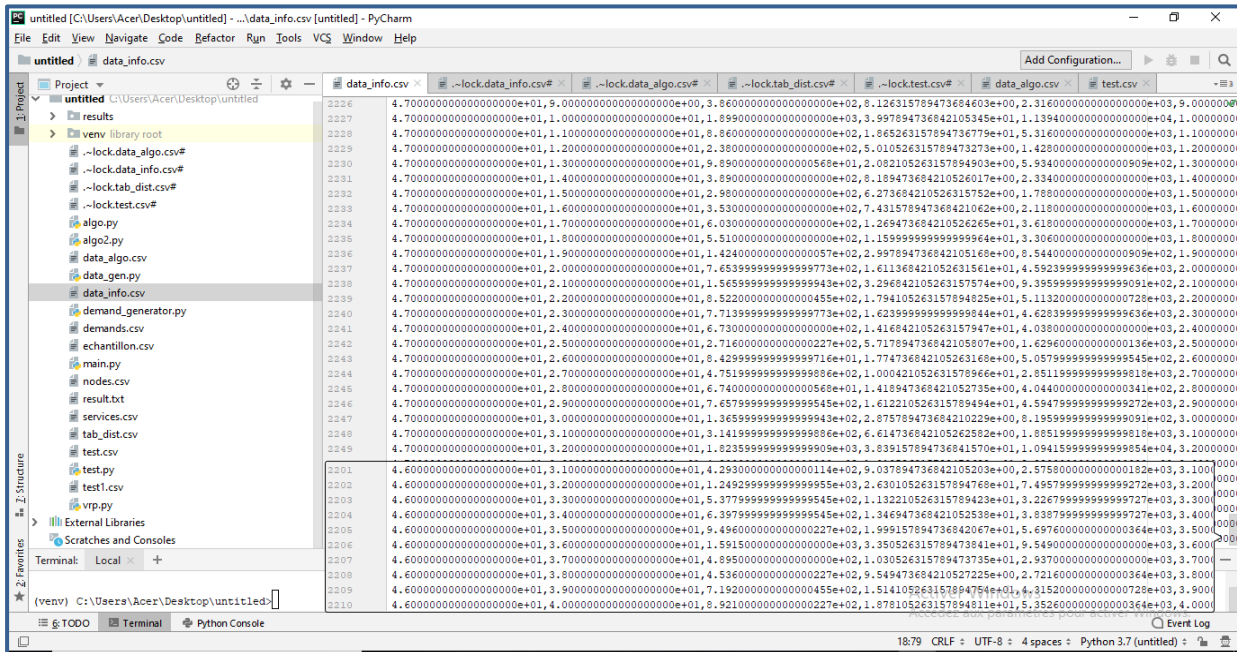


Figure 32:Algorithme de préparation des données

III.1.3 Description et formulation du problème

III.1.3.1 Description du problème

A ce stade de notre étude, nous considérons un problème de distribution, où un ensemble de clients (OT) est desservi par une flotte de véhicules qui se trouve dans plusieurs dépôts. A chaque véhicule est affecté un ensemble de clients à visiter, autrement dit des OT à satisfaire. Trouver une solution à ce problème consiste à confectionner l'ensemble des trajets de manière à satisfaire toutes les demandes d'une part et d'une autre part à minimiser les coûts de transport. Ces itinéraires construits doivent respecter certaines restrictions d'ordre temporel et social. Les contraintes temporelles concernent les heures d'ouverture et de fermeture des clients. Quant aux contraintes sociales, elles sont liées aux heures de conduite des chauffeurs, la durée de chaque tournée ne doit donc pas excéder un certain nombre d'heures.

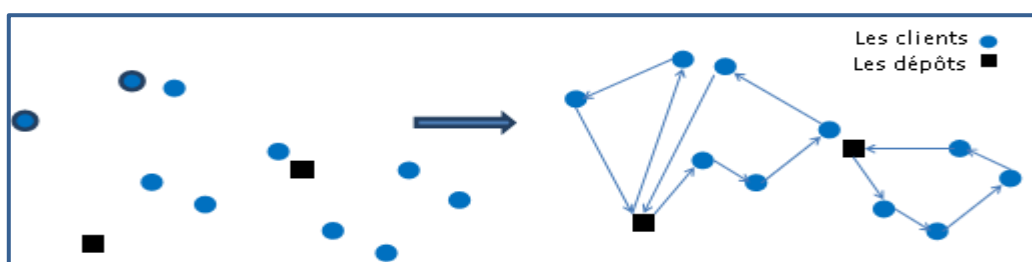


Figure 33:Nouvelle présentation du graphe support.

III.1.3.2 Formulation mathématique

Le problème peut être défini sur un graphe complet $G = (A, S)$ où A représente l'ensemble des sommets qui regroupe les clients à desservir ainsi que les dépôts ; et S est l'ensemble des arcs qui représentent les routes entre les sommets.

Plus spécifiquement, nous avons l'ensemble des nœuds du graphe défini comme suit : $A = N \cup D$ où l'ensemble $N = \{1, \dots, n\}$ regroupe les clients qui doivent être desservis ; tandis que l'ensemble $D = \{1, \dots, d\}$ représente les dépôts de l'entreprise.

Une demande positive de produit q_i est associée à chaque client i appartenant à N .

Une flotte de véhicules $= \{1, \dots, v\}$, supposée homogène, est disponible aux dépôts. Pour tous clients i et j , $\forall i, j \in N$ on associe une valeur d_{ij} qui est la distance directe de transport en allant du client i vers le client j .

Chaque client $i \in N$, dispose d'une fenêtre de temps $[e_i, l_i]$ où $e_i \leq l_i$. Autrement dit, le client doit être desservi par un véhicule à l'intérieur de cet intervalle de temps. A chaque client $i \in N$ est ajouté un temps de service s_i . Cependant, cette valeur est fixée à 0 pour le dépôt.

A chaque arc $(i, j) \in S$ est ajoutée une valeur non négative t_{ij} représente le temps nécessaire pour se rendre du nœud i au nœud j .

Notre modèle consiste à concevoir un ensemble d'itinéraires de véhicules les moins coûteux qui assure la satisfaction de toutes les demandes. Les hypothèses importantes de notre modèle sont suivantes :

- Le nombre de véhicules disponibles est prédéterminé.
- La capacité du véhicule est définie et fixée.
- Le nombre et l'emplacement des dépôts sont définis.
- Chaque véhicule part d'un dépôt et il doit impérativement retourner au même dépôt.
- Le nombre et l'emplacement du client sont prédéfinis.
- La vitesse du véhicule est fixe.
- Le coût de transport de chaque véhicule dépend de la distance parcourue.
- Le réseau de transport est considéré comme asymétrique, c'est-à-dire la distance $d_{ij} \neq d_{ji}$.
- Chaque client peut être visité plusieurs fois.
- Le respect des règles sociales de Numilog qui délimitent le temps total de la tournée. le temps total d'une tournée ne doit pas dépasser le nombre d'heures de conduite autorisé pour chaque chauffeur.

Les ensembles :

A : L'ensemble de tous les nœuds (des dépôts et client).

E : L'ensemble des routes (les arcs du graphe).

D : L'ensemble des dépôts.

N : L'ensemble des nœuds à desservir.

V : L'ensemble des véhicules.

Les indices :

i : Indice du client.

j : Indice du client.

m : Indice du dépôt.

k : Indice du véhicule.

Les paramètres :

v : Le nombre de véhicules.

n : Le nombre des nœuds à visiter.

d : Le nombre des dépôts.

d_{ij} : La distance entre le sommet i et le sommet j .

t_{ij} : Le temps nécessaire pour aller du sommet i vers le sommet j .

q_i : La demande d'un nœud i .

s_i : Le temps de service dans le nœud i .

c : Le cout kilométrique.

$T_{\text{toutnée}}$: Le temps maximum d'une tournée.

T_{ik} : Le temps d'arrivé du véhicule k au nœud i .

M : Un entier positive supposé très grand.

$[e_i, l_i]$: La fenêtre de temps du nœud i .

Les variables de décision :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le camion } k \text{ part du sommet } i \text{ vers } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\ \forall i \in N; \quad \forall j \in N; \quad \forall k \in V;$$
$$y_{mik} = \begin{cases} 1 & , \quad \text{Si le camion } k \text{ part du dépôt } m \text{ vers le noeud } i. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\ \forall i \in N; \quad \forall m \in D; \quad \forall k \in N;$$
$$z_{imk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le camion } k \text{ part du noeud } i \text{ vers le dépôt } m. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \\ \forall m \in D; \quad \forall i \in N; \quad \forall k \in V;$$

La fonction objectif :

L'objectif de notre modèle est de minimiser la somme des couts de déplacement. Elle se présente comme suit :

$$\text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v c_{ij} x_{ijk} + \sum_{m=1}^d \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^v c_{mik} y_{mik} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^d \sum_{k=1}^v c_{imk} z_{imk}$$

Avec :

$$i \in N$$

$$j \in N$$

$$k \in V$$

$$m \in D$$

La modélisation mathématique de notre problématique est représenté par le modèle (E) suivant :

$$\text{Min}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^v c_{d_{ij}} x_{ijk} + \sum_{m=1}^d \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^v c_{d_{mi}} y_{mik} + \sum_{i=1}^n \sum_{m=1}^d \sum_{k=1}^v c_{d_{im}} z_{imk} \quad (5.1)$$

sous contraintes:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^v x_{ijk} \geq 1, \quad \forall j = \overline{1, n} \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ipk} - \sum_{j=1}^n x_{pj k} = 0, \quad \forall p = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^v x_{ijk} \leq |N| - 1, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^v x_{ijk} = q_j, \quad \forall j = \overline{1, n} \quad (5.5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (s_i + t_{ij}) x_{ijk} \leq T_{\text{tournée}}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.6)$$

$$e_i \leq T_{ik} + s_i \leq l_i, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.7)$$

$$(T_{ik} + s_i + t_{ij} - T_{jk}) x_{ijk} \leq 0, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.8)$$

$$M * \sum_{m=1}^d \sum_{i=1}^n y_{mik} \geq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^n x_{ijk}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{mik} - \sum_{i=1}^n z_{imk} = 0, \quad \forall k = \overline{1, v}, \quad \forall m = \overline{1, d} \quad (5.10)$$

$$\sum_{m=1}^d y_{mik} + \sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.11)$$

$$\sum_{j=1 \text{ et } i \neq j}^n x_{ijk} + \sum_{m=1}^d z_{imk} = 1, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.12)$$

si:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^n (s_i + t_{ij}) x_{ijk} = T_{\text{tournée}} \text{ et } y_{mik} = 1 \Rightarrow z_{jmk} = 1, \quad \forall k = \overline{1, v}, \quad \forall u = \overline{1, n}, \quad \forall m = \overline{1, d} \quad (5.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall j = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.14)$$

$$y_{mik} \in \{0, 1\}, \quad \forall m = \overline{1, d}, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.15)$$

$$z_{imk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall m = \overline{1, d}, \quad \forall k = \overline{1, v} \quad (5.16)$$

- L'inéquation (5.1) représente la fonction objectif du modèle. Elle contient trois termes à minimiser qui sont : nécessaire pour voyager entre le dépôt et les premiers clients, le coût nécessaire pour voyager entre les clients, le coût et le coût nécessaire pour voyager entre les derniers clients et les dépôts dans chaque itinéraire.
- La contrainte (5.2) impose que chaque nœud $i \in N$ soit visité au moins une fois.

- La contrainte (5.3) représente la loi de conservation des flux ; le nombre de véhicules entrant dans un nœud $i \in N$ doit être égale au nombre de véhicules sortant de ce même nœud.
- La contrainte (5.4) est la contrainte d'élimination des sous-tours.
- La contrainte (5.5) assure la satisfaction de la demande de chaque nœud $i \in N$.
- Les contraintes (5.6), (5.7) et (5.8) représentent les contraintes temporelles. La contrainte (5.6) impose que temps totale d'une tournée ne doit pas dépasser un certain nombre d'heures précis, qui représente le temps total de la conduite d'un chauffeur. La contrainte (5.7) et (5.8) indiquent que le service dans le nœud $i \in N$ doit se faire à l'intérieure de l'intervalle défini par fenêtre du temps $[e_i, l_i]$.
- La contrainte (5.9) s'assure qu'une arête $(i, j) \in E$ ne peut pas être franchie par le véhicule $k \in K$ à moins que ce véhicule ne quitte le dépôt.
- La contrainte (5.10) est liée au départ et à l'arrivée de chaque tournée. Elle assure que chaque tournée commence d'un dépôt unique et se termine au même dépôt.
- Les contraintes (5.11) et (5.12) conduisent à servir tous les clients en s'assurant que pour chaque période de temps, le véhicule $k \in K$ ne peut effectuer qu'un seul dépassement. Les déplacements possible sont soit :
 - Du dépôt vers un client.
 - D'un client avec un autre client.
 - D'un client vers le dépôt.
- La contrainte (5.13) impose que chaque véhicule retourne à son dépôt de départ après la fin de sa tournée.
- Les contraintes (5.14), (5.15) et (5.16) représentent les contraintes d'intégrité (c'est-à-dire la définition des types variables utilisés).

III.1.3.3 La complexité du modèle

Note modèle est un modèle hybride qui regroupe les caractéristiques du PDPTW, SDVRP et le MDVRP. Nous avons également rajouté aux contraintes des modèles précédents d'autres contraintes d'ordre temporel. De ce fait, notre modèle est, par évidence, de complexité NP-difficile car il représente une hybridation des problèmes de nature NP-difficile.

III.1.3.4 La vérification du modèle

La vérification du modèle est une étape qui consiste à vérifiés les résultats avec un simple déroulement ayant pour but de voir si la solution affichée est réalisable dans notre exemple de simulation. Dans le cas contraire, il convient de revoir l'ensemble des contraintes formulées dans le modèle, de les modifier selon le besoin, et de vérifier encore si elles interprètent intégralement les contraintes réelles.

Pour ce faire nous avons vérifié le modèle en utilisant le logiciel CPLEX [ANNEXE5]. Comme le problème est NP-difficile et sa résolution demande un long temps de calcul, nous avons pensé à relaxer le modèle pour pouvoir le vérifier. Nous avons donc testé le modèle en imposant certaines conditions aux limites. En effet, en mathématiques, une condition aux limites est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations ou alors sur certaines données du problème. Il existe un grand nombre de conditions aux limites possibles, en fonction de la formulation du problème, du nombre de variables en jeu, et de manière plus importante de la nature de l'équation que nous voulons vérifier. Dans notre cas, les conditions limites sont les conditions sur les fenêtres de temps, nous avons supposé que les clients sont toujours ouverts et peuvent être desservis à tout moment. Mathématiquement, cela revient à supposer que les bornes des fenêtres temporelles sont infinies: $[e_i, l_i] =]\infty, \infty[$. Nous avons effectué ce test sur un échantillon de 5 sommets client et 2 dépôts avec des demandes comprises entre 1 et 4 demandes.

Les résultats de la simulation obtenus sont représentés dans la figure suivante :

```

1 /*.....
2 * OPL 12.5 Model
3 * Author: Acer
4 * Creation Date: 29 juin 2019 at 03:14:59
5 *.....
6 /*.....*Déclaration:.....*/
7 //Parametre:
8 int Nbrclient=...;
9 int Nbrvehicule=...;
10 int S1=...;
11 range client=1..Nbrclient;
12 range vehicule=1..Nbrvehicule;
13 range S=1..S1;
14 int distance[client][client]=...;
15 int demande[client]=...;
16
17 int Nbrdepot=...;
18 range depot=1..Nbrdepot;
19 int distance[depot][client]=...;
20 int distancea[client][depot]=...;
21
22
23 //Variable de décision:
24 dvar boolean x[client][client][vehicule];
25 dvar boolean y[depot][client][vehicule];
26 dvar boolean z[client][depot][vehicule];
27
28
29 /*.....
30
31
32 /*.....Le modèle Mathématique: .....*/
33 //Fonction objectif:

```

Figure 34: Test de vérification: déclaration des paramètres et des variables de décision

mais qui n'est pas nécessairement très optimale en termes de rentabilité. Par la suite nous avons optimisé cette solution en utilisant une métaheuristique.

III.2.1 Construction d'une solution initiale

L'utilisation de la plupart des métaheuristicques, ou du moins celles que nous avons présenté dans ce document, exige l'existence d'une solution initiale, qui sera optimisée par l'algorithme de la métaheuristique. Dans un premier temps nous avons utilisé l'heuristique proposée par (Federgruen et Simchi-Levi, 1995). Les auteurs considèrent qu'un client dont la demande est dq_i est équivalente à celle de q clients dont la demande de chacun est égale à une unité (dans notre cas : une unité est égale à un camion), qui se trouvent tous au même endroit. En terme algorithmique, nous avons dupliqué chaque sommet de façon à ce que le nombre de sommets dupliqués est égale à la demande du sommet initial; ces sommets se trouvent tous en même endroit, cependant la distance entre eux est infinie.

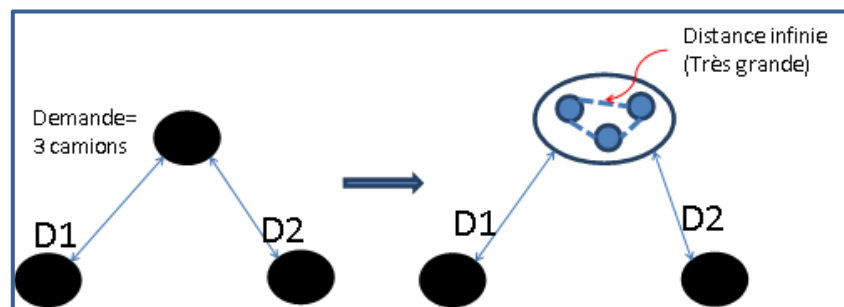


Figure 37: Heuristique de Federgruen et Simchi-Levi (1995).

Ensuite nous avons combiné cette heuristique avec deux autres heuristiques, et nous avons effectué un test sur 16 sommets pour comparer les résultats trouvés par chacune. Les deux heuristiques en question sont : *the parrallelcheapest insertionheuriscet method of Christofides*. Ces heuristiques appartiennent à une famille d'heuristique nommée « heuristique de construction ».

Les heuristiques de construction sont généralement le moyen le plus rapide de trouver des solutions réalisables à un problème proposé. De telles solutions ne sont généralement pas aussi bonnes que les solutions fournies par d'autres heuristiques. Car une heuristique de construction est un algorithme qui détermine une tournée selon certaines règles de construction, mais qui ne cherche pas à améliorer cette tournée. Les tournées sont construites successivement et les parties déjà construites restent inchangées tout au long de l'algorithme.

C'est pourquoi l'heuristique de construction est principalement utilisée lorsqu'il s'agit de trouver rapidement une solution relativement bonne à un problème ou de fournir des solutions initiales afin d'être amélioré par des métaheuristicques.

Généralement, une heuristique de construction peut être divisée en différentes phases, commençant par une phase d'initialisation, se poursuivant par une boucle sur les phases de sélection et de placement jusqu'à ce que certaines conditions soient remplies qui est la satisfaction de toutes les demandes dans notre cas.

III.2.1.1 CHEAPEST INSERTION heuristique

Cette heuristique de construction repose sur une méthode d'insertion (Lehuédé, 2015). Chaque tour est construit en insérant de nouveaux nœuds dans des sous-tours, c'est-à-dire des tours partiels.

La stratégie de l'heuristique est de trouver, parmi tous les nœuds non encore insérés, un nœud dont l'insertion entraîne la plus faible augmentation de la distance parcouru.

A chaque étape d'insertion l'algorithme doit choisir :

- Le nœud suivant à insérer.
- Où insérer le nœud choisi.

III.2.1.1.1 L'algorithme

Étape 1 : Sélectionner un nœud arbitraire i comme nœud de départ.

Étape 2 : Trouver un nœud j le plus proche de i . Former un sous-tour $T = i-j-i$.

Étape 3 : Trouver une arête $[i,j]$ du sous-tour T et un nœud k qui n'est pas dans le sous-tour, de sorte que l'augmentation de la longueur $\Delta f = c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$ soit minimisée. Modifier le sous-tour en insérant k entre i et j .

Étape 4 : Passer à l'étape 3 jusqu'à ce qu'un cycle hamiltonien se forme.

Étape 5 : renvoyer la valeur minimale de la distance parcourue.

III.2.1.1.2 Un exemple

Les inputs :

Soit un graphe complet $G = (A, E)$. Avec : $A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$

Soit B une matrice des distances tel que :

	1	2	3	4	5
1	/	7	3	9	9
2	7	/	6	7	10
3	3	6	/	5	6
4	9	7	5	/	5
5	9	10	6	5	/

Le déroulement de l'algorithme :

Le premier nœud $i=1$.

Le nœud le plus près $j=3$: $T=1-3-1$.

L'arrête 1-3, insertion nœud :

$$2 : \Delta f = c_{12} + c_{23} - c_{13} = 7 + 6 - 3 = 10 \quad \text{distance minimale}$$

$$4 : \Delta f = c_{14} + c_{43} - c_{13} = 9 + 5 - 3 = 11$$

$$5 : \Delta f = c_{15} + c_{53} - c_{13} = 9 + 6 - 3 = 12$$

$k=2$: $T=1-2-3-1$

$$1-2, \text{ insertion nœud } 4 : \Delta f = c_{14} + c_{42} - c_{12} = 9 + 7 - 7 = 9$$

$$1-2, \text{ insertion nœud } 5 : 2 : \Delta f = c_{15} + c_{52} - c_{12} = 9 + 10 - 7 = 12$$

$$2-3, \text{ insertion nœud } 4 : \Delta f = c_{24} + c_{43} - c_{23} = 7 + 5 - 6 = 6 \quad \text{distance minimale}$$

$$2-3, \text{ insertion nœud } 5 : \Delta f = c_{25} + c_{53} - c_{23} = 10 + 6 - 6 = 10$$

$$3-1, \text{ insertion nœud } 4 : \Delta f = c_{34} + c_{41} - c_{31} = 5 + 9 - 4 = 10 \quad \text{distance minimale}$$

$$3-1, \text{ insertion nœud } 5 : \Delta f = c_{35} + c_{51} - c_{31} = 6 + 9 - 4 = 11$$

$k=4$: $T=1-2-4-3-1$

Le dernier nœud 5 : l'insertion optimale de 4-3

$k=5$: $T=1-2-4-5-3-1$

$f=30$

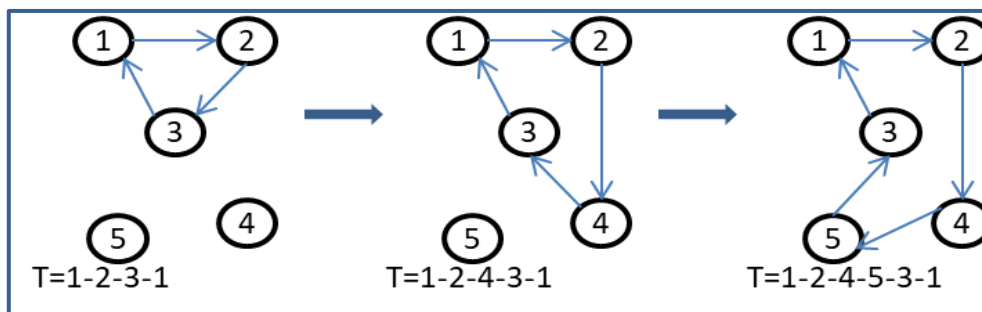


Figure 38: Exemple de l'algorithme de CHEAPEST INSERTION (Lehuédé, 2015).

III.2.1.1.3 Résultat obtenu par l'heuristique sur notre échantillon

Nous avons utilisé cette heuristique pour trouver une solution faisable. Le test a été effectué sur un échantillon de 16 sommets. Nous avons fixé des demandes entre 20 et 30 camions pour chaque sommet, nous avons donc 372 sommets à manipuler.

La solution était trouvée au bout de 12 secondes. Dans cette solution 84 véhicules ont été mobilisés et la distance totale parcourue était de 79030km.

```
Maximum of the route distances: 1480km
sum of dist: 79030
num of vehicles: 84
```

Figure 39: Résultat obtenu en utilisant CHEAPEST INSERTION.

III.2.1.2 Christofides

Christofides est une heuristique qui appartient aux algorithmes d'approximation. Les algorithmes d'approximation sont des algorithmes efficaces qui trouvent des solutions approximatives aux problèmes d'optimisation NP-difficile avec des garanties prouvables sur la distance de la solution retournée par rapport à la distance retournée par la solution optimale.

III.2.1.2.1 L'algorithme

Étape 1 : Trouver un arbre couvrant un cout minimum T dans A . [ANNEXE6].

Étape 2 : Identifier l'ensemble W des sommets ayant un degré impair en T .

Étape 3 : Trouver un poids minimum de couplage M de nœuds à partir de W dans A .

Étape 4 : Fusionner le graphe T et M pour former un multi-graphe V dans lequel nous trouvons un circuit eulérien L .

Étape 5 : Transformer le circuit eulérien L en circuit hamiltonien H .

III.2.1.2.2 Exemple :

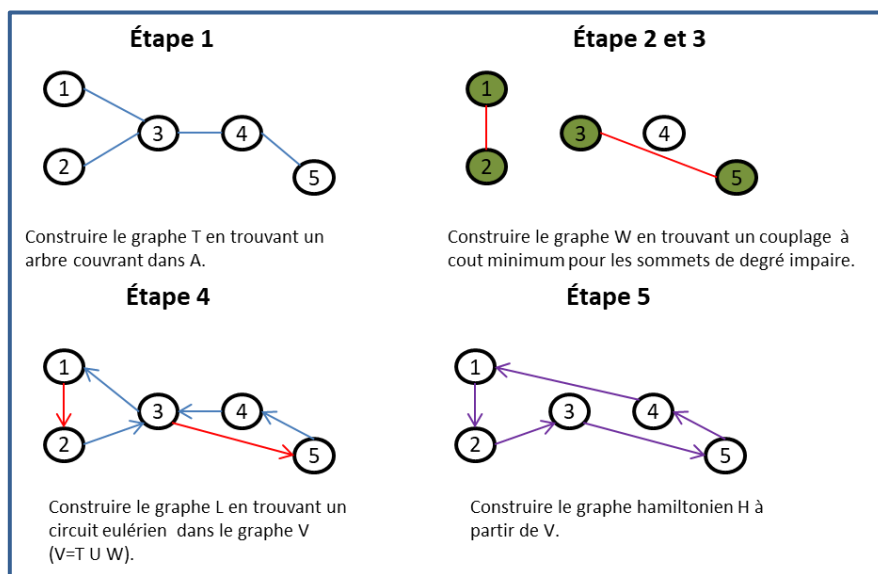


Figure 40: Exemple du déroulement de CRISTOPHIDES algorithme.

III.2.1.2.3 Résultat du test

Nous avons utilisé cette heuristique pour trouver une autre solution faisable. Nous avons effectué sur le même échantillon : un échantillon de 16 sommets avec des demandes entre 20 et 30 camions pour chaque sommet.

La solution était trouvée au bout de 41 secondes. Dans cette solution 87 véhicules ont été mobilisés et la distance totale parcourue était de 75731 km.


```
Maximum of the route distances: 1444km
sum of dist: 75731
num of vehicles: 87
```

Figure 41: Résultat obtenu en utilisant CRISTOPHIDES.

III.2.2 Optimisation de la solution initiale par Guided Local Search

III.2.2.1 Description de l'algorithme GLS

La recherche locale guidée (GLS) est un algorithme métaheuristique utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Il a été appliqué à un nombre non négligeable de problèmes, notamment les problèmes de transport, et il a obtenu d'excellents résultats. Son efficacité se reflète sur sa rapidité de résolution ainsi que sur la qualité des solutions.

Le principe de cet algorithme est d'aider la recherche locale pour échapper à des optima locaux. L'idée de base est d'augmenter la fonction objective avec des sanctions, qui dirige la recherche loin des optimums locaux. GLS consiste à utiliser une technique de recherche locale dans laquelle la fonction objectif varie durant le processus de recherche. Le but étant de rendre les minima locaux déjà visités moins attractifs. Le principe est illustré par la ci-dessous :

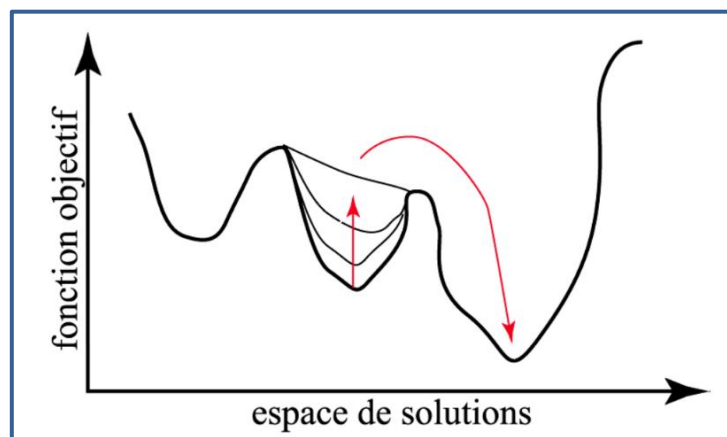


Figure 42: la stratégie de la méthode GLS pour explorer l'espace des solutions.

III.2.2.2 L'algorithme du GLS

Pour échapper aux minimums locaux la procédure est la suivante : soit $\{A_1, \dots, A_m\}$ un ensemble de m attributs utilisés pour discriminer les solutions de S . Pour le problème du voyageur de commerce, on peut par exemple associer un attribut à chaque arête du graphe et dire qu'une tournée possède l'attribut A_e si l'arête e fait partie de la tournée. Soit w_i le poids de l'attribut A_i et soit $\delta_i(s)$ une variable qui vaut 1 si s possède l'attribut A_i , et 0 sinon. La Recherche Locale Guidée utilise la fonction objectif suivante :

$$f'(s) = f(s) + \lambda \sum_{i=1}^m w_i \delta_i(s)$$

Où λ est un paramètre qui permet de faire varier l'importance du deuxième terme de cette fonction. On peut modifier les poids w_i au cours de l'algorithme. En règle général, lorsqu'on se déplace d'une solution s vers une solution voisine s' , on augmente le poids des attributs de s' . Il existe de différentes stratégies de modifications de poids qui varient selon la nature du problème à résoudre.

L'algorithme du GLS est donné comme suit :

Étape 1: Choisir une solution $s \in S$; Poser $s^* := s$;

Étape 2: Tant qu'aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire:

Appliquer une Recherche Locale à s avec f' comme fonction objectif;

Soit s' la solution ainsi obtenue ;

Mettre à jour les poids w_i ;

Poser $s := s'$;

Si $f(s) < f(s^*)$ alors poser $s^* := s$;

Fin du tant que.

III.2.2.3 Adaptation de la métaheuristique à notre problème

Les métaheuristiques offrent de stratégie de réflexion. Elles représentent une certaine logique pour exploiter un large champ de solution possible. Cependant, il faut adapter les paramètres de la métaheuristique selon la problématique étudiée.

Pour les problèmes de tournée, GLS peut être présenté comme suit :

Un attribut est associé à chaque arête du graphe et dire qu'une tournée possède l'attribut A_e si l'arête e fait partie de la tournée, 0 sinon.

- L'équation pour régler λ est de : $\lambda = \alpha \frac{\text{cost}(\text{optima})}{N}$
 - N est le nombre de villes.
 - $\text{cost}(\text{optima})$ est le coût d'un optimum local trouvé par une recherche locale.
 - α une pondération avec $\alpha \in [0,1]$.
- La fonction d'utilité pour les arêtes est de : $U_{\text{arete}} = \frac{D_{\text{arete}}}{1+P_{\text{arete}}}$
 - U_{arete} est l'utilitaire pour sanctionner une arête (maximisation).
 - D_{arete} est le coût de l'arête (distance entre les villes).
 - P_{arete} est la pénalité actuelle pour le bord.
- Le critère d'arrêt peut être soit un temps d'exécution limite ou un nombre prédéfini d'itération.

Dans notre cas, nous n'avons pas calibré tous ces paramètres. Nous avons travaillé avec OR_TOOLS qui est une bibliothèque prédéfinie conçue spécialement pour résoudre les problèmes difficiles notamment en matière de routage de véhicules, de flux, de programmation linéaire et entière et de programmation par contraintes.

III.2.2.4 Résultats obtenus avec GLS

Le test de la métaheuristique a été fait sur le même échantillon que celui des tests précédant : un échantillon de 16 sommets avec des demandes entre 20 et 30 camions pour chaque sommet et donc 376 sommets au total. Nous avons choisi un critère d'arrêt temporel. L'algorithme prend donc 2 heure de temps de résolution avant de renvoyer une quelconque solution.

Le premier test était fait en combinant l'heuristique de Cheapest Insertion avec GLS :

La solution était trouvée au bout de 2h et 12 secondes. Dans cette solution 83 véhicules ont été mobilisés et la distance totale parcourue était de 78979 km.

```
Maximum of the route distances: 1444km  
sum of dist: 78979  
num of vehicles: 83
```

Figure 43: Résultat obtenu en combinant CHEAPEST INSERTION+ GLS.

Le premier test était fait en combinant l'heuristique de CHRISTOFIDES avec GLS :

La solution était trouvée au bout de 2h et 41 secondes. Dans cette solution 86 véhicules ont été mobilisés et la distance totale parcourue était de 75312 km.

```
Maximum of the route distances: 1444km  
sum of dist: 75312  
num of vehicles: 86
```

Figure 44: Résultat obtenu en combinant CRISTOPHIDES+ GLS.

III.2.3 Evaluation des algorithmes utilisés

Table 7: Un tableau illustrant les résultats obtenus pour l'ensemble des tests.

Méthode	temps de résolution	Distance totale parcourue	Nombre de véhicule utilisé
Cheapest insertion	12 secondes	79030km	84
Christofides	41 secondes	75731 km	87
Cheapest insertion + GLS	2h et 12 secondes	78979 km	83
Christofides + GLS	2 heures et 41	75312 km	86

- La valeur ajoutée de l'utilisation de la métaheuristique :

$$indicateur1_{\text{Cheapest insertion/Cheapest insertion+GLS}} = \frac{79030 - 78979}{79030} \approx 0,064\%$$

$$indicateur2_{\text{Christofides/Christofides+GLS}} = \frac{75731 - 75312}{75731} \approx 0.55\%$$

Nous remarquons que l'utilisation d'une métaheuristique entraîne une amélioration quelle que soit l'heuristique utilisée. Cependant, cette amélioration diffère entre les deux cas. Nous notons, une optimisation de 0,064% pour Cheapest insertion heuristique. Cette amélioration est équivalente à 51km et une baisse de 3 060 DA des couts. Tandis qu'avec Christofides, nous notons une optimisation de 0.55% . Cette amélioration est équivalente à 419 km.

- La performance des heuristiques utilisées :

$$indicateur3_{\text{Christofides/Cheapest insertion}} = \frac{79030 - 75731}{79030} \approx 4.17\%$$

Ce résultat prouve que l'heuristique de Christofides est beaucoup plus performante que Cheapest insertion. En effet, Christofides améliore résultat avec un pourcentage de 4.17% ; cela est équivalent à minimiser 3 299 km la distance parcourue.

- L'influence de la solution initiale :

$$indicateur4_{\text{Christofides+GLS/Cheapest insertion+GLS}} = \frac{78979 - 75312}{78979} \approx 4,6\%$$

D'après ce ratio, nous pouvons constater que la solution initiale influence considérablement le résultat de la solution optimisée. En effet, en utilisant une même métaheuristique GLS avec des solutions initiales différentes, nous avons obtenu une différence de 3 667 km qui représente une augmentation de distance de 4,6%.

D'après ces indicateurs, la combinaison entre l'algorithme de Christofides et GLS semble être la méthode qui donne le meilleur résultat.

A la fin de cette partie, et d'après nos recherches et les résultats de simulation obtenus, nous avons pu résoudre notre modèle mathématique en utilisant les algorithmes qui donne le meilleur résultat. Nous avons opté pour un algorithme combiné. Dans un premier temps nous avons utilisé l'heuristique de Federgruen et Simchi-Levipour pour transformer le problème en un problème de VRP classique, par la suite nous avons appliqué l'algorithme de Christofides pour trouver une solution initiale. Et finalement nous avons utilisé GLS métaheuristique pour améliorer les résultats et trouver une bonne solution dans un temps de résolution plutôt acceptable.

III.3 Présentation de l'outil

Cette partie du chapitre sera dédié principalement à la présentation de l'outil conçu. Dans l'étape précédente, nous avons expliqué les différentes heuristiques et métaheuristique utilisées pour le codage de notre algorithme. Cependant, dans cette étape nous allons présenter notre outil d'un angle moins technique. En effet, nous allons commencer par expliquer son architecture globale et nous terminons par montrer son mode de fonctionnement à travers un exemple illustratif.

III.3.1 L'architecture de l'outil

Notre outil est une combinaison de trois algorithmes, comme il est illustré par la;

Le premier algorithme est utilisé pour faire entrer les données nécessaires. Il se compose de deux étapes : la première est de faire entrer le nombre total d'OT, la deuxième consiste à démarrer une boucle afin de saisir les informations de chaque OT.

Le deuxième algorithme sert à transformer les données. Il permet de construire les sommets composés et mettre les données sous un format adéquat.

Le troisième algorithme permet de résoudre le modèle. Il comporte globalement trois grandes étapes. La première étape consiste à trouver une solution initiale, la deuxième étape améliore la solution trouvée, et enfin la dernière étape permet d'afficher les résultats.

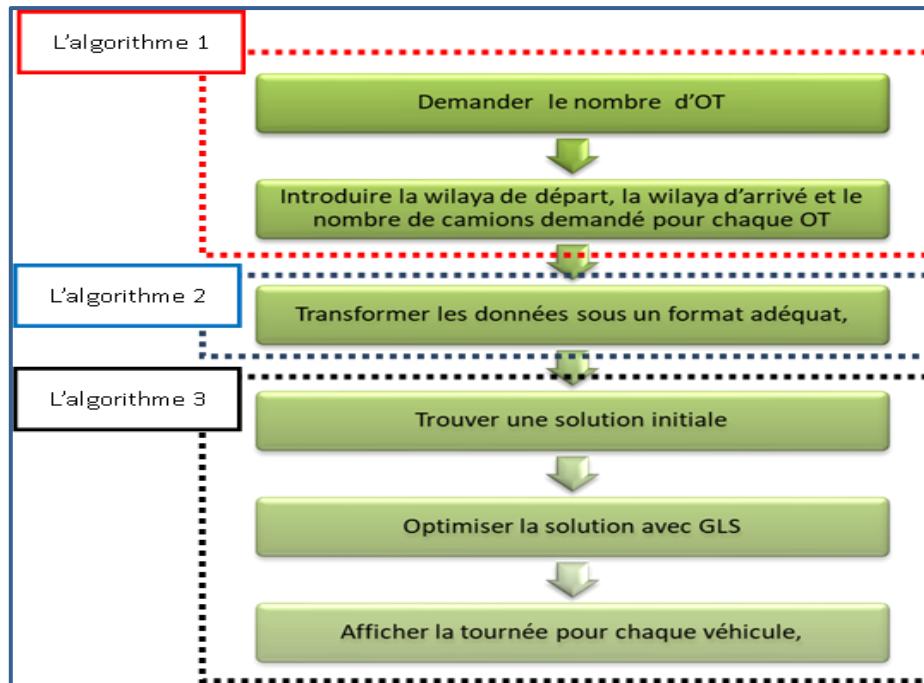


Figure 45:Architecture globale de l'algorithme.

III.3.2 Exemple illustratif

Après avoir présenté l'architecture globale de l'algorithme, nous allons à présent s'intéresser à la façon de son utilisation. L'interface est conçue d'une manière à ce que son utilisation soit très simple. Il suffirait de suivre les instructions de chaque étape pour parvenir à maîtriser l'outil.

Pour montrer cela nous prenons un exemple. Il s'agit de 4 OT :

- D'Alger vers Blida avec une demande de 15 camions.
- De Jijel vers Skikda avec une demande de 14 camions.
- De Telmcen vers Oran avec une demande de 5 camions.
- De Bouira vers Tizi avec une demande de 8 camions.

Nous introduisons les données comme suit :

[code_wilaya_départ, code_wilaya_départ, la quantité]

Le premier OT sera introduit ainsi : 16,9,15

```

File Edit View Navigate Code Refactor Run Tools VCS Window Help
untitled algo2.py
Project C:\Users\Acer\Desktop\untitled
  results
  venv library root
  --lock_data_algo.csv# main()
Terminal Local +
Microsoft Windows [version 10.0.17134.629]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

(venv) C:\Users\Acer\Desktop\untitled>python vrp.py
Nombre d'ordres de transport
4
Ecrire l'ordre de transport sous le format (wilaya de depart,wilaya d'arrivee ,demande)
exemple: Si la demande est de Alger vers Batna avec une demande = 9 alors veuillez ecrire 16,5,9
Entrez l'OT n° 1
16,9,15
Entrez l'OT n° 2
18,21,14
Entrez l'OT n° 3
13,31,5
Entrez l'OT n° 4
10,15,8
  
```

Figure 46: Démonstration (1) : l'introduction des OT.

La prochaine étape, consiste à introduire le temps maximal d'une tournée ainsi qu'un temps de total de résolution.

```

untitled (C:\Users\Acer\Desktop\untitled) - ...\algo2.py [untitled] - PyCharm
File Edit View Navigate Code Refactor Run Tools VCS Window Help
untitled algo2.py
Project C:\Users\Acer\Desktop\untitled
  results
  venv library root
  --lock_data_algo.csv# main()
Terminal Local +
Microsoft Windows [version 10.0.17134.629]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

(venv) C:\Users\Acer\Desktop\untitled>python vrp.py
Nombre d'ordres de transport
4
Ecrire l'ordre de transport sous le format (wilaya de depart,wilaya d'arrivee ,demande)
exemple: Si la demande est de Alger vers Batna avec une demande = 9 alors veuillez ecrire 16,5,9
Entrez l'OT n° 1
16,9,15
Entrez l'OT n° 2
18,21,14
Entrez l'OT n° 3
13,31,5
Entrez l'OT n° 4
10,15,8
2263
Entrez un temps de tournée maximale supérieure à 60 B
60
Donnez un temps de résolution en minute
4
  
```

Figure 47: Démonstration (2): l'introduction des contraintes temporelles.

Après ces deux étapes, nous lançons l'algorithme :

```

untitled | algo2.py
Project | data_info.csv | algo2.py | --lock_data_info.csv# | --lock_data_algo.csv# | --lock_tab_dist.csv# | --lock_test.csv# | data_algo.csv#
C:\Users\Acer\Desktop\untitled | main()
Terminal: Local | +
Cost of the route: 14280 DA
Time of route: 23 h
Sum of srvc of route: 19 h

Route for vehicle 97
(16, 16) -> (16, 9) -> (16, 16)
Distance of the route: 44 km
Cost of the route: 2640 DA
Time of route: 8 h
Sum of srvc of route: 8 h

Route for vehicle 104
(16, 16) -> (16, 9) -> (16, 16)
Distance of the route: 44 km
Cost of the route: 2640 DA
Time of route: 8 h
Sum of srvc of route: 8 h

sum of dist: 5750 km
total cost: 345000 DA
num of vehicles: 42

(venv) C:\Users\Acer\Desktop\untitled>

```

Figure 48: Démonstration (3) : affichage des résultats

L’algorithme retourne un plan de transport optimal, qui spécifie pour chaque véhicule utilisé :

- Le nombre de kilomètre parcouru à vide.
- Le cout de la tournée.
- Le CA de la tournée.

Ces données permettront à Numilog d’avoir une visibilité assez fiable sur le résultat de son activité.

III.4 La validation du modèle

III.4.1 La validation du modèle

La validation du modèle consiste à prouver que les plans de transport donnés par l’algorithme sont de qualité meilleure ou égale par rapport à celle des plans de transport effectivement effectués.

Pour ce faire, nous avons utilisé l’historique des demandes du 04/06/2019 et limité le temps de résolution à 2h. Cependant, nous ne pouvons pas mettre les résultats obtenus pour des raisons de confidentialité.

Pour mesurer l’apport de notre outil d’aide à la décision sur la rentabilité de Numilog nous avons calculé le l’indicateur suivant :

$$\text{Taux de marge}_{\text{modèle}} = \frac{\text{chiffre d'affaire} - \text{cout total}}{\text{chiffre d'affaire}}$$

Après nos calculs l’indicateur est évalué à : **Taux de marge_{modèle} ≈ 16%**

Tandis que le taux de marge fixée par Numilog est de 10%.

D'après ces résultats, il est opportun de dire que tous les cas d'applications que nous avons exécutés sur le modèle élaboré, ont permis de mettre en valeur son aptitude à répondre au besoin d'optimisation des flux de Numilog.

III.4.2 Perspectives de l'étude

Comme tout travail, la solution proposée peut faire l'objet d'une amélioration. C'est dans ce sens que nous suggérons deux axes d'amélioration. Le premier consiste à augmenter la capacité de traitement de l'outil, et le deuxième axe porte sur la forme finale sous laquelle le modèle est présenté.

- La première suggestion est une proposition d'augmentation de capacité de traitement:

Bien que le modèle que nous avons développé répond parfaitement au besoin de Numilog, mais le codage algorithmique présente certaines limites. En effet, ce dernier ne peut traiter qu'un certain nombre de demande, il convient alors d'utiliser des algorithmes heuristiques plus puissants afin de pouvoir trouver une solution initiale pour un nombre important de de demande.

- La deuxième suggestion est une proposition d'amélioration de forme:

Actuellement, pour utiliser notre outil, l'utilisateur doit entrer les demandes, suivant une certaine nomenclature, manuellement sur la console de Python. Ensuite remplir les autres paramètres temporels, pour avoir enfin le plan de transport affiché sur l'interface Python.

C'est une procédure qui pourrait bien être complétée par le développement d'une application qui injecte directement automatiquement les demandes à partir d'un fichier Excel, et ce dans le but de rendre l'utilisation du modèle beaucoup plus pratique. Il serait également recommandable de développer une interface graphique pour mieux visualiser les résultats.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué notre approche de résolution en trois parties. Dans la première section, nous avons analysé les étapes du processus de prise de décision qui permet d'aboutir à l'élaboration d'un plan de transport. Cette analyse nous a permis de classer les chemins empruntés en deux catégories :

- Un chemin choisi.
- Un chemin imposé.

En utilisant ce constat, nous avons construit un algorithme qui nous permet d'éliminer les contraintes de précédences. La dernière étape de cette partie, consistait à créer un modèle mathématique adapté à notre nouvelle approche.

La deuxième section de ce chapitre était consacrée à l'explication des algorithmes de résolution. Dans un premier temps nous avons utilisé CHEAPEST INSERTION heuristique et CRISTOPHIDES heuristique pour trouver une solution initiale. Dans un second temps, nous avons utilisé GUIDED LOCAL SEARCH pour optimiser la solution. Nous avons justifié nos choix concernant les algorithmes utilisés par le calcul d'un certain nombre d'indicateurs obtenus après avoir effectué plusieurs tests sur un échantillon de 16 sommets.

La troisième section, a porté sur la présentation de la conception de l'outil d'aide à la décision. Nous avons commencé par décrire l'architecture globale de l'outil et ensuite nous avons présenté un exemple pour illustrer son mode de fonctionnement.

La dernière section était consacrée à la validation du modèle et à la suggestion de certaines pistes d'amélioration afin d'optimiser l'outil.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La pérennité d'une entreprise réside dans la maîtrise de ses couts. C'est le point cardinal. Et c'est autour de ce point que tout notre travail ait gravité.

Optimiser les flux de transport requiert une organisation souple, des méthodes scientifiques et des moyens adéquats.

Notre travail de recherche au niveau de NUMILOG nous a révélé l'absence d'outil informatique d'aide à la décision qui permet justement de bien organiser les rotations des moyens de transport et ce à moindre cout et juste à temps.

Pour répondre à cette problématique très complexe du fait de l'absence d'une méthode existante dans la littérature, nous avons développé notre propre méthode de résolution. Cette approche de résolution est innovante et adaptée aux contraintes de Numilog. Nous avons analysés les étapes détaillées du processus décisionnel d'élaboration de tournées. Cette analyse nous a permis de classer les chemins empruntés dans chaque tournée en deux catégories : des chemins choisis et d'autre imposé.

Nous avons utilisé ce résultat comme une base de notre méthode. Nous avons donc regroupé la wilaya de départ et celle d'arrivé d'une même demande de façon à avoir à manipuler que les itinéraires qui peuvent être choisis, éliminant ainsi toutes les contraintes de précédences, c'est-à-dire les contraintes qui impose à chaque véhicule de visiter la wilaya dans laquelle se fait le ramassage de la marchandise avant de visiter celle dans laquelle se fait la livraison de cette même marchandise. Pour se faire, avons dû développer un algorithme qui permet de transformer les données et les mettre sous un format adéquat. Dans cet algorithme, nous manipulons des matrices de l'ordre $[2263] \times [2263]$ l'équivalent de 5millions de données.

Par la suite, nous avons créé un modèle mathématique adéquat. Ainsi nous avons introduit ce modèle, décrit ses hypothèses et expliqué ses contraintes. Puis nous avons vérifié et validé le modèle et enfin prouvé qu'il était NP-difficile.

L'étape suivante consiste à résoudre le modèle proposé. Comme il s'agit d'un modèle très complexe qui n'admet pas de solution exacte dans un temps de calcul polynomial. Afin de le résoudre il fallait utiliser des méthodes de résolution approchées, qui donnent une solution relativement bonne dans un temps de calcul acceptable. La résolution du modèle s'est faite en deux étapes

- La première étape consistait à trouver une solution initiale du problème. Pour ce faire, nous avons combiné entre deux heuristiques : l'heuristique de Federgruen et Simchi-Levi et celle du *Christofides*.
- La deuxième étape consistait à améliorer la solution initiale en utilisant GLS métaheuristique.

Nous avons ensuite présenté notre outil d'aide à la décision. Nous avons décrit son architecture globale et expliqué son mode de fonctionnement à travers un exemple illustratif. Nous avons terminé par validé le modèle et présenté un ensemble de suggestion en vue d'améliorer l'outil.

De ce qui précède, nous pouvons affirmer que ce projet, malgré sa grande complexité, était une excellente opportunité pour nous d'apprendre sur un domaine qui nous ait été totalement inconnu. C'est un projet qui nous a permis de mettre en épreuve tout ce qu'on a appris durant notre cursus de formation d'ingénieur, partant de la capacité de comprendre et d'analyser le fonctionnement d'une entreprise, passant par la modélisation conceptuelle et mathématique, en arrivant au codage informatique. Et le plus important, notre formation en management d'innovation, nous a dotés de la capacité, et des outils nécessaires afin de pouvoir répondre aux besoins des entreprises d'une façon innovante.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- BELENGUER, J. M., Martinez, M. C., Mota, E. A Lower Bound for the Split Delivery Vehicle Routing Problem. *Operations Research* [en ligne].2000, vol. 48, n°5 [consulté le 16 Mai 2019]. p. 801-810. Disponible sur: <<https://www.jstor.org/stable/223032>>
- BODIN, L.D., BERMAN, L. Routing and Scheduling of School Buses by Computer. *Transportation Science* [en ligne].1979, vol. 13, n°2 [consulté le 28 Mai 2019]. p. 85-178. Disponible sur: <<https://doi.org/10.1287/trsc.13.2.113>>
- BOUZGARROU, Mohamed Ekbal. Parallélisation de la méthode du "Branch and Cut" pour résoudre le problème du voyageur de commerce. 121 p.
Thèse de doctorat: Recherche Opérationnelle: Paris, Institut d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble: 1998.
- BORNE, P., DAUPHIN-TANGUY, G., RICHARD, J.P., ROTELLA, F., ZAMBETTAKIS, I. Commande et optimisation des processus: Méthodes et Pratiques de l'Ingénieur-1. Paris: Technip, 1998, 303 p. ISBN 9782710805991.
- CLAUSEN, J. Branch and Bound Algorithms Principles and Examples. Review paper [en ligne] 1999, 26 p. Disponible sur: <<https://imada.sdu.dk/~jbj/heuristikker/TSPtext.pdf>>
- CLARKE, G., Wright, J.W. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research* [en ligne].1964, vol. 12, n°4 [consulté le 01 Mai 2019]. p. 519-643. Disponible sur: <<https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>>
- DREO, J., PETROWSKI, A., SIARRY, P., TAILLARD, E. Méthodes heuristiques pour l'optimisation difficile. EYROLLES edition: Paris, 2005, 300 p.
- DROR, M., LAPORTE, G., TRUDEAU, P. Vehicle routing with split deliveries. *Discrete Applied Mathematics* [en ligne].1994, vol. 50, n°3 [consulté le 28 Mai 2019]. p. 239-254.
Disponible sur: <[10.1016/0166-218X\(92\)00172-I](https://doi.org/10.1016/0166-218X(92)00172-I)>
- DROR, M., LAPORTE, G., TRUDEAU, P. I. Vehicle Routing with Stochastic Demands: Properties and Solution Frameworks. *Transportation Science* [en ligne].1989, vol. 23, n°3 [consulté le 28 Mai 2019]. p. 166-176.
Disponible sur: <[http://dx.doi.org/10.1287/trsc.23.3.166](https://dx.doi.org/10.1287/trsc.23.3.166)>
- 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]. p. 297-373.
Disponible sur: <[https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80108-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80108-2)>
- 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* [en ligne].2002, vol. 53, n°9 [consulté le 21Avril 2019]. p. 977-984.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601426>>

- GOLDEN, B., ASSAD, A., LEVY, L., GHEYSENS, F. The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* [en ligne].1984, vol. 11, n°6 [consulté le 20 Mai 2019]. p. 49-66. Disponible sur: <[https://doi.org/10.1016/0305-0548\(84\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0305-0548(84)90007-8)>
- HADJICONSTANTINO, E., BALDACCI, R. A multi-depot period vehicle routing problem arising in the utilities sector. *Journal of the Operational Research Society* [en ligne].1998, vol. 49, n°12 [consulté le 23 Mai 2019]. p. 1239–1248.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors>>
- JUNG, S., HAGHANI, A., Genetic Algorithm for a Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Journal of the Transportation Research Board* [en ligne].2000, vol. 1733, n°1 [consulté le 01 Juin 2019]. p. 1–7. Disponible sur: <<https://doi.org/10.3141/1733-01>>
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research* [en ligne].1992, vol. 59, n°3 [consulté le 13 Juin 2019]. p. 345-358. Disponible: <[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C)>
- LE BOUTHILLIER, Alexandrer. UML-Modeling of a Cooperative Architecture applied to the Vehicle Routing Problem with Time Windows. 103 p.
Thèse de Master: Informatique: Montréal, Université de Montréal: 2000.
- LEHUÉDÉ, Fabien. Problèmes de Tournées de Véhicules avec Synchronisation et Optimisation Multicritère avec l'Intégrale de Choquet. 157 p.
Habilitation à Diriger les Recherches: Informatique: Nantes, Université de Nantes: 2015.
- LI, H.; LIM, A., RODRIGUES, B. *Solving the Pickup and Delivery Problem with Time Windows using "Squeaky Wheel" Optimization with Local Search*. American Conference on Information Systems AMCIS 2002 Proceedings: August 8-11, 2002, Dallas, Texas. 2335-2344. Disponible sur: <https://ink.library.smu.edu.sg/lkcsb_research/1963>
- LI, H., LIM, A. A Metaheuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *International Journal on Artificial Intelligence Tools* [en ligne].2003, vol. 12, n°2 [consulté le 16 Juin 2019]. p. 173-186.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1142/S0218213003001186>>
- LU, Q., DESSOUKY, M.M. A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with time windows. *European Journal of Operational Research* [en ligne].2006, vol. 175, n°2 [consulté le Avril 2019]. p. 672–687.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.012>>
- MULLASERIL, P.A., DROR, M., LEUNG, J. Split-Delivery Routeing Heuristics in Livestock Feed Distribution. *The Journal of the Operational Research Society* [en ligne].1997, vol. 48, n°2 [consulté le 10 Juin 2019]. p. 107-116.

- Disponible sur: <<https://www.jstor.org/stable/3010350>>
- NIAZY, N.-S., BADR, A. Complexity of Capacitated Vehicles Routing Problem Using Cellular Genetic Algorithms. *International Journal of Computer Science and Network Security* [en ligne].2012, vol. 12, n°2 [consulté le 01 Juin 2019]. p. 5–11.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.3141/1733-01>>
- REGO, C., ROUCAIROL, C. Le problème de tournées de véhicules : Etude et Résolution Approchée. p.90.
Rapport: Institut national de recherche en informatique et automatique INRIA: 1994.
- RENAUD, J., LAPORTE, G., BOCTOR, F.F., A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers & Operations Research* [en ligne].1996, vol. 23, n°3 [consulté le 26 Mai 2019]. p. 229-235.
Disponible sur: <[https://doi.org/10.1016/0305-0548\(95\)00026-P](https://doi.org/10.1016/0305-0548(95)00026-P)>
- RYAN, D.M., HJORRING, C., GLOVER, F. Extensions of the Petal Method for Vehicle Routeing. *Journal of the Operational Research Society* [en ligne].1993, vol. 44, n°3 [consulté le 01 Juin 2019]. p. 289-296.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1057/jors.1993.54>>
- SALHI, S., SARI, M. A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. *European Journal of Operational Research* [en ligne].1997, vol. 103, n°1 [consulté le 13 Mai 2019]. p. 95-112.
Disponible sur: <[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00253-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00253-6)>
- SESHADRI, A. Vehicle Routing Problems 101. *Opex Analytics Blog*. [en ligne].*Mars 2018*
Disponible sur: <<https://medium.com/opex-analytics/opex-101-vehicle-routing-problems-262a173f4214>>
- SIERKSMA, G., TIJSEN, G.A. Routing helicopters for crew exchanges on off-shore locations. *Annals of Operations Research* [en ligne].1998, vol. 76, n°0 [consulté le 10 Juin 2019]. p. 261–286.
Disponible sur: <<https://doi.org/10.1023/A:1018900705946>>
- SOL, M., SAVELSBERGH, M.W.P. A branch-and-price algorithm for the pickup and delivery problem with time windows. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1994, 23 p.
- SU, C.-T. Dynamic vehicle control and scheduling of a multi-depot physical distribution system. *Integrated Manufacturing Systems* [en ligne].1999, vol. 10, n°1 [consulté le 20 Avril 2019]. p. 56-65. Disponible sur: <<https://doi.org/10.1108/09576069910247609>>
- SUMICHRAS, R.T., Markham, I.S. A heuristic and lower bound for a multi-depot routing problem. *Computers & Operations Research* [en ligne].1995, vol. 22, n°10 [consulté le 20 Mai 2019]. p. 1047–1056. Disponible sur: < [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00083-K](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00083-K)>

ANNEXES

Annexe 1 : L'approche processus

L'approche processus est l'un des concepts de gestion. Elle s'est finalement formée au cours du siècle dernier, dans les années 80. Selon ce concept, toutes les activités de l'organisation sont considérées comme un ensemble de processus. Si vous voulez gérer l'entreprise, vous devez gérer les processus. L'approche processus est devenue un élément clé de l'amélioration de la qualité.

L'idée principale de l'approche processus est un concept de processus. Il existe différentes définitions de processus, mais on utilise généralement la définition de la norme ISO 9001. "Un processus - ensemble d'activités inter-reliées ou interactives qui utilisent des intrants pour obtenir un résultat escompté. Les étapes systématiques constituent une partie importante du processus. Les étapes du processus devraient pouvoir être répétées. Si les étapes sont aléatoires - ce n'est pas un processus.

- L'objectif de l'approche processus :

L'approche processus a été conçue pour créer des relations horizontales dans les organisations. Les unités et le personnel impliqués dans le même processus peuvent le coordonner eux-mêmes. Ils peuvent résoudre des problèmes sans avoir recours à la haute direction. L'approche par processus permet de résoudre les problèmes qui se posent et d'influencer le résultat plus rapidement.

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'agence 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.



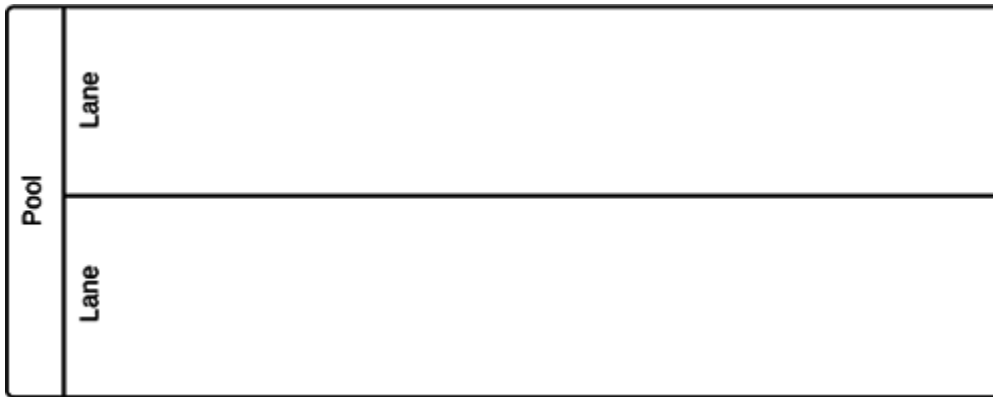
Symbole Flux de message : représente les messages d'un participant du processus à un autre.



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 3 : Le cube de Stern

Le Cube de Stern est un outil d'analyse des problèmes, il permet de classer les causes inhérentes à un dysfonctionnement. Cette méthodologie se décompose en plusieurs étapes :

Etape 1 :

Identifier un dysfonctionnement

Etape2 :

Identifier les causes pouvant expliquer le dysfonctionnement

Etape3 :

Analyser chaque cause selon quatre critères : l'urgence, l'importance, le pouvoir d'action, la capacité à trouver des solutions et puis attribuer pour chacun des critères une note entre 0 et 3.

Avec :

- URGENCE :

Est-il urgent ou non de traiter cette cause de dysfonctionnement ?

0-aucune urgence

1-une certaine urgence

2-très urgent

3-la plus extrême urgence

- IMPORTANCE :

Cette cause apparaît-elle comme étant d'importance pour expliquer le dysfonctionnement ?

0-importance négligeable

1-une certaine importance

2-une grande importance

3-une importance capitale

- CAPACITE A TROUVER DES SOLUTIONS

Nous sentons-nous capables a priori de trouver des solutions pour remédier à cette cause de dysfonctionnement ?

0-aucune solution ne semble envisageable

1-solutions difficilement envisageables

2-des solutions existent mais avec des difficultés d'application

3-des solutions existent et semblent facilement applicables

- POUVOIR D'ACTION

Avons-nous, à notre niveau, un pouvoir d'action pour agir sur cette cause ?

0-Aucune action ne semble possible à notre niveau

1-L'action semble difficile à notre niveau seulement

2-L'action est probablement possible à notre niveau

3-L'action ressort tout à fait de notre niveau

Etape 4 :

Additionner les points obtenus pour chacune des causes identifiées.

Etape5:

Classer les causes.

- La cause ayant obtenu le plus de points est la cause principale à traiter

Annexe 4 : 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 particuliers 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.

Annexe 5 : 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'ide 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 précédé de //(comme en C++) s'ils sont sur une seule ligne.

Etape2 : 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 6 :

Algorithme de l'arbre couvrant « l'algorithme de Kruskal »

On considère un graphe connexe non-orienté et pondéré : chaque arête possède un poids qui est un nombre qui représente le coût de cette arête. Dans un tel graphe, un arbre couvrant est un sous-graphe connexe sans cycle qui contient tous les sommets du graphe. Le poids d'un tel arbre est la somme des poids des arêtes qui le compose. Un arbre couvrant minimum est un arbre couvrant dont le poids est inférieur ou égal à celui de tous les autres arbres couvrants du graphe. L'objectif de l'algorithme de Kruskal est de calculer un tel arbre couvrant minimum.

Principe de l'algorithme

L'algorithme construit un arbre couvrant minimum en sélectionnant des arêtes par poids croissant. Plus précisément, l'algorithme considère toutes les arêtes du graphe par poids croissant (en pratique, on trie d'abord les arêtes du graphe par poids croissant) et pour chacune d'elles, il la sélectionne si elle ne crée pas un cycle.

```
Kruskal(G) :
1  A := ∅
2  pour chaque sommet v de G :
3    créerEnsemble(v)
4  trier les arêtes de G par poids croissant
5  pour chaque arête (u, v) de G prise par poids croissant :
6    si find(u) ≠ find(v) :
7      ajouter l'arête (u, v) à l'ensemble A
8      union(u, v)
9  renvoyer A
```