



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
Université HADJ-LAKHDAR-BATNA
Faculté de Technologie
Département de Génie Industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Magister en Génie Industriel
Option : Génie Industriel
Par
Mlle : SMAILI Yamina
Ingénieur d'état en Génie Industriel
THEME

Optimisation des flux dans un système de distribution Application à une entreprise

Soutenu le 31/05/2012

Devant le jury composé de :

Dr. F.Boubakeur	Pr	Université de Batna	Président
Dr.N.K.Mouss	Mc.	Université de Batna	Rapporteur
Dr.Z.Sari	Pr.	Université de Tlemcen	Examineur
Dr.M.D.Mouss	Mc.	Université de Batna	Examineur
Dr.H.Smadi	Mc.	Université de Batna	Examineur
Mr.A.Senoussi	MA.	Université de Batna	Co-Encadreur

ANNEE 2011-2012

remerciement

Je remercie Dieu pour m'avoir donné la patience et la force d'accomplir ce travail pour aller plus loin.

Je ne peux passer sous silence l'appui inconditionnel de mes parents, ils étaient le premier moteur qui m'a poussé à avancer et terminer ce travail.

Mes remerciements vont également aux membres de jury de m'accepter mon travail, Soyez assurés de ma gratitude.

Le travail présenté dans ce mémoire a été initié au sein du laboratoire d'**Automatique et productique (LAP)**, dont je tiens à remercier vivement la directrice **Mme L.H Mouss** pour ses efforts considérables. Mes remerciements s'adressent aussi à toute la famille de **Génie Industriel**.

Je tiens, à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur **Mme Mouss N. K** maître de conférence à l'université de BATNA qui a supporté la direction de ce travail, je la remercie pour son soutien moral sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide tout au long de ce travail, et qui m'a mené du domaine de logistique particulièrement du transport. A cet essai, je tiens également à exprimer ma gratitude à mon Co-encadreur Mr Senoussi. Pour ses conseils et ses encouragements.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues de travail.

Merci pour la promotion de post-graduation 2004 – 2005.

Merci pour tous qui m'aident du près ou du loin.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents que Dieu les garde et les protège pour tout ce qu'ils ont fait

pour moi

Mes sœurs

Mes frères

Mes belles sœurs

Riad

Tous ceux que j'aime

Tous qui aiment Yamina

Tous ceux qui aiment et sacrifient pour l'ALGERIE



SMAILI Yamina

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des abréviations.....	III
Liste des notations.....	IV
Introduction générale.....	V

Chapitre I : Problème de tournées de véhicules

I.1. Introduction.....	01
I.2. Problème de tournées de véhicules	02
I. 2-1 Définitions et complexité	02
I.3 Variantes du problème VRP	04
I.4 Typologie du problème VRP	05
I.5. Types du problème VRP selon la nature des données	07
I.5.1 VRP statique.....	08
I.5.2 VRP dynamique.....	08
I.6. Gestion Dynamique des Tournées de Véhicules.....	08
I.7. Modélisation mathématique du problème	09
I.7.1 Identification des différents paramètres.....	09
I.7.2. Les variables	09
I.7.3. La fonction objectif et les contraintes.....	10
I.8. Optimisation.....	11
I.8. 1 Problème d'optimisation	11
I.8.2 Critères d'optimisation	12
I.8.3 Méthodes d'optimisation du VRP et état de l'art	13
I.8.3.1 Méthodes de résolution.....	13
I.8.3.2 Etat de l'art	14
I.9. Conclusion	18

Chapitre II : Les fourmis artificielles

II.1 Introduction	19
II.2. Généralités sur les fourmis	20
II.2.1 Anatomie d'une fourmi	20
II.2.2 Les sortes de fourmis	20
II.3 Caractéristiques des fourmis.....	21
II.3.1 Les fourmis réelles	21
II.3.1.1 Les insectes sociaux	21
II.3.1.2 L'intelligence collective des fourmis.....	21
II.3.1.3. La communication	22
II.3.1.4. La division du travail.....	22
II.3.1.5. La construction du nid	23
II.3.1.6. La recherche de nourriture	23
II.3.1.7. Capacités individuelles	23
II.3.2. Les comportements collectifs des insectes	24
II.3.2.1. Auto organisation	24
II.3.2.2. Stigmergie.....	24
II.3.2.3. Contrôle décentralisé	24
II.3.2.4. Les pistes de phéromone.....	24
II.3.3. Les Fourmis artificielles	25
II.3.4. Comparaison entre les fourmis réelles et artificielles	26
II.4. Optimisation par colonies de fourmis	27
II.5. Des fourmis naturelles à la méta-heuristique	28
II.6. Optimisation par colonies de fourmis	29
II.6.1 Principe général d'implémentation de l'algorithme de base Ant. Système.....	29
II.6.2. Choix des paramètres.....	31
II.6.3. Les paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis.....	32
II.6.4. Formalisation d'algorithme de colonie de fourmis	32
II.6.4.1 Représentation du problème.....	32
II.6.4.2. Construction des solutions	33
II.6.5. Algorithme de base.....	35
II.7. Variantes du système de fourmi « Anti system AS ».....	36
II.7.1 -Ant System élitisme	36

II .7.2. Ant-Q.....	36
II .7.3 Ant Colony System ACS.....	36
II .7.4. L’algorithme Max-Min.....	37
II.8. Etat de l’art d’ACO pour VRP.....	38
II.9. Conclusion.....	41

Chapitre III : Application d’ACO sur un système de distribution

III.1 Introduction.....	42
III.2. présentation de l’entreprise (Groupe ZEDPHARM)	42
III.2.1. Structure du groupe ZEDPHARM.....	42
III.2.2. Les missions du chef de parc (dispatcher)	43
III.2.3. Organigramme hiérarchique de la société ZEDPHARM.....	44
III.2.4. Méthode actuelle de planification des tournées	44
III.3. Analyse des données.....	46
III.3.1. Les clients	46
III.3.1.1.. La carte géographique de l’Est algérien	46
III.3.1.2.. Construction du réseau de distribution.....	46
III.3.1.3. La matrice de distance.....	48
III.3.2. Les véhicules	48
III.3.3. La demande	48
III.4. Estimation des paramètres de l’ACO.....	49
III.4.1. 1er cas : La demande faible	50
III.4.2. 2ème cas : La demande moyenne	51
III.4.3. 3ème cas : La demande forte.....	53
III.4.4. 4ème cas : demande générale	54
III.5. Application à une journée	55
III.5.1. Etat de livraison de la société ZEDPHARM.....	56
III.6. Présentation graphique de la solution obtenue par ACO pour CVRP	59
III.7. Présentation géographique des tournées construites par ACO pour CVRP.....	59
III.8. Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64

Annexe

Bibliographie

Liste des figures

Fig. I.1. Présentation graphique du problème de voyageur de commerce TSP.....	03
Fig. I.2 Présentation graphique du problème des tournées de véhicule VRP.....	03
Fig. I.2. Typologie du problème des tournées sur les nœuds	06
Fig.1.3. Types du problème VRP selon la nature des données	07
Fig. I.4. Problème VRP statique et dynamique	08
Fig. I.5. Création d'une nouvelle route	08
Fig. I.6. Construction d'une nouvelle route.....	09
Fig. I.7 Présentation du problème d'optimisation	11
Fig. II.6 : Présentation mathématique d'un problème d'optimisation multi objectif	12
Fig. II.1. Anatomie d'une fourmi	19
Fig. II.2. Les sortes de fourmis.....	20
Fig. II.3. Types de communication chez les fourmis.....	21
Fig. II.4. Construction du nid.....	22
Fig. II. 5. Comportement collectif pour la recherche de nourriture chez les fourmis.....	22
Fig. II.6. Spots de phéromone.....	24
Fig. II.7. Comportement d'une fourmi naturelle lors de la recherche de nourriture	24
Fig. II. 8. a : Sélection du chemin par la fourmi de façon aléatoire en fonction de la quantité de phéromone.....	26
Fig. II. 8. b. Comment les fourmis recherchent la nourriture	27
Fig. II.9 : Arrivée à la ville i , la fourmi doit choisir la ville suivante.....	29
Fig. II.10 Organigramme de l'algorithme de base d'ACO.....	34
Fig. III.1 Structure du groupe ZEDPHARM.....	43
Fig. III.2. Organigramme hiérarchique de la société ZEDPHARM.....	44
Fig.III.3. Carte géographique de l'Est algérien représente les points de livraison de ZEDPHARM.....	46
Fig. III.4. Réseau de distribution de la société pour la région de l'Est algérien.....	47
Fig. III.5. Le détail d'un nœud du réseau de distribution.....	47
Fig.III.6. Structure de la demande moyenne de la société ZEDPHARM.....	48
Fig.III.7. Les quatre cas possibles de la demande.....	49
Fig.III.8. Détermination du paramètre β cas : demande faible.....	50
Fig.III.9. Détermination du paramètre ρ cas : demande faible.....	50

Fig.III.10. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : demande faible	51
Fig.III.11. Détermination du paramètre β cas : demande moyenne.....	51
Fig.III.12. Détermination du paramètre ρ cas : demande moyenne.....	52
Fig.III.13.. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : demande moyenne.....	52
Fig.III.14.. Détermination du paramètre β cas : la demande est forte.....	53
Fig.III.15. Détermination du paramètre ρ cas : demande forte.....	53
Fig.III.16. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : la demande est forte ...	54
Fig. III.17. Détermination du paramètre β dans le cas général.....	54
Fig.III.18. Détermination du paramètre ρ cas : la demande est générale.....	55
Fig. III.19. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : la demande est forte....	55
Fig. III.20. Présentation graphique des tournées construites par ACO.....	59
Fig. III.21. Présentation géographique de la tournée N° : 1.....	59
Fig. III.22. Présentation géographique de la tournée N° : 2.....	60
Fig. III.23. Présentation géographique de la tournée N° : 3.....	60
Fig. III.24. Présentation géographique de la tournée N° : 4.....	61
Fig. III.25. Présentation géographique de la tournée N° : 5.....	61
Fig. III.26. Présentation géographique de la tournée N° : 6	62

Liste des tableaux

Tab-I-1-Variantes du problème des tournées et ses contraintes.....	05
Tab. I.2. Etat de l'art	15
Tab : II.1 Tableau comparatif entre les fourmis réelles et artificielles	25
Tab : II.2 Similarités et différences entre fourmis virtuelles et réelles	26
Tab. II.3. Les paramètres constants de l'algorithme ACO.....	31
Tab. II.4. Gammes des paramètres variables de l'ACO.....	32
Tab. II.5.Etat de l'art sur VRP par ACO.....	40
Tab.III.1 La demande d'une journée de la société ZEDPHARM (Juillet 2011).....	58

Liste des abréviations

STSP : Sélectif travelen salsemen problem(problem de voyageur de commerce sélectif)

SVRP : Sélectif vehicle routing problem(problem de tournées de véhicule selectif)

PCTSP : Pacup cost traveling salsemen problem (problème de coût de collecte pour voyageur de commerce)

PCVRP : Pickup cost vehicle routing problem(cout de collecte de tournées de véhicule)

TSPTW: Traveling salsemen problem withe time windows(problem de voyageur de Commerce avec fenêtre de temps)

VRPTW : Vehicle routing probem with time windows(problem de tournées de véhicule avec fenêtre de temps)

STSPTW : Selectif travelen salsemen problem with time windows(problem de voyageur de comcece selectif avec fenêtre de temps)

SVRPTW : Selectif vehicle routing probem with time windows(problem de tournées de véhicule sélectif avec fenêtre de temps)

PCTSPTW : Pickup cost travelen salsemen problem with time windows(problem du coût de collecte de voyageur de commerce avec fenêtre de temps)

PCVRPTW : Pickup cost vehicle routing problem with time windows(coût de collecte de tournée de véhicule avec fenêtre de temps)

SDVRPTW: Selectiv delevry vehicle routing problem with time windows(problem de tournées de livraison selectif avec fenêtre de temps)

SDVRP : Selectiv delevry vehicle routing problem (problem de tournées de livraison selectif)

PTV : Problème de tournées de véhicules

VRP : Vehicle routing problem

PTVC : Problème de tournées de véhicules avec capacité

CVRP: Vehicle routing problem with capacity.

PVC : Problème de voyageur de commerce

TSP: Travelling Salesman Problem.

OCF : Optimisation par colonie de fourmi

ACO : Ant colony optimisation (Optimisation par colonie de fourmi)

ACS : Ant Colony System (systems colonies de fourmis)

AS: Ant System (système de fourmi)

Liste des notations

G : Graphe

A : Est l'ensemble des arcs

V : L'ensemble des nœuds

C : Matrice de distance

T : Matrice de temps

(i, j) : Les points du graphe

n : Nombre de sommets (nombre de clients).

m : Nombre de véhicules.

D : Capacité d'un véhicule.

T_k : Temps maximal de la tournée du véhicule k .

d_i : Demande du sommet i .

t_i^k : Temps nécessaire au véhicule k pour charger ou décharger au sommet i .

t_{ij}^k : Temps nécessaire au véhicule k pour voyager du sommet i au sommet j .

c_{ij} : Coût ou distance du voyage du sommet i au sommet j .

b_i : L'instant où le service débute chez le client i .

b_j : L'instant où le service débute chez le client j .

e_i : Borne inférieure sur la fenêtre de temps du client i .

l_i : Borne supérieure sur la fenêtre de temps du client i .

x_{ij}^k : Variable booléenne

$f(x), g_i(x), h_j(x), x_k$: Contraintes d'optimisation

\mathcal{R} : Espace de recherche

j_i^k : La liste des villes qui ne sont pas visitées par la fourmi k placée sur le nœud i .

η_{ij} : La visibilité.

d_{ij} : La distance entre les villes i et j

τ : La quantité de phéromone présentée sur l'arête (i, j) .

τ_0 : Niveau de phéromone initial

ρ : Taux d'évaporation de la phéromone

$P_{ij}^k(t)$: Probabilité de passer de la ville " i " à la ville " j "

α et β : Paramètre qui contrôle le ratio entre l'importance de la phéromone et de la visibilité

$\Delta\tau_{ij}^K(t)$: Le cumul de phéromone

Q : est un paramètre constant.

$T^K(t)$: Liste taboue

$L^k(t)$: La longueur d'un tour trouvé par la méthode du plus proche voisin.

m : Nombre de fourmis

n : Nombre des villes

S : Ensembles de solutions

f : Fonction objectif

Ω : Ensembles de contraintes.

k : Indice de fourmi

$s_{départ}^k$: Un état de départ (nœud de départ du graphe)

e^k : Des critères de terminaison,

$T_{départ}^k$: Une mémoire

N_c : Nombre de cycles

t : Compteur de temps

q_0 : Paramètre qui contrôle le ratio entre exploitation et exploration

J : Une ville sélectionnée aléatoirement selon la probabilité $P_{ij}^k(t)$

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans le monde technologique dans lequel nous vivons, la croissance des activités de distribution et de collecte de produits a créé une pression sur de nombreuses entreprises. Aussi devant une compétitivité de plus en plus dure et une diminution des coûts dans un contexte de mondialisation des marchés, il devient pour toutes les entreprises de réduire leurs dépenses à tous les niveaux et en particulier dans le domaine de la logistique

Le cœur de la chaîne logistique est le transport, il joue un rôle clé dans ses activités, puisqu'un produit est rarement produit et consommé au même endroit. Pratiquement, chaque produit acheté par un consommateur est passé par deux camions ou même plus avant d'aboutir entre les mains du consommateur final. Aussi et afin de minimiser les coûts de transport et rester compétitive, les entreprises visent à améliorer leurs systèmes logistiques.

Le problème de base en transports, est le problème du voyageur de commerce (Traveling Salesman Problem TSP) qui consiste à visiter un ensemble de clients avec un seul véhicule. Dans le cas où l'entreprise possède une flotte de véhicules, elle doit quotidiennement faire face à un autre type de problème de transport qui est le problème de tournées de véhicule PTV (Vehicle Routing Problem VRP), ce dernier consiste à déterminer un ensemble optimal de circuit de distribution ou de ramassage à partir d'un ou plusieurs dépôts afin de desservir un ensemble de clients sans faire violer les contraintes de volume, de capacité et du temps [Teo 05].

Les problèmes de tournées de véhicules se situent au cœur de la problématique actuelle de la réduction des coûts de la logistique et du transport. Il s'agit d'effectuer à moindre coût, avec des véhicules, un ensemble de tâches dispersées sur un réseau routier. Ces tâches peuvent correspondre à des lieux ponctuels appelés nœuds ou s'étendre sur un segment de rue ou route appelée arc.

Ces problèmes très combinatoires ont de nombreuses applications : logistique de distribution, la distribution des produits pétroliers, collecte de déchets, salage ou sablage de routes, nettoyage de la voirie, les urgences, relevées de compteurs. Ils sont de type NP-difficile

Les problèmes d'optimisation NP-difficile ne possèdent pas, à ce jour un algorithme général permettant de les résoudre en un temps polynomial, ce problème de l'explosion combinatoire limite l'utilisation de méthodes exactes pour la résolution des

problèmes de petites tailles. Dans le cas de problèmes de grandes tailles, le recours aux méthodes approchées est nécessaire. La plupart des méta-heuristiques visent à résoudre des problèmes d'optimisation difficile sont d'inspiration biologique. Parmi ces méta-heuristiques, nous pouvons citer les algorithmes génétiques, le recuit simulé, les réseaux de neurones et les algorithmes à colonie de fourmis. Ces derniers forment une classe de méta-heuristique récemment proposée pour les problèmes d'optimisation difficile. C'est une technique d'optimisation biomimétique inspirée par le travail d'un biologiste qui a été repris par les informaticiens et largement exploitée et développée par Marco Dorigo dans les années 90

Le travail présenté dans ce mémoire illustre l'application de la méta-heuristique par colonie de fourmis pour l'optimisation des tournées de véhicules. Ce dernier a été appliquée à un cas réel à savoir le Groupe ZEDPHARM de Constantine spécialisé dans la distribution des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques.

Aussi notre mémoire s'organise de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons un état de l'art sur le problème VRP et les méthodes existantes pour le résoudre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude en détail de l'algorithme colonie de fourmi et sa mise en œuvre afin de résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire tel que celui du VRP.

Le dernier chapitre présente des généralités sur l'entreprise cible et particulièrement son mode de fonctionnement actuel, et l'application de l'algorithme colonie de fourmi (Ant Colony System ACS) pour l'optimisation du problème de tournées de véhicules au niveau de la société ZEDPHARM.

Vu la structure et les moyens dont disposent ZEDPHARM, le problème d'optimisation a été étudié avec capacité et trajet limité autrement dit notre VRP a été ramené à un CVRP(Capacited Vehicle routing problem).

Nous achevons ce travail par une conclusion qui présente une synthèse de notre travail réalisé, tout en proposant des pistes de recherches connexes sous forme de perspectives de recherches futures dans ce domaine.

Chapitre I

Problème de tournées de véhicules

I- 1- Introduction

Dans un contexte économique de réduction des coûts, une des principales préoccupations des entreprises industrielles est d'améliorer l'efficacité de leur chaîne logistique, pour pouvoir organiser au moindre coût un meilleur service et la fluidité des flux de leur marchandise.

En effet, suite à la réduction des coûts de production observée ces dernières années, la part des coûts liés à la distribution est relativement importante. Ainsi pour de nombreuses entreprises, la diminution des coûts de distribution constitue un nouvel enjeu, qui ne peut être relevé que par la résolution de nombreux problèmes « combinatoires » parmi eux ceux liés au transport.

En effet, l'activité de transport est l'une des causes de coûts les plus importantes de la distribution. L'amélioration de cette dernière passe très souvent par l'optimisation du transport.

De façon générale, les problèmes de distribution consistent à satisfaire les demandes provenant de plusieurs clients à partir d'un ou plusieurs entrepôts au moindre coût. L'optimisation d'un réseau de distribution implique plusieurs types de décisions, parmi elles : les décisions opérationnelles qui sont prises quotidiennement et leurs effets sont immédiats, à titre d'exemple l'affectation des produits aux clients, le choix des véhicules et des routes à prendre. Lorsqu'on a plusieurs véhicules, le choix des routes à prendre est effectivement un problème de tournées de véhicules PTV (Vehicle routing Problem VRP).

L'optimisation des problèmes de tournées de véhicules (optimisation du transport et de la distribution) dans l'objectif de minimiser les coûts consiste à planifier pour chaque période de livraison :

- Les clients à visiter ;
- La quantité à livrer ;
- Le trajet à suivre par chaque véhicule.

Dans une version plus complexe, la planification des tournées de véhicules consiste à définir les itinéraires à effectuer par les véhicules qui vont livrer au client :

- ☞ les quantités demandées ,
- ☞ dans le délai souhaité ,
- ☞ à un coût minimum.

Dans ce chapitre, on présente quelques notions de base sur le PTV (VRP), sa modélisation mathématique ainsi quelques concepts de base sur l'optimisation est donnée. Un aperçu sur les différentes méthodes utilisées dans ce contexte est présenté sous forme d'un tableau qui synthétise les travaux réalisés. On termine par le choix du type de VRP, le problème de tournées de véhicules avec capacité. (Capacited Vehicle routing problem CVRP) qui fera l'objet de notre travail.

I.2 Problème de tournées de véhicules

Les entreprises de distribution font quotidiennement face à un type de problème de transport qui est le VRP.

Le PTV (VRP) est une version étendue du problème du voyageur de commerce (Travelling Salesman Problem TSP). La résolution de ce problème consiste à trouver le chemin le plus court qui permet de visiter tous les clients en une seule fois avec un seul véhicule tout en revenant au point de départ.

Au cour de la résolution de ce type de problème, il est nécessaire de respecter les contraintes suivantes :

- ✗ Tous les clients doivent être servis.
- ✗ Un client ne peut être servi que par un et un seul véhicule.
- ✗ En quittant un client, un véhicule ne peut se diriger que vers un seul autre client.
- ✗ Un véhicule ne peut servir un client que si sa capacité résiduelle est suffisante pour satisfaire la demande de ce client.
- ✗ Chaque client doit être servi une et une seule fois.

I. 2-1 Définitions et complexité

D'après [HOU-05] le VRP consiste à construire des tournées à coût minimal afin de visiter une et une seule fois un ensemble de clients géographiquement distribués.

Pour [KAM-06] le VRP consiste à construire des routes visitant tous les clients une seule fois en minimisant le coût du transport, en satisfaisant les demandes et en respectant les capacités des véhicules.

Ce type de problème peut être décrit comme un problème de conception d'itinéraires à moindre coût, d'un dépôt à un ensemble de points géographiquement dispersés (ville, magasins, entrepôts, écoles, clients, etc.).

De nombreux problèmes relatifs au transport sont modélisés par un graphe. Cette représentation sert, de manière générale à décrire la structure d'un ensemble complexe dont les éléments sont en relation.

Le VRP est un problème de conception de routes. Il est défini par un graphe (Fig I-2)

$G(V, A)$ où:

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ est l'ensemble des $n + 1$ nœuds (villes)

Avec : v_0 : le dépôt

$\{v_1, \dots, v_n\}$: Ensemble des clients.

$A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ Ensemble des arcs allant d'un point « i » à un point « j » selon le cas étudié, chaque arc identifie un élément des matrices soit :

☒ De distance (ou de coût) $C = (c_{ij})$

☒ De temps $T = (t_{ij})$

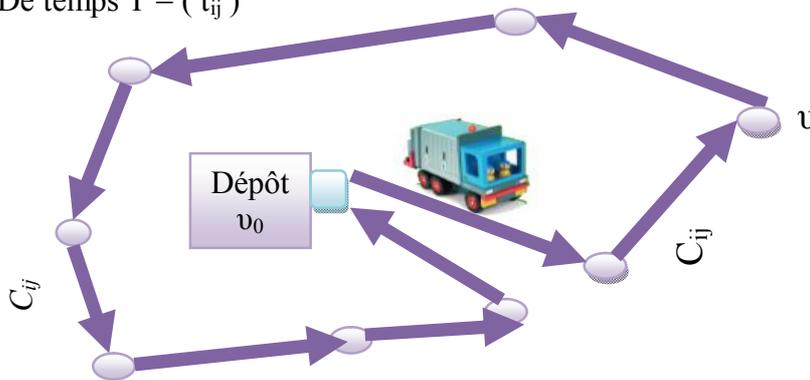


Fig. I.1 Présentation graphique du problème de voyageur de commerce TSP

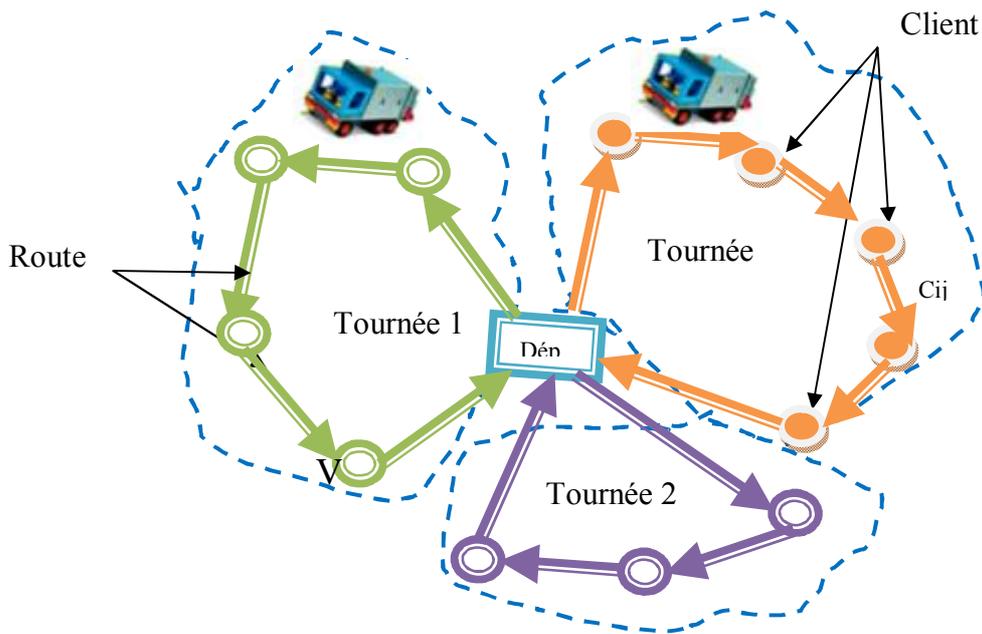


Fig. I.2 Présentation graphique du problème de tournées de véhicules VRP

I.3 Variantes du problème VRP

Il est important d'analyser les caractéristiques du problème logistique traité avant de chercher sa résolution.

On ne peut pas citer tous les types du problème VRP à cause des exigences augmentées des clients, tel que, à chaque fois où on ajoute ou retranche une contrainte, on obtient un type de VRP.

Le tableau (Tab I-1-) résume les différents paramètres que nous pouvons rencontrer lors de l'étude d'un VRP.

Paramètres	Option possibles
Taille du parc de véhicule	Un seul véhicule
	Plusieurs véhicules
Types de véhicules	Homogène
	Hétérogène
Emplacement des véhicules	Un seul dépôt
	Plusieurs dépôts
Nature des demandes des nœuds	Demande déterministe
	Demande stochastique
	Satisfaction partielle de la demande
Emplacement des demandes	Aux nœuds
	Aux arcs
	Aux arcs ou aux nœuds
Restriction de capacités sur les Véhicules	Imposée et identique pour toutes les tournées
	Imposée et différentes pour toutes les tournées
	Non imposée
Longueur maximale d'une tournée	Imposée et identique pour toutes les tournées
	Imposée et non identique pour toutes les tournées
	Non déterminée
Temps maximal d'une tournée	Imposée et identique pour toutes les tournées
	Imposée et non identique pour toutes les tournées
	Non déterminée
Type de service	Un seul type
	Plusieurs mais unique pour un type de véhicule

	Plusieurs pour un même véhicule
Contraintes horaires de service	Imposées et préfixées
	Spécifiées d'un intervalle à un nœud
	Non spécifiées
Distance entre nœuds	Euclidienne
	Non Euclidienne
	La même quelque soit la direction (symétrique)
	Différente (asymétrique)
Type de client	Dépendant
	Indépendant
Capacité de véhicule	Finie
	Infinie
Demande des clients	Statique
	Dynamique

Tab-I-1-Variantes du problème de tournées et ses contraintes [Cla-04]

I.4 Typologie du problème VRP

Le fait d'ajouter ou de supprimer un de ces paramètres, nous fait passer d'un problème à un autre ; la figure (Fig I-2) illustre ceci.

En effet, on passe du problème de base (voyageur de commerce TSP) aux autres problèmes par l'ajout d'une contrainte. Par exemple, du problème de TSP si on prend en considération la contrainte de la taille du parc on passe au problème de VRP.

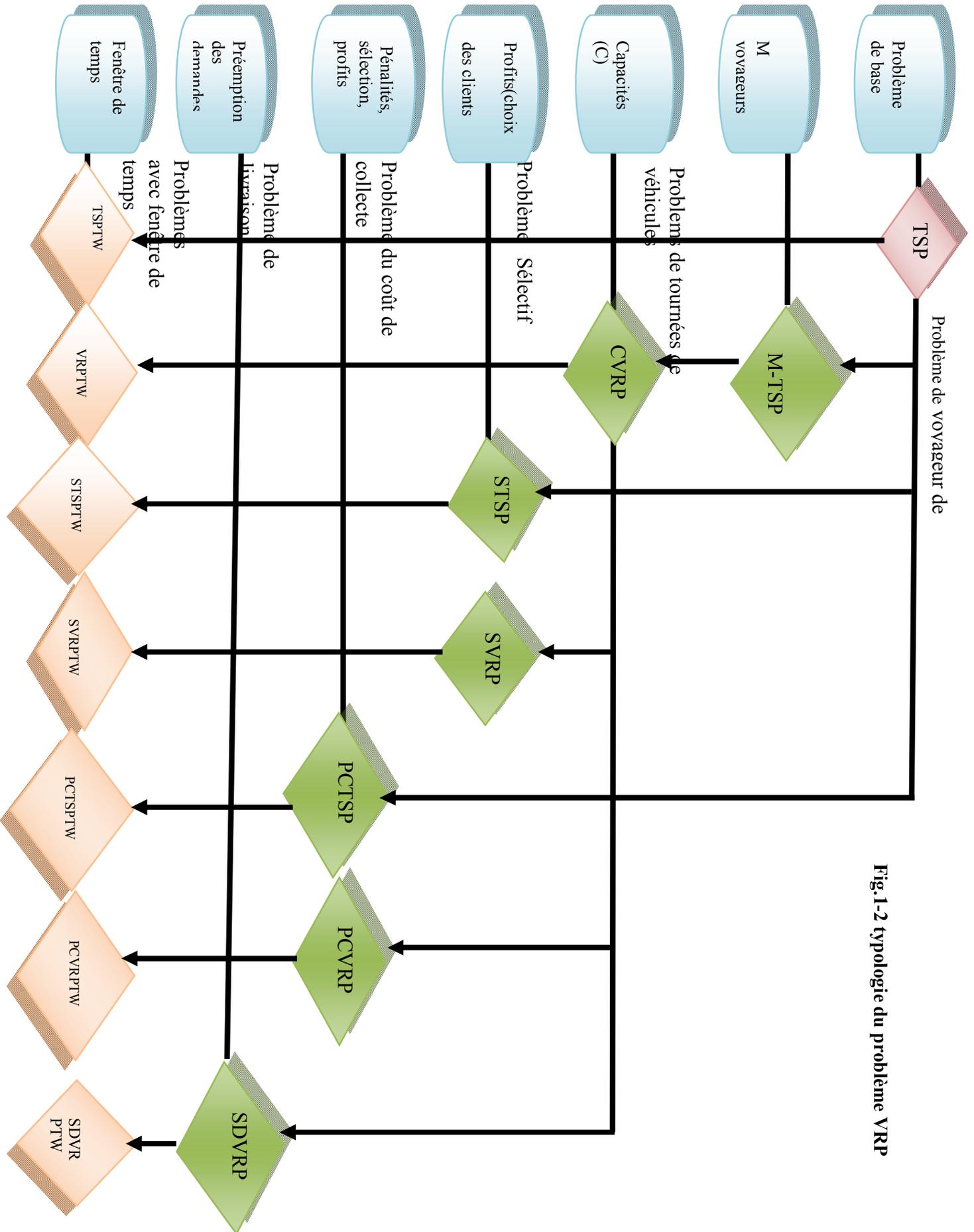


Fig.1-2 typologie du problème VRP

1.5. Types du problème VRP selon la nature des données

Selon la nature des données, on peut citer quatre types de problèmes de tournées de véhicule (Fig 1-3).

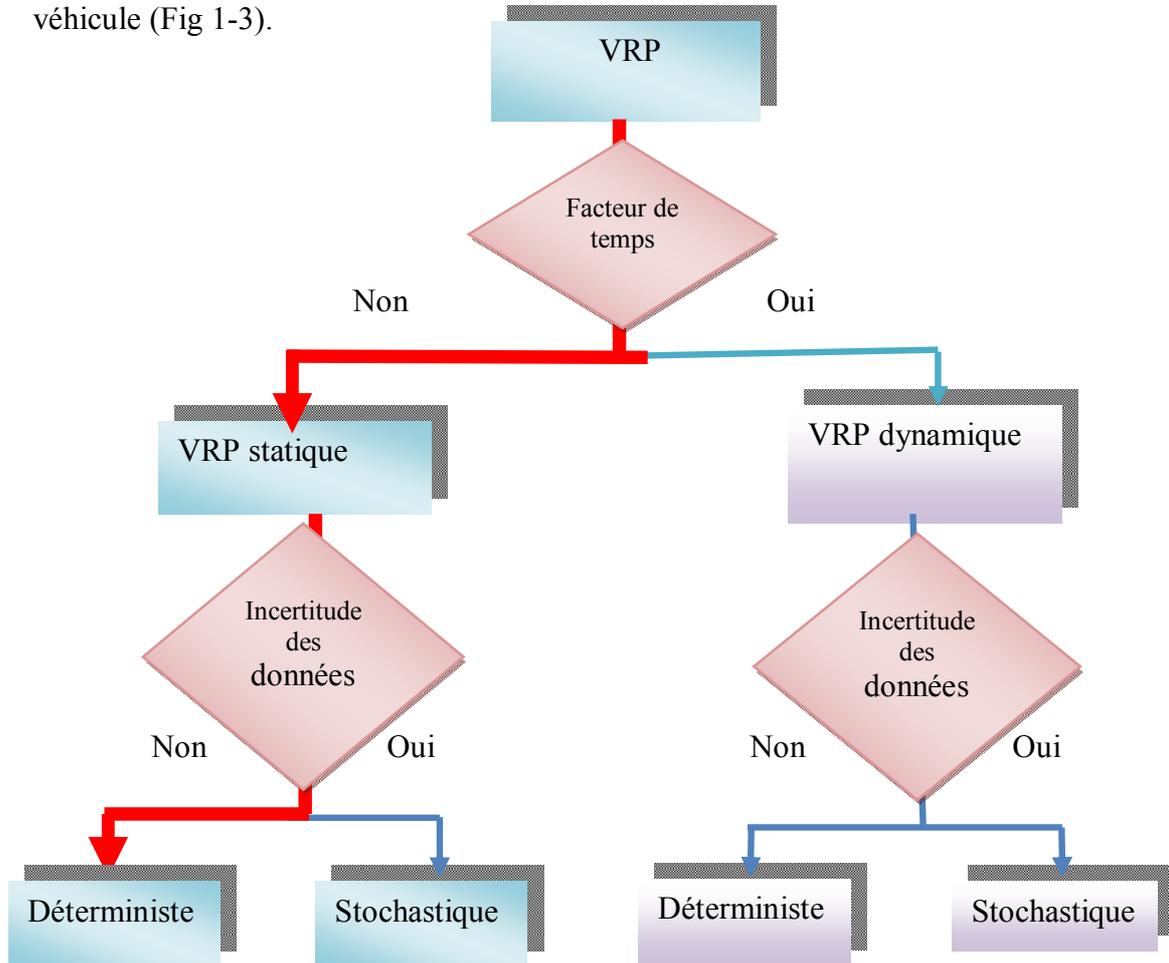


Fig.1.3. Types du problème VRP selon la nature des données [HOU 05]

Le chemin avec des traits rouge présente notre problème à étudier qui est VRP statique déterministe.

1.5.1 VRP statique

Dans le mode statique, pour la planification des tournées de véhicules, on admet que toute information concernant la planification des routes est supposée connue par le planificateur avant que le processus de planification ne commence, cette information ne change pas après que les routes aient été construites.

Dans ce cas, le client qui est pris en considération dans le planning est dit VRP statique, les données de ce dernier sont connues avec certitude. Seuls quelques éléments d'informations dépendent du temps.

I.5.2 VRP dynamique

Dans la réalité, une fois que le planning est établi et que les véhicules sont en routes, de nouveaux clients demandent à être servi. Les nouveaux clients doivent alors être insérés dans les planifications existantes (solution courante). Ces clients sont appelés des clients dynamiques.

Dans le problème dynamique stochastique connu sous le nom VRP en temps réel toutes les données sont incertaines par exemple l'arrivée des nouveaux demandes.

I.6 Gestion Dynamique de Tournées de Véhicules

La figure (Fig 1-4) illustre un exemple type de DVRP, deux véhicules doivent servir un certain nombre de clients. L'itinéraire planifié initialement est représenté en trait plein et les clients par un cercle noir. Avant la fin de la livraison, deux clients dynamiques (représenté par un cercle clair) font leur demande.

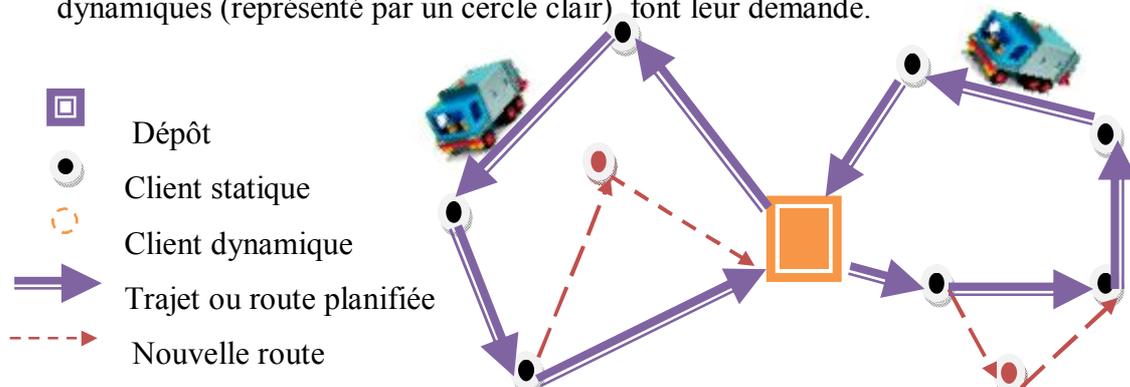


Fig. I.4 problème VRP statique et dynamique [GON 06]

L'arrivée d'une nouvelle demande provoque la distinction de deux cas possibles :

- ✎ Si la demande ne dépasse pas la capacité du véhicule, un nouvel itinéraire est alors construit (Fig. I.5)(tournée pointillée en rouge).
- ✎ Si la demande dépasse la capacité du véhicule, des nouvelles tournées sont alors créées (figure I.6)(tournée pointillée en bleu).

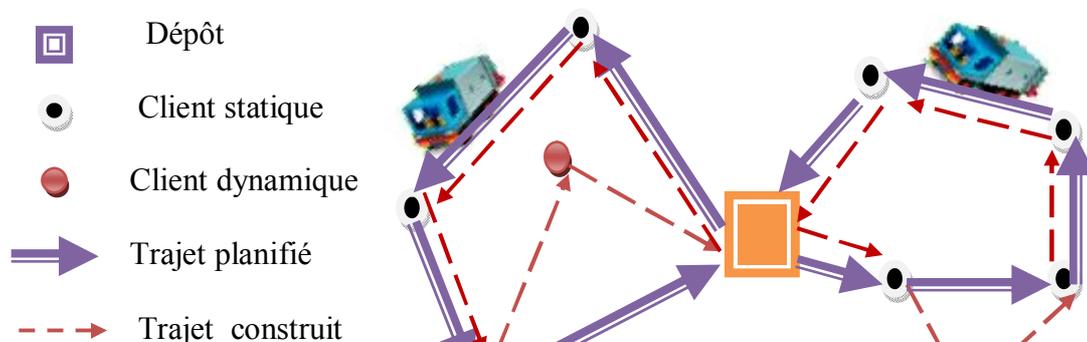


Fig. I.5 Construction d'une nouvelle route

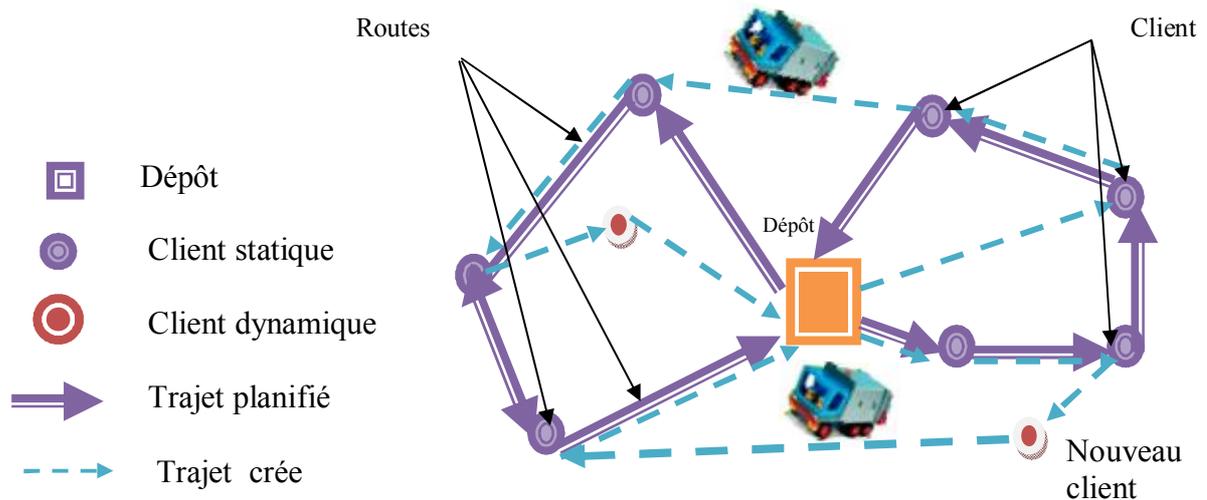


Fig. I.6. Création d'une nouvelle route

I.7. Modélisation mathématique du problème

D'une manière générale la formulation mathématique du VRP se résume dans les équations suivantes [CAM 06] et [BOU 00].

I.7.1 Identification des différents paramètres

n : Nombre de sommets (nombre de clients).

m : Nombre de véhicules.

D : Capacité d'un véhicule.

T^k : Temps maximal de la tournée du véhicule k .

d_i : Demande du sommet i .

t_i^k : Temps nécessaire au véhicule k pour charger ou décharger au sommet i .

t_{ij}^k : Temps nécessaire au véhicule k pour voyager du sommet i au sommet j .

c_{ij} : Coût ou distance du voyage du sommet i au sommet j .

b_i : Instant où le service débute chez le client i .

b_j : Instant où le service débute chez le client j .

e_i : Borne inférieure sur la fenêtre de temps du client i .

l_i : Borne supérieure sur la fenêtre de temps du client i .

L longueur d'une tournée (fixe)

I.7.2. Les variables

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si le véhicule } k \text{ voyage du sommet } i \text{ au sommet } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\forall x \in [1,0]$$

I.7.3. La fonction objectif et les contraintes

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

La fonction objectif (1) consiste à minimiser le coût total de transport.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ij}^k = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) définissent que chaque sommet ne doit être servi qu'une seule fois par un et un seul véhicule.

$$\sum_{i=1}^n x_{ip} - \sum_{j=1}^n x_{pj} = 0 \quad p = 1, \dots, n \quad (4)$$

L'équation (4) représente la continuité d'une tournée par un véhicule: le sommet visité doit impérativement être quitté.

$$\sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \leq D \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$$

L'équation (5) définit le respect de la contrainte de capacité du véhicule.

$$\sum_{i=1}^n l_i^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq L_k \quad k=1; \dots, m \quad (6)$$

L'équation (6) représente le respect de la contrainte de la durée totale de la tournée.

$$\sum_{i=1}^n t_i^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^k + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \leq T_k \quad k=1; \dots, m \quad (7)$$

L'équation (7) représente le respect de la longueur d'une tournée

$$\sum_{j=2}^n x_{1j}^k \leq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$k = 1, \dots, m$$

$$\sum_{i+2}^n x_{i1}^k \leq 1 \quad \begin{matrix} j = 1, \dots, n \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (9)$$

Les équations (8) et (9) représentent le non dépassement de la disponibilité d'un véhicule.

$$e_i \leq t_{ik} + b_i \leq l_i \quad \begin{matrix} i = 2, \dots, n \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (10)$$

$$x_{ij}^k = 1 \Rightarrow e_i \leq b_i \leq l_i \quad \begin{matrix} i = 2, \dots, n \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (11)$$

$$x_{ij}^k = 1 \Rightarrow b_i + t_i^k + t_{ij}^k \leq b_j \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

Les équations (10),(11) et(12) représentent le respect de la fenêtre de temps exigé par le client.

$$S_{ij} = d_{i0} + d_{0j} - d_{ij} \quad (13)$$

L'équation (13) exprime l'élimination des sous tours.

A partir de la formulation mathématique, nous remarquons que si nous négligeons les contraintes identifiées par les équations (5), (10), (11) et (12) on passe d'une modélisation du problème CVRPTW à une modélisation du problème VRP.

I.8. Optimisation

I.8. 1 Problème d'optimisation

Résoudre un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver une solution optimale dans un espace de recherche, optimisant la valeur de la fonction objectif et respectant un ensemble de contraintes.

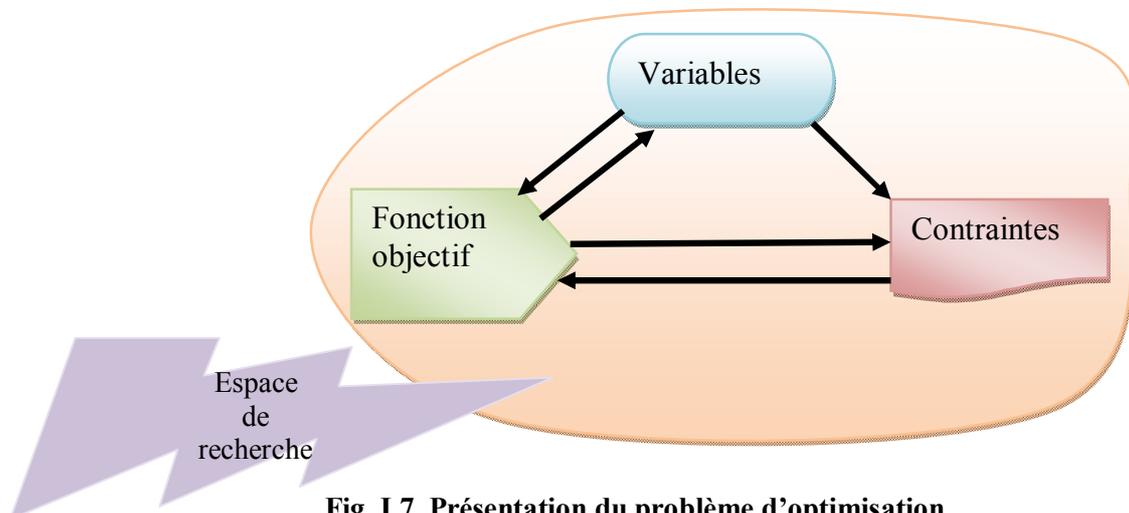


Fig. I.7 Présentation du problème d'optimisation

La formulation mathématique peut être représentée par la figure (Fig. I.7)

Si l'espace de recherche de solution est grand (exemple l'ensemble \mathbb{R}), le problème d'optimisation est dit de type « difficile ».

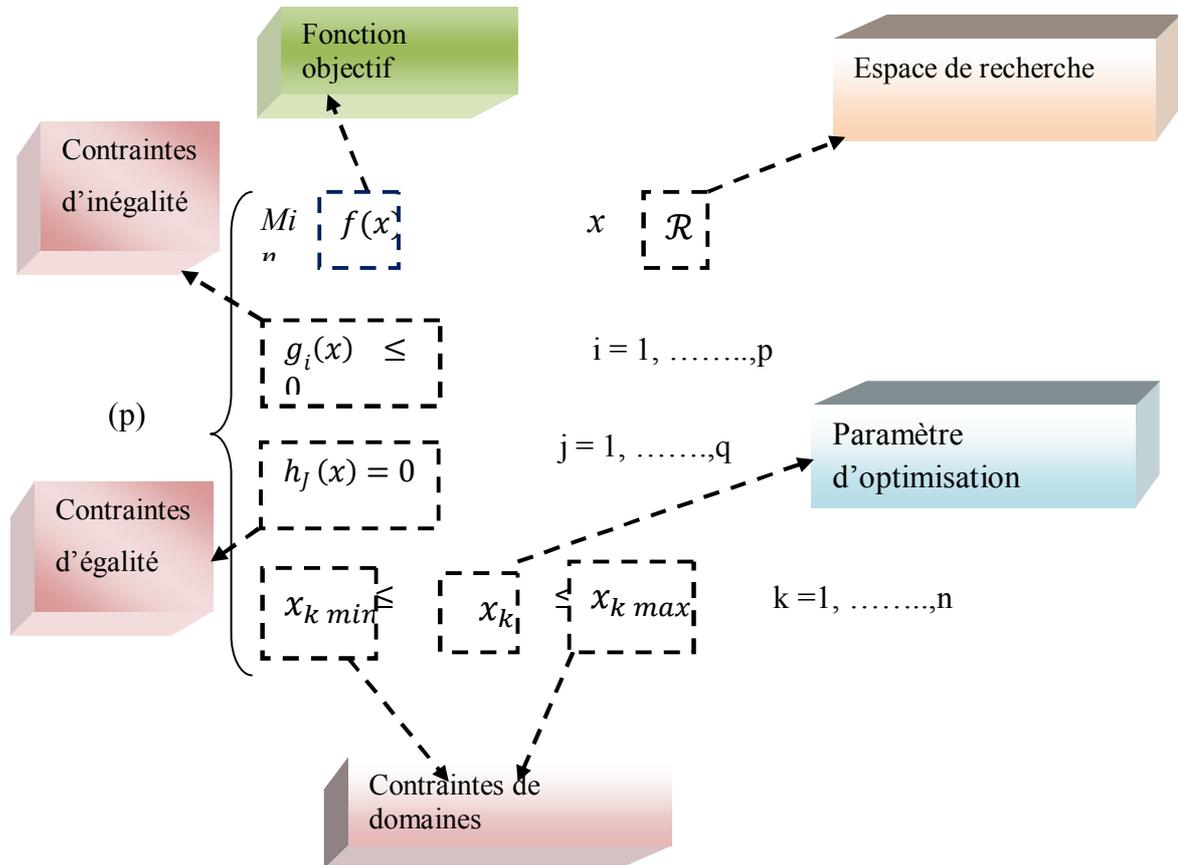


Fig. I.8: Présentation mathématique d'un problème d'optimisation multi objectif [SAA07]

I.8.2 Critères d'optimisation

Plusieurs classifications des critères d'optimisation du problème VRP existent, [FAB 06] les a simplifiés en trois à savoir :

- ✓ Minimiser le coût total du parcours.
- ✓ Minimiser la somme des coûts fixes associés à l'utilisation des véhicules.
- ✓ Minimiser le temps total du parcours.

Le critère « coût total du parcours » est généralement équivalent au fait de minimiser la distance totale de parcours. On peut formellement composer ces objectifs.

Une autre classification de fonctions objectives est faite en fonction des travaux réalisés dans ce domaine à savoir:

- ✎ Minimiser le nombre de véhicules ;
- ✎ Minimiser la distance totale parcourue ;
- ✎ Minimiser le temps d'attente des clients ;
- ✎ Minimiser le retard au dépôt ;
- ✎ Minimiser le retard total chez les clients ;
- ✎ Minimiser le temps de réponse aux demandes ;

I.8.3 Méthodes d'optimisation du VRP et état de l'art

Afin de parvenir au but visé qui est l'optimisation de la distance totale parcourue, il est important de connaître les méthodes déjà testées sur différentes versions du VRP, et sur les sous problèmes classiques de logistique du transport qui le composent.

I.8.3.1 Méthodes de résolution

Il existe une multitude d'algorithmes d'optimisation combinatoire, ils peuvent être repartis en deux catégories à savoir :

Les méthodes exactes : utilisées pour les problèmes combinatoires de petites tailles.

Les méthodes approchées : utilisées pour les problèmes combinatoires de grandes tailles.

☞ **Les méthodes exactes**

Les méthodes exactes étudient l'espace de recherche et produisent une solution optimale. Les méthodes approchées peuvent trouver une solution quasi-optimale au bout d'un temps de calcul raisonnable lorsque le temps de calcul nécessaire pour atteindre cette solution est exagéré.

☞ **Les méthodes approchées**

Ces méthodes sont utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire pour lesquels on ne trouve pas de solution optimale en un temps raisonnable [LIO98] tel que:

- ✓ Méthodes heuristiques
- ✓ Méthodes méta heuristiques

✎ *Les heuristiques :*

Une heuristique d'optimisation est une méthode approchée simple, rapide et adaptée à un problème donné. Sa capacité est d'optimiser un problème avec un minimum d'information. Elle n'offre aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée. C'est une méthode guidée par des « astuces » qui dépendent du problème traité.

✎ *Les méta-heuristiques :*

Les méta- heuristiques sont des méthodes générales de recherche dédiées aux problèmes d'optimisation difficiles. Leur principe de fonctionnement repose sur des mécanismes indépendants du problème traité.

Les méta- heuristiques progressent de façon itérative. L'état de départ est souvent choisi aléatoirement, l'algorithme se déroulant ensuite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Ces méthodes représentent un compromis entre la qualité de la solution trouvée et le temps de calcul nécessaire.

I.8.3.2 Etat de l'art

Le problème VRP est de type NP-difficile qui ne dispose pas à ce jour, de solution optimale s'effectue dans un temps polynomial où le recours aux méthodes approchées est nécessaire

Dans ce qui suit nous exposons une synthèse des travaux réalisés sur le VRP et ses variantes et par conséquent nous présentons les principales méthodes appliquées pour l'optimisation de ces types de problèmes (Tab-I-2).

Problèmes Méthodes d'optimisation	VRP	VRPTW	m-VRPTW	DVRP	DVRPTW	SVRP	SVRPTW	CVRP	MCVRP	HVRP	IRP
Approche de Décomposition	P. Lacomme C.Prins 2006										Compbell Savels Bergh 2004
Algorithme Mimétique	(AG + RL) Nagata 200								A .Elfallahi R .Wolfler calio 2006	Lima Goldbarg 2004	
Algorithme Génétique	Braysy 2007	H.Wang 2000			Housroum .H 2005		A.EL.Moudni N.Hayari A.Manier 2003	Baker et Ayechew 2003			
Algorithme de Bellman	Lacomme et al 2003										
Méthode	Tarantilis			Mitrovic.							

Tabou	2005	2002 Noor	Lau.Sim et Teo 2003	Minic Laporte.G 2004						Wassan. Osman 2002	
Recuit simulé	Eglese et Coll 2005	Li et Lim 2003									
Colonie de fourmi	Reimann. . Hartl Doerner 200	D.Favare tto E.Morett i P.Pellegr ini 2008		Montamenn .R et al 2003	A.Alkaff A.Rusdians yah N.Ganayant i 2008 S. Moreira R.Sergio M.Amelia 2007			S.Lopes L.Delle Molle R.Eaig Limo 2005			C .R. Jyun .C. L. C. Shu 2011
Algorithme d'attribus	Derigs et Kaiser 2007										
Algorithme de fourmi Hybridé	Doerner et Hartl 2004										

Méthode de Balayage										Renaud Boctor 2002	
Génération de Colonne										Choi et Tcha 2007	
Méthode gloutonne										Yepes , Madina 2006	
Recuit simulé + Tabou		2006 Las et Ran									

Tab I-2 Etat de l'art sur le problème de tournées de véhicules VRP

L'analyse du tableau (Tab. I.2), nous permet de découvrir les différentes extensions du VRP. Notre problème à étudier est celui de CVRP qu'on va optimiser par une méta-heuristique de « colonie de fourmi » qui fait l'objet du chapitre III.

I.9. Conclusion

L'importance du problème de distribution, essentiellement du transport (VRP) rencontré quotidiennement par les entreprises fait apparaître au travers des travaux de recherche réalisées son importance pour la survie d'une entreprise.

Dans ce chapitre, on a présenté le principe général du problème de tournées de véhicules, VRP, sa modélisation mathématique, les différentes contraintes intervenant dans sa classification, un aperçu général et une synthèse sur les différentes méthodes utilisées pour l'optimisation de ce problème et effectuée.

La livraison quotidienne des produits afin de satisfaire les clients géographiquement distribués est réalisée à l'aide d'une flotte de véhicules dotée d'une capacité limitée. Dans ce cas là, on se trouve face à un problème de tournées de véhicules avec capacité (Capacited Vehicle Routing Problem CVRP) notre cas d'étude.

Les décisions à prendre dans le CVRP est la conception des tournées, les variables de décision nécessaires sont de type entier, le but est de minimiser les coûts en respectant les contraintes de capacité et la longueur du trajet. Ce problème appartient au champ de l'optimisation combinatoire, il est de type NP-difficile qui ne dispose pas à ce jour de solution optimale s'effectuée dans un temps polynomial, pour cette raison, et pour l'optimisation de ce problème on fait recours à une méta-heuristique particulière « colonie de fourmis » qui fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II

Les fourmis artificielles



II.1 Introduction

L'optimisation est l'une des mathématiques employée à l'étude du (ou des) minimum(s)/maximum(s) d'une fonction, à une ou plusieurs variables sur un certain domaine de définition, généralement elle est interprétée par la mise en œuvre d'un algorithme.

Ce chapitre est consacré à l'utilisation des méthodes approchées telles que les méta- heuristique particulièrement l'algorithme colonie de fourmis. Ce dernier sert à la résolution des problèmes du type NP-difficile qui ne disposent pas à ce jour de solution optimale s'effectuée dans un temps polynomial.

L'optimisation par colonies de fourmis s'inspire du comportement naturel des fourmis.

Ce comportement collectif, principalement remarqué chez les fourmis, est l'optimisation du chemin maintenu qui permet aux fourmis de retrouver le plus court chemin entre leur nid et une source de nourriture grâce à un système de marquage de phéromone. Ce comportement naturel a été modélisé et transposé à la résolution de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire sous le non d'une nouvelle méta-heuristique « Optimisation par les algorithmes colonie de fourmis OCF (Ant colony optimisation ACO) ». Leur popularité est due d'une part à la facilité de la mise en œuvre et d'autre part à la complexité des fonctions réalisables.

Le but de ce chapitre est de présenter d'une part, des généralités sur les fourmis, leur comportement naturel et leur transposition en algorithme dont l'objectif de la résolution de nombreux problèmes complexes.



II.2 Généralité sur les fourmis

Les fourmis sont des insectes sociaux réparties en 11 sous-familles, et approximativement 10 000 espèces. La fourmi peut mesurer de quelques millimètres à plusieurs centimètres de long. Son corps est composé de 3 parties principales : la tête, le thorax et l'abdomen (Fig .II-1)



Fig. II.1. Anatomie d'une fourmi

II.2.1 Anatomie d'une fourmi

➤ La tête

La tête est équipée d'une paire d'antennes, qui ont pour fonction le goût, le toucher et l'odorat. En effet, les antennes peuvent capter un certain nombre de substances inodores, volatiles et chimiques appelées phéromones qui serviront à la communication entre les fourmis.

➤ Le thorax

Le thorax soutient 3 paires de pattes très longues se terminant par deux griffes. Les extrémités des pattes sont recouvertes de poils représentant l'organe sensoriel de la fourmi.

➤ L'abdomen

L'abdomen renferme plusieurs cavités digestives telles le jabot social, l'estomac et l'intestin. Il comporte également les conduites respiratoires et la glande de Dufur ou «Falcon à parfum» qui secrète le « phéromone ». Chez les reines et les mâles l'appareil reproducteur se trouve dans l'abdomen.

II.2.2 Les sortes de fourmis

Il existe 3 sortes de fourmis (Fig.- II-2)



- ☞ La reine : sa fonction principale est la reproduction.
- ☞ Les mâles (soldats) : la défense, surveillance du nid.
- ☞ Les ouvrières : construction et entretien de la colonie, approvisionnement en nourriture.

Les ouvrières

Les mâles

La reine



Fig. II.2. Les sortes de fourmis [BEL 08]

II.3 Caractéristiques des fourmis

II.3.1 Les fourmis réelles

Les fourmis constituent à l'heure actuelle un support majeur pour les théories développées, ce ci revient à plusieurs raisons à savoir:

- * La domination des fourmis est une preuve de leur adaptation à des environnements très variés. [BOU 08]
- * L'étude des fourmis se fait assez facilement puisqu'elles s'adaptent sans trop de difficultés à des environnements différents de leur habitat d'origine ;
- * Les fourmis possèdent une gamme de comportements très variés, collectifs ou individuels.

II.3.1.1 Les insectes sociaux

La place des fourmis dans l'étude des sociétés animales est centrale car elles ont développé des formes très avancées de socialité.

II.3.1.2 L'intelligence collective des fourmis

Les capacités des fourmis en matière de coopération, de communication, de compétition et d'apprentissage peuvent être mises à profit pour la conception de robots ou d'algorithmes de résolution des problèmes.



La suite de ce chapitre présente les principales caractéristiques des fourmis que l'on retrouve dans les approches d'optimisation et les systèmes informatiques.

II .3.1.3. La communication

Les fourmis ont la particularité d'employer pour communiquer des substances volatiles appelées « phéromones », elles sont très sensibles à ces substances qu'elles perçoivent grâce à des récepteurs situés dans leurs antennes. Ces substances sont nombreuses et varient selon les espèces. Les fourmis peuvent déposer des phéromones au sol, grâce à une glande située dans leur abdomen et former ainsi des pistes odorantes qui pourront être suivies par leurs congénères[CHR 05].



La communication directe

Paralexies



La communication indirecte

Spots de phéromone

Fig. II.3. Types de communication chez les fourmis [OUA 06]

Le mode de communication des fourmis par le phéromone a été utilisé comme base de travail pour la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire à titre d'exemple le voyageur de commerce, le routage de véhicule, l'affectation quadratique et l'ordonnancement [MAR03].

II .3.1.4. La division du travail [NIC 00]

Une des caractéristiques particulièrement intéressante est la capacité des fourmis à partager le travail [NIC 00]. Les tâches que doivent accomplir les ouvrières sont en effet multiples :

- La recherche de nourriture ;
- La défense du nid ;
- L'entretien et la construction du nid ;
- L'entretien des larves et leur approvisionnement en nourriture.
- Etc,

Toutes ces activités, dont l'importance est variable dans le temps et l'espace, doivent être assurées simultanément pour la survie et le développement de la colonie.



II .3.1.5. La construction du nid

L'architecture des nids construits par les fourmis est un exemple de structure complexe. Il n'y a pas de contrôle centralisé, de coordination de niveau supérieur à l'individu. La structure émerge des interactions interindividuelles et avec l'environnement. La communication entre les individus est faite d'une manière indirecte.

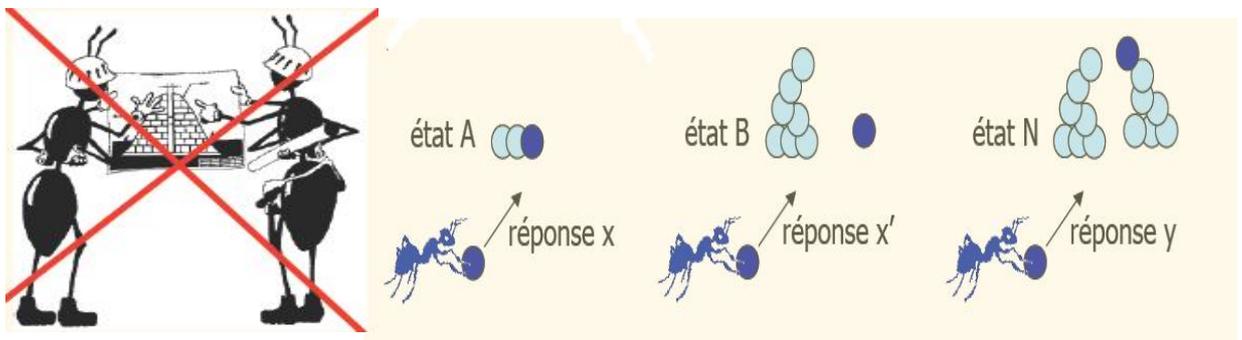


Fig .II.4 .Construction du nid [AND04]

II .3.1.6. La recherche de nourriture

Au cours de la recherche de nourriture, la communication entre les individus est présentée sous forme d'une mémoire telle que l'utilisation des phéromones [BOU 08].

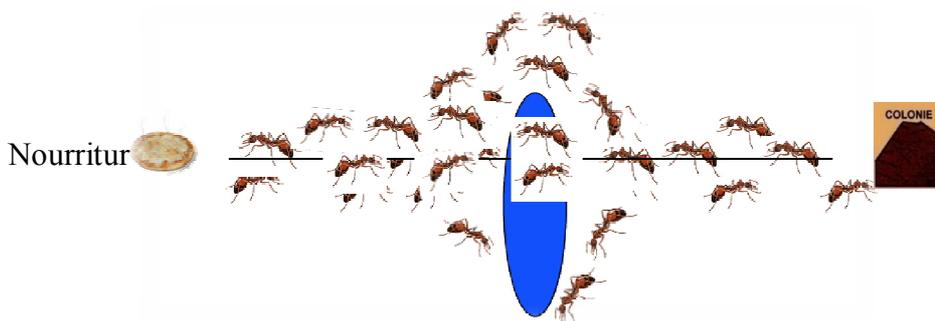


Fig. II. 5. Comportement collectif pour la recherche de nourriture chez les fourmis [CED03]



II .3.1.7. Capacités individuelles

Les capacités individuelles des fourmis peuvent servir de modèle à des systèmes artificiels tant leur adaptation à leur environnement est efficace. Individuellement, une fourmi possède certaines capacités d'apprentissage, et notamment quand elle se déplace autour du nid. La plupart des caractéristiques qui intéressent l'informatique sont des symptômes collectifs.

II.3.2. Les comportements collectifs des insectes

II.3.2.1. Auto organisation

L'auto organisation est un mécanisme qui stabilise les systèmes biologiques et évite les fluctuations indésirables. Un exemple célèbre de l'auto organisation est l'évaporation de traces de phéromone chez les colonies de fourmis, cette évaporation agit d'une façon globale et continue dans le temps. Sans ce processus, l'utilisation de phéromone par la colonie serait sans utilité, puisque toutes les fourmis se mettraient à renforcer le même chemin de plus en plus, ce qui n'est pas adapté pour des environnements variables [TFA07], et conduiront ainsi au choix « prématuré » d'un chemin « optimal ».

II.3.2.2. Stigmergie

La stigmergie est une forme de communication passant par le biais de modification de l'environnement, c'est l'interaction sociale indirecte.

La grande force de la stigmergie est que les individus échangent des informations par le biais du travail encours, de l'état d'avancement et de la tâche globale à accomplir [PAT03].

II.3.2.3. Contrôle décentralisé

Dans le système auto-organisé des fourmis on ne trouve pas de [ABD 05]

- ✓ Prise de décision à un niveau donné.
- ✓ Suivi d'ordre.
- ✓ Actions pré déterminées.
- ✓ Connaissance du problème dans son ensemble.

A l'inverse, on trouve l'existence d'une vision locale de l'environnement par un individu.

II.3.2.4. Les pistes du phéromone

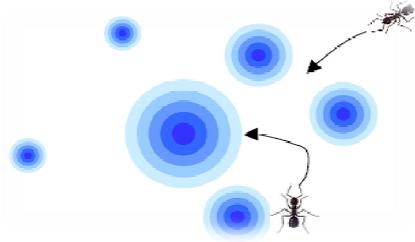


Fig. II.6. Spots de phéromone [JOH 04]



Les phéromones ont un rôle de marqueur de chemin : quand les fourmis choisissent leur chemin, elles ont tendance à choisir la piste qui porte la plus forte concentration du phéromone. Cela permet de retrouver le chemin vers leur nid lors du retour. D'autre part, les odeurs peuvent être utilisées par les autres fourmis pour retrouver les sources de nourritures trouvées par leurs congénères. Ce comportement permet également de trouver le chemin le plus court vers la nourriture lorsque les pistes de phéromone sont utilisées par la colonie entière. [MAR 06]

La définition des pistes de phéromone est cruciale et a des conséquences sur les performances de l'algorithme cependant un choix intuitif donne parfois de meilleurs résultats.[LAC 06].

Il est difficile de connaître avec précision les propriétés physico-chimiques des pistes de phéromone, qui varient en fonction des espèces et d'un grand nombre de paramètres.

La figure (Fig. II.7) représente le comportement d'une fourmi réelle lors de la recherche de la nourriture. Il faut remarquer que dans le cas de fourmis artificielles la notion de recrutement n'est pas obligatoire.

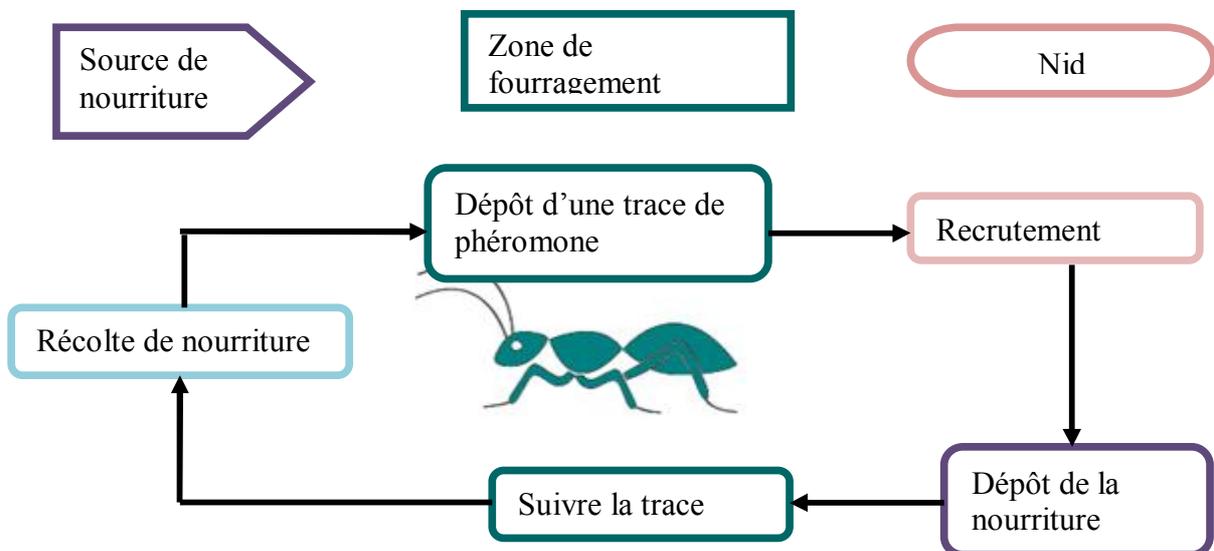


Fig. II.7. Comportement d'une fourmi naturelle lors de la recherche de nourriture [OLI 01]

II.3.3. Les Fourmis artificielles

La fourmi artificielle se présente sous la forme d'un ensemble de procédures qui définissent son comportement, celui-ci est très semblable à celui de la fourmi naturelle quand elle recherche de la nourriture. L'exemple des instructions qui définissent leur comportement permet aux fourmis artificielles de se déplacer dans l'espace combinatoire formé par les différents éléments qui peuvent être utilisés pour le problème à résoudre, on dit qu'elle construit une solution. La mémorisation de ces déplacements donne la forme d'une solution. Les fourmis artificielles communiquent entre elles indirectement par stigmergie via des modifications de leur environnement qui représente la mémoire collective de la colonie [BOU 08].

II.3.4. Comparaison entre les fourmis réelles et artificielles

Les fourmis virtuelles modélisent les comportements abstraits des fourmis réelles, elles peuvent être enrichies par des capacités que ne possèdent pas les fourmis réelles. Le tableau (Tab II.1) présente une comparaison entre les fourmis réelles et virtuelles.

	Fourmis réelles	Fourmis artificielles
depuis quand ?	100.10 ⁶ années	15/20 ans
où ?	tout écosystème terrestre	ordinateurs, réseaux, robots
combien ?	10 ¹⁸	
qui ?	entomologistes myrmécologues	informaticiens, ...
pourquoi ?	équilibres, régulations, évolution	optimisation, ...

Tab : II.1 Tableau comparatif entre les fourmis réelles et artificielles [MON07]

Nous avons également résumé dans le tableau (Tab II.2) quelques similarités et différences entre fourmis réelles et virtuelles.

Fourmis réelles	Fourmis artificielles
Monde continu	Monde discret et continu
Mémoire	Programme
Phéromone de nature physique	Phéromone présentée par des valeurs
Solution optimale	Solution proche de l'optimalité
Capacité spéciale limitée	Capacité illimitée
Points semblables	



colonie d'individus coopérants
 pistes de phéromones
 évaporation des phéromones
 recherche du plus court chemin
 déplacements locaux
 choix aléatoire lors des transitions

II.4. Optimisation par colonies de fourmis

L'optimisation par l'approche colonie de fourmis est relativement récente. Le principe de l'optimisation est apparu au début des années 90. Il est le fruit des travaux de recherche de M. Dorigo, V. Maniezzo et A. Coloni. L'objectif de leurs travaux est la proposition d'une nouvelle approche pour l'optimisation stochastique combinatoire (TSP). L'avantage de leur nouvelle méthode et la rapidité de trouver des solutions acceptables tout en évitant des convergences prématurées.

Les fourmis sont capables de résoudre collectivement des problèmes complexes, comme trouver le plus court chemin entre deux points dans un environnement accidenté. Pour cela, elles communiquent entre elles de façon locale et indirecte.

Au cours de leur progression, les fourmis déposent une trace de phéromone ; elles choisissent ensuite leur chemin de façon aléatoire, selon une probabilité dépendant de la quantité de phéromone précédemment déposée. Le chemin choisi est celui comportant la plus grande quantité de phéromone (Fig. II- 8-a).

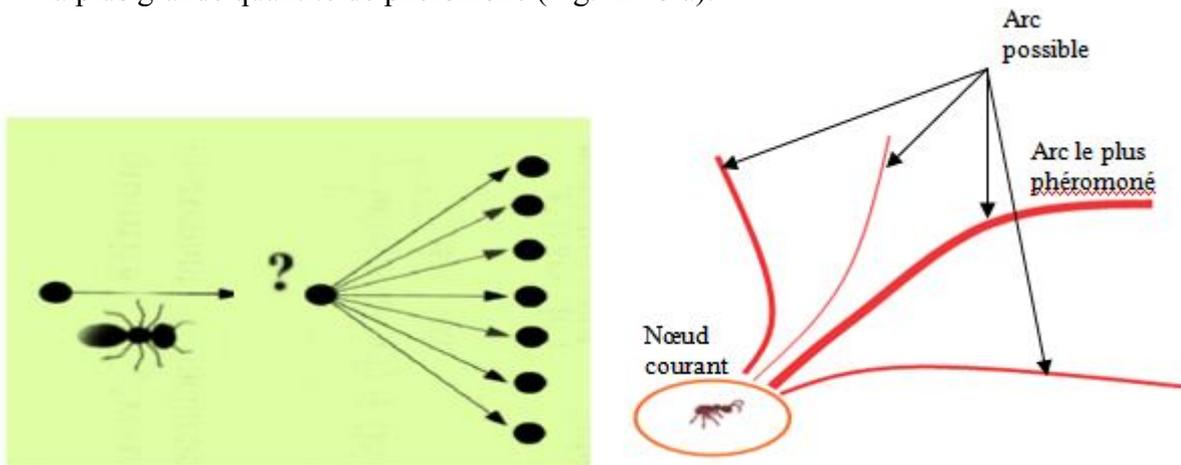


Fig. II. 8. a : Sélection du chemin par la fourmi de façon aléatoire

en fonction de la quantité de phéromone

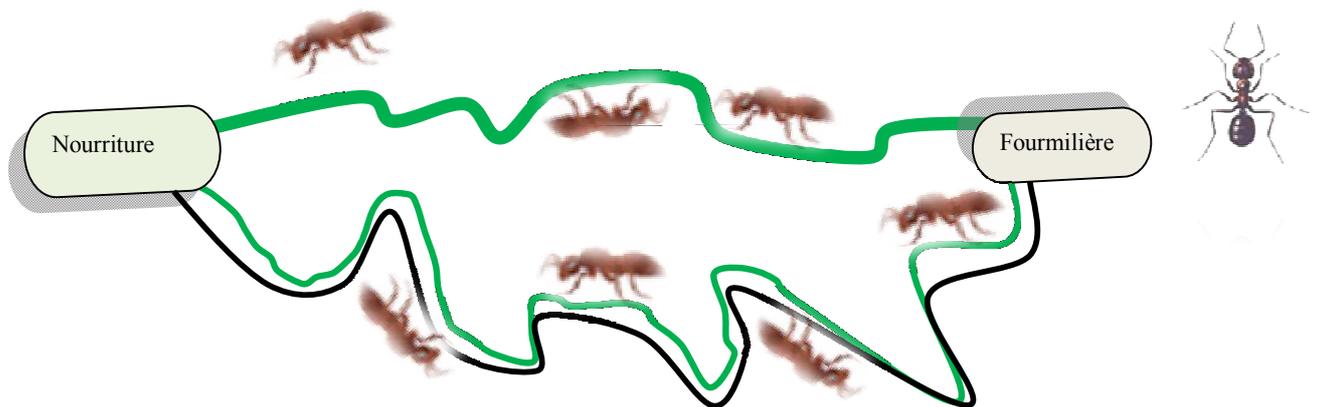


Fig. II. 8. b. Comment les fourmis recherchent la nourriture [SAA 07]

II.5. Du fourmis naturelles à la méta-heuristique d'optimisation par colonies de fourmis

Grâce aux caractéristiques qu'ont les fourmis naturelles, les fourmis artificielles deviennent des experts dans la résolution collective de certains problèmes complexes via les échanges indirects d'informations entre les individus (fourmis) par l'utilisation de phéromone [DAG90, DSC04].

La trace de phéromone laissée par une fourmi lors de sa progression augmente la probabilité que d'autres fourmis choisissent le même chemin.

Ce mécanisme de résolution collective de problèmes est à l'origine des algorithmes à base de fourmis artificielles. Ces algorithmes ont été initialement proposés dans [DOR91], comme une approche multi-agents pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. L'idée est de représenter le problème à résoudre sous la forme de la recherche d'un meilleur chemin dans un graphe, appelé graphe de construction, puis d'utiliser des fourmis artificielles pour rechercher de bons chemins dans ce graphe.

Intuitivement, cette communication indirecte via l'environnement (stigmergie) fournit une information sur la qualité des chemins empruntés afin d'attirer les fourmis et d'intensifier la recherche dans les itérations futures vers les zones correspondantes de l'espace de recherche. Ce mécanisme d'intensification est combiné à un mécanisme de diversification, essentiellement basé sur la nature aléatoire des décisions prises par les fourmis, qui garantit une bonne exploration de l'espace de recherche. Le compromis entre intensification et diversification peut être obtenu en modifiant les valeurs des paramètres déterminant l'importance du phéromone.

Les fourmis artificielles ont aussi d'autres caractéristiques, qui ne trouvent pas leur équivalent dans la nature. En particulier, elles peuvent avoir une mémoire, qui leur permet de garder une trace de leurs actions passées. Dans la plupart des cas, les fourmis ne déposent une trace de phéromone qu'après avoir effectué un chemin complet, et non de façon incrémentale au fur et à mesure de leur progression. Enfin, la probabilité pour une fourmi artificielle de choisir un arc ne dépend généralement pas uniquement des traces de phéromone, mais aussi d'heuristiques dépendantes du problème permettant d'évaluer localement la qualité du chemin. Ces caractéristiques du comportement des fourmis artificielles définissent la « méta-heuristique d'optimisation [CHR 05].

II .6. Optimisation par colonies de fourmis

Le problème de base qui est le TSP a fait l'objet de la première implémentation d'un algorithme de colonies de fourmis. L'équipe de recherche de Marco Dorigo fut la première à modéliser le comportement de fourrageage et à l'appliquer pour résoudre un problème d'optimisation.

II .6.1 Principe général d'implémentation de l'algorithme de base Ant system(AS)

Ant system (AS) est le premier algorithme de fourmi reposant sur le comportement de fourrageage des fourmis qui a été appliqué pour la résolution du TSP [DOR91].

Le TSP consiste à trouver un chemin Hamiltonien dans un graphe complètement connecté, il s'agit pour un voyageur de commerce de trouver le chemin le plus court pour visiter une et une seule fois chacune des n villes dans lesquelles il doit se rendre. L'espace de recherche est l'ensemble des combinaisons possibles des n villes. Il s'agit sans doute du problème d'optimisation combinatoire NP-complet le plus utilisé comme test pour les nouvelles méthodes d'optimisation.

Le TSP est généralement défini comme un graphe complètement connecté (V, A) où : V : est l'ensemble des nœuds (villes), A le trajet entre ces villes (arêtes).

Les fourmis vont travailler en parallèle à essayer diverses solutions à ce problème jusqu'à trouver la plus acceptable. La procédure se déroule de la manière suivante :

Chacune des fourmis de la colonie est placée aléatoirement sur un des nœuds. Elle se déplace d'un nœud à un autre, jusqu'à ce qu'elle les a tous visités, avec la condition que chaque ville soit visitée une et une seule fois.

Le déplacement des fourmis de la ville « i » à la ville « j » dépend de [DRE 05] :



- La liste des villes déjà visitées, qui définit les mouvements possibles à chaque pas, quand la fourmi k est sur la ville i : J_i^k
- L'inverse de la distance entre les villes: $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ appelée visibilité. Cette information "statique" est utilisée pour diriger le choix des fourmis vers des villes proches, et éviter les villes trop lointaines.
- La quantité de phéromone déposée sur l'arête reliant les deux villes appelée l'intensité de la piste. Ce paramètre définit l'attractivité d'une partie du trajet global et change à chaque passage d'une fourmi. C'est, en quelque sorte, une mémoire globale du système, qui évolue par apprentissage.



Le passage de chaque fourmi d'un nœud i au nœud j (**Fig. II.14**) se fait aléatoirement en fonction d'une probabilité donnée par l'équation (17).

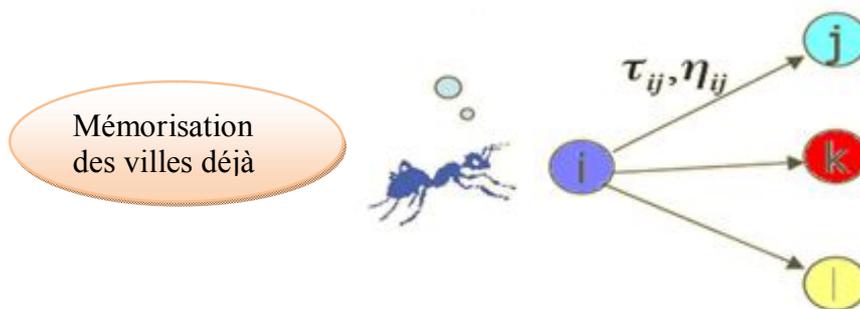


Fig. II.9 : arrivée à la ville i, la fourmi doit choisir la ville suivante [AND04]

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{L \in J_i^k} (\tau_{iL}(t))^\alpha \cdot (\eta_{iL})^\beta} & \text{Si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad (17)$$

L'équation (17) est la probabilité de passer de la ville "i" à la ville "j" en fonction de la distance d_{ij} et de la quantité de phéromone τ avec :

- ❖ η_{ij} : visibilité, représente l'heuristique de la désirabilité de choisir j à partir de la ville i .
- ❖ $\tau_{ij}(t)$ est la quantité de phéromone présente sur l'arête (i,j) . Cette information dynamique représente la désirabilité acquise de sélectionner j comme destination de i .

- ❖ J_i^K est la liste de villes qui ne sont pas visitées par la fourmi k placée sur le nœud i. Cette mémoire joue un double rôle : d'une part elle empêche la fourmi de retourner sur des villes déjà visités et d'autre part elle permet la sauvegarde du chemin parcouru par la fourmi afin de déposer les phéromones à la fin de chaque cycle.

α et β sont deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste $\tau_{ij}(t)$, et de la visibilité η_{ij} . Avec $\alpha = 0$, seule la visibilité de la ville est prise en compte ; la ville la plus proche est donc choisie à chaque pas. Au contraire, avec $\beta = 0$, seules les pistes de phéromone jouent. D'où, un compromis entre ces deux paramètres. En effet, pour éviter une sélection trop rapide d'un trajet, nous jouons sur les comportements de diversification et d'intensification.



Après 'n' itérations, lorsque toutes les fourmis ont construit un chemin complet chacune d'elles calcule la longueur totale parcourue (somme des distances d'une ville à l'autre) et libère des phéromones tout au long du chemin en quantité inversement proportionnelle à la longueur : plus le chemin est court, plus il sera chargé en phéromones. Le procédé est recommencé jusqu'à ce l'on obtienne une solution optimale ou jugée acceptable. Régulièrement par ailleurs, les quantités de phéromones portées par les arcs sont multipliées par un facteur d'évaporation proche de 0.99 [YAN 03].

Ces deux types d'informations sont nécessaires et influencent sur les comportements de diversification et d'intensification.

Les variables des phéromones sont mises à jour selon la formule :

$$\tau_{ij}^{t+1} = (1 - \rho) \tau_{ij}^t + \sum_{K=1}^M \Delta\tau_{ij}^K(t) \quad (18)$$

Où : ρ est le coefficient d'évaporation des traces de phéromone présent sur les arêtes.

$\Delta\tau_{ij}^K(t)$: représente le cumul de phéromone. Cette valeur est donnée par :

$$\Delta\tau_{ij}^K(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i,j) \in T^K(t) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (19)$$

Où : $T^K(t)$: le trajet effectué par la fourmi k à l'itération t

Q : paramètre constant.

II .6.2. Choix des paramètres

Pour l'algorithme ACS, la ville de départ de chaque fourmi est typiquement choisie par un tirage aléatoire uniforme, aucune influence significative du placement de départ n'ayant pu être démontrée.

En ce qui concerne l'algorithme ACS, il est conseillé d'utiliser $\tau_0 = (n \cdot L_m)^{-1}$
Où : n ; est le nombre de villes.

L_m : La longueur d'un tour trouvé par la méthode du plus proche voisin.

Le nombre de fourmis m est un paramètre important, il est préférable d'utiliser autant de fourmis que de villes ($m = n$). En règle générale, les algorithmes de colonies de fourmis semblent assez peu sensibles à un réglage fin du nombre de fourmis.



II .6.3. Les paramètres optimaux des algorithmes de colonies de fourmis

L'utilisation des valeurs appropriées pour les paramètres des algorithmes de colonies de fourmis est très importante. Dorigo et son équipe de recherche a conseillé que les valeurs exactes des paramètres dépendent du problème à résoudre.

Pour résoudre un problème d'optimisation, il faut choisir les huit paramètres de l'algorithme de colonie de fourmis. La moitié de ces paramètres peut être gardée constante.

Les paramètres constants de l'algorithme ACO

Paramètre	Valeur constante
α	1
τ_0	$1/n$
numAnts	n =nombre de cités à visiter

Tab. II.3. Les paramètres constants de l'algorithme ACO

Le reste des paramètres varient dans les gammes suivantes tableau (Tab II.4):

paramètre	Valeur constante
β	$1 < \beta < 15$
ρ	$0 < \rho < 1$
max_cycles	$10 \leq \text{max_cycles} \leq 1000$

Tab. II.4. Les paramètres varient de l'algorithme ACO



I.6.4 .Formalisation d'algorithmes de colonies de fourmis

L'utilisation de OCF nécessite de choisir une *représentation* formelle du problème d'optimisation à traiter et de définir le processus de *construction* de solution par les fourmis en utilisant la représentation suivante.

I.6.4 .1 Représentation du problème

Un problème d'optimisation se définit par l'ensemble $O = \{\Omega, f, S\}$ tel que :

S : Ensemble de solutions

f : Fonction objectif

Ω : Ensemble de contraintes.

Suivant cette représentation, les fourmis construisent les solutions possibles en se déplaçant sur un graphe $G(V, A)$.

Les contraintes du problème sont implémentées directement dans les règles de déplacement des fourmis. Par conséquent, la solution optimale représente le chemin de coût minimum.

I.6.4 .2. Construction des solutions

Les fourmis artificielles construisent les solutions en ajoutant selon un processus stochastique et itératif les séquences de composants à partir de V . Chaque fourmi construit une solution possible (même de mauvaise qualité) d'une manière stochastique en se déplaçant dans le graphe (V, A) . La solution optimale émergera de la coopération entre les fourmis de la colonie.

A chaque fourmi " k " on associe :

- $S_{départ}^k$: Un état de départ (nœud de départ du graphe).
- e^k : des critères de terminaison,
- $T_{départ}^k$: Une mémoire qui stocke les informations sur les composants qu'elle a ajoutée à sa solution. Cette mémoire peut être utilisée afin de :
 - ❖ Evaluer la qualité de la solution trouvée.
 - ❖ Parcourir le chemin à l'envers pour faciliter la mise à jour des traces de phéromones une fois la solution générée.
 - ❖ Empêcher la fourmi de boucler sur un même nœud.

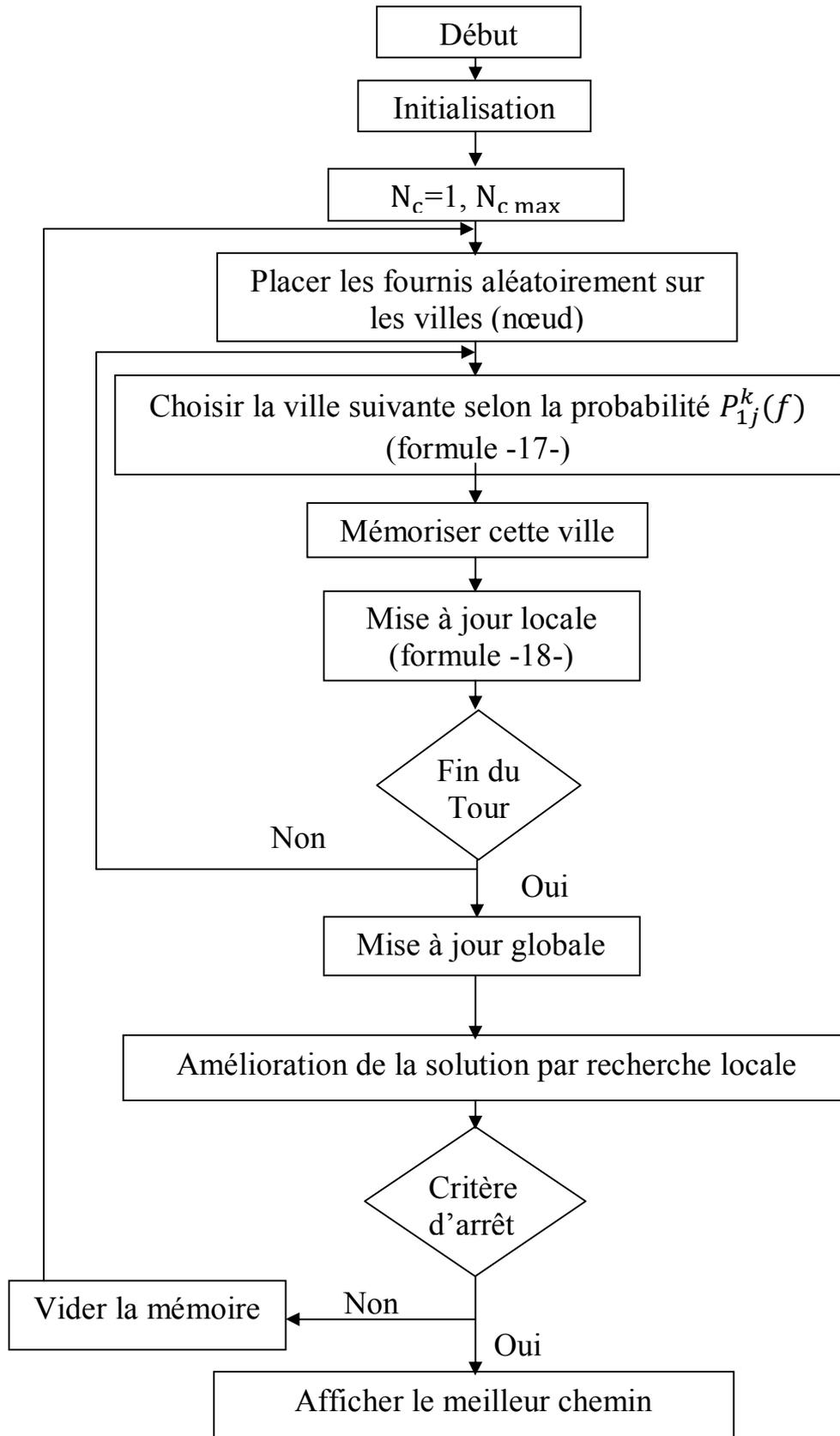


Fig. II.10 Organigramme de l'algorithme de base d'ACO



En plus de ces règles de comportement des fourmis, un autre processus est introduit : l'évaporation des traces de phéromones qui permet de décroître les

quantités des traces de phéromones et donc éviter que certains arcs soient plus favorisés que d'autres à cause de la forte concentration de phéromone présente sur eux, ce qui peut amener à une convergence rapide vers une région sous-optimale de l'espace de recherche.

Le principe général de l'OCF est donné par l'algorithme de base suivant :

II .6.5. Algorithme de base

Début

1. initialisation

$$t = 0$$

$$\tau_{IJ} = 0$$

Placer aléatoirement chaque fourmi sur chaque nœud

2. Tant que la liste taboue n'est pas saturée (la fourmi n'a pas terminé sa solution)

Pour $i = 1, \dots, n$ pour chaque ville

Pour $k = 1, \dots, m$ pour chaque fourmi

Sélectionner la ville suivante (j) non visitée selon l'équation « 17 »

Insérer cette ville (j) dans la liste taboue de la fourmi k

Mise à jour des traces de phéromone selon la formule « 18 »

Fin pour

Amélioration de la solution à l'aide d'une recherche locale

Vider la liste taboue

Fin pour

Fin tant que

Si la condition d'arrêt n'est pas atteinte

$$t \leftarrow t + 1$$

Si non

Afficher le plus court chemin

Fin



Les algorithmes colonie de fourmis présentent les caractéristiques suivantes [DOR 9

- ✗ La flexibilité : les algorithmes colonie de fourmis sont applicables pour les problèmes statiques et dynamiques, aux variables discrets et continus.
- ✗ La robustesse : ne nécessite pas de changement pour leur application à de nouveaux problèmes d'optimisation combinatoire.
- ✗ Approche à base de population : les algorithmes colonie de fourmis se parallélisent de façon très naturelle, en affectant par exemple un processus différent pour traiter la marche de chaque fourmi, et un autre pour mettre à jour les pistes de phéromones.

II .7. Variantes du système de fourmi « Anti system AS »

- ✗ Nous abordons dans ce qui suit quelques variantes de l'algorithme de base.
- ✗ Les variantes de «Ant system AS » sont nées suite aux différentes améliorations effectuées sur le AS.

II .7.1 Ant System élitisme

- ✗ Une première variante du " Ant system " a été proposée dans [DMC 96]: elle est caractérisée par l'introduction de fourmis " élitistes " .
- ✗ Dans cette version, la meilleure fourmi (celle qui a effectué le trajet le plus court) dépose une quantité de phéromone plus grande, dans l'optique d'accroître la probabilité des autres fourmis ,d'explorer la solution la plus prometteuse.

II .7.2. Ant-Q

Dans cette variante de AS, la règle de mise à jour locale est inspirée de l'apprentissage par renforcement « Q-learning ». Cependant, aucune amélioration par rapport à l'algorithme AS n'a pu être démontrée. Cet algorithme n'est d'ailleurs, de l'aveu même des auteurs, qu'un pré version du « Ant Colony System ».

II .7.3 Ant Colony System ACS

Cet algorithme est plus efficace pour les problèmes de grande taille [DGM 97].Il introduit un certain nombre de changements de fonctionnement :

*Le déplacement de la fourmi suit une autre règle de transition dit "règle proportionnelle pseudo aléatoire". Cette règle dépend d'un paramètre q_0 ($0 < q_0 < 1$). Une fourmi k choisira la ville " j " à partir de la ville " i " par la règle suivante :



$$j = \begin{cases} \underset{J}{\operatorname{argmax}}_{u \in J_i^k} [(\tau_{iu}(t)) \cdot (\eta_{ij})^\beta] & \text{Si } q \leq q_0 \\ J & \text{Si } q > q_0 \end{cases} \quad J \in J_i^k \quad (20)$$

La ville « J » sélectionnée aléatoirement selon la probabilité :

$$P_{ij}^k(t) = \frac{(\tau_{ij}(t)) \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t)) \cdot (\eta_{il})^\beta} \quad \text{Si } j \in J_i^k \quad (21)$$

Si : $q > q_0$ $j = P_{ij}^k(t)$ "équation 17" le système tend à effectuer une diversification (Exploration)

Si : $q \leq q_0$ le système tend vers une intensification (Exploitation), il ne peut pas choisir un trajet non exploré.

La gestion des pistes de phéromone est également modifiée, et se fait en deux niveaux différents :

- ❖ Mise à jour locale, pas à pas, de ville en ville

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (22)$$

τ_0 : Est la valeur initiale du phéromone

- ❖ Mise à jour globale, en ligne retardée, à la fin de la construction d'une solution.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t) \quad (23)$$

Où les arêtes (i; j) appartiennent au meilleur tour T de longueur L et

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L} \quad (24)$$

Seule la meilleure piste est mise à jour, ce qui contribue à une intensification par sélection de la meilleure solution.

Le système utilise une liste de candidats. Cette liste stocke pour chaque ville les villes voisines les plus proches, classées par distances croissantes.

II .7.4. L'algorithme Max-Min

Max-Min Ant System (MMAS) présente des différences notables [STH 97, STH 00] :

- ❖ Seule la meilleure fourmi met à jour une piste de phéromone.
- ❖ Les valeurs des pistes sont bornées par τ min et τ max.
- ❖ Les pistes sont initialisées à la valeur maximum τ max.
- ❖ La mise à jour des pistes se fait de façon proportionnelle, les pistes les plus fortes étant moins renforcées que les plus faibles.
- ❖ Une réinitialisation des pistes peut être effectuée.



Les meilleurs résultats sont obtenus en mettant à jour la meilleure solution avec une fréquence de plus en plus forte au cours de l'exécution de l'algorithme.

Tous ces types d'algorithmes dépendent fortement des paramètres [CLM O6] :

- ✗ Sensibilité due à l'intensité des fourmis.
- ✗ Sensibilité due à la distance entre les villes.
- ✗ Taux d'évaporation des phéromones

Dans ce qui suit on va présenter un état de l'art sous formes d'un tableau qui synthétise les travaux réalisés sur le problème VRP par les algorithmes ACO.

II.8. Etat de l'art de ACO pour VRP

Auteurs	Type de problème	Type d'algorithme	Fonction objectif	Année
Chia-Ho Chen Ching-Jung Ting	VRPTW	ACS	✗ Minimisation de la distance totale parcourue	2005
R.Montemanni L.M Gambardella A.E Rizzoli A.V Donati	DVRP	ACS	✗ Minimisation du temps total du parcourue	2005
R.Montemanni L.M Gambardella A.E Rizzoli F. Oliv variante erio	VRP	ACO	✗ Minimisation de la distance parcourue ✗ Minimisation du temps total du parcourue	2006
A.E Rizzoli R.Montemanni L.M Gambardella E. Lacibello	VRP VRPTW PDVRP DVRP	ACO	✗ Minimisation du temps total du parcourue	2007
F.Guenther F.Doerner L.Manuel	3L-CVRP	ACO	✗ Minimisation du coût total	2010
F.Guenther F.Doerner L.Manuel	2L-CVRP	ACO	✗ Minimisation du coût total	2009
R. Reim variante an M. Laumanns	CVRP	ACO	✗ Minimisation du coût total	2006
S. Moreira R.Sergio	DVRPTW	ACS	✗ Minimisation du coût total	2007



M.Amelia				
D. Taskiran	VRPTW	ACS	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du nombre de véhicule ✗ Minimisation de la distance parcourue 	2006
Z.XiaOia Z. LixinTang	VRP	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation de la distance ✗ Minimisation de nombre de véhicule 	2009
R. Andrew	DVRP	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation de la distance totale parcourue 	2008
D.Favaretto E.Moretti P.Pellegrini	VRPTW	ACS	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation de la longueur totale des sous-tours 	2008
Q.Chengming	VRP	ACS	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du nombre de tournées ✗ Minimisation de la distance totale parcourue 	2005
S.Lopes L.DelleMolle R.Eaig Limo	CVRP	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du nombre de véhicule ✗ Minimisation de la distance totale parcourue 	2005
A.Alkaff A.Rusdiansyah N.Ganayanti	DVRPTW	ACS	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du temps total du parcourue 	2008
B. Yu Z.Yangzhong B.Yao	VRP	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du coût total 	2008
S.R.Balseiro L.Loiseau J.Ramonet	TD-VRPTW	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Minimisation du nombre de service de client 	2011
C. R. Jyun L. C. Shu	IVRP	ACO	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Maximisation du profit 	2011



I.Ellabib P.Calamai O.Basir	VRPTW	ACO	⊗ Minimisation du coût total	2007
B.Yu Z. Yang B. Yao	VRPTW	ACO	⊗ Minimisation de la longueur totale	2011
P.C S.Huen -Huang	IRP	ACO	⊗ Minimisation de la longueur totale	2010

Tab. II.5. Etat de l'art sur VRP par ACO

Notre problème à résoudre est le CVRP par ACO avec un trajet limité.



II.9 Conclusion

L'optimisation par colonie de fourmis (OCF) est une méta heuristique qui a été utilisée avec succès pour résoudre plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire. Ce chapitre a été consacré à la présentation d'une approche méta-heuristique « Algorithme colonie de fourmis ». Après une introduction sur l'optimisation et l'optimisation par colonie de fourmi, des généralités sur les fourmis basées sur le comportement d'intelligence collectif de ces insectes sont présentées. En suite, un aperçu sur l'utilisation de ces mécanismes a été montré avec les fourmis artificielles et enfin les algorithmes de base d'optimisation par colonie de fourmis ont été exposés. Leur application pour un problème de CVRP fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Application d'ACO sur un système de distribution

III.1 Introduction

L'application de notre travail a été faite au niveau de la société ZEDPHARM du Groupe ZEDPHARM et plus particulièrement le service logistique et distribution. Cette société est spécialisée dans la distribution des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques.

Le problème rencontré chez la société ZEDPHARM ressemble au problème de tournées de véhicules VRP qui est décrit comme un problème de conception d'itinéraires, à moindre coût, d'un dépôt à un ensemble de points géographiquement dispersés effectué par une flotte de véhicules.

Le but de ce dernier chapitre, est de montrer comment peut-on résoudre le problème de tournées de véhicules avec capacité (CVRP) dont l'objectif de minimiser la distance totale parcourue, en utilisant une méta heuristique de population qui est « colonie de fourmis ».

Ce chapitre est divisé en trois sous chapitres: Le premier présente la société ZEDPHARM , le deuxième est une analyse des données et le dernier est consacré à une présentation des différents résultats de simulation que nous avons réalisé par l'application du méta-heuristique sur ce système de distribution et par conséquent, la détermination des différents paramètres de l'algorithme ACO.

III.2. présentation de l'entreprise (Groupe ZEDPHARM)

Le Groupe ZEDPHARM siège à Constantine a été fondé en 1997. Son activité va de la production des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques à la commercialisation et la distribution.

III.2.1. Structure du groupe ZEDPHARM

La structure du groupe est présentée par la figure (Fig.III.1)

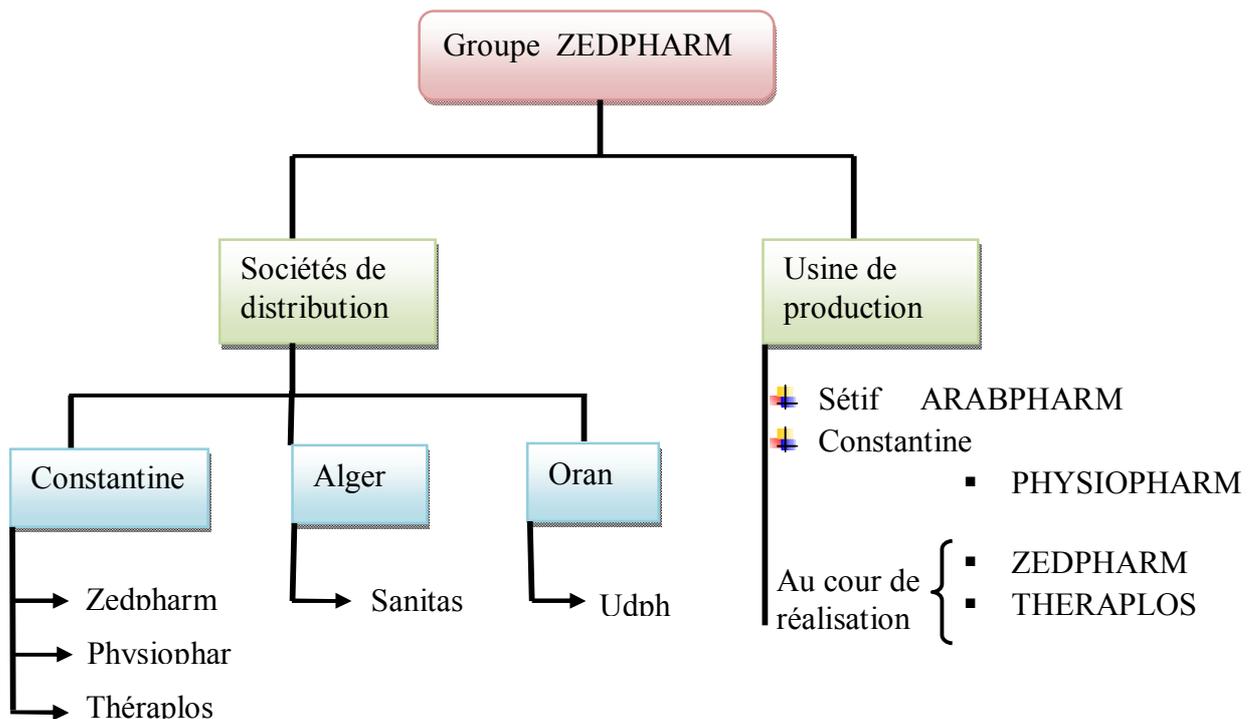


Fig. III.1. Structure du groupe ZEDPHARM

La société ZEDPHARM a vu la création de nouvelles sociétés de distribution et de production qui avec la société mère ont formé le groupe ZEDPHARM, chaque société a un organigramme bien structuré (Fig.III.2).

Notre stage est effectué au niveau de la société ZEDPHARM de Constantine de distribution et plus particulièrement au service du chef de parc. Les missions de ce dernier sont citées dans ce qui suit.

III.2.2. Les missions du chef de parc (dispatcher)

Le dispatcher assure :

- ☞ la réalisation des programmes de distribution,
- ☞ la répartition du programme de livraison,
- ☞ le contrôle des performances des chauffeurs,
- ☞ l'établissement des rapports d'activités(RJU),
- ☞ assure l'application des consignes de sécurité par les chauffeurs,
- ☞ la livraison dans les délais,
- ☞ l'affectation des chauffeurs (absence et remplacement),
- ☞ l'établissement des questionnaires dans le cas d'excès de vitesse.

III.2.3. Organigramme hiérarchique de la société ZEDPHARM

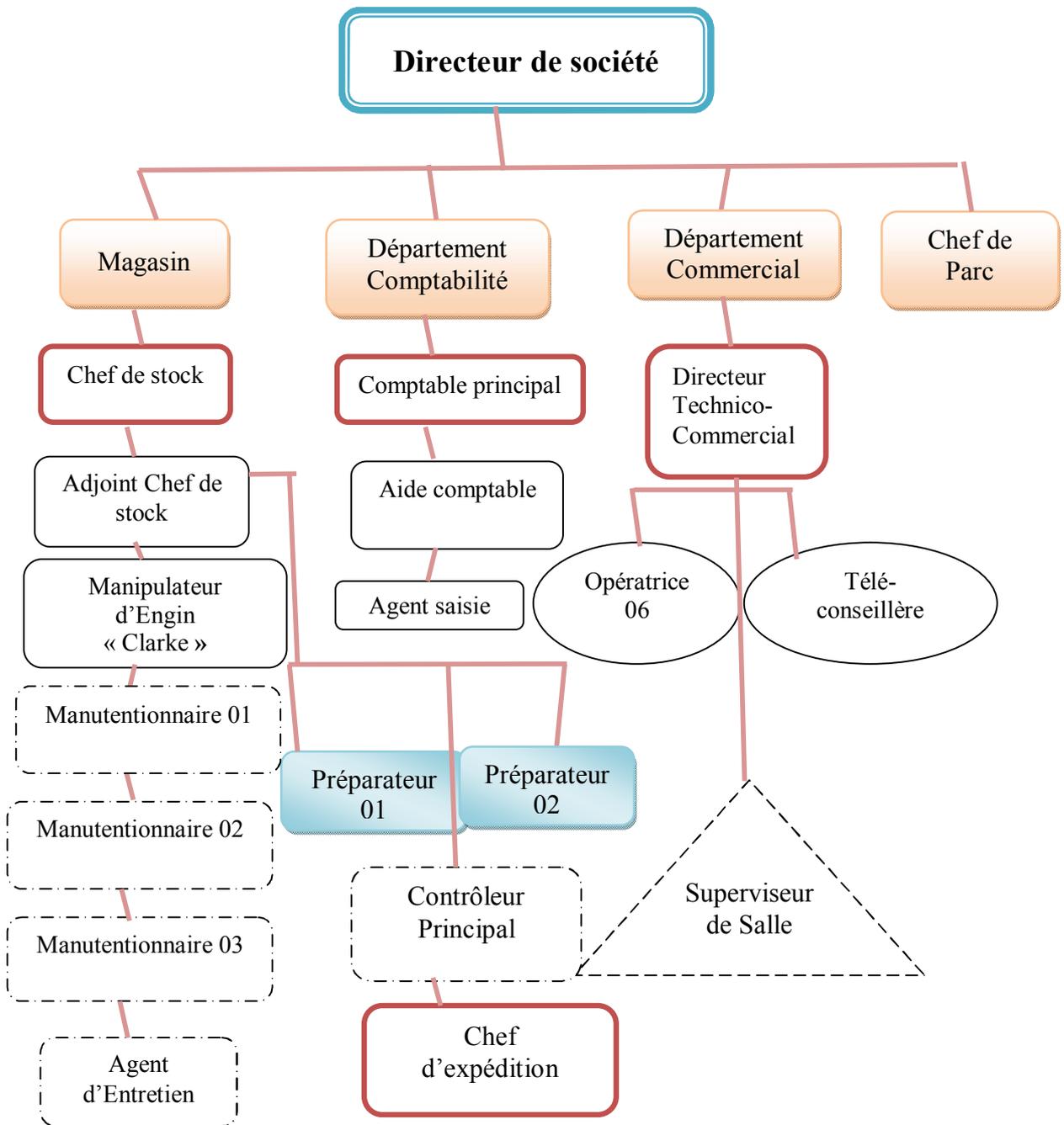


Fig.III.2. Organigramme hiérarchique de la société ZEDPHARM

Dans ce qui suit, on s'intéresse au service du chef de parc (Géo-localisation)

III.2.4. Méthode actuelle de planification de tournées

Actuellement, pour l'établissement du plan de livraison journalier, la société ZEDPHARM applique la politique suivante :

Chaque jour à 8 h 00, le service commercial reçoit un rapport général sur le contenu du magasin (quantités, prix, type de produit) établi par le chef du stock. Les opératrices appellent tous leurs clients pour les informer sur les types, quantités, prix des produits disponibles sous la surveillance des contrôleurs. Dans cette étape, le groupe utilise un système informatique nommé pompière (CRM) qui enregistre la communication qui se déroule entre le vendeur et l'acheteur, le recours à cette communication enregistrée est obligatoire dans le cas où il y a une réclamation.

À la fin de la journée (17 h 00), un rapport sur les clients (région), les quantités, le type de produit demandé est établi et transmis au magasin où la préparation et l'organisation des demandes de chaque wilaya est faite, la demande de chaque client (wilaya) est placée sur une table. Grâce à la disponibilité d'un parc homogène de véhicules, et à partir des informations ramenées précédemment, le chef de parc planifie les tournées de livraison journalière par la détermination des wilayas à visiter, les quantités à livrer et leur affectation aux camions ainsi que l'affectation des chauffeurs aux véhicules sans déterminer le circuit à suivre dans chaque wilaya, ce dernier est laissé au choix des chauffeurs plus expérimentés sur les différentes routes des différentes régions.

Dans le cas où il y a un nouveau client, si le client est dans une wilaya incluse dans le programme de livraison, ce dernier doit être modifié à condition que la quantité demandée ne dépasse pas la capacité du véhicule affecté pour cette wilaya, si non, ce client doit attendre le prochain planning.

L'établissement d'un programme de livraison journalier dépend de cinq (05) facteurs à savoir :

- ✚ La quantité demandée,
- ✚ Le stock,
- ✚ La disponibilité des moyens de livraison,
- ✚ Les chauffeurs,
- ✚ Les livreurs.

La société ZEDPHARM assure la livraison des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques aux wilayas de l'est algérien avec sa propre flotte et ses chauffeurs et des livreurs. L'établissement des itinéraires de livraison se fait sans l'intervention d'un outil d'optimisation. La livraison de ces produits est faite d'une manière directe, elle n'a aucun moyen de vérifier l'efficacité du planning établi.

III.3. Analyse des données

Dans ce qui suit nous présentons une analyse des différentes données nécessaires à l'application de notre approche.

III.3.1. Les clients : le regroupement des clients est fait en fonction du critère de distance, dans le cas où la distance séparant deux clients est petite, on pose ces deux clients comme étant un seul client.

III.3.1.1.. La carte géographique de l'Est Algérien

La carte suivante (Fig.III.3.) est la carte géographique de l'est algérien qui présente les points de livraison de la société ZEDPHARM.

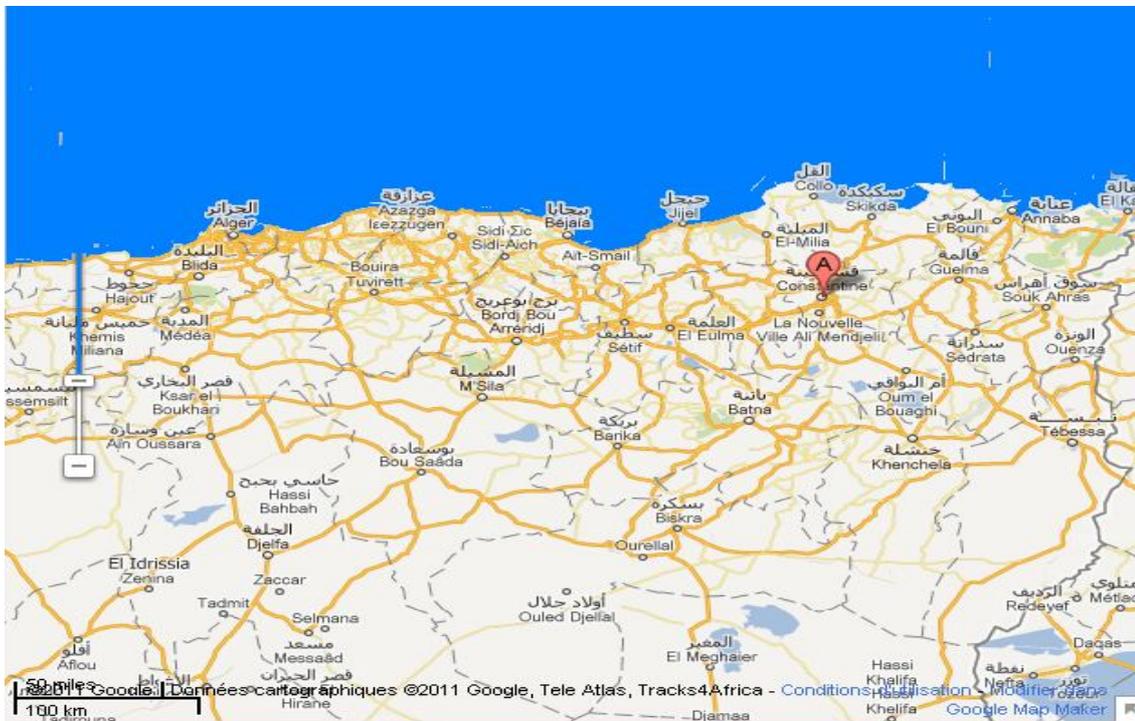


Fig.III.3. Carte géographique de l'est algérien représente les points de livraison de ZEDPHARM

III.3.1.2.. Construction du réseau de distribution

La construction du réseau de distribution pour la société ZEDPHARM se fait en fonction du critère de la distance.

Le graphe suivant (Fig. III.4.) représente le réseau de distribution pour les différents clients (pharmacies) de la société ZEDPHARM des wilayas de l'est, où chaque sommet indique une wilaya bien définie.

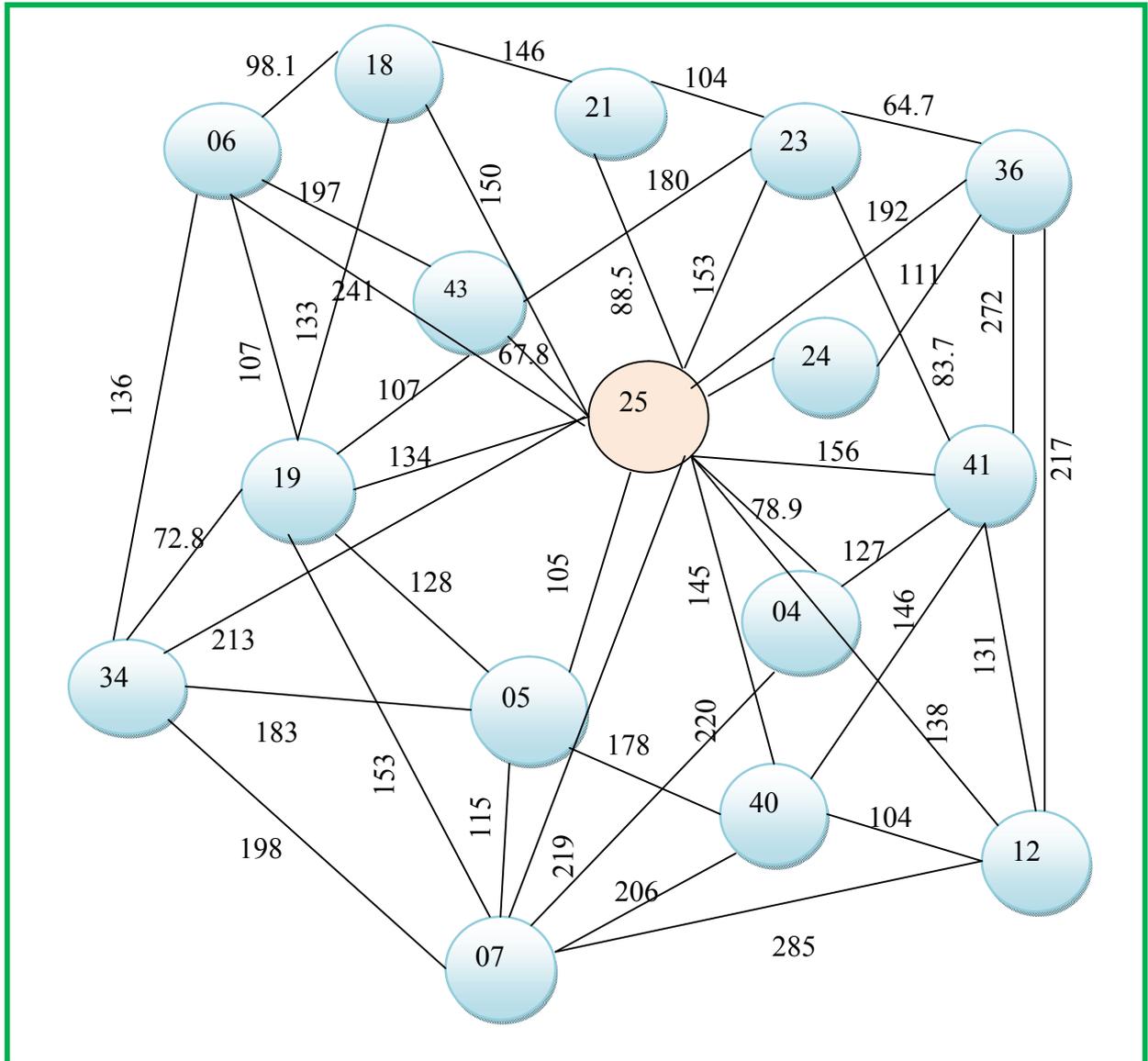


Fig. III.4. Réseau de distribution de la société pour la région de l'Est Algérien

On peut prendre un nœud de ce réseau pour le détailler a

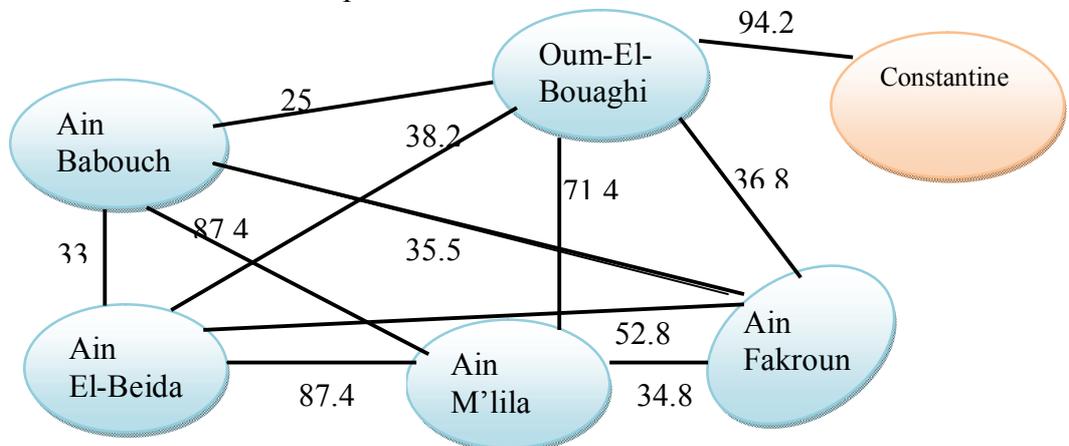


Fig. III.5. Le détail d'un nœud du réseau de distribution

Ainsi, le problème de la société ZDEPHARM est un « *CVRP* ». Il est représenté par un graphe $G(V, A)$

Où :

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$: Ensemble des $n + 1$ nœuds.

Avec :

v_0 : Dépôt (Centre de distribution : Constantine).

$\{v_1, \dots, v_n\}$: Ensemble des clients (pharmacies)

et $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs présentant les routes possible à suivre entre ces différentes pharmacies pour assurer la livraison des produits demandés où à chaque arc est associé une matrice de distance $d = (d_{ij})$

III.3.1.3. La matrice de distance : la distance séparant deux clients est représentée par une matrice de distance de nature « symétrique », cette dernière est déterminée par Google earth.

III.3.2. Les véhicules : la société ZEDPHARM distribue les produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques sous forme de colis grâce à une flotte homogène.

III.3.3. La demande : d'après les statistiques de la société ZEDPHARM, on peut représenter son historique de la demande d'un mois par la figure (III.6).

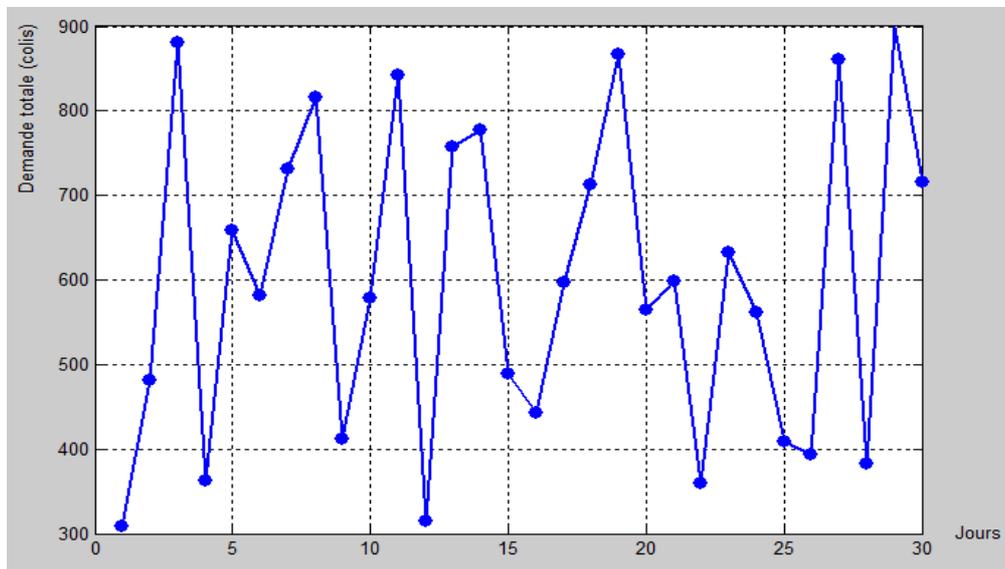


Fig.III.6. Structure de la demande d'un mois de la société ZEDPHARM

Nous remarquons que la demande est très variable. Aussi et pour mieux cerner notre problème, nous avons divisé les quantités demandées en intervalles. Ainsi, on distingue quatre cas possible à savoir :

Cas 1 : demande faible $D \in [300 \quad 500]$

Cas 2 : demande moyenne $D \in [500 \quad 700]$

Cas 3 : demande forte $D \in [700 \quad 900]$

Cas 4 : demande générale $D \in [300 \quad 900]$

Ce qui nous montre la figure (.III.7.)

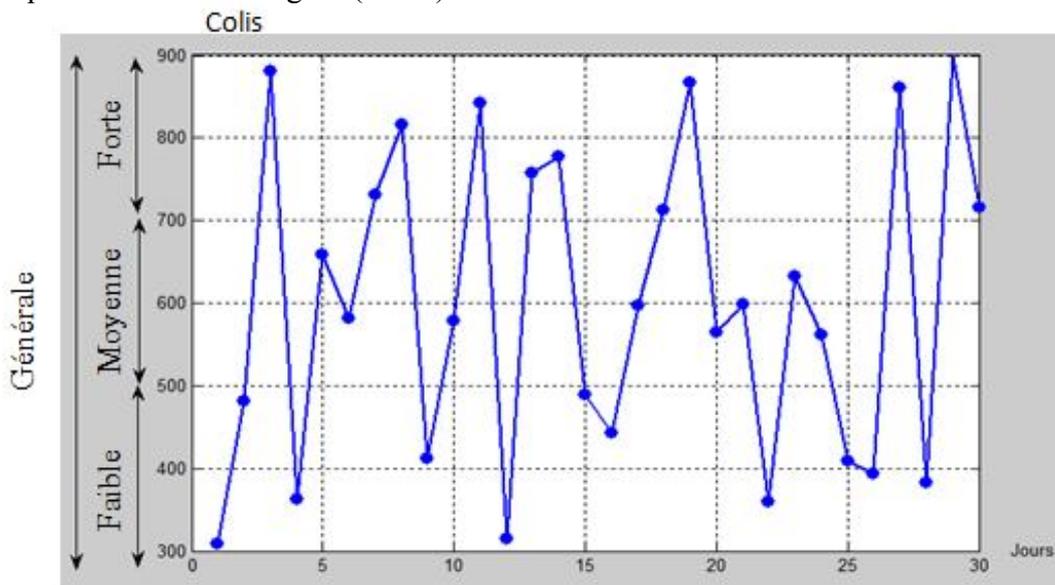


Fig.III.7. Les quatre cas possibles de la demande

III.4. Estimation des paramètres de l'ACO

Les valeurs des paramètres de l'algorithme ACO ont un effet direct ou indirect sur la qualité de solution obtenue. Aussi, pour déterminer la valeur des paramètres (β , ρ) et le nombre d'itération, nous procédons par simulation.

Pour la détermination de la valeur de β , on simule pour plusieurs valeur β ainsi le nombre d'itération jusqu'à l'obtention d'une solution de valeur fixe, à ce moment, on prend la valeur de β correspond à cette solution ainsi que le nombre minimum d'itérations nécessaires pour générer cette situation de l'algorithme. De la même manière on détermine le paramètre ρ .

III.4.1. 1^{er} cas : La demande faible

Après la simulation avec plusieurs valeur de β et plusieurs nombres d'itérations pour chaque valeur de β . La figure (III.8.) montre que l'algorithme converge avec $\beta = 9$.

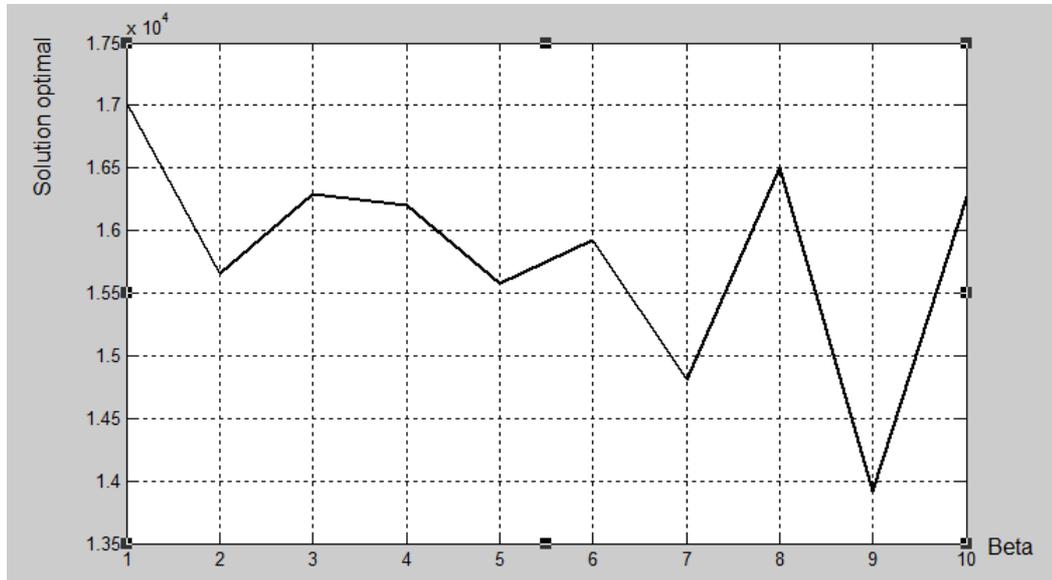


Fig.III.8. Détermination du paramètre β cas : demande faible

Les mêmes opérations sont effectuées pour déterminer la valeur de ρ .

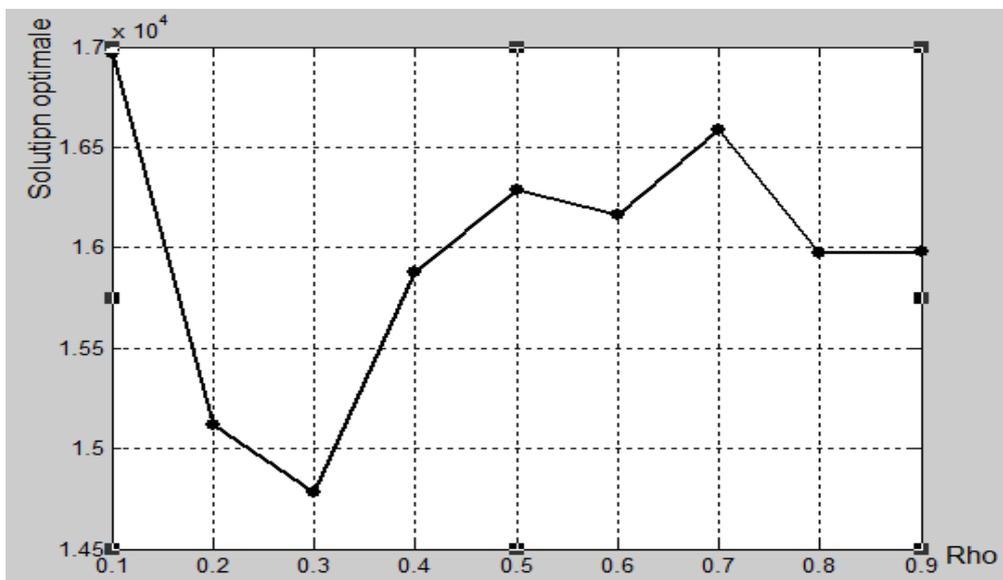


Fig.III.9. Détermination du paramètre ρ cas : demande faible

D'après la Figure (Fig.III.9.) on observe que la valeur de $\rho = 0.3$ rend l'algorithme ACO converge vers la solution optimale.

Avec les valeurs de β et ρ obtenues précédemment, des variations sur la capacité sont effectuées, où chaque modification de Q engendre une solution optimale.

Influence de la capacité sur la distance parcourue

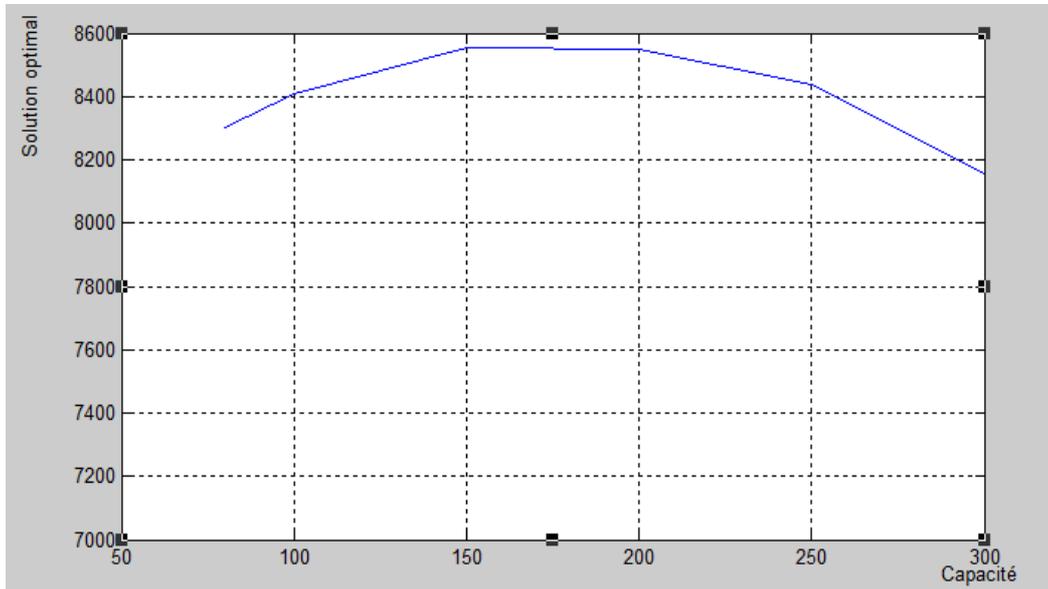


Fig.III.10. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : demande faible

On remarque une légère variation dans la distance totale parcourue elle est d'ailleurs négligeable, ce qui signifie que la capacité n'a aucune influence dans ce cas sur la distance parcourue sauf dans le cas où la matrice de distance est une matrice asymétrique.

III.4.2. 2^{ème} cas : La demande moyenne

Comme notre objectif est la minimisation de la distance totale parcourue, alors une simulation avec différentes valeurs de β est effectuée, des solutions correspondante sont obtenues, la variation de la solution en fonction de β est représentée par la figure (III.11).

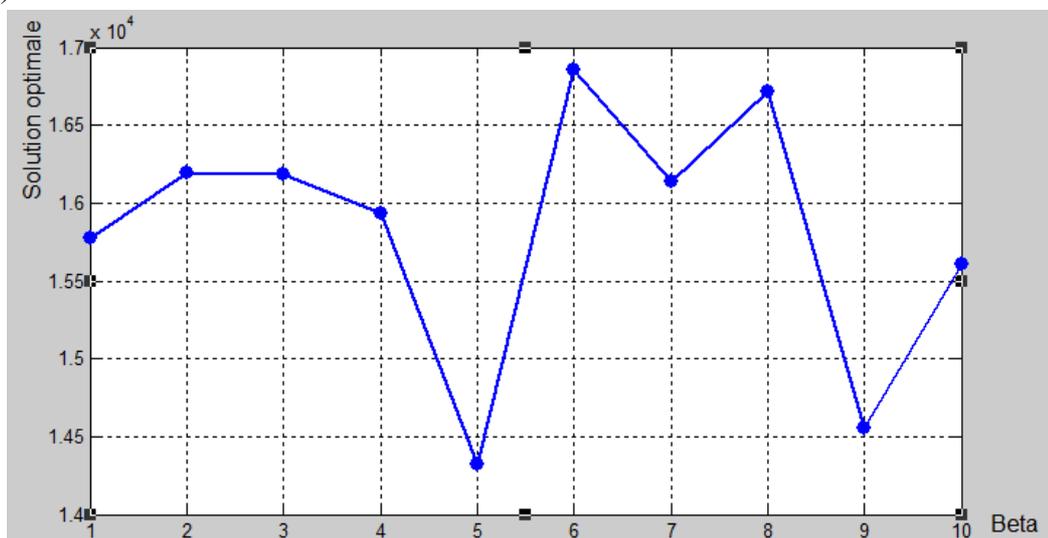
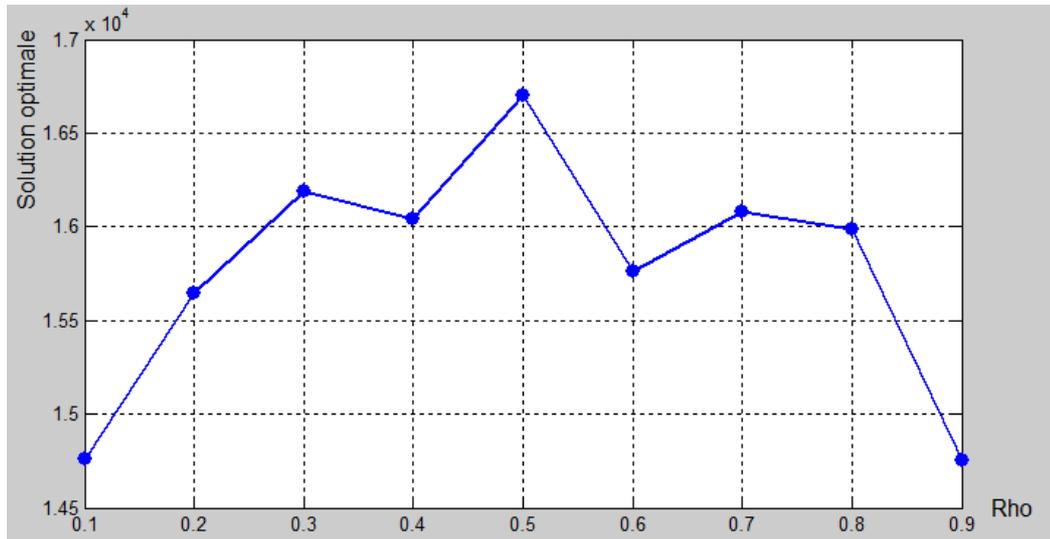


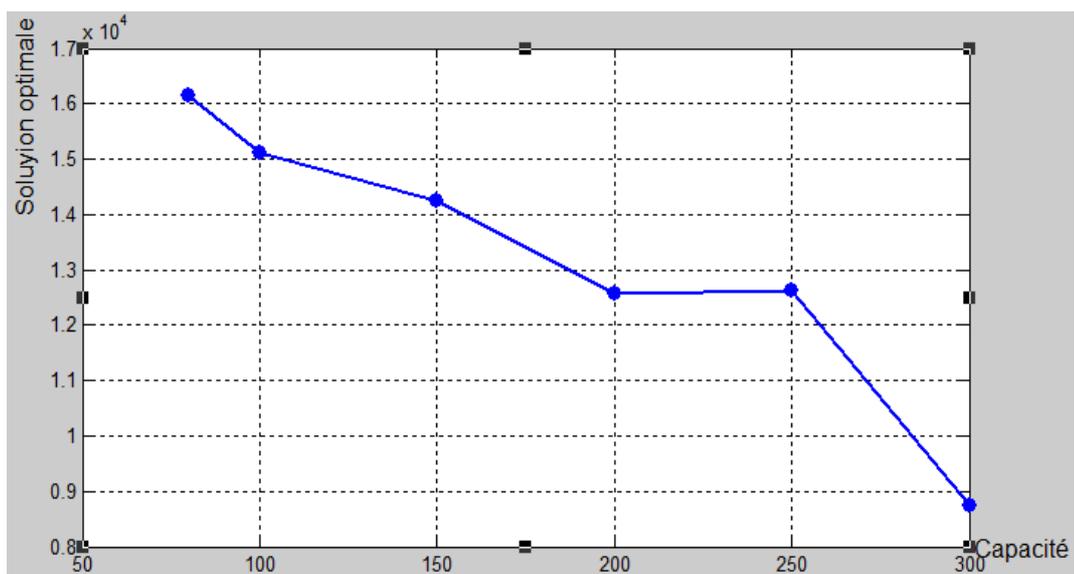
Fig.III.11. Détermination du paramètre β cas : demande moyenne

La figure (III.11.) nous permet de déterminer la valeur de $\beta = 5$ pour la quelle la solution est minimale.

**Fig. II.12. Détermination du paramètre ρ cas : demande moyenne**

On fait la simulation de la même manière, on trouve que la valeur de $\rho = 0.9$ équivalente à une solution minimale ce que nous montre la figure (III.12.)

✚ Influence de la capacité sur la distance parcourue

**Fig.III.13. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : demande moyenne**

D'après la figure (III.13.) On peut dire que la capacité du véhicule a une influence sur la solution trouvée qu'on peut l'interpréter par l'augmentation dans la quantité demandée qui reflète l'augmentation du nombre de véhicule utilisée (nombre de tournée) et par conséquent la croissance de la distance totale parcourue.

III.4.3. 3^{ème} cas : *La demande forte*

La variation de la solution résultante engendrée par la variation du paramètre β est représentée par la figure (III.14).

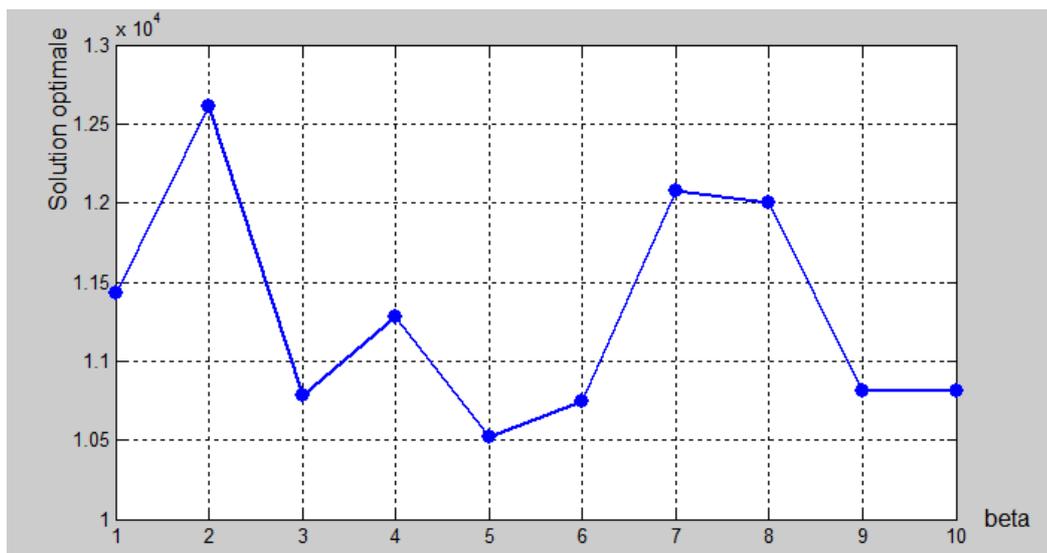


Fig.III.14. Détermination du paramètre β cas : la demande est forte

La figure (III.14.) nous montre la valeur de β ($\beta = 5$) pour laquelle la distance totale est minimale.

Les mêmes opérations sont effectuées pour déterminer la valeur de ρ

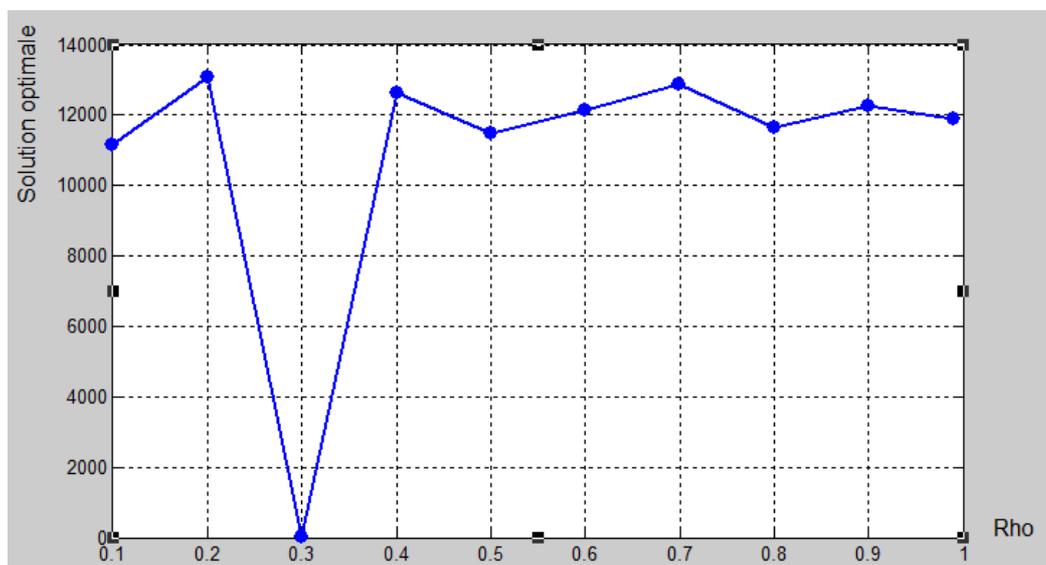


Fig.III.15. Détermination du paramètre ρ cas : demande forte

D'après la figure (III.15) le paramètre ρ prend la valeur 0.3 afin que la solution obtenue soit minimale.

+ *Influence de la capacité*

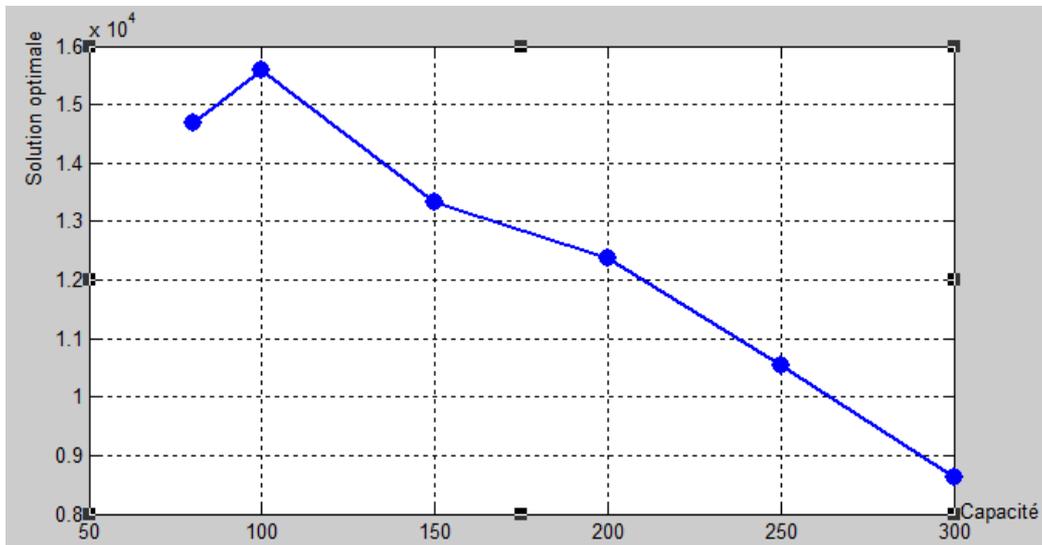


Fig.III.16. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : la demande est forte

La Figure (Fig.III.16.) nous montre l'existence d'une relation inversement proportionnelle de la capacité avec la solution optimale, ce ci revient à la croissance de quantité demandée, par conséquent le nombre de véhicule accrue **qui reflète directement** la croissance de distance parcourue.

III.4.4. 4^{ème} cas : demande générale

Dans ce dernier cas, on détermine les paramètres de notre algorithme ou la demande englobe les trois cas précédents.

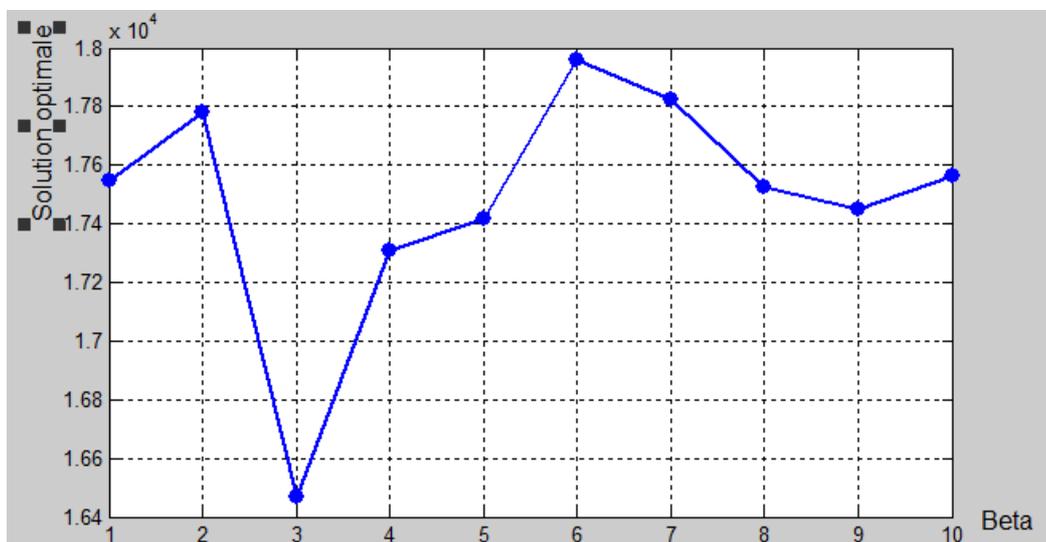
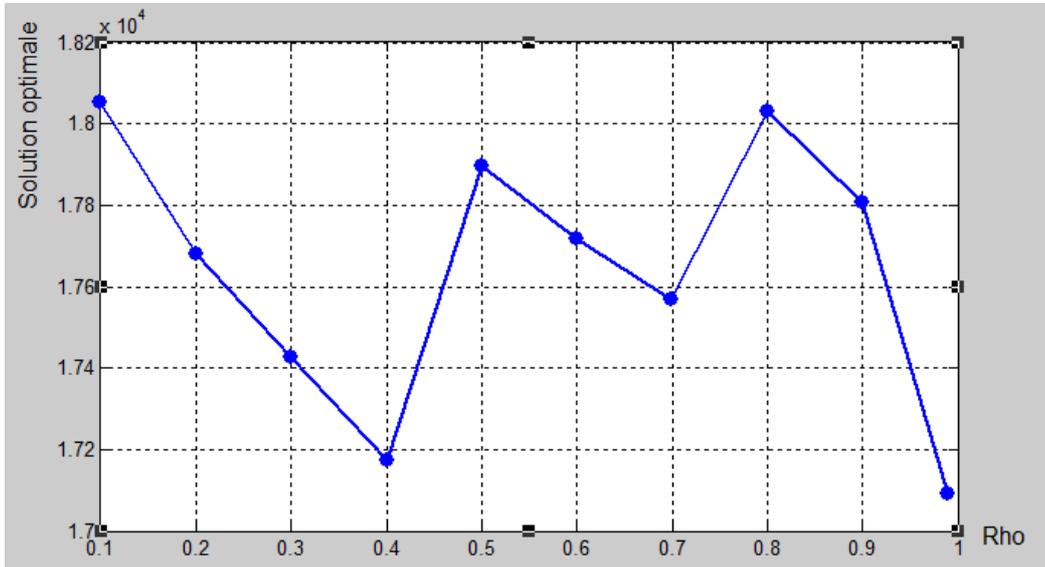
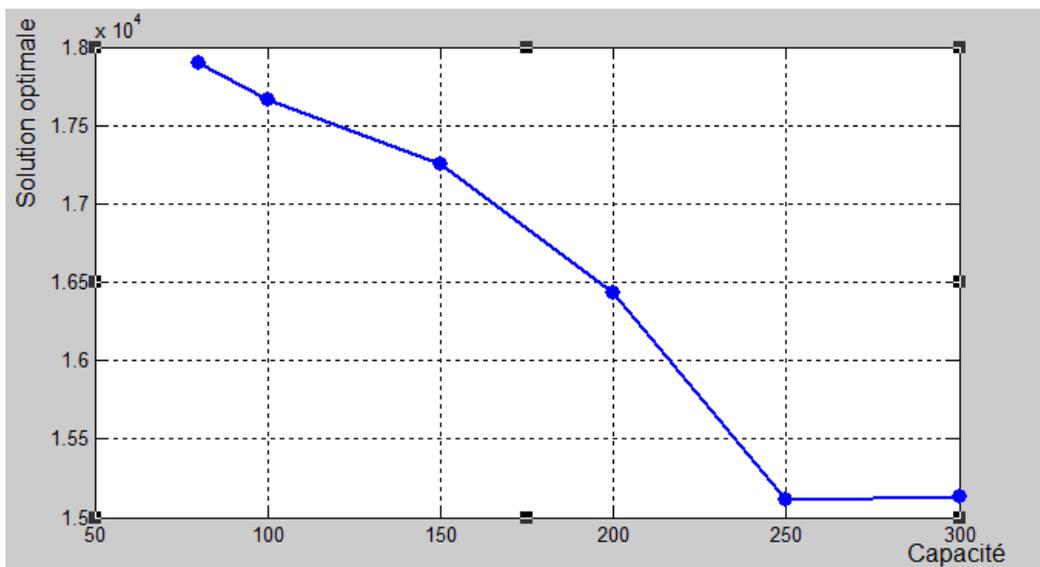


Fig.III.17. Détermination du paramètre β dans le cas général

La figure (III.17) nous montre que la valeur du paramètre β qui permet d'obtenir une solution optimale minimale est de valeur =3.

**Fig.III.18. Détermination du paramètre ρ cas : la demande est générale**

Cette figure (III.18) nous permet de détecter la valeur de $\rho = 0.99$ pour la quelle on obtient une solution minimale.

**Fig. III.19. Influence de la capacité sur la solution optimale cas : la demande est forte**

La figure (III.19.) nous montre la variation linéaire de solution obtenue en fonction de capacité, ce ci revient à la quantité demandée augmentée, qui reflète directement la croissance de distance parcourue a cause du nombre de véhicule croissant.

III.5. Application à une journée

Après une analyse de la demande et une estimation des paramètres, on a appliqué cet algorithme à une journée (Juillet 2011).

Dans la section suivante, on présente les résultats obtenue de la simulation de notre approche par MATLAB pour la résolution du problème CVRP au niveau de la société ZEDPHARM Constantine.

Les performances de notre algorithme sont évaluées sur un réseau de distribution composé de 54 clients inclus le dépôt, la flotte utilisée est homogène de capacité de 80 colis, la demande des clients est connue à l'avance, la matrice séparant les clients est représentée par une matrice de distance de nature « symétrique ».

III.5.1. Etat de livraison de la société ZEDPHARM

Le tableau suivant représente l'état de livraison de la société ZEDPHARM, les quantités livrées sont données par le nombre de colis.

N°	Clients (pharmacies)	Quantité livrée (colis)
1	Oum- El-Bouaghi	21
2	Ain -El-Beida	18
3	Ain- M'Lila	18
4	Ain- Facroun	19
5	Ain- Babouche	17
6	Batna	10
7	Arris	5
8	Barika	8
9	Bejaia	7
10	Adekar	4
11	Tazmalt	3
12	Kherrata	6
13	Biskra	9
14	El-Kantara	4

15	Tolga	3
16	Tébessa	7
17	Bir -El-Ater	3
18	Cheria	3
29	Jijel	11
20	El Milia	8
21	Ziama-mansuria	5
22	Setif	10
23	Et-Eulma	9
24	Hammam- Guergour	5
25	Skikda	8
26	El-Arrouch	5
27	Oum-Toub	3
28	Azzaba	4
39	Annaba	13
30	Berrahal	9
31	Guelma	10
32	Oued-zenati	7
33	Bouchegout	5
34	El-khroube	10
35	Hamma Bouziane	6
36	Zighoud Youcef	8
37	Bordj-Bou-Arreidj	20
38	Mansourah	10
49	Bordj –zemoura	10
40	El Taraf	9
41	Asfour	6
42	Besbès	5
43	Ben mehidi	7
44	Khenchela	12
45	Babar	8
46	Ain Touila	10
47	Tamza	3

48	Souk-Ahras	10
59	Sedrata	6
50	Taoura	4
51	Mila	7
52	Chelghoum laid	6
53	Rouached	4

Tab.III.1 La demande d'une journée de la société ZEDPHARM (Juillet 2011)

D'après l'analyse de la demande de la société ZEDPHARM Constantine, et après le tableau précédent, on conclut que la demande de cette journée de la société, est faible.

Comme notre objectif est la minimisation de la distance totale parcourue (coût total) avec un minimum de tournées (minimum du nombre de véhicule), par la combinaison de ces deux objectifs et la combinaison de deux contraintes capacité et de distance du trajet limité, l'application de notre approche (l'algorithme ACO) sur ce système de distribution nous permet de tirer les résultats suivants, est grâce aux résultats de simulation obtenue précédemment:

- ☒ Distance totale parcourue : 4136.3 km
- ☒ Nombre de tournées : 6 tournées
- ☒ Le temps de simulation = 23 seconds.
- ☒ $\beta = 9$
- ☒ $\rho = 0.3$

III.6. Présentation graphique de la solution obtenue par ACO pour CVRP de la société ZEDPHARM

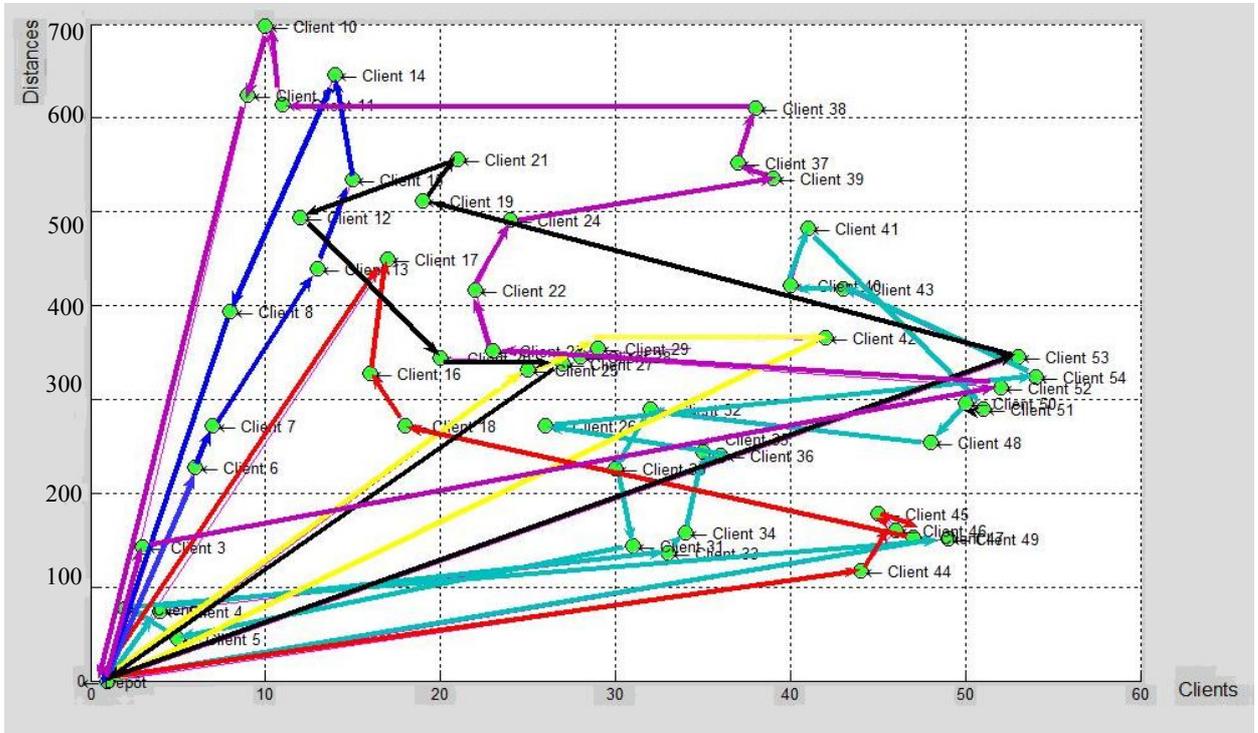


Fig. III.20. Présentation graphique des tournées construites par ACO

III.7. Présentation géographique de tournées construites par ACO

Tournée N° : 1

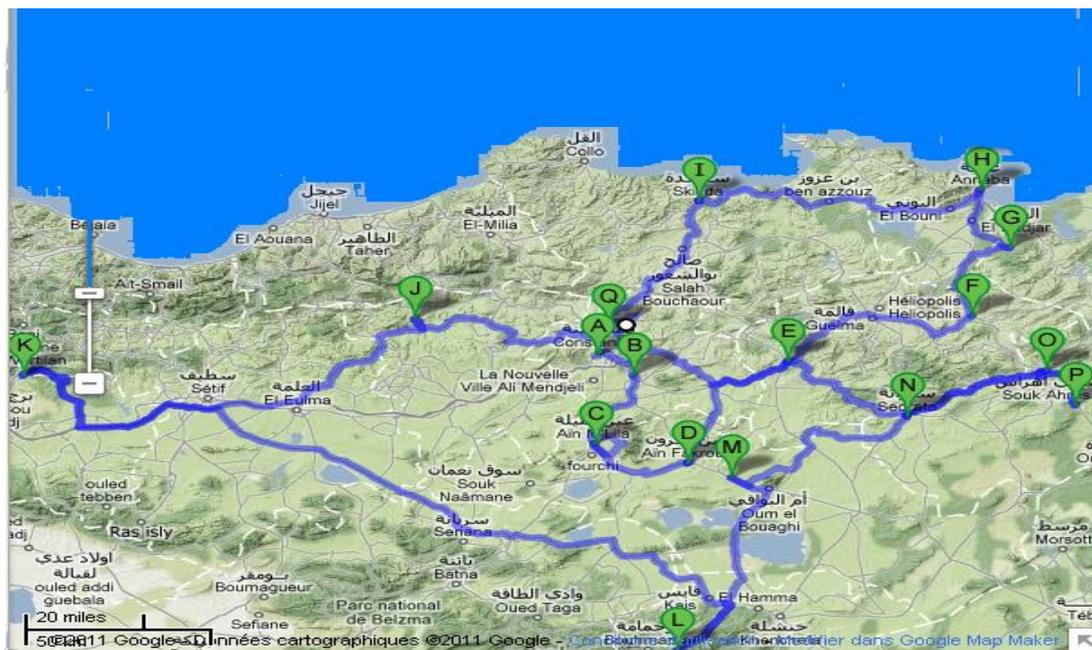


Fig. III.21. Présentation géographique de la tournée N° : 1

Tournée N° : 2

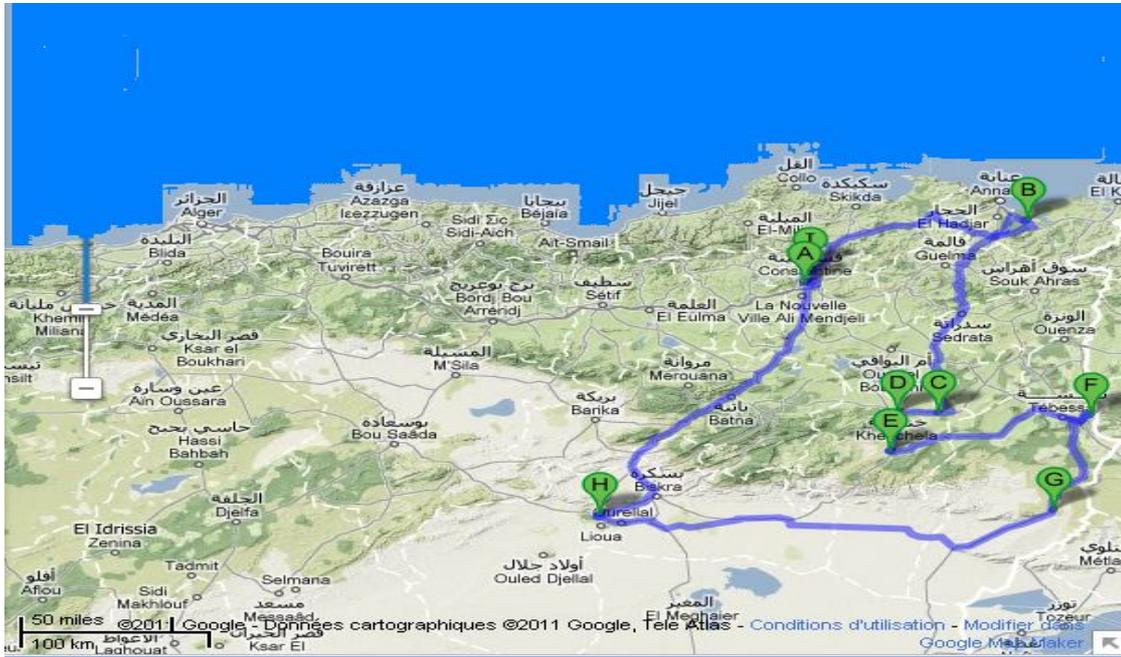


Fig. III.22. Présentation géographique de la tournée N° : 2

Tournée N° : 3

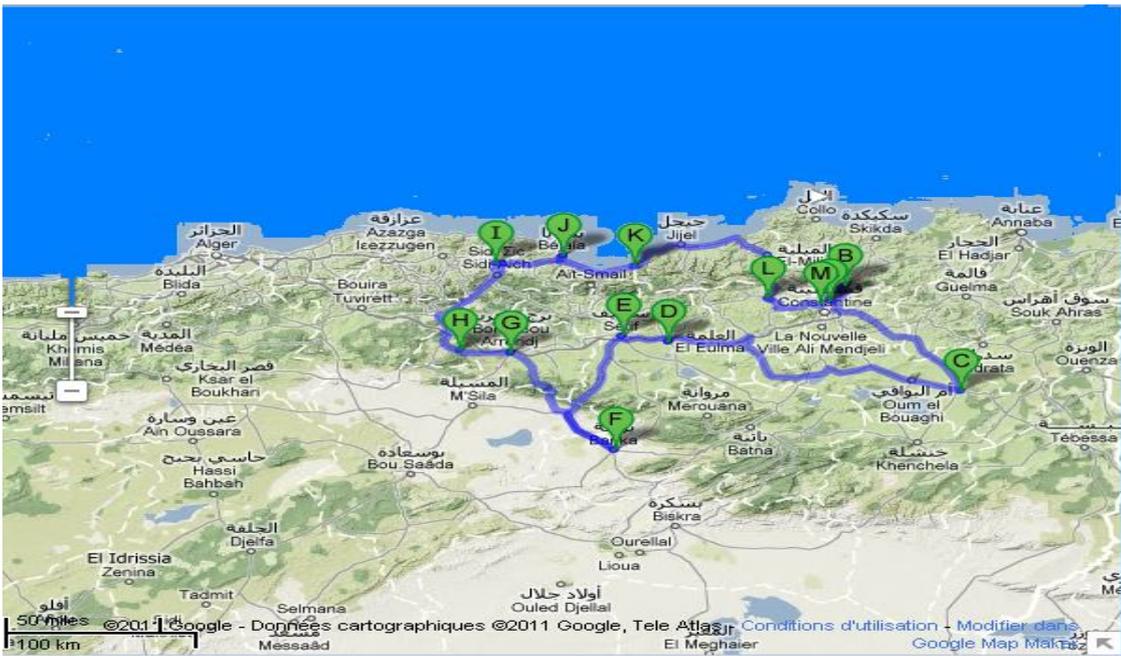


Fig. III.23. Présentation géographique de la tournée N° : 3

Tournée N° : 4

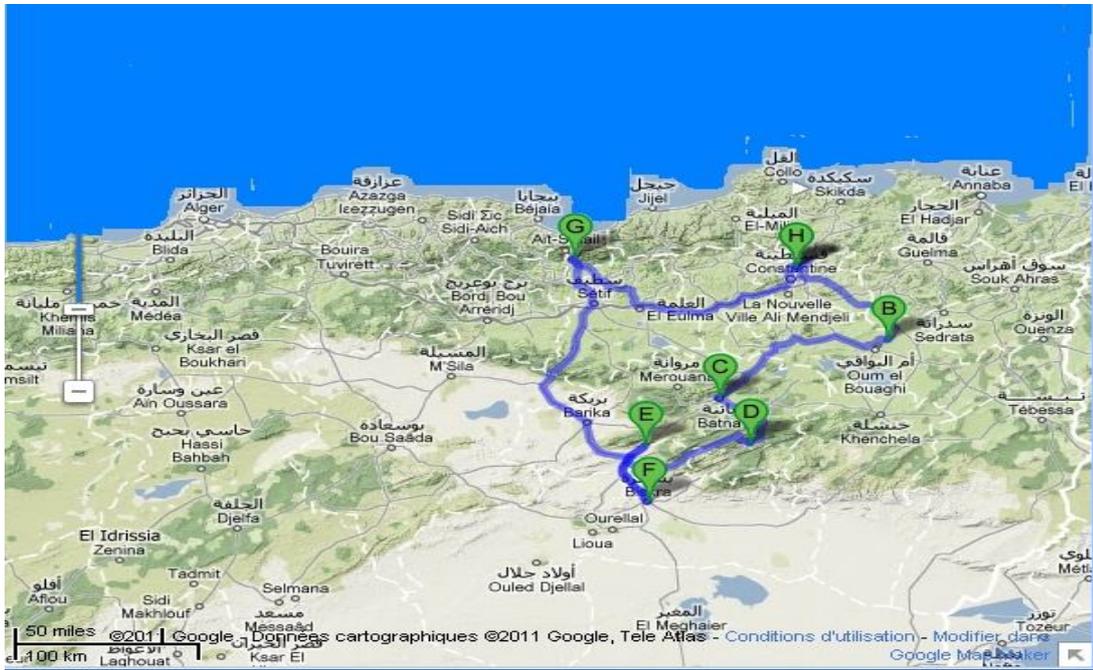


Fig. III.24. Présentation géographique de la tournée N° : 4

Tournée N° : 5

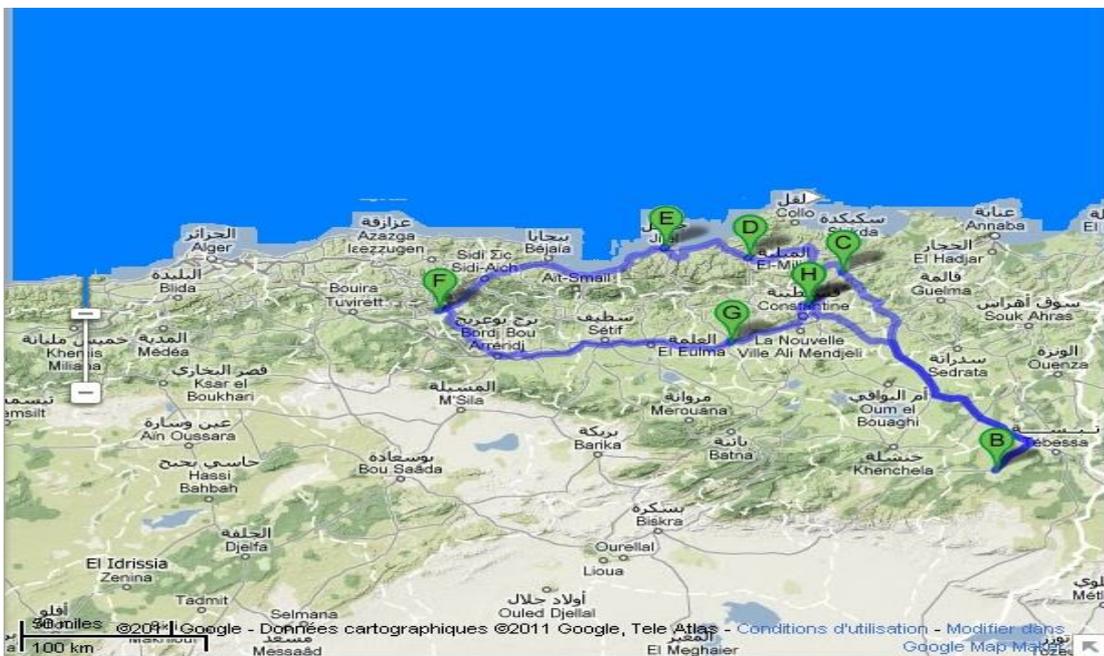


Fig. III.25. Présentation géographique de la tournée N° : 5

Tournée N° : 6



Fig. III.26. Présentation géographique de la tournée N° : 6

Actuellement, afin de satisfaire leurs clients et assurer la livraison de ses produits, la société ZEDPHARM, qui dispose d'une flotte de véhicule homogène, planifie les tournées de livraison journalière par la détermination des wilayas à visiter, les quantités à livrer ainsi que l'affectation des chauffeurs aux véhicules sans déterminer le circuit à suivre dans chaque wilaya, ce dernier est laissé au choix des chauffeurs qui se charge de la conception des itinéraires et de la livraison. Ainsi la création des tournées est faite sans l'intervention d'un outil d'optimisation et la livraison est effectuée d'une manière directe, à chaque wilaya est associé un véhicule, ce dernier servira l'ensemble des clients.

Pour le cas de la journée choisi comme exemple pour notre étude, il y a 16 wilayas à visiter ce qui correspond à l'utilisation de 16 véhicules, 16 chauffeurs et cela selon la politique appliquée par ZEDPHARM.

Or, par l'application de l'approche proposée de colonie de fourmis pour la même journée de commande la livraison peut se faire en 06 tournées et donc 06 véhicules.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, l'application du méta-heuristique d'ACO sur un système de distribution permet de définir les trajets optimaux à suivre en fonction de la demande et en minimisant la distance. En effet, après avoir déterminé les valeurs respectives de β et ρ nous avons appliqué l'algorithme ACO pour le cas d'une journée de distribution au niveau de la société ZEDPHARM. Les résultats obtenus et que la distribution de toutes les demandes peut se faire en 6 tournées, à chaque fois l'itinéraire est spécifié et les conditions de capacité et de distance sont respectées ce qui vise à démontrer l'utilité et les bénéfices pouvant résulter de cette approche.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite deux axes de recherche, le premier est relatif au problème d'optimisation des tournées de véhicules VRP dans un réseau de distribution, le deuxième est lié à l'application du méta-heuristique particulièrement colonie de fourmis dans l'objectif d'optimisation.

Sous sa forme la plus simple, le problème de tournées de véhicules consiste à minimiser la distance totale parcourue par une flotte de véhicules homogènes afin d'assurer la livraison, et par conséquent la satisfaction du client à partir d'un seul dépôt, à un nombre fixe de clients géographiquement distribués tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules et le trajet effectué par chaque véhicule.

Les algorithmes des fourmis sont des algorithmes inspirés du comportement naturel des fourmis qui consiste à optimiser le trajet de la fourmilière à l'endroit de la nourriture. Nous avons appliqué cette méthode pour optimiser le chemin parcouru par les véhicule au cour de livraison des produits aux clients.

Ce mémoire examine le cas réel de distribution des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques de la société ZEDPHARM. Le réseau étudié est constitué d'un dépôt, de plusieurs clients. et d'une flotte composée d'un nombre limité de véhicules homogènes. La capacité des véhicules est déterminée en termes d'unités de produits livrés (colis).

Le problème rencontré au niveau de cette société est similaire à celui des tournées de véhicules avec capacité CVRP, dans un tel problème, on doit visiter un ensemble de clients répartis dans un réseau pour livrer des produits pharmaceutiques et parapharmaceutiques à l'aide de véhicules homogènes et de capacités limitées. Notre objectif est de déterminer un ensemble optimal de circuit suivi par un véhicule (cas de sa tournée) pour minimiser le coût total de distribution, pour le cas étudié, le coût est représenté par la distance totale parcourue.

Pour atteindre ce but, nous avons proposé un modèle de résolution approché basé sur l'algorithme de colonie de fourmi, puis, pour valider expérimentalement cette approche évolutionniste, on a utilisé le langage de programmation MATLAB,

L'application de cette approche nous facilite la planification et la régénération des routes en très peu de temps.

La contribution principale de ce mémoire est d'offrir des solutions applicables pour un cas réel de distribution. Entre autres, l'optimisation du problème a produit des économies potentielles en temps et en distance.

Et comme perspectives, nous proposons :

- ✎ La continuité sur cet axe de recherche on faisant l'insertion, de deux autres contraintes, celle du dynamisme et les fenêtres horaire.
- ✎ L'utilisation de deux approches suivantes, réseau de neurone pour le regroupement des clients en classe ensuite l'optimisation par colonie de fourmi ou l'inverse.

Autres dimensions peuvent être considérées lors de l'élaboration du problème est qui dépend des exigences des clients.

Annexe A

Optimisation et Recherche opérationnelle

Une heuristique : est une méthode conçue pour un problème d'optimisation donnée qui produit une solution non nécessairement optimale.

Un méta -heuristique : est défini de manière similaire, mais à un à un niveau d'abstraction plus élevé

Espace de recherche : est l'intervalle où il appartient les variables.

Graphe de construction : le graphe de construction est le graphe sur lequel les fourmis déposent de la phéromone. Les sommets de ce graphe sont les composants de solution que les fourmis peuvent sélectionner pour construire progressivement leurs solutions.

Fonction objective : représente la fonction à optimiser.

Il existe trois types de tournées :

- ✗ **Tournées fixes** : le circuit est établi une fois pour toutes (remplissage du véhicule faible et rigidité du parcours).
- ✗ **Tournées semi-variables** : les secteurs géographiques sont fixés mais les tournées sont élaborées en fonction des commandes reçues et du cumul des tonnages (taux de remplissage correct).
- ✗ **Tournées variables** : les tournées sont réactualisées chaque jour d'après les commandes recueillies. (Optimisation des ressources matérielles et humaines).

Circuit hamiltonien : est un circuit qui passe exactement une fois par tous les sommets du graphe.

La longueur d'un circuit : est la somme des longueurs des arcs qui le composent,

Cycle = 1 itération

Graphe complet : Un graphe complet avec n sommets est un graphe possédant n sommets pour lequel chaque sommet est relié à tous les autres (il existe une arête entre chaque paire de sommets).



Le problème de voyageur de commerce PVC: TSP (Traveling Salesman Problem) est le problème consistant à trouver un circuit hamiltonien de longueur minimale sur le graphe

Problème combinatoire : On qualifie généralement de « combinatoires » les problèmes dont la résolution se ramène à l'examen d'un nombre fini de combinaisons, cette résolution faire face à une explosion du nombre de combinaisons à explorer

Optimisation : L'optimisation combinatoire trouve des applications dans des domaines aussi variés que la gestion, l'ingénierie, la conception, la production, les télécommunications, les transports, l'énergie, les sciences sociales et l'informatique elle-même.

Intelligence artificielle

Optimisation par colonie de fourmi : l'optimisation par colonies de fourmis, résout un problème d'optimisation combinatoire de parcours d'un graphe de construction complet.

La phéromone : est une substance chimique volatile que les fourmis perçoivent grâce à des capteurs situés sur leurs antennes et la dépose sur le sol par une glande situé sur leur abdomen en créant des pistes chimiques elle représente la mémoire globale du système qui évolue par apprentissage, ainsi les fourmis utilisent les phéromones comme media de communication sensibles à la quantité, intensité de phéromones de leur environnement.

La mise à jour de phéromone : Le but de la mise à jour des traces de phéromones, dernière étape d'une itération, est d'augmenter les valeurs de phéromones associées à de bonnes solutions, tout en réduisant celles associées à des mauvaises. En général, la mise à jour se fait :

1. en réduisant toutes les valeurs de phéromones par un procédé appelé évaporation
2. en augmentant les valeurs de phéromones associées à un ensemble de bonnes solutions choisies $\Delta\tau$.

La mise à jour des traces de phéromones diffère selon l'algorithme d'ACO utilisé.

Intensification : est l'exploitation de l'information rassemblée par le système à un moment donné, dans le cas des algorithmes de colonies de fourmis, cela revient à favoriser les pistes de phéromones.

La diversification : La diversification est la recherche de nouvelles informations, afin d'augmenter la connaissance du problème. est l'exploration de régions de l'espace de recherche imparfaitement prises en compte. Le piège d'un mauvais réglage entre intensification et diversification serait de tomber rapidement dans une solution sous-optimale (Intensification trop forte), ou de ne jamais trouver une solution. (Diversification trop forte).

Une fourmi artificielle: est une entité simple dotée d'un comportement similaire ou étendu à celui de la fourmi réelle

Une colonie virtuelle : est un ensemble d'entités simples capables d'accomplir des tâches complexes grâce au concept d'émergence et d'auto-organisation.

Auto- organisation : L'auto-organisation caractérise un processus au cours duquel une structure émerge au niveau global uniquement d'un grand nombre d'interactions entre les composants de niveau local du système. Les règles spécifiant les interactions entre composants du système sont suivies en utilisant uniquement des informations locales, sans référence au modèle global.

Emergence : c'est une propriété macroscopique d'un système qui ne peut pas être déduite à partir de son fonctionnement microscopique, elle a été exploitée pour la conception des systèmes artificiels.

Emergence : est l'apparition plus ou moins soudaine d'une idée, d'un fait social, politique, économique».D'après Petit Larousse

La stigmergie : est à la base des méta-heuristiques de colonies de fourmis. Elle est définie comme étant une "forme de communication passant par le biais de modifications de l'environnement". On peut également rencontrer comme définition : "interactions sociales indirectes". Le principal avantage de la stigmergie est que les individus échangent des informations par le biais du travail en cours, permettant ainsi une coordination distribuée.

Liste tabou : est un vecteur dynamique qui contient la liste des villes visitées par la fourmi K.

Recrutement : est une forme de communication qui rassemble les individus à un endroit où un travail est requis.

Il existe deux canaux de communication chez les fourmis :

- ☒ Direct : recrutement
- ☒ Indirect: trophallaxies

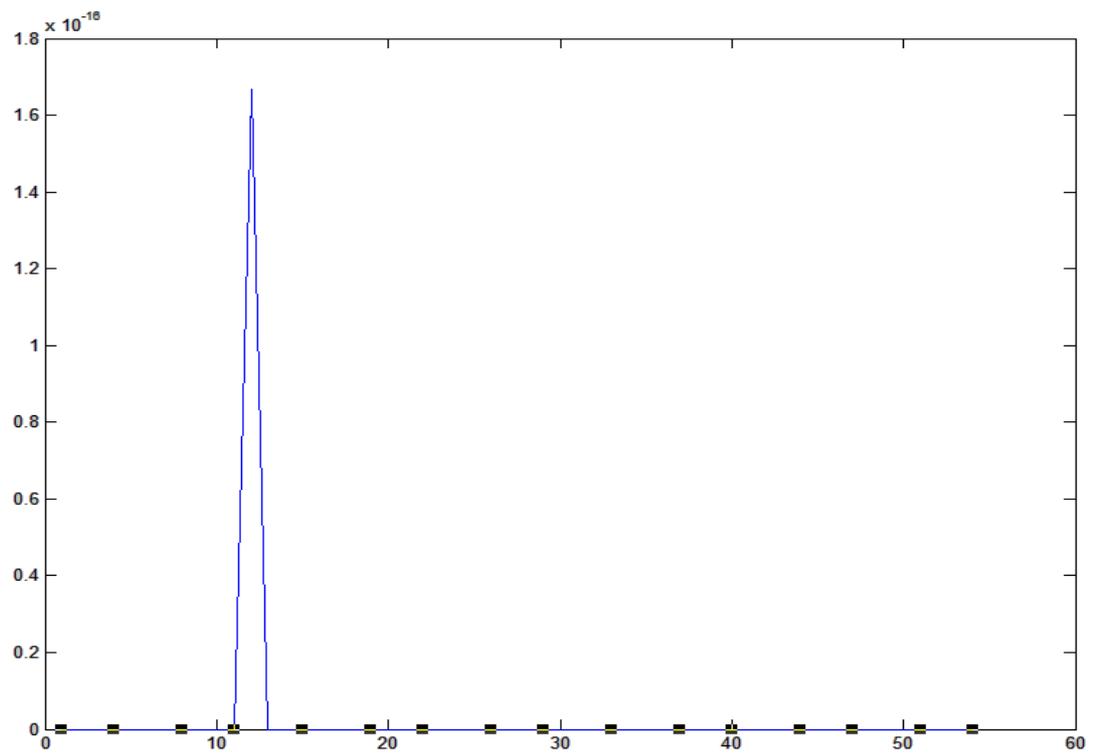
Logistique : la logistique a pour but de mettre un produit donné au bon endroit ,au bon moment, au moindre coût et dans les meilleurs conditions de qualité.

La logistique : c'est l'ensemble des activités visant à la maîtrise des flux physiques et d'information en optimisant l'utilisation des ressources humaines et matérielles (Norme AFNOR).

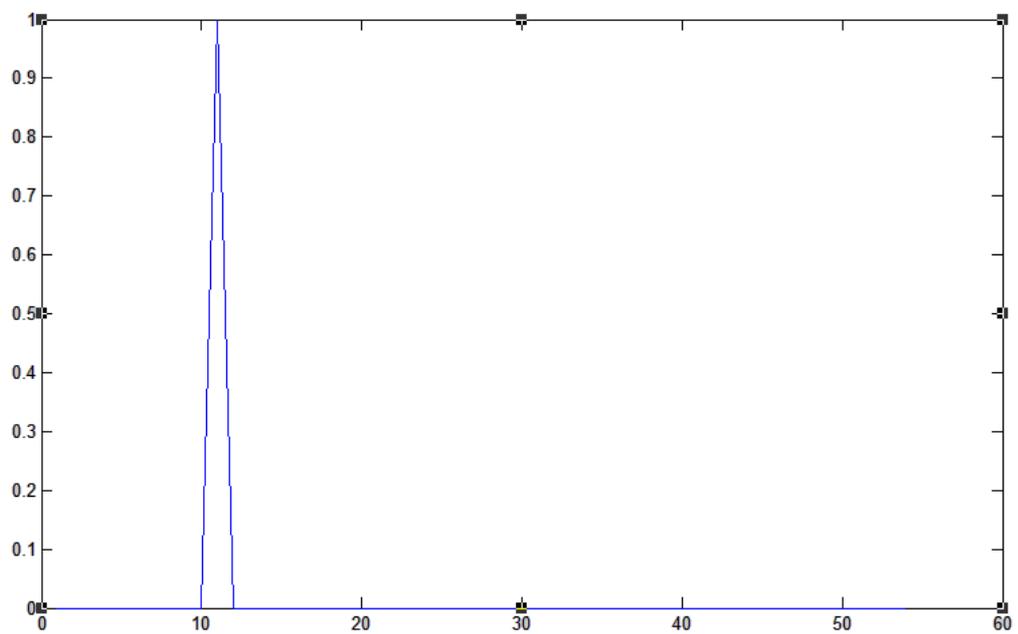
On ne peut pas donner une définition exacte et précise pour la logistique car la logistique est une fonction transversale dans l'entreprise

Distribution : La distribution physique prend en charge le produit fini et assure la mise à disposition des acheteurs qu'ils soient transformateurs ou consommateurs des biens ou des services. La distribution physique comprend le transport, l'entreposage, la gestion des stocks. [Le Grand dictionnaire (mai 2003)]

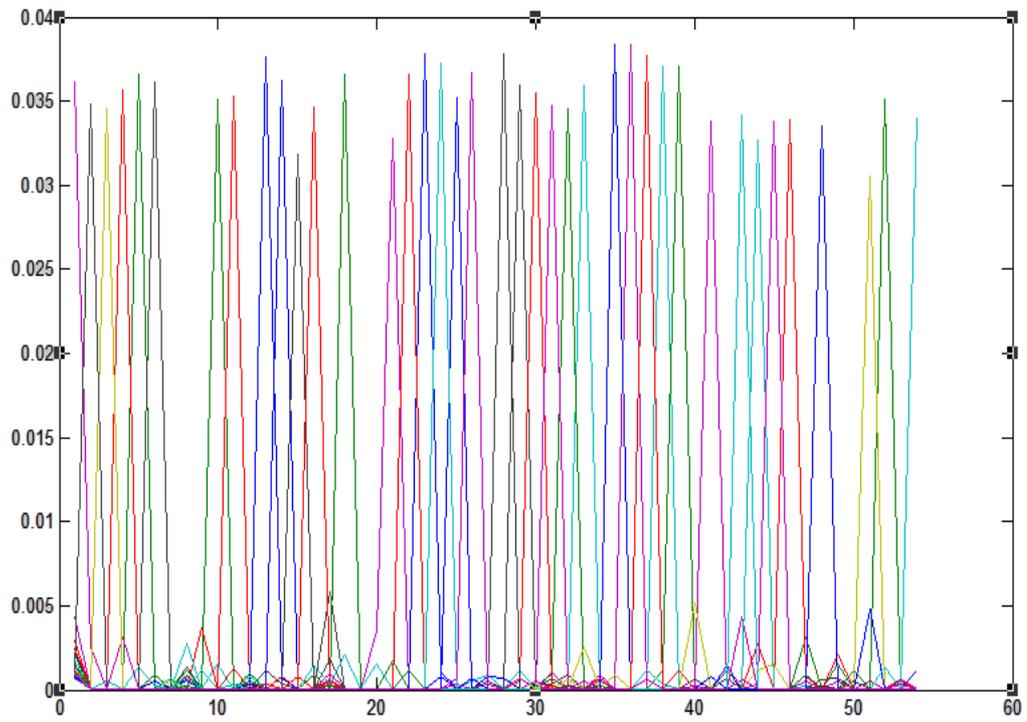
Annexe B



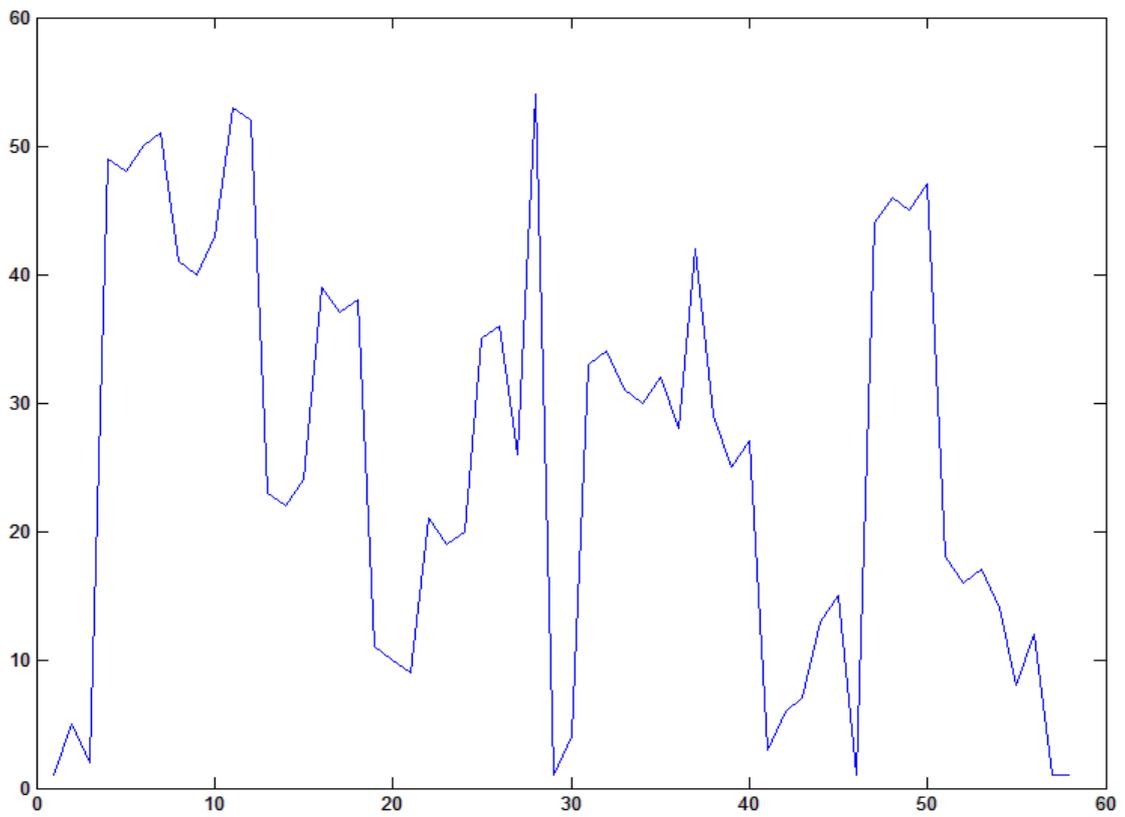
Le phéromone du chemin optimal



Probabilité du chemin optimal



Phéromone initial



Le parcours des fourmis

Bibliographie

- [LAC 06] **P. LACOMME, C. PRINS:** « Algorithmes de découpage pour les problèmes de tournées de véhicules » 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc.
- [KAM 06] **R. KAMMARTI:** « Approches évolutionnistes pour la résolution du 1-pdptw statique et dynamique ».Thèse de doctorat en Automatique et informatique Industrielle LILLE 2006.
- [HAY 03] **N. HAYARI, M.-A. MANIER, C.BLOCH, A. EI MOUDNI:** « Un Algorithme évolutionniste pour le problème de tournées Sélectives avec contraintes de fenêtres de temps » 4^{ème}Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM'03 - du 23 au 25 avril 2003- Toulouse France
- [HOU 05] **H. HOUSROUM** « Une approche génétique pour la résolution du problème VRPTW dynamique ». Thèse de doctorat en informatique. Université d'Artois France. 2005
- [CLA 04] **T. CLARISSE** « Outil d'aide à la décision pour la régulation en temps réel du trafic Ferroviaire dans une usine sidérurgique ». Thèse de doctorat en automatique Productique » Université de Grenoble 2004
- [MAN 06] **H.MANIER:**« Intégration du transport en planification et ordonnancement dans la chaine logistique » Laboratoire des Systèmes et transport Belfort France 2006.
- [GON 06] **G.GONCALVES , R. DUPAS :** « une plate forme de simulation pour la Gestion dynamique de tournées de véhicules » 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation –MOSIM'06 du 3 au 5 avril 2006 – Rabat-Maroc
- [FRE 05] **S. FREDRIC, G.TEODOR, R. LAMIH:** « Recherche opérationnelle et transport de marchandises ». Rapport: sciences administratives et Centre de recherche Sur les transports Université du Québec à Montréal et Université de Valenciennes 2005.
- [HOU 05] **H.HOUSROUM, T. HSU, R.DUPAS, G. GONCALVES:** « Une approche génétique en ligne pour la gestion de tournées dynamique ». Article en Génie Informatique et Automatique de l'Artois France2005.
- [VIN 01] **M. VINCENT, B. FAYEZ, R. JACQUES :** « Nouvelles approches pour l'approvisionnement des stations d'essence ».Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR) Québec Canada 2001.
- [EDI 03] **N.EDITH:** « Problème de tournées de véhicule avec contraintes de ressources

modélisation par Arcs-Etats et techniques de résolution adaptées ». Thèse de doctorat en informatique université pierre et Marie Curie Paris12- 2003.

[RAM 03] W. RAMDANE CHERIF: « Problème d'optimisation en tournées sur arcs ».

Thèse de doctorat en gestion de la production ».LAUSANNE-SUISSE 2003

[TRI 06] F.TRICOIR : « Optimisation des tournées de véhicules et du personnels de maintenance : application à la distribution et au traitement des eaux » Thèse de doctorat en Génie industriel . Ecole - Mines de Nantes France 2006.

[MIH 06] S.MIHEL: « Optimisation des tournées de véhicules combinées à la gestion de stock ».Thèse de doctorat en Mathématique Appliquées BORDEAUX-I France 2006.

[JUL 93] J.S.FREDRIC: «Elaboration de tournées de véhicule sous contraintes d'accessibilité ». Thèse de doctorat en mathématique Ecole polytechnique fédérale de LAUSANNE Suisse 1993.

[CLA 08] M.B. CLAUDE: «Heuristique pour la résolution de problèmes complexe de distribution ».Thèse de doctorat en science de l'administration université Laval Canada 2008.

[BAC 00] R. BACHMANN: « Analyse du plan de transport pour l'approvisionnement dans le commerce au détail ».Mémoire pour l'obtention du diplôme de maîtrise des sciences appliqué université de MONTREAL Canada 2000.

[CLA 06] M.CLAUDE,JACQUES RENAUD,FAYEZF.BOCTOR: « Heuristique pour le problème de tournées de véhicules avec flotte limité et transporteur externe».Article de centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau université LAVAL Canada 2006.

[SOU04] E.SOUTERA, P.LACOMME: « Un système d'aide à la décision basé sur Un algorithme génétique pour le vehicle routing problem ». Rapport laboratoire d'informatique université des cézeaux France 2004.

[MON 03] R. MONTEMANNI: « A new algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem based on Ant Colony System ». Istituto Dalle Molle di Studi sull Intelligenza Artificiale Manno, Switzerland 2003.

[LAR 01] A. LARSEN. « The dynamic vehicle routing problem ». PHD Thesis.Institut de Microtechnique de Mayence Danemark 2001.

[BEN 03] R.BENT AND P.VAN HENTENRYCK. « Dynamic vehicle routing with stochastic requests » Conférence internationale conjointe sur l'intelligence artificielle page 1362- 1363- Mexique 2003.

[JON 04] Dr JONATHAN THOMPSON «Ant Colony Optimisation» Article Ecole de

mathématiques Cardiff Université SWORDS Américain 2004.

[DRE 03] DREO, J, PETROWSKI, A, SIARRY, P., TAILLARD, I ,D

« Métaheuristique pour l'optimisation difficile ». Ouvrage Edition Eyrolles France 2003

[SAA 07] L. SAADI « Optimisation multi objectifs par programmation génétique ». Mémoire de magister en « Informatique Industriel université Batna 2007.

[PAU 07] R. PAULA, EMILIE LEGALL, Modélisation multi- agent du métro Londonien Mémoire de magister École des Ingénieurs de la Ville de Paris EIVP 2007.

[OUA 06] S.OUADFEL « Contribution à la segmentation d'images basé sur la résolution collective par colonie de fourmis artificielle ». Thèse de doctorat en informatique. Université de Batna 2006.

[CHR 05] S.CHRISTINE « Contribution à la résolution pratique de problèmes combinatoires-des fourmis et des graphes ». Mémoire d'Habilitation Université Claud Bernard LYON1 France 2005.

[ALA 05] ALAYA, CHRISTINE S,GHEDIRA K « Algorithme fourmi avec différentes stratégies firomentales pour le sac à dos multidimensionnel ». MHOSI Tunisie 2005.

[COS 06] COSTANZO A, LUONG T, MARILL G « Optimisation par colonie de fourmis ». Rapport de recherche France 2006.

[BOU 08] S.BOURI « **optimisation de la production et la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis** »Thèse de doctorat En Science- Électrotechnique Université Djilali Liabès - Sidi Bel Abbes -2008.

[HOL 96] HOLLDOBLER, WILSON, « Voyage chez les Fourmis » Livre Edition **Seuil** 1996.

[MAR03] S.MARC « Application d'un algorithme à colonie de fourmis à la détection de structure rétentives en eaux côtières ». Article France 2003.

[AND 04] P.ANDRES « Swarme intelligence ».Rapport de recherche. Ecole du Canton de vaud Suisse 2004.

[TFA 07] W.TFAILI. « Conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamiques ». Thèse de doctorat en science de l'ingénieur-optimisation-Université de Paris12 France 2007.

[JOH 04] JOHAN DREO et PATRICK SIARRY « Algorithme à estimation de distribution et colonie de fourmis ». Article LERISS Université Paris12 France 2004.

[MON 07] NECOLA MONMARCHE, ALAIN LENOIR « Des fourmis réelles aux Fourmis artificielles ». Article Université François Rabelais Tours France 2007.

- [DOR 04] **M.DORIGO and T.STUETZLE** « Ant colony optimization » université américaine MIT Press 2004.
- [DEN 09] **J.L.DENEUBOURG,S.ARON. S,GOSS, and. J.M PASTEELS** « The self organizing exploratory pattern of the argentine ant» , Journal of insect behavior3,159 168.1990.
- [CED 03] **CEDRIC BUCHE** « Metaheuristique pour l'optimisation» Article . Ecole national d'ingénieurs de BREST France 2003
- [OLI 01] **OLIVIER ROUX** «La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis application à l'optimisation et à la programmation ». Thèse de doctorat en informatique université de Littoral cote D'opale. France2001.
- [DOR 92] **M. DORIGO.** « *Optimization, Learning and Natural Algorithms* ».PHD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [DOR 96] **M. DORIGO, V. MANIEZZO, AND A. COLORNI.** « Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents » *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: 29– 41*, 1996.
- [BEN 92] **J.L. BENTLEY** « Fast algorithms for geometric traveling salesman problem » ORSA Journal on Computing, vol. 4, pp. 387-411, 1992.
- [DRE 05] **JOHANN DREO** « Adaptation de la méthode des colonies de fourmis pour l'optimisation en variables continue Application en génie biomédical ». Thèse de doctorat en optimisation Paris 12, LERISS France 2005.
- [YAN 03] **YANN SEMET** « application de l'optimisation par colonies de fourmis à la structuration automatique de parcours pédagogiques ». Mémoire de fin d'études d'ingénieur Université de Technologie de Compiègne France 2003.
- [DOR 97] **M, DORIGO. AND GAMBARDELLA, L. M.** « Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem ».IEEE Trans. Evol. Comp, 1 :53 -66. 1997.
- [STU 00] **STUTZLE, T. AND HOOS, H.** «MAX-MIN Ant System». Future Generation Computer System, 16 :889{914) 2000.
- [STU 97] **STUTZLE, T. AND HOOS, H.** « Improvements on the Ant System : Introducing MAX- MIN Ant System. In Proceedings International ». Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms, Vienna. Springer Verlag1997.
- [ALE 05] **ALEXANDRE BARGETON, BENJAMIN DEVEZE** « Les colonies de fourmis : apprentissage coopératif pour le problème du voyageur de commerce » Article Université Pierre et Marie Curie France 2005.

- [NIC 00] **NICOLAS MONMARCHEE** « Algorithmes de fourmis artificielles : applications à la classification et à l'optimisation ». Thèse de doctorat en Informatique université de Tours France 2000.
- [DEN 90] **J.-L. DENEUBOURG, S. ARON, S. GOSS, AND J.-M. PASTEELS.** «The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant». *Journal of Insect Behavior*, 3 :159– 168, 1990.
- [DOR 04] **M. DORIGO AND T. STUETZLE.** «*Ant Colony Optimization*». Massachusetts institute of technology, MIT American university Press, 2004.
- [SOL 05] **SOLNON CHRISTINE** « Contribution à la résolution pratique de problèmes combinatoires-des fourmis et des graphes ». Mémoire d'Habilitation Université Claud Bernard LYON1 France 2005.
- [BOU 08] **BOURI SIHEM** « **optimisation de la production et la structure d'énergie Electrique par les colonies de fourmis** »Thèse de doctorat En Science-Electrotechnique Université Djilali Liabès - Sidi Bel Abbes -2008.
- [HOL 96] **HOLDOBLER ET WILSON,** « Voyage chez les Fourmis » Livre Edition Seuil 1996.
- [MAR 03] **MARC SEGOND** « Application d'un algorithme à colonie de fourmis à la détection de structure rétentives en eaux côtières ». Article France 2003.
- [JOH 04] **JOHAN DREO ET PATRICK SIARRY** « Algorithme à estimation de distribution et colonie de fourmis ». Université Paris12 France 2004.
- [NEC 07] **NECOLA MONMARCHE, ALAIN LENOIR** « Des fourmis réelles aux fourmis artificielles ». Article Université François Rabelais Tours France 2007.
- [DOR04] **M.DORIGO AND T.STUETZLE** « Ant colony optimization »université américaine 2004
- [DEN 09] **J.L.DENEUBOURG,S.ARON. S,GOSS, AND. J.M PASTEELS** « The self organizing exploratory pattern of the argentine ant» , *Journal of insect behavior* 3,159-168.1990.
- [CED 03] **CEDRIC BUCHE** « Metaheuristique pour l'optimisation» Ecole national d'ingénieurs de BREST France 2003
- [OLI 01] **OLIVIER ROUX** « La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis application à l'optimisation et à la programmation ». Thèse de doctorat en informatique université de Littoral cote Dopale. France2001.
- [DOR 92] **M. DORIGO.** « *Optimization, Learning and Natural Algorithms* ».PHD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992.

- [DOR 96] **M. DORIGO, V. MANIEZZO, AND A. COLORNI.** « Ant System : Optimization by a colony of cooperating agents » *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*: 29– 41, 1996.
- [DRE 05] **JOHANN DREO** « Adaptation de la méthode des colonies de fourmis pour l'optimisation en variables continue Application en génie biomédical ». Thèse de doctorat en optimisation Paris 12, LERISS France 2005.
- [YAN 03] **YANN SEMET** « application de l'optimisation par colonies de fourmis à la structuration automatique de parcours pédagogiques ». Mémoire de fin d'études d'ingénieur Université de Technologie de Compiègne France 2003.
- [DOR 96] **DORIGO, M., MANIEZZO, V., AND COLORNI, A.** « The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. ». *Trans. Syst. Man Cybern*, 26- 41. 1996.
- [DOR 97] **M. DORIGO. AND GAMBARELLA, L. M.** « Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem ». *Trans. Evol.Comp* 1 :53 -66. 1997.
- [STU 00] **STUTZLE, T. AND HOOS, H.** «MAX-MIN Ant System». *Future Generation Computer System*, 16 :889{914) 2000.
- [STU 97] **STUTZLE, T. AND HOOS, H.** « Improvements on the Ant System : Introducing MAX- MIN Ant System. In *Proceedings International* ». Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms, Vienna. Springer- Verlag 1997.
- [ALE05] **ALEXANDRE BARGETON, BENJAMIN DEVEZE** « Les colonies de fourmis : apprentissage coopératif pour le problème du voyageur de commerce » Article Université Pierre et Marie Curie France 2005.
- [NIC 00] **NICOLAS MONMARCHEE** « Algorithmes de fourmis artificielles : applications à La classification et à l'optimisation ». Thèse de doctorat en Informatique université de Tours France 2000.
- [DEN 90] **J.-L. DENEUBOURG, S. ARON, S. GOSS, AND J.-M. PASTEELS.** «The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant». *Journal of Insect Behavior*, 3 :159–168-.1990
- [DOR 04] **M. DORIGO AND T. STUETZLE.** «*Ant Colony Optimization*». Massachusetts institute of technology, American university Press, 2004.
- [DRE 01] **QREO, J, PETROWSKI, A, SIARRY, P, AND TAILLARD, I,D,**”Métaheuristique pour l'optimisation difficile ». Ouvrage Edition Eyrolles 2001

- [SOL05] **SOLNON CHRISTINE** « Contribution à la résolution pratique de problèmes combinatoires-des fourmis et des graphes ». Mémoire d'Habilitation Université Claud Bernard LYON1 France 2005.
- [ALA 05] **ALAYA, CHRISTINE SOLNON,GHEDIRA KHALED** « Algorithme fourmi avec différentes stratégies firomentales pour le sac à dos multidimensionnel ». Tunisie 2005.
- [COS 06] **COSTANZO ANDREA, LUONG THEVAN, MARILL GUILLOUME** « Optimisation par colonie de fourmis ». Rapport de recherche France 2006.
- [GUE 10] **GUENTHER FUELLERER, KARL F. DOERNER, RICHARD F. HARTL, MANUEL IORI** «Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints », University of Modena and Reggio Emilia, Italy , European Journal of Operational Research 201 751–759. 2010.
- [GUE 09] **GUENTHER FUELLERER, KARL F. DOERNER,*, RICHARD F. HARTL, MANUEL IORI** «Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem » University of Modena and Reggio Emilia, Italy European Journal of Operational Research 2009.
- [MON 00] **R. MONTEMANNI, L.M. GAMBARDELLA, A.E. RIZZOLI, A.V. DONATI** « A new algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem based on Ant Colony System ». Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale witzerland 2000.
- [SLI 09] **MME SLIMANI LINDA** « Contribution à l'application de l'optimisation par des Méthodes métaheuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité déréglé ». Thèse de Doctorat en sciences Option : Electrotechnique université de Batna. 2009.
- [SIL 04] **SILVIA MAZZEO ,IRENE LOISEAU** «An Ant Colony Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing ». Universidad de Buenos Aires,Argentina.Journal of Electronic Notes in Discrete Mathematics 18 181–186-2004
- [ELL 07] **ISSMAIL ELLABIB , PAUL CALAMAI , OTMAN BASIR** “ Exchange strategies formultiple Ant Colony System » journal of information sciences 177 1248–1264 62007.
- [HEI 05] **HEITOR S. LOPES,VILSON L. DALLE MOLLE,CARLOS R. ERIG LIMA** « an ant colony optimization system for the capacitated vehicle routing problem » . *American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE Brazil 2005.*

- [NUR 00] **NURLITA GAMAYANTI, AHMAD RUSDIANSYAH, ABDULLAH ALKAFF, KEIICHI UCHIMURA** «Ant- colony Heuristics for Solving Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows for Inter-city Courier Service providers » Seminar Tokoname, university Kumamoto JAPAN 2000
- [MON 07] **R. MONTEMANNI, L.M. GAMBARDELLA, A.E. RIZZOLI, A.V. DONATI** « A new algorithm for a dynamic vehicle routing problem based on Ant colony system» Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale Switzerland 2007.
- [JOH 07] **JOHN CARLSSON; DONGDONG GEZ; ARJUN SUBRAMANIAM; AMY WU; AND YINYU YEK** «Solving Min-Max Multi-Depot Vehicle Routing Problem» University, Stanford,, USA.2007.
- [KAR 01] **KARL DOERNER,MANFRED GRONALT,RICHARD F. HARTL,MARC REIMANN, CHRISTINE STRAUSS STUMMER** “ SavingsAnts for the Vehicle Routing Problem » Adaptive Information Systems and Modelling in Economics and Management Science Vienna University of Economics 2001.
- [XIA 09] **XIAOXIA ZHANG, LIXIN TANG** « A new hybrid ant colony optimization algorithm for the vehicle routing problem” The Logistics Institute, Northeastern University Shenyang, China , journal of Pattern Recognition Letters 30 848–855. 2009.
- [SOP 06] **SOPHIE MICHEL** « Optimisation des tournées de véhicules combiné à la gestion de stock» Thèse de doctorat. Ecole doctorale de mathématiques et informatiques spécialités mathématiques appliquées. Université BordeauxI France 2006.
- [DUY 06] **DUYGU TASKIRAN** «a revised multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows “ School of Engineering and Natural Sciences Master of Science Sabanci University 2006.
- [RIZ 05] **A.E. RIZZOLI1, F. OLIVERIO2, R. MONTEMANNI1, L.M. GAMBARDELLA1** «Ant Colony optimisation for vehicle routing problems: from theory to applications » Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale Switzerland 2005.
- [DAN 07] **DANIELA FAVARETTO ,ELENA MORETTI,PAOLA PELLEGRINI** « Ant colony system for a VRP with multiple time windows and multiple Visits » *Journal of Interdisciplinary Mathematics* V77ol. 10 . No. 2, pp. 263–284 2007.
- [MAR 06] **MARC REIMANN, MARCO LAUMANN** «Savings based ant colony optimization for the capacitated minimum spanning tree problem » journal of

Computers & Operations Research 33 -794–1822 2006.

- [DAV 08] **DAVID MEIGNAN** «Une approche organisationnelle et multi agent pour la modélisation et l'implémentation de méta-heuristique, application aux problème d'optimisation de réseaux de transport ». Thèse de doctorat spécialité informatique, université de technologies de Belfort-Montbéliard 2008.
- [YAN 11] **B. YU , Z.Z. YANG ***, **B.Z. YAO** « A hybrid algorithm for vehicle routing problem with time window» *journal of Expert Systems with Applications* 38 435–441 2011.
- [RIZ 07] **A.E. RIZZOLI, R. MONTEMANNI · E. LUCIBELLO .L.M. GAMBARDELLA** « Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems From theory to applications » *Journal of Swarm Intell* 1: 135– 151 2007.
- [MON 05] **R. MONTEMANNI, L.M. GAMBARDELLA, A.E. RIZZOLI,, A.V. DONATI** «Ant Colony System for a Dynamic Vehicle Routing Problem» *Journal of Combinatorial Optimization*, 10, 327–343, 2005.
- [YAN 09] **YU BIN , YANG ZHONG-ZHEN, YAO BAOZHEN** « An improved ant colony optimization for vehicle routing problem » *European Journal of Operational Research* 196 171–176 2009.
- [LUC 99] **LUCA MARIA GAMBARDELLA, ÉRIC TAILLARD AND GIOVANNI AGAZZI** « macs-vrptw: a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows » McGraw-Hill, London, UK, pp. 63-76, 1999
- [SHU 11] **SHU-CHU LIU , JYUN-RUEI C.** « A heuristic method for the inventory routing and pricing problem in a supply chain » *.Journal of expert systems with Applications* 38 1447–1456 – 2011.μ
- [AND 08] **ANDREW RUNKA** «ant colony optimization algorithms with local search for the dynamic vehicle routing problem» Department of Computer Science. University Brock Canada 2008.
- [JOH 04] **JOHN E. BELLA, PATRICK R. MCMULLEN** « Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem » *Journal of Advanced Engineering Informatics* 18 41–48.-2004
- [LYA 10] **LYAMINE BOUHAFS, AMIR HAJJAM, ABDER KOUKAM** « A Hybrid Heuristic Approach to Solve the Capacitated Vehicle Routing Problem » *Journal of Artificial Intelligence: Theory and Application Vol.1-* pp. 31-34 -Université de Technologie de Belfort France 2010

- [KAR 02] KARL DOERNER, MANFRED GRONALT, RICHARD F. HARTL, MARC REIMANN,, CHRISTINE STRAUSS, AND MICHAEL STUMMER**« Savings Ants for the Vehicle Routing Problem » Institute of Management Science, University of Vienna. Austria Austria 2002.
- [KAI 03] KAIFENG ZENG** « Dynamic Vehicle Routing Problem with Backhaul and Time Window and Its Application in the Less-Than-Truckload (LTL) Trucking Industry » University of Cincinnati, China 2003.