



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université - Batna 2
Faculté de Technologie
Département Génie Industriel
Laboratoire d'Automatique et Productique



MÉMOIRE

Présenté au
Laboratoire d'Automatique et Productique
En vue de l'obtention de diplôme de
Magister en Génie Industriel
Option
Génie des Systèmes Industriels
Par

BOUTARFA YUCEF

Ingénieur d'état en informatique

THÈME

***Utilisation d'une heuristique basée sur la
Recherche Tabou pour résoudre le problème
d'intégration production-distribution***

Devant le Jury :

MOUSS Leila Hayet	Professeur	Université Batna 2	Président
BENHARZALLAH Saber	MCA	Université de Biskra	Examineur
ABDELHAMID Samir	MCA	Université Batna 2	Examineur
MOUSS Kinza Nadia	Professeur	Université Batna 2	Encadreur
SENOUSSI Ahmed	MAA	Université Batna 2	Co-Encadreur

2015 / 2016

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Mes sincères remerciements vont directement à l'Encadreur Madame Kinza Nadia MOUSS, Professeur à l'Université Batna 2 de m'avoir donné l'opportunité et la chance de découvrir un domaine de recherche passionnant et pour sa patience, sa présence continue pour les lectures attentives aux différentes étapes de la réalisation de ce travail et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier mon Co-Encadreur Monsieur Ahmed SENOUSSE, MAA à l'Université Batna 2 pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail. J'espère qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir soutenu et encouragé dans les moments les plus difficiles. Merci pour toutes les heures de travail qu'on a passées ensemble.

Je suis honoré par la présence de Madame Leila Hayet MOUSS, Professeur à l'Université Batna 2 et Directrice du Laboratoire d'Automatique et Productique d'avoir accepté de présider ce jury.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury : Monsieur Samir ABDELHAMID, Maître de Conférence à l'Université Batna 2 et Monsieur Saber BENHARZALLAH, Maître de Conférence à l'Université de Biskra pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre mémoire de magister en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé pour réaliser ce travail.

Merci.

*Si tu ne prends pas le temps de créer la vie que tu désires,
tu seras forcé à passer beaucoup de temps à vivre une vie dont tu ne veux pas.*

Kevin Ngo

SOMMAIRE

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux	I
Introduction générale	II

Chapitre I : Notions de base sur l'intégration dans une chaîne logistique

Introduction.....	6
I.1. Généralités	6
I.1.1 La chaîne Logistique.....	6
I.1.1.1 Définition de la chaîne logistique.....	6
I.1.1.2 Classifications des entités de la chaîne logistique.....	7
I.1.2 La gestion de la chaîne logistique	8
I.1.2.1 Les décisions de gestion d'une chaîne logistique.....	8
I.1.2.2 Les activités principales d'une chaîne logistique	8
I.1.3 L'intégration dans la chaîne logistique	14
I.1.3.1 Intégration Production-Stockage (LSP).....	14
I.1.3.2 Intégration Production-Distribution (PDP).....	15
I.1.3.3 Intégration Distribution-Stockage (IDP)	15
I.2 Etat de l'art	16
Conclusion	19

Chapitre II : Intégration production-stockage-distribution dans une chaîne logistique avec détaillants regroupés

Introduction.....	20
II.1 Description du problème.....	20
II.2 Modélisation du problème.....	23
II.2.1 Les indices.....	23
II.2.2 Les paramètres	23
II.2.3 Les variables	23
II.2.4 La fonction objectif.....	24
II.2.5 Les contraintes.....	24

II.3 Méthodes de résolution	25
II.3.1 Méthodes exactes	26
II.3.1.1 Les méthodes arborescentes	27
II.3.1.2 La programmation dynamique	27
II.3.1.3 La méthode de simplexe	28
II.3.1.4 La programmation linéaire.....	28
II.3.2 Méthodes approchées.....	28
II.3.2.1 Les heuristiques	29
II.3.2.2 Les méta-heuristiques.....	29
Conclusion	32

***Chapitre III : Méta-heuristiques pour la résolution du problème d'intégration
production-stockage-distribution***

Introduction	33
III.1 Méthode de recherche Tabou (Tabu Search)	33
III.1.1 Principes de base.....	33
III.1.2 Algorithme général de la méthode recherche Tabou	36
III.1.3 Application de la méthode de recherche Tabou	37
III.1.3.1 Notation spécifiques à la recherche tabou	37
III.1.3.2 Définition de la solution	38
III.1.3.3 Définition du voisinage de s.....	38
III.1.3.4 Définition du mouvement.....	38
III.1.4 Algorithme général du problème	41
III.1.4.1 Détermination de la période α_{jt}	42
III.1.4.2 Structure de la liste tabou.....	42
III.1.4.4 Détermination de la taille de la liste tabou	43
III.1.4.5 Présentation & choix de la solution initiale.....	44
III.1.4.6 Procédure de réparation	44
III.1.5 Calcul des coûts	45

III.1.5.1 Coût de production.....	46
III.1.5.2 Coût de stockage.....	46
III.1.5.3 Coût de distribution.....	47
III.1.5.4 Calcul des pénalités.....	49
III.1.5.5 Coût total.....	49
III.1.5.6 Calcul du Gap.....	49
III.2 Méthode de recuit simulé	50
III.2.1 Principe de base.....	50
III.2.2 Notations spécifiques.....	51
III.2.3 Algorithme général.....	51
III.2.4 Définition d'une solution	52
III.2.5 Algorithme général du problème	52
III.2.6 Présentation & choix de la solution initiale.....	53
III.2.7 Calcul des coûts	54
III.3 Hybridation de la recherche Tabou avec le recuit simulé	54
Conclusion	54

Chapitre IV : Validation de l'approche

Introduction.....	56
IV.1 Description des instances	56
IV.2 Analyse des résultats fournis par la recherche tabou	57
IV.2.1 Effet de variation de TLT sur le Gap moyen	57
IV.2.2 Interprétation et analyse des résultats	57
IV.2.3 Effet de variation du nombre de détaillants N sur le Gap moyen.....	58
IV.2.4 Effet de variation du nombre de périodes T sur le Gap moyen	58
IV.2.5 Effet de variation du nombre de véhicules V sur le Gap moyen.....	59
IV.2.6 Interprétation et analyse des résultats	59
IV.3 Résultats fournis par le recuit simulé	60
IV.3.1 Comparaison des résultats donnés par recherche Tabou et recuit simulé.....	60

IV.3.2 Interprétation et analyse des résultats	61
IV.4 Résultats fournis par l'approche hybride	61
IV.4.1 Comparaison entre recherche Tabou, recuit simulé et l'hybridation	61
IV.4.2 Interprétation et analyse des résultats	62
Conclusion	62
Conclusion générale.....	63
Références bibliographiques	64
Annexes	68

Liste des figures

Figure II.1	: Description du problème	21
Figure II.2	: Hypothèses & Paramètres du problème	22
Figure II.3	: Classification des méthodes de résolution	26
Figure III.1	: Exemple de <i>Forward move</i>	39
Figure III.2	: Exemple de <i>Backward move</i>	40
Figure IV.1	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i>	57
Figure IV.2	: Effet de variation de <i>N</i> sur le <i>Gap moyen</i>	58
Figure IV.3	: Effet de variation de <i>T</i> sur le <i>Gap moyen</i>	59
Figure IV.4	: Effet de variation de <i>V</i> sur le <i>Gap moyen</i>	59
Figure IV.5	: Comparaison entre Tabou et Recuit	60
Figure IV.6	: Comparaison Tabou-Recuit-Hybride	61

Liste des tableaux

Tableau 1	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 0 %)	68
Tableau 2	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 5 %)	69
Tableau 3	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 10 %)	70
Tableau 4	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 20 %)	71
Tableau 5	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 30 %)	72
Tableau 6	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 40 %)	73
Tableau 7	: Effet de variation de <i>TLT</i> sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 50 %)	74
Tableau 8	Récapitulation du <i>Gap moyen</i> en fonction du temps d'exécution	75
Tableau 9	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 0 %)	75
Tableau 10	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 5 %)	76
Tableau 11	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 10 %)	76
Tableau 12	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 20 %)	76
Tableau 13	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 30 %)	77
Tableau 14	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 40 %)	77
Tableau 15	: Effet de variation des instances sur le <i>Gap moyen</i> (<i>TLT</i> = 50 %)	77
Tableau 16	Récapitulation des variations du <i>Gap moyen</i> en fonction des instances	78
Tableau 17	: Calcul du <i>Gap moyen</i> par recuit simulé	79
Tableau 18	: Calcul du <i>Gap moyen</i> par Hybridation Tabou-Recuit	80

Introduction générale

Introduction générale

L'environnement dans lequel les entreprises évoluent a beaucoup changé ces dernières années en raison de la compétitivité sans cesse croissante à laquelle elles sont confrontées. Par conséquent, les gestionnaires sont toujours sollicités à innover en matière d'organisation de leurs entreprises et doivent prendre des décisions intervenant à plusieurs niveaux dans des délais de plus en plus limités, afin de gagner de nouveaux marchés, géographiquement distribués. Ces considérations ont incité ces entreprises à s'organiser en groupes communément appelés "Chaînes Logistiques". [1]

La compétitivité d'un produit sur le marché ne dépend donc plus de l'entreprise qui l'assemble ou qui le vend, mais bien de l'ensemble des entreprises impliquées dans la fabrication et la distribution de ce produit, donc de l'ensemble de la chaîne logistique. La gestion de la chaîne logistique c'est l'optimisation de l'ensemble des outils et des méthodes du processus d'approvisionnement, afin de réduire au plus bas les délais de livraison, les stocks et donc les coûts.

La délocalisation des unités des centres de production par exemple dans des pays où la main d'œuvre est moins chère, a fait augmenter sensiblement les coûts liés au stockage et au distribution des produits, puisque la création de zones de stockage intermédiaires, dans ce cas, est nécessaire. Les exigences des consommateurs en termes de coûts et de délais étant en constante augmentation, l'optimisation des activités de production, de stockage et de distribution simultanément est devenue un facteur clé dans la réussite d'une entreprise d'une manière particulière, et de toute la chaîne logistique d'une manière plus générale.

Dans un problème de dimensionnement de lot (lot sizing), la production et le stockage sont les deux activités principales, il est souvent trop coûteux de produire un article à chaque période puisqu'il existe des coûts de lancement (setup) associés à chaque produit. A l'inverse, produire un grand nombre d'articles dans une période engendre des coûts de stockage importants. La résolution d'un problème de dimensionnement de lot revient donc à trouver un compromis entre les différents coûts, c'est-à-dire entre le coût de production et coût de stockage, afin de calculer la quantité de production optimale, cela d'une part, et d'une autre part la distribution des produits est souvent traitée séparément, comme dans le cas du problème de tournées de véhicules VRP (Vehicle Routing Problem) et du problème du voyageur de commerce TSP (Travelling Salesman Problem). Ici on parle d'une approche non-

intégrée et l'optimisation des activités est séquentielle (optimisation par activité), qui consiste à optimiser les activités tour à tour afin d'optimiser tous le problème. Les approches non-intégrées ou découplées sont très efficaces notamment pour des systèmes simples et non-complexes où les trois activités ont des coûts de différents ordres de grandeur.

Par conséquent, lorsque les coûts de production, de transport et de stockage sont du même ordre de grandeur, les approches découplées s'avèrent très vite inefficaces. Ces activités doivent être alors considérées simultanément dans le même modèle. Le principe des approches intégrées d'optimisation consistent à considérer deux activités ou plus en même temps afin de minimiser le coût global engendré par ces activités.

L'intégration simultanée des activités production, stockage et distribution dans le même modèle a été alors prise de plus en plus sérieusement et plusieurs chercheurs se sont penchés sur cette problématique qui a donné ses fruits et a montré son efficacité d'optimisation et son importance dans le domaine de gestion des chaînes logistiques.

Plusieurs modèles intégrés ont été étudiés ces dernières années dans le domaine d'optimisation, dans la section suivante de l'introduction nous exposons la problématique de la chaîne logistique que nous avons étudiée.

1. Problématique

La gestion d'une chaîne logistique qui intègre la production, le stockage et la distribution est l'objet de notre étude, qui est une structure particulière d'une chaîne logistique. Le modèle dans notre cas est composé d'un fournisseur assurant la production d'un seul type de produit, expédié par une flotte de véhicules homogènes à un ensemble de détaillants situés dans la même région géographique. Le fournisseur est responsable de la production et la reconstitution des stocks au niveau des détaillants. La distance entre le fournisseur et la région de livraison est considérable par rapport à celles reliant les détaillants entre eux. Le coût de transport entre le fournisseur et la région est fixe pour chaque véhicule. Le coût de prestation de service change d'un détaillant à un autre et le coût de routage entre les détaillants est nul. L'hypothèse VRP est donc exclue dans notre cas.

Le coût unitaire de stockage est fixe pour le fournisseur et également pour les détaillants.

Le problème d'intégration production-stockage-distribution IPIDP (Integrated Production Inventory Distribution Problem) dans une chaîne logistique est une extension du problème OWMR (One-Warehouse Multi-Retailer).

2. Motivations

Le choix de ce problème est motivé par l'émergence de pôles de vente au détail dans les chaînes logistiques, où un grand nombre de détaillants se rassemblent dans un milieu urbain, créant un marché pour des produits homogènes ou hétérogènes, ce type de regroupement est connu par le nom « Cluster » dans le domaine des affaires, où il est défini comme un rassemblement ou regroupement de détaillants dans la même zone géographique. Désormais, les clusters sont devenus importants dans le domaine de gestion des chaînes logistiques et ils rapportent de grands avantages économiques aux fournisseurs et aux détaillants.

Les clusters émergent pour les raisons et les motivations objectives suivantes :

- la création de pôles commerciaux ou pôles des affaires (business) autrement dit, capables d'attirer une masse importante de la clientèle et d'attirer aussi les fournisseurs pour leurs approvisionnements,
- la formulation des commandes consolidées aux moments opportuns,
- la réception des livraisons dans les délais,
- la contribution équitable aux paiements des frais et services communs tels que le transport et le gardiennage, Etc.

Pour monter l'importance de notre choix, nous essayons de donner quelques exemples concrets de détaillants rassemblés en clusters dans le même milieu urbain, selon le type de la marchandise, comme suit :

- La ville d'Ain M'lila qui représente un grand pôle commercial dans le domaine de la pièce de rechange automobile,
- la ville d'El Eulma dans le domaine de l'électroménager
- la région d'Ain Fakroune dans le domaine vestimentaire, etc.

Le modèle IPIDP est une extension du problème OWMR, qui a été démontré NP-difficile par Arkin et al. [25]. par conséquent le IPIDP sur lequel nous travaillons est également NP-difficile. L'objectif de résolution est de déterminer pour chaque période la quantité à produire, les quantités stockées et les quantités à livrer pour chaque détaillant, afin de minimiser le coût global composé des coûts de production, de stockage et de distribution.

En pratique, les informaticiens et les développeurs sont souvent confrontés à des problèmes NP-difficiles. Dans ce cas, savoir que le problème sur lequel nous travaillons est NP-difficile est une indication que le problème est difficile à résoudre, donc il vaut mieux chercher des solutions approchées (proches de la solution optimale) en utilisant des algorithmes d'approximation ou des heuristiques.

Pour résoudre le problème IPIDP, faire recours à des heuristiques est indispensable, dans ce contexte nous avons développé deux algorithmes basés sur deux méthodes de résolutions approchées, deux méta-heuristiques, la première est « la Recherche Tabou » la seconde est « le recuit simulé ». Les algorithmes permettent ainsi d'assurer un compromis entre la qualité de la solution retenue et le temps nécessaire de calcul.

Ce mémoire tente de répondre aux questions posées ci-dessus, nous l'avons organisée en quatre chapitres. Le premier chapitre est scindé en deux sections, la première a pour objectif de donner quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant dans le domaine de la chaîne logistique, en montrant l'importance d'intégration dans la chaîne logistique, la deuxième section a pour objectif de donner un état de l'art sur les études traitant les problèmes d'intégration dans la chaîne logistique. Le second chapitre comprend trois sections, dans la première nous allons donner une vue panoramique sur les méthodes de résolution des problèmes NP-difficiles, dans la deuxième nous décrivons notre problème et dans la dernière section nous le modélisons. Le troisième chapitre est consacré à l'application de la méthode de Recherche Tabou, de la méthode de recuit simulé et d'une hybridation des deux méthodes sur le problème. Le quatrième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux fournis par les trois approches et enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives de recherche pour des travaux futurs.

Chapitre I

Notions de base sur l'intégration dans une chaîne logistique

Introduction

Avec la forte concurrence sur le marché national et international, le but des entreprises est désormais de produire et de livrer dans des délais précis, à des coûts réduits, en satisfaisant des niveaux de services élevés exigés par le consommateur.

Par conséquent, ces entreprises sont incitées à s'organiser en chaînes logistiques, afin de conquérir de nouveaux marchés. Une chaîne logistique est définie comme étant un ensemble d'entités qui contribuent à l'approvisionnement en matières premières, leurs transformations en produits finis, et enfin, la distribution et la vente de ces produits aux consommateurs. [1].

Aussi ce premier chapitre est réservé particulièrement à la présentation de quelques notions théoriques relatives à notre domaine de travail.

Ainsi il est scindé en deux sections. La première section est consacrée d'une part à la présentation de quelques généralités et définitions utilisées par la communauté scientifique travaillant dans le domaine de la chaîne logistique, d'autre part à la définition de la gestion de la chaîne logistique. La seconde section est réservée à un bref état de l'art relatif aux problèmes d'intégration des chaînes logistiques.

I.1. Généralités

I.1.1 La chaîne Logistique

I.1.1.1 Définition de la chaîne logistique

De nombreuses définitions de la chaîne logistique ou Supply Chain (en terminologie anglo-saxonne) ont été proposées dans la littérature. Ces définitions présentent la chaîne logistique selon deux visions différentes : la première vision consiste à mettre le produit ou le service comme critère d'identification des acteurs de la chaîne. La deuxième vision centre la chaîne logistique sur l'entreprise principale.

La définition commune est celle proposée par Tayur [1] : « la chaîne logistique est un réseau composé de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs et de détaillants entre lesquels s'échangent des flux matériels dans le sens des fournisseurs, et des flux d'information

dans les deux sens »_. Selon Akbari Jokaar [2] « La chaîne logistique correspond à un réseau d'installation où sont assurées les fonctions d'approvisionnement en matières premières, la distribution de ces matières premières aux centres de production, la transformation de celles-ci en composants puis en produits finis, la distribution du produit fini chez le détaillant ainsi que le service après vente, le recyclage ou la mise au rebut des produits en fin de vie ».

D'autres auteurs, tel que Poirier C. et Reiter S.E. [3] « considère que la chaîne logistique est centrée sur l'entreprise et non pas sur un produit ou un service. Ce point de vue reste limité aux détaillants et aux fournisseurs immédiats de l'entreprise ».

I.1.1.2 Classifications des entités de la chaîne logistique

Les entités d'une même chaîne logistique peuvent être classées selon trois critères : physique, organisationnel et fonctionnel, donnée par : Salah Eddine Merzouk [4].

- **Classification physique** : Trois types d'entités physiques sont présentes dans une chaîne logistique :
 - **Les sites** : Ils peuvent être des sites de production ou de stockage.
 - **Les marchandises** : qui peuvent être de la matière première, des produits finis ou des produits semi-finis qui s'échangent entre les sites par des moyens de transports.
 - **Les moyens de transport** : ce sont les différents types de transporteurs tels que : les flottes de camions, les wagons, les véhicules, etc. qui assurent la livraison des marchandises entre les différents sites de la chaîne logistique.
- **Classification fonctionnelle** : Les activités majeures au sein d'une chaîne logistique sont : la production, le stockage et la distribution. Ce sont les entités qui peuvent être identifiées selon la fonction que chacune assure au sein de la chaîne.
- **Classification organisationnelle** : Cette classification est généralement utilisée si la chaîne logistique est définie par rapport à une entreprise donnée. Trois maillons essentiels sont alors distingués :
 - **Achat et approvisionnement** : Cela consiste à alimenter une ligne de fabrication ou un entrepôt par exemple, par de la matière première. C'est donc l'ensemble des entités qui viennent en amont de l'entreprise.
 - **Production** : Elle est constituée des entités qui interviennent dans les

différentes étapes de fabrication d'un produit donné.

- **Distribution** : C'est l'ensemble des entités situées en aval de l'entreprise qui assurent l'acheminement et la distribution des produits semi-finis ou finis vers les détaillants.

I.1.2 La gestion de la chaîne logistique

La gestion de la chaîne logistique a été définie par Simchi-Levi [5] comme étant « un ensemble d'approches utilisées pour intégrer efficacement les fournisseurs, les producteurs et les distributeurs de manière à ce que la marchandise soit produite et distribuée à la bonne quantité, au bon endroit et au bon moment dans le but de minimiser les coûts et d'assurer le niveau de service requis par le détaillant ».

I.1.2.1 Les décisions de gestion d'une chaîne logistique

D'après cette définition la gestion de la chaîne logistique revient donc à prendre un certain nombre de décisions à travers les différents horizons de temps (court, moyen et long terme). Ces décisions peuvent être regroupées en trois niveaux distincts : les décisions stratégiques, les décisions tactiques et les décisions opérationnelles.

- **Décisions stratégiques** : Le choix des fournisseurs, le partenariat, la localisation des sites et le choix du mode de transport ;
- **Décisions tactiques** : Le plan de production, l'affectation aux détaillants et l'allocation produits ;
- **Décisions opérationnelles** : L'ordonnancement de la production, l'organisation des tournées, le calcul des quantités de productions et le calcul des instants de production.

I.1.2.2 Les activités principales d'une chaîne logistique

La plupart des travaux rencontrés s'identifient par rapport aux trois activités principales d'une chaîne logistique, à savoir, la production, le stockage et la distribution.

❖ La production

Selon Despontin-Monsarrat [6] « Le système de production d'une entreprise assure la transformation de matières premières et/ou de produits semi-finis provenant des fournisseurs,

en produits semi-finis et/ou finis à destination des détaillants, tout en ayant des objectifs en termes de qualités, de coûts et de délais » _.

La gestion de la production est une problématique très ancienne qui a fortement intéressé des théoriciens et praticiens tels que Taylor, Fayol, Ford, etc. A partir des travaux de ces théoriciens et praticiens, plusieurs méthodes de gestion de la production se sont développées. Nous pouvons citer :

- **La technique MRP :**

La première technique à évoquer est le MRP (Material Requirement Planning), elle consiste à déterminer les quantités de matières premières nécessaires à la production sans prendre en compte les capacités des équipements utilisés. Toutes les demandes sont alors estimées réalisables.

Le MRP a évolué vers le MRP II afin de prendre en compte la capacité des unités de production.

- **La technique Kanban :**

Un *Kanban* , terme japonais signifiant « enseigne, panneau » est une simple fiche cartonnée que l'on fixe sur les bacs ou les conteneurs de pièces dans une ligne d'assemblage ou une zone de stockage.

Cette méthode, déployée à la fin des années 1950 dans les usines Toyota, par l'ingénieur japonais Taiichi Ōno [46], elle est mise en place entre deux postes de travail et limite la production du poste amont aux besoins exacts du poste aval.

Le système Kanban fonctionne entre les postes de production aval et amont :

- ▶ L'opérateur aval entame un conteneur. Il libère alors le Kanban de manutention fixé sur le conteneur et le dispose dans une boîte.
- ▶ Le manutentionnaire ramasse le Kanban de manutention et va au poste amont.
- ▶ Au poste amont, il enlève le Kanban de production du conteneur plein, le met dans une autre boîte et lui substitue le Kanban de manutention.

- ▶ Il ramène le conteneur plein avec le Kanban de manutention au poste aval.
- ▶ Quand l'opérateur du poste amont a rempli un conteneur, il regarde la boîte dekanbans de production. S'il y a un kanban, il l'enlève, le fixe à un conteneur vide et reprend la production. S'il n'y a pas de kanban, cela veut dire que les encours sont suffisants et il attend.

- **La technique OPT** (*Optimized Production Technology*)

La méthode OPT « techniques de production optimisée » est à la fois une méthode et un type de logiciel d'ordonnancement. Elle repose sur un compromis entre les logiques « flux poussés » et « flux tirés ». C'est une planification des ordres de fabrication en priorité sur les outils de production à capacité limitée.

À partir de la demande client évaluée par les prévisions commerciales, il s'agit de détecter les goulots d'étranglement prévisibles, c'est-à-dire, les postes de travail les plus chargés et d'en déduire les stocks de sécurité pertinents.

Puis lorsque se déclenchent les commandes clients, on lance l'activité des postes en situation de forte charge (goulots d'étranglement) puis celle des autres postes, en remontant vers l'amont [47].

Une autre dimension importante de la gestion de la production est l'organisation de la production. Cette dernière est qualifiée de production à la commande lorsque le processus de fabrication est déclenché par une commande d'un client. Les entreprises optent pour ce type de production lorsque la demande est difficilement prévisible. Lorsque la demande d'un client peut être anticipée, l'entreprise opte pour une organisation de la production sur stock. Giard V. [7].

❖ Le stockage

« La constitution des stocks au sein d'une chaîne logistique est justifiée par plusieurs raisons tels que le souhait de compenser les écarts entre la prévision et la réalité, les délais de mise à disposition de plus en plus courts chez les détaillants, la fluctuation de la demande, la volonté de se garantir des phénomènes de hausse des prix de la matière première (spéculation), les accidents de production, etc. » selon Breuzard J.P. et Fromentin D. [8].

De ces différentes raisons nous pouvons distinguer de quatre types de stocks : le stock

de marchandises, le stock de matières premières, le stock des produits en cours de fabrication et le stock des produits finis.

Parmi les méthodes de gestion de stock nous pouvons citer :

- **La méthode ABC**

La classification ABC est l'une des méthodes les plus répandues pour la gestion des stocks. Basée sur la loi des 20/80 de Paréto, elle consiste à établir une hiérarchie des produits nécessaires à une activité donnée en fonction de leurs prix. Trois classes sont distinguées :

- Classe A : Produits très chers, rares ou qui nécessitent des délais de livraison très longs.
- Classe B : Produits moyennement chers ou dont la disponibilité est aléatoire.
- Classe C : Produits courants ou peu chers.

- **La méthode du lot économique**

La méthode du lot économique ou la quantité économique à commander (QEC), fait également partie des méthodes qui émergent de la littérature en gestion des stocks. « Elle constitue une façon rapide de calculer la quantité la plus économique à commander pour minimiser le coût total de commande et de stockage, lorsque certaines hypothèses sont satisfaites ou qu'elles se rapprochent suffisamment de la situation réelle sous étude » [48]. Dans le modèle de base, le coût de commande et le coût de stockage constituent les seuls coûts pertinents.

On identifie généralement cinq hypothèses ou conditions d'utilisation de la QEC:

- 1- la demande est constante et déterministe,
- 2- la structure de coût est fixe,
- 3- le délai de livraison est nul,
- 4- aucune pénurie n'est possible et
- 5- les quantités commandées sont livrées en entier et en même temps.

• Les systèmes de réapprovisionnement

Pour déterminer les dates de réapprovisionnement et les quantités à commander, quatre systèmes sont généralement reconnus au sein de la littérature: les systèmes (s,Q) , (s,S) , (R,S) et (R,s,S) :

1- **Le système (s,Q)** est un système à revue continue basé sur le fait qu'une quantité fixe Q d'articles est commandée à chaque fois que la position des stocks atteint ou dépasse le point de réapprovisionnement s .

2- **Le système (s,S)** est aussi un système à revue continue. Il est basé sur le fait qu'une quantité variable d'articles est commandée à chaque fois que la position des stocks atteint ou dépasse le point de réapprovisionnement s . Contrairement au modèle précédent, la quantité à commander est variable afin d'atteindre le niveau plafond S .

3- **Le système (R,S)** est pour sa part un système à revue périodique . IL est basé sur le fait qu'à chaque période de temps R , une commande sera placée pour atteindre le niveau plafond S .

4- **Le système (R,s,S)** est réalisé à partir d'une combinaison des systèmes (s,S) et (R,S) . Ce modèle est basé sur le fait qu'à chaque période de temps R , une vérification du niveau des stocks est effectuée. Si le niveau des stocks a atteint ou est inférieur au niveau s , une commande est passée afin d'atteindre le niveau plafond S .

• Le système de la mise en consignation

La mise en consignation est une méthode de gestion des stocks relativement simple. À la base, elle repose sur une entente effectuée entre le client et le fournisseur. Dans cet état d'esprit, le fournisseur accepte de supporter financièrement les stocks qui sont entreposés au sein même de l'entreprise, donc du client. Ce n'est que lorsque certains articles sont vendus ou utilisés pour des fins de fabrication qu'ils sont alors imputés au client. Cette méthode semble néanmoins davantage destinée à des entreprises comme les épiceries qu'à des entreprises manufacturières [49].

❖ La distribution

Dans une chaîne logistique, la distribution des marchandises (appelé également le frêt),

est un domaine très vaste et constitue une phase importante de tout le processus logistique, en étant l'interface entre la phase de production et le marché. L'activité de distribution devrait être optimisée, au même titre que les activités de production et de stockage, car le coût de distribution peut varier considérablement selon les produits et les destinations, on estime qu'en moyenne le coût de distribution représente entre 5% et 10% du coût global. Aussi bien l'optimisation n'est jamais facile. Elmahi I. [9].

Plusieurs problèmes de distribution de marchandises ont été étudiés dans la littérature, parmi les problèmes classiques les plus répandus, nous pouvons citer le problème du voyageur de commerce ou the Traveling Salesman Problem (TSP) [12] et le problème de tournée de véhicule ou Vehicle Routing Problem (VRP) [13].

Ces deux problèmes ont été enrichis par la suite en introduisant de nouvelles contraintes telles que la capacité des véhicules ou the Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) [14] ou encore des contraintes de fenêtres de temps pour les livraisons ou Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW) [15].

L'optimisation globale d'une chaîne logistique reste une tâche assez difficile et la difficulté d'optimisation dépend du problème étudié et de l'approche adoptée.

Ainsi une approche non-intégrée ou découplée est une optimisation séquentielle qui consiste à optimiser les activités tour à tour afin d'optimiser tous le problème. Si on s'intéresse aux sous-problèmes de production, de stockage et de distribution séparément, la littérature est très riche en modèles et méthodes d'optimisation, on peut citer : Dupont L. [29], Giard V. [30] et Vallin P. [31] qui donnent un état de l'art assez complet sur ces modèles et méthodes. Les approches découplées sont très efficaces notamment pour des systèmes simples et non-complexes où les trois activités ont des coûts de différents ordres de grandeur.

Par contre, si, par exemple, le coût de production est prépondérant par rapport à celui de la distribution et du stockage, la solution retenue lors de l'optimisation de la production peut se rapprocher de la solution de l'optimisation globale de la chaîne.

Par conséquent, les approches découplées s'avèrent très vite inefficaces et décevantes lorsque les coûts de production, de stockage et de distribution sont du même ordre de grandeur. Ces activités doivent être alors considérées simultanément dans le même modèle.

On parle alors d'intégration de la chaîne logistique.

I.1.3 L'intégration dans la chaîne logistique

La politique de délocalisation des sites engendre d'une part un coût de distribution qui peut être élevé, et d'autre part un coût de stockage supplémentaire dû à l'utilisation des plateformes logistiques intermédiaires. Ce paradoxe entre les coûts de production d'un côté et les coûts de stockage et de distribution d'un autre côté, incite les entreprises à donner de plus en plus d'importance à une prise en compte de toutes leurs activités simultanément pour mieux réduire le coût global.

Les approches intégrées d'optimisation consistent à considérer deux activités ou plus en même temps afin de minimiser le coût global engendré par ces activités.

I.1.3.1 Intégration Production-Stockage (LSP)

Les stocks à considérer sont les stocks de matières premières, les stocks de produits semi-finis et les stocks de produits finis. Donc il est difficile d'envisager une gestion efficace de la production sans tenir compte des niveaux de stocks en cours.

Les problèmes de dimensionnement de lots ou Lot Sizing Problem (LSP) s'intègrent aussi dans cette même dimension. La production et le stockage sont simultanément considérés sur un intervalle de temps fini. L'objectif est de minimiser le coût global du système en trouvant les périodes et les quantités optimales de production durant chaque période.

Plusieurs sous-classes de LSP ont été ainsi distinguées. Les LSP avec contraintes de capacité CLSP (Capacitated lot sizing problem) et les problèmes discrets de dimensionnement de lots DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) font parties des LSP les plus traités dans la littérature. Le CLSP peut être considéré comme étant une extension du modèle de LSP au cas de multi-produits, sous l'hypothèse d'une contrainte de capacité. Le DLSP est obtenue en divisant les "macro-périodes" du CLSP en un nombre fini de "micro-périodes" de largeur égale. La supposition principale du DLSP est basée sur le principe du "tout ou rien" : Un seul article peut être produit par période, et si c'est le cas, toute la capacité de production est utilisée.

Plusieurs auteurs tels que Brahimi N., et al. [10] donnent un état de l'art assez complet sur les différentes classes de LSP et plusieurs critères sont utilisés pour la classification de ces

problèmes :

- ✓ le nombre de gammes de produits,
- ✓ le nombre de machines (ressources),
- ✓ la structure de la chaîne,
- ✓ les contraintes de capacité et
- ✓ la longueur de l'horizon de planification, etc.

I.1.3.2 Intégration Production-Distribution (PDP)

Les grandes entreprises ont été amenées à délocaliser leurs centres de productions dans des pays où la main d'œuvre est beaucoup moins chère, afin de réduire leurs coûts de production. Cependant, cette politique de délocalisation a engendré des coûts de transport qui s'avèrent extrêmement élevés. L'intégration simultanée des activités de production et de transport a été alors prise de plus en plus sérieusement et plusieurs chercheurs se sont penchés sur cette problématique.

La plupart des travaux rencontrés dans la littérature interviennent sur deux niveaux décisionnels différents :

- un niveau stratégique pour la distribution (localisation des détaillants, ouverture / fermeture des dépôts, etc.) ;
- un niveau opérationnel pour la production (quand, quelle quantité, etc.).

Une extension a été introduite pour prendre en considération la capacité du transporteur. Le modèle a été généralisé par la suite au cas de plusieurs types de produits avec des coûts fixes pour chaque livraison et pour chaque véhicule utilisé. Les auteurs montrent que la coordination entre l'ordonnancement de la production et de la livraison est plus intéressante qu'un ordonnancement séquentiel des deux activités.

I.1.3.3 Intégration Distribution-Stockage (IDP)

La délocalisation des centres de production a engendré également, en plus des coûts de distribution, des coûts de stockage supplémentaires dus à l'utilisation des plates-formes logistiques intermédiaires. Ces coûts supplémentaires ont poussé les gestionnaires des chaînes logistiques à une prise en considération plus détaillée des réseaux de distribution. Dans une

telle approche, les coûts engendrés par la production sont considérés négligeables.

Les problèmes de tournées avec gestion de stock IRP (Inventory Routing Problem) sont des problèmes qui combinent deux activités de la chaîne logistique : la gestion de stock et l'élaboration des tournées des véhicules. Le but est de minimiser le coût de transport sans avoir une rupture de stock. Le problème MPIRP (Multi Period Inventory Routing Problem) est une extension du problème IRP portant sur la résolution des problèmes de tournées de livraison multi-produits, multi-périodes.

Dans ce qui suit, nous présentons quelques travaux relatifs à l'importance de l'intégration des activités de production, de stockage et de distribution. Dans la majorité des cas, la demande est considérée constante et périodique à travers un horizon de temps fini, le détaillant doit être livré à des périodes bien déterminées et les capacités des stocks sont prises en considération à la fin des périodes.

I.2 Etat de l'art

La planification de la production et la distribution sont deux disciplines complexes, expliquant pourquoi la plupart des entreprises adoptent une approche en deux phases, dans laquelle la distribution est élaborée après le plan de la production. La même chose peut être observée dans la recherche, les deux problèmes ont été largement étudiés mais séparément.

Brahimi N., et al. [10] ont présenté un état de l'art sur un problème important dans le domaine de la planification de la production. Ce problème consiste à dimensionner les lots de plusieurs gammes de produits avec une capacité limitée, ont donné un aperçu général des différents problèmes de dimensionnement des lots, ont consacré le papier au Problème de Dimensionnement de Lots avec contraintes de Capacité (PDLC), ont donné les différentes modélisations du PDLC et enfin ont présenté brièvement différentes approches de résolution du problème.

Hahm en 1992 [17] introduit un problème de production-distribution, il s'agit du problème d'ordonnancement et de livraison de lots économiques (Economic Lot and Delivery Scheduling Problem (ELDSP)). Le système étudié par Hahm est constitué d'un fournisseur qui achemine un seul type de produit vers un seul centre d'assemblage où se trouvent les détaillants. La livraison des produits et leur utilisation chez les détaillants s'effectuent à des taux constants. Le modèle proposé permet de déterminer les longueurs optimales des périodes

ainsi que les quantités optimales à produire et à transporter durant chacune des périodes. Le résultat majeur de Hahm est de démontrer que la période de fabrication des produits (T) doit être un multiple de l'intervalle de livraison (R) ($T = M \cdot R$).

Burns et al. [18] comparent deux politiques de livraisons, la politique de livraison directe et la politique de livraison avec des tournées, et proposent une méthode analytique pour minimiser le coût global de stockage et de distribution depuis un fournisseur vers les détaillants.

Mason et al. [19] développent un modèle de simulation afin de montrer que l'intégration des systèmes de gestion de stocks et de gestion de la distribution permet de réduire d'une manière significative le coût global du stockage et de la distribution.

Sarmiento et Nagi [20] présentent une synthèse des différents problèmes soulevés par la coordination entre la production et la distribution. Le papier passe en revue les travaux récents sur l'analyse intégrée des systèmes de production-distribution et identifie les domaines importants où des recherches supplémentaires sont nécessaires.

Chandra et Fisher [21] ont étudié un problème (IPDP) similaire à celui de Sarmiento, mais ils considèrent plusieurs produits, une taille de la flotte et illimitée, une capacité de stockage illimitée de l'usine et les coûts de stockage sont négligés.

Chandra et Fisher [22] comparent une approche de production-routage intégrée avec une approche non-intégrée. Les auteurs développent une heuristique où le plan de production est défini pour un horizon de temps, ensuite la distribution est définie pour chaque période selon le plan de production prédéfini. Pour améliorer les solutions obtenues, ont utilisé un algorithme d'ajustement, pour des instances moyennes de 50 clients, 10 produits et 10 périodes, les résultats ont montré que la l'approche intégrée peut réduire le coût total de 3% à 20%.

Fumero et Vercellis [23] ont traité un problème presque identique à celui étudié par Chandra et Fisher [21]. Leur algorithme de résolution est basé sur la relaxation Lagrangienne, il a été testé sur des petites instances, avec un maximum de 12 détaillants, 10 produits et 8 périodes. Là encore, l'algorithme a été comparé à une approche découplée et des gains importants ont été obtenus.

Boudia et al. [32] proposent une GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) pour résoudre le problème de routage. Le principe de la méthode est de créer une solution initiale pendant une phase dite de construction, puis passer à la phase d'amélioration de la solution obtenue en faisant recours à la méthode de recherche locale. Les auteurs ne considèrent pas le coût de stockage chez le détaillant.

Boudia et Prins [33] proposent un algorithme mémétique pour résoudre le problème, pour l'évaluation des calculs, il ont testé l'algorithme sur des instances de 50, 100 et 200 détaillants et de 20 périodes.

Bard et Nananukul [34] proposent une méthode hybride qui combine une approche exacte avec une heuristique dans un algorithme Branch-and-Price. Ils ont expérimenté la méthode hybride sur des instances d'un maximum de 10 détaillants, 6 périodes et 5 véhicules.

Bard et Nananukul [35] ont développé un algorithme de recherche Tabou, ils l'ont appliqué sur des instances d'un maximum de 200 clients et 20 périodes.

Brahimi et Aouam [36] exposent le problème de plusieurs produits avec des capacités de stockage et accumulation de retards (Backlogging). Ils comparent plusieurs formulations PPIM pour résoudre le problème.

Adulyasak et al. [37] proposent des reformulations pour le cas de plusieurs véhicules, et introduisent certaines contraintes (Symmetry Breaking Constraints), pour résoudre le problème ils ont travaillé sur des instances de 35 détaillants, 3 périodes et 3 véhicules. L'optimalité est atteinte au bout de deux heures.

N. Absi et al. [38] développent une approche efficace en deux phases. La première phase de lotissement LSP consiste à résoudre le problème où le coût de routage est remplacé par un coût fixe approximatif de distribution, la deuxième phase de routage est appelée à calculer des itinéraires des véhicules pour chaque période.

VA. Armentano , et al. [24] traitent le problème intégré de la planification de production et la distribution avec routage sur des périodes d'un horizon fini. Ils proposent deux variantes de recherche Tabou pour ce problème, ces variantes proposées sont testés sur un ensemble de petites et grandes instances générées avec plusieurs produits. Pour les petits

cas, les deux méthodes donnent de bons résultats et pour les grandes instances, cette approche intégrée atteint de nouveau les meilleures solutions, mais à l'encontre du temps de calcul très élevé. Le problème traité par les auteurs est similaire au notre, avec la différence de prise en considération du routage.

A. Senoussi et al. [51] ont étudié un problème identique à notre problème, ont proposé deux formulations de programmation linéaire mixte avec six familles d'inégalités valides. Les résultats numériques ont montré que l'ajout des inégalités valides améliore considérablement la qualité de la solution et réduit le temps d'exécution pour les grandes instances.

Conclusion

Les activités de production, de stockage et de distribution sont les principales activités de la chaîne logistique. Dans de nombreuses situations, ces trois activités sont considérés séquentiellement pour les approches découplées (non-intégrées). L'intégration des trois activités a montré son efficacité et son importance dans le domaine d'optimisation.

Malgré le nombre important de publications traitant les problèmes d'intégration dans les chaînes logistiques et qui sont des problèmes difficiles à résoudre et nécessitant le développement de méthodes simples et efficaces, beaucoup de cas ne sont pas encore explorés, et le terrain est fertile pour les chercheurs dans le domaine.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une description détaillée du problème ainsi que la modélisation mathématique et enfin nous exposons en bref les différentes méthodes de résolution.

Chapitre II

Intégration production-stockage-distribution

dans une chaîne logistique

avec détaillants regroupés

Introduction

La gestion des chaînes logistiques est un domaine très vaste, dans notre étude nous avons choisi de traiter la gestion d'une structure particulière de chaînes logistiques, il s'agit de la chaîne logistique qui intègre la production, le stockage et la distribution, que nous allons décrire dans le chapitre suivant.

Le chapitre est scindé en trois sections, dans la première nous décrivons en détail la structure de la chaîne logistique étudiée, dans la deuxième nous donnons une modélisation mathématique du problème et enfin dans la troisième section nous exposons les différentes approches de résolution des problèmes de gestion des chaînes logistiques.

II.1 Description du problème

Le problème de production-stockage-distribution intégré IPIDP (Integrated Production Inventory Distribution Problem) qui a fait l'objet de notre étude, est décrit comme suit : Il s'agit d'une unité de production (usine) produisant un seul type de produit expédié par un ensemble restreint de véhicules homogènes $v \in \{1, \dots, V\}$ d'une capacité W , en périodes de temps $t \in \{1, \dots, T\}$ à un ensemble de détaillants $j \in \{1, \dots, N\}$, se trouvant dans la même zone géographique.

Dans chaque période, chaque véhicule peut effectuer au plus une visite de livraison. De plus la distance entre les différents détaillants n'est pas prise en considération dans notre cas.

Plusieurs détaillants peuvent être visités par le même véhicule dans la même période.

Les pénuries ne sont pas autorisées, autrement dit les détaillants peuvent être servis à l'avance mais pas en retard, à condition que leurs capacités de stockage soient respectées. Chaque détaillant peut être visité au plus une fois par période.

Le modèle est composé d'un fournisseur, un entrepôt central (stock) pour l'excédent de production, une flotte de véhicules homogènes et un ensemble de détaillants regroupés dans la même zone géographique disposant chacun d'un stock individuel. Le fournisseur assure la production ainsi que l'expédition et la livraison des commandes aux détaillants et il

est responsable aussi de la reconstitution des stocks chez les détaillants. La description du problème est présentée par la figure II.1.

La distance entre le fournisseur et la région de livraison est importante par rapport à celles reliant les détaillants entre eux, ce qui va influencer sur les coûts de distribution comme suit : le coût de transport entre le fournisseur et la région est fixe pour chaque véhicule, le coût de service change d'un détaillant à un autre et le coût de routage entre les détaillants est nul, donc l'hypothèse VRP est exclue dans notre cas.

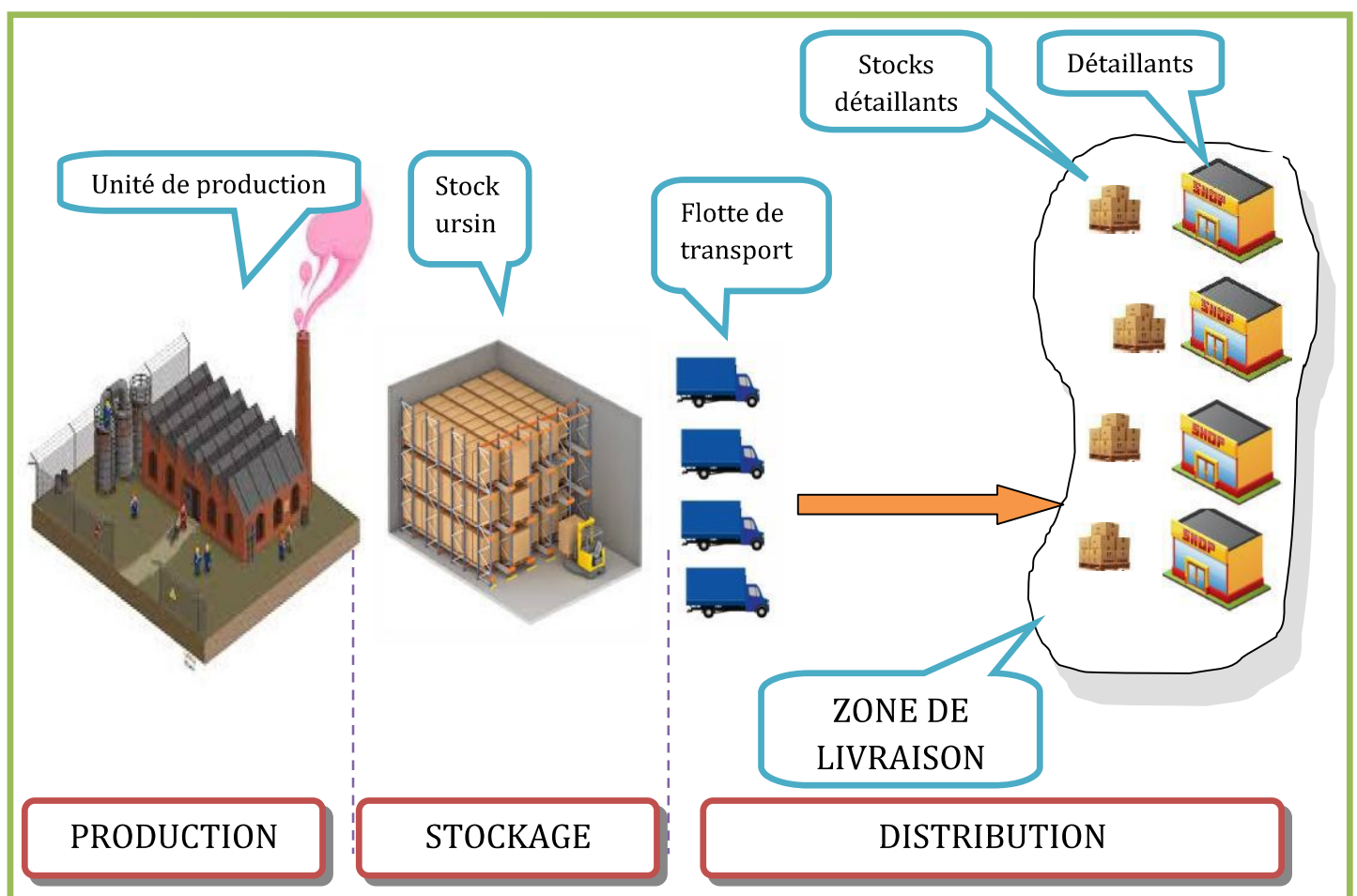


Figure II.1 : Description du problème

Nous présentons sur la figure II.2 ci-après les hypothèses et les paramètres de notre cas d'étude.

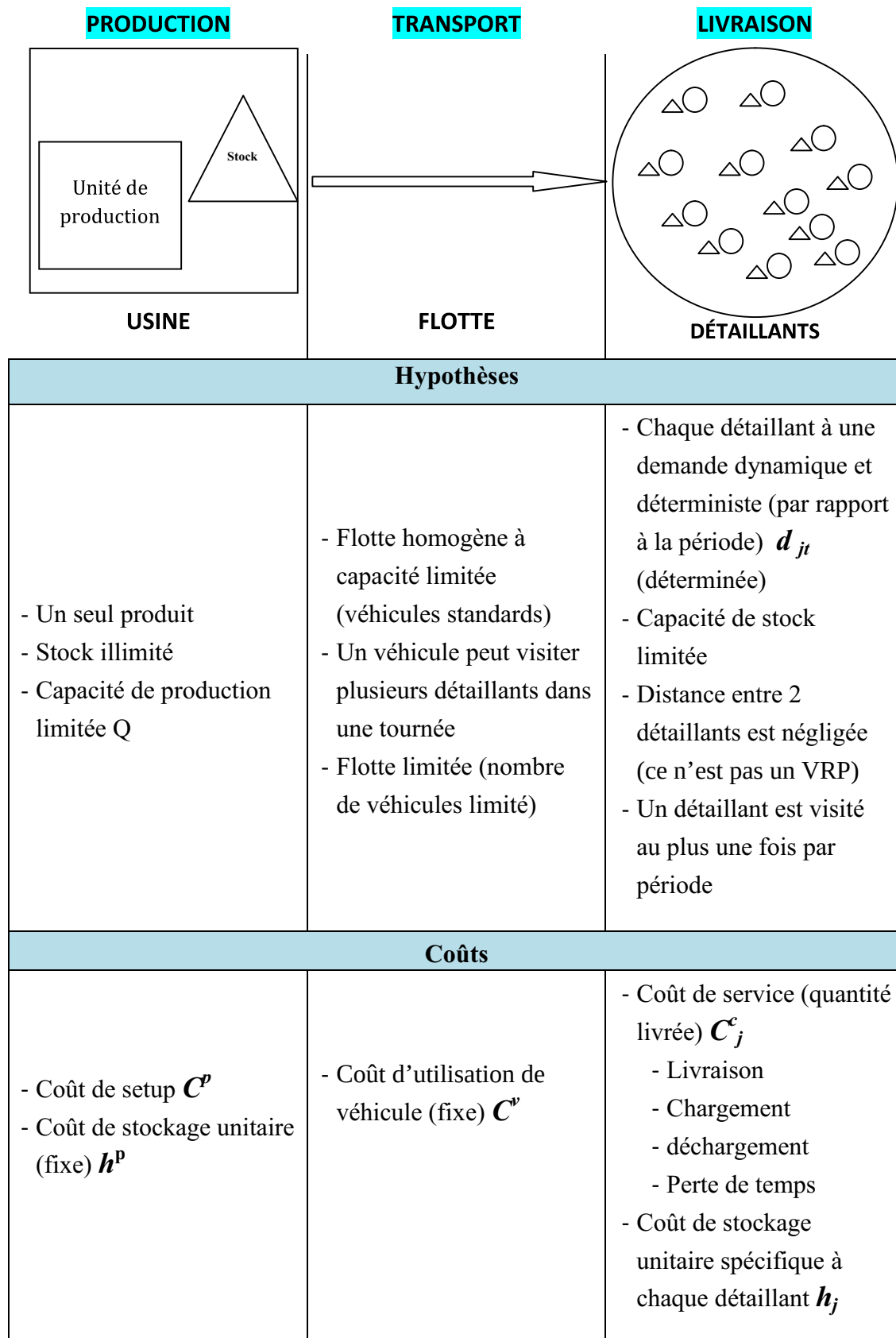


Figure II.2 : Hypothèses & Paramètres du problème

II.2 Modélisation du problème

Nous présentons dans ce qui suit la modélisation mathématique de notre problème.

II.2.1 Les indices

Nous manipulons dans le modèle mathématique les variables selon trois indices :

- l'indice ' t ' pour indiquer les périodes, $t \in \{1, \dots, T\}$,
- l'indice ' j ' pour indiquer les détaillants, $j \in \{1, \dots, N\}$,
- l'indice ' v ' pour indiquer les véhicules, $v \in \{1, \dots, V\}$.

II.2.2 Les paramètres

Les paramètres de la fonction objectif sont :

- h^p : coût unitaire de stockage usine,
- h_j : coût unitaire de stockage du détaillant j ,
- c^p : coût de setup de production,
- c^v : coût fixe de transport,
- c_j^c : coût de service détaillant j ,
- Q : capacité de production,
- W : capacité du véhicule,
- d_{jt} : demande du détaillant j à la période t ,
- I_j^{max} : capacité maximum de stockage du détaillant j ,
- T : désigne le nombre de périodes,
- N : nombre de détaillants,
- V : nombre de véhicules.

II.2.3 Les variables

Considérons les variables suivantes :

- p_t : quantité produite à la période t ;
- y_t : variable booléenne identifiant s'il y a production ou non à la période t ;

- I_t^p : niveau de stock à l'usine à la fin de la période t ;
- I_{jt}^c : niveau de stock chez le détaillant j à la fin de la période t ;
- z_{vt} : variable booléenne identifiant l'utilisation ou non du véhicule v à la période t ;
- q_{vt}^V : quantité transportée par le véhicule v à la période t ;
- q_{jvt}^c : quantité livrée au détaillant j par le véhicule v à la période t ;
- x_{jvt} : variable booléenne identifiant si un détaillant j est servi ou non par le véhicule v à la période t .

II.2.4 La fonction objectif

La fonction objectif pour notre problème est donnée par la formule mathématique suivante :

$$\min \sum_{t=1}^T \left[h^p \cdot I_t^p + c^p y_t + \sum_{v=1}^V c^v \cdot z_{vt} + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{v=1}^V c_j^c \cdot x_{jvt} + h_j \cdot I_{jt}^c \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

II.2.5 Les contraintes

$$I_t^p = I_{t-1}^p + p_t - \sum_{v=1}^V q_{vt}^V \quad t = 1, \dots, T \dots \dots \dots (2)$$

$$I_{jt}^c = I_{jt-1}^c + \sum_{v=1}^V q_{jvt}^c - d_{jt} \quad t = 1, \dots, T \quad j = 1, \dots, N \dots \dots \dots (3)$$

$$p_t \leq Q \cdot y_t \quad t = 1, \dots, T \dots \dots \dots (4)$$

$$q_{vt}^V \leq W \cdot z_{vt} \quad t = 1, \dots, T \quad v = 1, \dots, V \dots \dots \dots (5)$$

$$q_{jvt}^c \leq \min(d_{jt} + I_j^{max}, W) \cdot x_{jvt} \quad j = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T, v = 1, \dots, V \dots \dots \dots (6)$$

$$\sum_{v=1}^V x_{jvt} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \dots \dots \dots (7)$$

$$I_{jt}^c \leq I_j^{max} \quad t = 1, \dots, T \quad j = 1, \dots, N \dots \dots \dots (8)$$

$$p_t, I_t^p, q_{vt}^V, q_{jvt}^c, I_{jt}^c \geq 0; y_t, x_{jvt}, z_{vt} \in \{0,1\} \quad \forall t = 1, \dots, T, v = 1, \dots, V, j = 1, \dots, N \dots \dots \dots (9)$$

La fonction objectif (1) exprime la minimisation du coût global : le coût de production, les coûts de stockage et les coûts de distribution. La contrainte (2) représente l'équilibre entre la production, les stocks et les livraisons, et la contrainte (3) représente l'équilibre entre les livraisons, les stocks et la demande des détaillants. La contrainte (4) limite la production (respect de la capacité de la production), et la contrainte (5) veille sur le respect de la capacité de véhicule et relie la quantité transportée au véhicule utilisé, et la contrainte (6) assure le respect de la quantité livrée par le véhicule au détaillant s'il est desservi. La contrainte (7) veille à ce que, dans chaque période, chaque véhicule dessert au plus un détaillant, la contrainte (8) veille à ce que, le stock au niveau du détaillant, dans chaque période, ne dépasse pas son stock maximal. La contrainte (9) indique le type des variables utilisées.

Ayant présenté la modélisation mathématique de notre problème, nous donnons, dans ce qui suit, en bref, un vue panoramique sur les méthodes de résolution des problèmes NP-difficiles dans le domaine d'optimisation d'une manière générale et dans le domaine de gestion des chaînes logistiques en particulier.

II.3 Méthodes de résolution

Résoudre un problème d'optimisation combinatoire, c'est trouver l'optimum d'une fonction, parmi un nombre fini de choix, souvent très grand. Les applications concrètes sont nombreuses dans le domaine de la production industrielle ou dans le domaine des transports. Les méthodes de résolution peuvent être classées en deux grandes catégories, les méthodes exactes et les méthodes approchées, comme cela est spécifié sur la figure II.3.

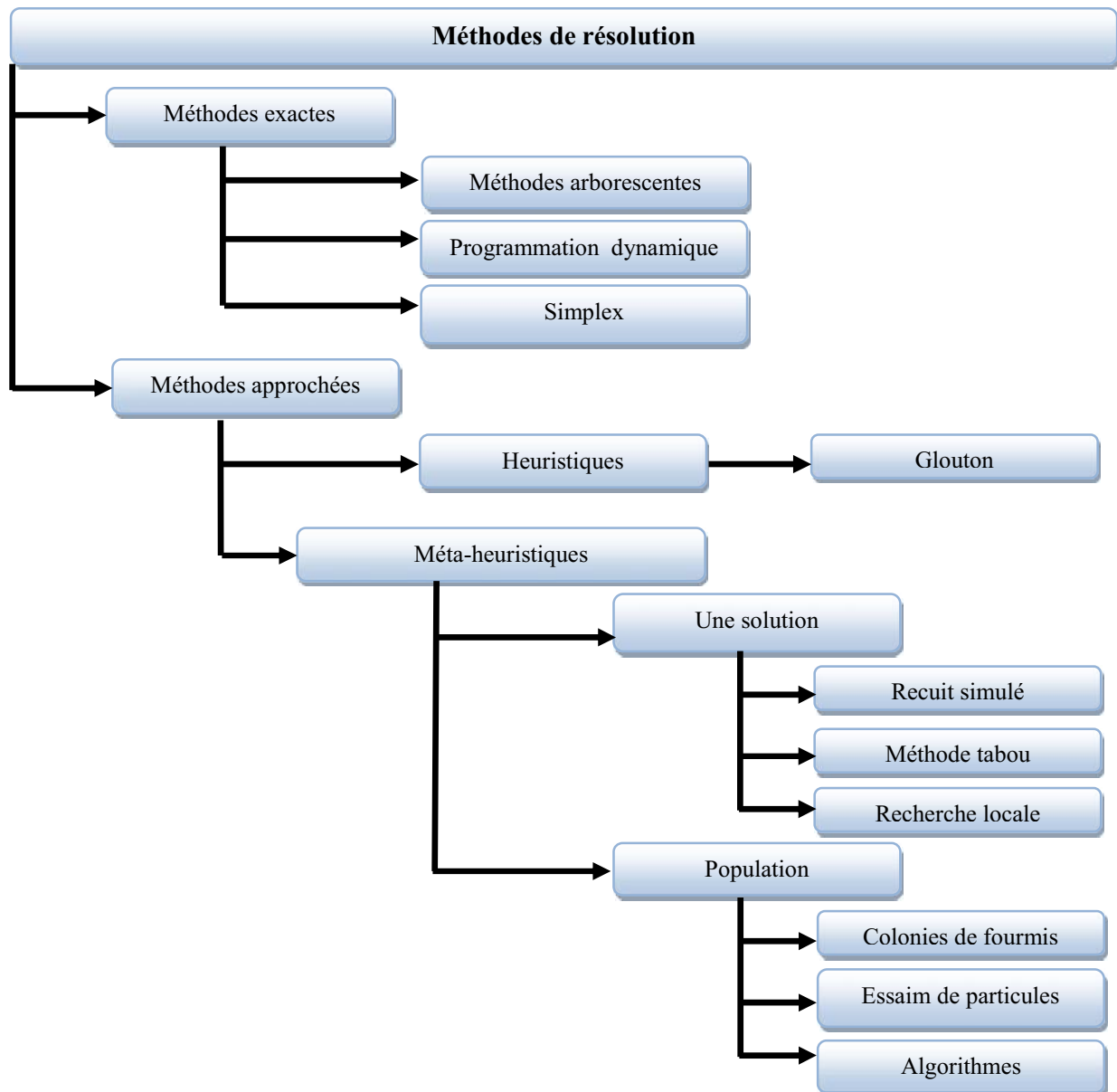


Figure II.3 : Classification des méthodes de résolution

II.3.1 Méthodes exactes

Les méthodes exactes fournissent systématiquement une solution optimale au problème traité, si une telle solution existe. Dans le cas contraire, ce type de méthode permet d'affirmer qu'il n'existe pas de solution au problème traité.

Parmi ces méthodes on peut citer :

II.3.1.1 Les méthodes arborescentes

Les méthodes de résolution les plus répandues sont certainement celles qui modélisent l'espace de recherche des solutions sous la forme d'une arborescence telle que la procédure de Séparation Évaluation Progressive. Cette méthode, appelée également Branch & Bound Procedure (BBP), utilise des techniques lui permettant de séparer l'espace de recherche en plusieurs sous ensembles distincts. Des calculs de bornes sont alors effectués pour chaque sous ensemble afin d'éliminer de la recherche ceux dont on a la certitude qu'ils ne contiennent pas la solution optimale. Les méthodes Branch & Cut et Branch & Price sont des dérivées de la BBP.

L'efficacité d'une technique de BBP dépend en grande partie du choix de la borne inférieure (ou supérieure) de l'arborescence. En effet, il est nécessaire que cette dernière soit la plus précise possible afin d'arrêter le plus rapidement l'exploration des branches qui vont conduire inévitablement à une mauvaise solution. [4].

Certains problèmes peuvent être résolus par d'autres méthodes exactes telles que la programmation dynamique, la méthode du simplexe, et la programmation linéaire en nombres entiers.

II.3.1.2 La programmation dynamique

Le principe de la programmation dynamique est de procéder à une décomposition des décisions associées aux problèmes en sous ensembles considérés successivement, ce qui conduit à résoudre des sous problèmes plus grands en utilisant la solution de sous problèmes plus petits. Ceci n'est possible que si la fonction objectif possède la propriété de décomposition. On traite le problème par étapes commençant par le plus petit sous problème jusqu'au problème complet. On cherche la solution optimale pour chaque sous problème en tenant compte des informations obtenues lors des précédents étapes.

L'exemple le plus simple de l'utilisation de la programmation dynamique est la recherche du plus court chemin dans un graphe orienté. La programmation dynamique énumère implicitement toutes les solutions, et de ce fait elle est très exigeante en termes de temps de calculs et de mémoire pour les problèmes NP-difficiles. Elle ne permet pas alors d'aborder des problèmes de grandes tailles.

II.3.1.3 La méthode de simplexe

La méthode du simplexe permet la recherche d'un optimum économique. Il s'agit par exemple, dans le cas d'un programme de production, de déterminer quelles seront les quantités à fabriquer pour optimiser le coût total, et ce en tenant compte des contraintes de production, de stockage, etc.

Le principe de base de la méthode suit un certain nombre d'étapes contenues dans l'algorithme de simplexe.

II.3.1.4 La programmation linéaire

Elle formule le problème avec un critère et des contraintes exprimés en fonction linéaires de variables de décisions. Les variables sont entières ou binaires pour la plupart des problèmes d'ordonnancement. Ceci rend l'ensemble des problèmes pour lesquels on peut trouver des solutions exactes en un temps raisonnable, limité à des problèmes de tailles relativement faibles.

Les méthodes de résolution exactes s'avèrent souvent inefficaces ou très lourdes lorsqu'il s'agit de problèmes de dimension importante. L'exploration de tout l'espace de recherche devient alors irréalisable et l'exécution partielle de la méthode exacte donne rarement une solution de bonne qualité [4].

Exemple : Dans le cas du problème du voyageur de commerce TSP, l'espace de recherche croît en $(n-1)!$, où n est le nombre de villes à visiter, ce qui dépasse rapidement les capacités de calcul de n'importe quel ordinateur.

L'utilisation des méthodes *exactes* pour la résolution des problèmes NP-difficiles, n'est pas toujours efficace, dans ce cas, faire recours aux méthodes approchées est une nécessité, car ces dernières permettent d'identifier en un temps raisonnable au moins une solution réalisable rapide, pas obligatoirement optimale.

II.3.2 Méthodes approchées

Des méthodes de résolution approchées ont été mises au point afin d'obtenir rapidement de bonnes solutions même si elles ne sont pas optimales. Les méthodes

approchées sont regroupées d'une manière générale en deux grandes familles : les heuristiques et les méta-heuristiques.

II.3.2.1 Les heuristiques

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approché qui permet d'identifier en temps polynomial au moins une solution réalisable rapide, pas obligatoirement optimale. Généralement les heuristiques sont destinées à résoudre des problèmes bien spécifiques [43]. Parmi les heuristiques on peut citer l'algorithme glouton.

► **L'algorithme glouton** : Les algorithmes gloutons sont ceux qui trouvent une solution parmi plusieurs possibles, comparables selon un critère global. A chaque fin d'étape de l'algorithme, on choisit l'étape suivante en fonction des informations locales. La méthode gloutonne ne trouve pas forcément la meilleure solution [43]. L'idée générale est :

- Générer une solution initiale
- Modifier légèrement la structure de cette solution pour en obtenir une meilleure
- Répéter, tant qu'on trouve des améliorations

Exemple : pour le problème du voyageur de commerce TSP, l'algorithme glouton le plus classique consiste à visiter à chaque itération, la ville non visitée la plus proche de la dernière ville ajoutée.

II.3.2.2 Les méta-heuristiques

Méta est un préfixe qui provient du grec *μετά* (*meta*) (après, au-delà de, avec). Il exprime, tout à la fois, la réflexion, le changement, la succession, le fait d'aller au-delà, à côté de, entre ou avec [43]. **Méta** signifie aussi à propos.

Ceux sont des algorithmes d'optimisation (généralement de type stochastique) combinant plusieurs approches heuristiques. Elles tentent de trouver l'optimum global (plusieurs solutions) ou l'optimum local (une seule solution) d'un problème d'optimisation difficile.

Les méta-heuristiques sont fondées sur des principes généraux qui s'adaptent facilement à différents types de problèmes. Deux familles de méta-heuristiques sont à distinguer :

Les méta-heuristiques à solution unique : qui sont basées sur le principe de recherche de voisinage. En effet, en partant d'une solution initiale, l'algorithme tente d'améliorer cette solution pas à pas en choisissant une nouvelle solution dans son voisinage. Les méta-heuristiques à solution unique les plus répandues et les plus utilisées dans la littérature [28] sont :

► **Le recuit simulé** : L'idée est d'effectuer un mouvement selon une distribution de probabilité qui dépend de la qualité des différents voisins [43]:

- Les meilleurs voisins ont une probabilité plus élevée.
- Les moins bons ont une probabilité plus faible.

On utilise un paramètre, appelé la température (notée TT) :

- TT élevée : tous les voisins ont à peu près la même probabilité d'être acceptés.
- TT faible : un mouvement qui dégrade la fonction de coût a une faible probabilité d'être choisi.
- $TT=0$: aucune dégradation de la fonction de coût n'est acceptée.

La température varie au cours de la recherche : TT est élevée au début, puis diminue et finit par tendre vers 0.

► **La recherche Tabou** : L'idée de base de la méthode consiste à introduire la notion d'histoire dans la politique d'exploration des solutions. Le nom **recherche Tabou** exprime l'interdiction de reprendre des solutions récemment visitées.

L'idée de base de la liste Tabou consiste à mémoriser les configurations ou régions visitées et à introduire des mécanismes permettant d'interdire à la recherche de retourner trop rapidement vers ces configurations [43].

► **La recherche locale** : La recherche locale peut être utilisée sur des problèmes de recherche d'une solution maximisant un critère parmi un ensemble de solutions candidates [43]. Les algorithmes de recherche locale passent d'une solution à une autre dans l'espace des solutions candidates (*l'espace de recherche*) jusqu'à ce qu'une solution considérée comme optimale soit trouvée ou que le temps imparti soit dépassé.

Les méta-heuristiques à population : constituent la deuxième famille de méta-heuristiques. A l'inverse de la famille précédente, ces méthodes améliorent, au fur et à mesure, un ensemble de solutions, appelé population, et non une seule solution. L'avantage majeur de ces méthodes est qu'elles apportent un facteur de diversité des solutions et donc une meilleure exploration de l'espace de recherche.

► **Les colonies de fourmis** : Est une méthode évolutive inspirée du comportement des fourmis à la recherche de nourriture. Cet algorithme a été proposé par Dorigo en 1992 [44].

► **les algorithmes d'optimisation par essaim de particules** : Les particules sont les individus et elles se déplacent dans l'hyperespace de Recherche. Le processus de recherche est basé sur deux règles [43]:

1. Chaque particule est dotée d'une mémoire qui lui permet de mémoriser le meilleur point par lequel elle est déjà passée et elle a tendance à retourner vers ce point.
2. Chaque particule est informée du meilleur point connu au sein de son voisinage et elle va tendre à aller vers ce point.

► **Les algorithmes génétiques** : Inspirés de la génétique, ils consistent à trouver une solution optimale à partir d'une population qui évolue de génération en génération (la classe des algorithmes évolutionnaires) [45].

Ce sont des méta-heuristiques les plus répandues dans la littérature. Plus de détails sur ces méthodes peuvent être trouvés dans [28].

Conclusion

Les méthodes de résolution des problèmes de chaînes logistiques d'une manière particulière, et des problèmes d'optimisation d'une manière générale appartiennent à deux grandes catégories bien distinctes, en fonction de la qualité de la solution obtenue. Les méthodes de résolution *exactes* qui assurent l'optimalité de la solution, et les méthodes approchées appelées *heuristiques* qui permettent d'avoir une bonne solution en un temps réduit. Les heuristiques sont utilisées pour résoudre les problèmes NP-difficiles dont la résolution avec une méthode exacte ne s'effectue pas en un temps polynomial. Elles permettent ainsi d'assurer un compromis entre la qualité de la solution retenue et le temps nécessaire de calcul.

Le problème IPIDP que nous avons traité est un problème NP-difficile, c'est la raison pour laquelle nous avons fait recours aux méthodes de résolution approchées d'une façon générale et aux méta-heuristiques à une solution d'une manière particulière. La méthode choisie pour notre cas est « la Recherche Tabou ». Nous allons voir en détail, dans le troisième chapitre, le principe de la méthode, l'algorithme général de la méthode et l'algorithme spécifique à notre problème... etc.

Chapitre III

*Méta-heuristiques pour la résolution du
problème d'intégration
production-stockage-distribution*

Introduction

Le problème d'intégration production-stockage-distribution IPIDP avec Cluster, qui fait l'objet de notre étude, est un problème NP-difficiles, d'où la nécessité d'avoir recours à une méthode approchée (méta-heuristique) pour sa résolution.

Les méthodes de recherche locale ou méta-heuristiques à une solution et à base de voisinages s'appuient toutes sur un même principe : à partir d'une solution initiale x_0 , considérée comme point de départ, la recherche consiste à passer d'une solution à une solution voisine par déplacements successifs. L'ensemble des solutions que l'on peut atteindre à partir d'une solution x est appelé voisinage de x , noté $N(x)$.

L'approche méta-heuristique que nous avons appliquée dans notre étude est « la Recherche Tabou », l'idée de base de cette approche exprime l'interdiction de reprendre des solutions récemment visitées.

Le troisième chapitre est divisé en trois sections, dans la première section nous présentons le concept de base, le principe et l'algorithme général de la méthode de recherche Tabou et l'application de la méthode sur le problème. Dans la deuxième section nous présentons le principe de base de la méthode de recuit simulé et son application sur le problème. Dans la dernière section du chapitre nous présentons une approche d'hybridation des deux méthodes ainsi que son application sur le problème.

III.1 Méthode de recherche Tabou (Tabu Search)

III.1.1 Principes de base

L'idée de la recherche Tabou consiste, à partir d'une solution courante x_n à l'étape n , à explorer le voisinage et à choisir la meilleure solution x^* qu'il contient. Il est important de noter que cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction : c'est le cas lorsque les évaluations de tous les points du voisinage ont une valeur plus élevée que l'évaluation du point courant. C'est à partir de ce mécanisme que l'on sort d'un minimum local. Le risque, cependant, est qu'à l'étape suivante, on retombe dans le minimum local auquel on vient d'échapper. Il faut donc mettre en place un mécanisme qui évite le cyclage ou

en tous cas qui permette de faire un choix différent de (x_{n+1}) si la recherche nous ramenait à la solution x_n . La solution retenue consiste en l'introduction d'une mémoire dans l'algorithme.

Les solutions déjà explorées sont conservées dans une liste (appelée souvent liste Tabou) d'une taille donnée, qui est un paramètre ajustable de l'heuristique. Cette liste doit conserver des solutions complètes, ce qui dans certains types de problèmes, peut nécessiter l'archivage d'une grande quantité d'informations. Cette difficulté peut être contournée en ne gardant en mémoire que les mouvements précédents, associés à la valeur de la fonction à minimiser.[16]

Dans ce dernier cas, il est tout à fait possible que les listes Tabou écartent des solutions non rencontrées. On peut alors imaginer de mettre en place un système permettant de négliger le statut Tabou de certaines solutions si un avantage suffisant en résulte. On implémente ceci à l'aide de critères d'aspiration tels que : accepter x^* Tabou si x^* donne à la fonction objectif une valeur meilleure que toutes celles obtenues jusqu'à présent ou si la valeur de l'objectif est améliorée d'au moins 1% [27]

Les paramètres les plus critiques à définir dans la méthode de la recherche Tabou sont, la mémoire, la longueur de la liste Tabou (L), l'aspiration, l'intensification et la diversification [27]. La méthode de la recherche Tabou est caractérisée par :

- ☐ A chaque itération, on examine complètement le voisinage de la solution actuelle, et on va vers la meilleure solution.
- ☐ On s'interdit de revenir sur une solution visitée dans un passé proche grâce à une liste Tabou T de longueur limitée, qui stocke de manière compacte les dernières solutions visitées.
- ☐ On conserve en cours de route la meilleure solution trouvée.

► Mémoire

Elle préserve un nombre d'états visités précédemment accompagné d'un nombre d'états qui pourraient être non acceptés [39].

► Tabous et liste Tabou

Les Tabous sont une manière de représenter la mémoire du cheminement effectué pour diriger l'exploration vers des régions non visitées. La manière la plus simple de définir les Tabous est de conserver une liste Tabou qui contient les dernières solutions rencontrées et on empêche à la procédure d'y retourner. On gère cette liste comme une liste circulaire : on élimine le plus vieux Tabou et on insère la nouvelle solution (cette solution peut s'avérer coûteuse en termes de quantité d'information requise).

Le rôle de la liste Tabou est d'interdire les mouvements cycliques. La longueur de la liste doit être bien choisie. La valeur moyenne des solutions visitées se développe proportionnellement avec l'augmentation de la taille de liste Tabou [39].

► Critères d'aspiration

Les critères d'aspiration permettent de révoquer les mouvements considérés comme Tabou lorsqu'ils produisent une bonne solution. Les critères d'aspiration les plus connus sont les suivantes :

☐ Meilleur global : Soient s la meilleure solution connue jusqu'à présent et s'' une solution qui peut être obtenue à partir de la solution courante s' avec une transformation qui utilise des mouvements Tabous. Si $f(s'') < f(s)$ on lève les interdictions Tabous.

☐ Meilleur régional : quand la solution obtenue à partir des mouvements Tabous produit la meilleure solution de la région courante.

☐ Meilleur parmi les derniers : quand la solution obtenue à partir des mouvements Tabous donne la meilleure solution parmi les k dernières solutions.

► Intensification

L'intensification est une stratégie destinée à restreindre la trajectoire de recherche à une partie de l'espace des solutions jugée prometteuse. Cette approche est motivée par l'idée intuitive que, si l'on exhibe une solution particulièrement intéressante au cours d'une exploration rapide, alors il y a de fortes chances pour qu'un examen plus poussé dans sa proximité en fournisse de meilleures encore [40].

► Diversification

Afin d'éviter qu'une grande région de l'espace de recherche reste inconnue et inexplorée, il est important de diversifier la recherche en effectuant plusieurs lancements aléatoires.

Un autre moyen, qui garantit l'exploration des régions non visitées est de pénaliser les mouvements ou les solutions fréquemment visitées. Cette pénalité est posée de telle sorte à assurer l'éloignement et l'évitement des régions courantes.

Il est également possible d'employer une pénalité sur les mouvements fréquemment effectués pendant toute la procédure de recherche. Pendant cette phase de diversification, les solutions visitées ne sont pas obligatoirement réalisables [27].

► Critère d'arrêt

En règle générale, pour interrompre l'algorithme, on considère deux critères :

- Nombre d'itérations : tout d'abord on vérifie à chaque itération que le compteur d'itérations totales n'a pas dépassé un nombre maximal depuis le début de processus, ou on se base sur une autre valeur seuil, qui correspond au nombre maximal d'itérations que l'on s'autorise entre deux modifications (améliorations) consécutives de la (meilleure) solution.
- Temps d'exécution : au lieu de considérer le nombre d'itérations, on pourrait aussi se baser sur le temps d'exécution total, qui devrait être inférieur à une valeur maximale.

III.1.2 Algorithme général de la méthode recherche Tabou

Algorithme 1 : Algorithme général de la recherche Tabou

Début

- 1- Initialisation
- 2- Générer une solution initiale x_0 . $x^* \leftarrow x_0$, $c^* \leftarrow f(x_0)$; x^* est la meilleure solution rencontrée, c^* son coût et f la fonction économique (fonction qualité)
- 3- $k \leftarrow 0$, Liste_Tabou = $\emptyset$
- 4- Répéter tant qu'un critère de fin n'est pas vérifié
- 5- Choisir meilleur x_k parmi le voisinage de x_k , $V(x_k)$, en effectuant le mouvement qui minimise f et qui n'appartient pas à la Liste_Tabou, sauf si $c_k < c^*$.
- 6- $x_{k+1} \leftarrow meilleur(x_k)$.

7- si $(c(x_k+1) < c^*)$ alors $x \leftarrow x_{k+1}$, $c^* \leftarrow c(x_{k+1})$.

8- $k \leftarrow k+1$

9- Mise à jour de la liste_Tabou.

Fin

III.1.3 Application de la méthode de recherche Tabou

III.1.3.1 Notation spécifiques à la recherche tabou

Nous présentons les notations spécifiques à la recherche Tabou relatives à notre problème comme suit :

T_alerte : est une période limite qui détermine s'il y a un déficit de production ou non, c'est-à-dire à partir de $t_alerte+1$ la différence entre le cumul de la capacité de production et le cumul des quantités à livrer soit positif ;

TLT : désigne la taille de la liste Tabou ;

χ (gamma) et β (beta) sont des paramètres positifs qui correspondent, respectivement, à l'excès de production et au dépassement du nombre de véhicule.

α_{jt} : Signifie que si le stock du détaillant j est plein à la fin de la période t , alors nous ne pouvons plus livrer jusqu'à la période α_{jt} ;

Variable & indices

Indices particuliers : j : indice détaillant, v : indice véhicule et t : indice période.

x_{jt} : élément de la matrice X qui indique si le détaillant j est livré à la période t ;

p_t : élément de la matrice P qui indique la quantité produite à la période t ;

y_t : élément de la matrice y qui indique s'il y a production à la période t ;

P_t : élément de la matrice P qui indique le niveau de stock à l'usine à la fin de la période t ;

I_{jt}^c : élément de la matrice I^c qui indique le niveau de stock au niveau du détaillant j à la fin de la période t ;

z_{vt} : élément de la matrice Z qui indique si le véhicule v est utilisé à la période t

q_{vt}^V : élément de la matrice q^V qui indique la quantité transportée par le véhicule v à la période t ;

q_{jvt}^c : élément de la matrice q^c qui indique la quantité livrée au détaillant j par le véhicule v à la période t ;

x_{jv} : élément de la matrice x qui indique si le détaillant j est desservi par le véhicule v à la période t ;

ql : la matrice des quantités à livrer.

ql_{jt} : élément de ql .

III.1.3.2 Définition de la solution

Une solution 's' au problème consiste à déterminer, les quantités à produire à chaque période, les quantités à livrer affectées à chaque véhicule, l'ensemble des détaillants visités par chaque véhicule et les quantités à livrer à chaque détaillant à chaque période. Aussi la grandeur la plus importante est la matrice ql des quantités à livrer. En effet c'est à partir d'elle qu'on pourra déterminer les autres variables. A titre d'exemple la matrice ql peut se présenter comme suit :

$$ql = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 9 & 17 & 2 & 38 & 18 \\ 15 & 21 & 5 & 0 & 11 \\ 40 & 5 & 11 & 15 & 20 \\ 6 & 3 & 8 & 3 & 0 \\ 12 & 5 & 7 & 2 & 5 \\ 12 & 17 & 16 & 10 & 0 \end{pmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}$$

Exemple de la matrice ql

Matrice donnant la quantité à livrer pour 5 périodes ($T=5$) et 6 détaillants ($N=6$).

III.1.3.3 Définition du voisinage de s

Nous définissons le voisinage $V(s)$ d'une solution s ($s = ql$) comme l'ensemble des solutions $ql \in V$ produites chacune d'un mouvement élémentaire permettant de passer de la solution ql à une autre solution ql' proche avec une faible modification de la structure de la solution ql .

III.1.3.4 Définition du mouvement

Nous définissons le mouvement comme suit : un mouvement se fait dans la matrice des quantités à livrer, c'est le déplacement d'une quantité maximale $r_{jt} \leq ql_{jt}$ de la période t' à la période $t \neq t'$ pour le détaillant j sans violer :

- ✚ La capacité maximale de stockage des détaillants (I_{max}),
- ✚ La capacité de production (Q),
- ✚ La capacité de véhicule (W).

Il existe deux types de mouvement : *forward move* et *backward move*.

Forward move

Le mouvement consiste à déplacer une quantité $r_{jtt'} \leq ql_{jt'}$ de la période t' à la période $t > t'$ pour le détaillant j .

La quantité $r_{jtt'}$ est donnée par la formule suivante :

$$r_{jtt'} = \min\{ql_{jt'}, W - ql_{jt}, \min(Ic_{jt})\} \quad \tau = t', \dots, t-1$$

L'exemple suivant illustre le mouvement *Forward move* qui consiste à déplacer une quantité $r_{jtt'} = 13$ calculée par la formule précédente, de la période $t' = 1$ à la période $t = 4$ pour le détaillant $j = 2$:

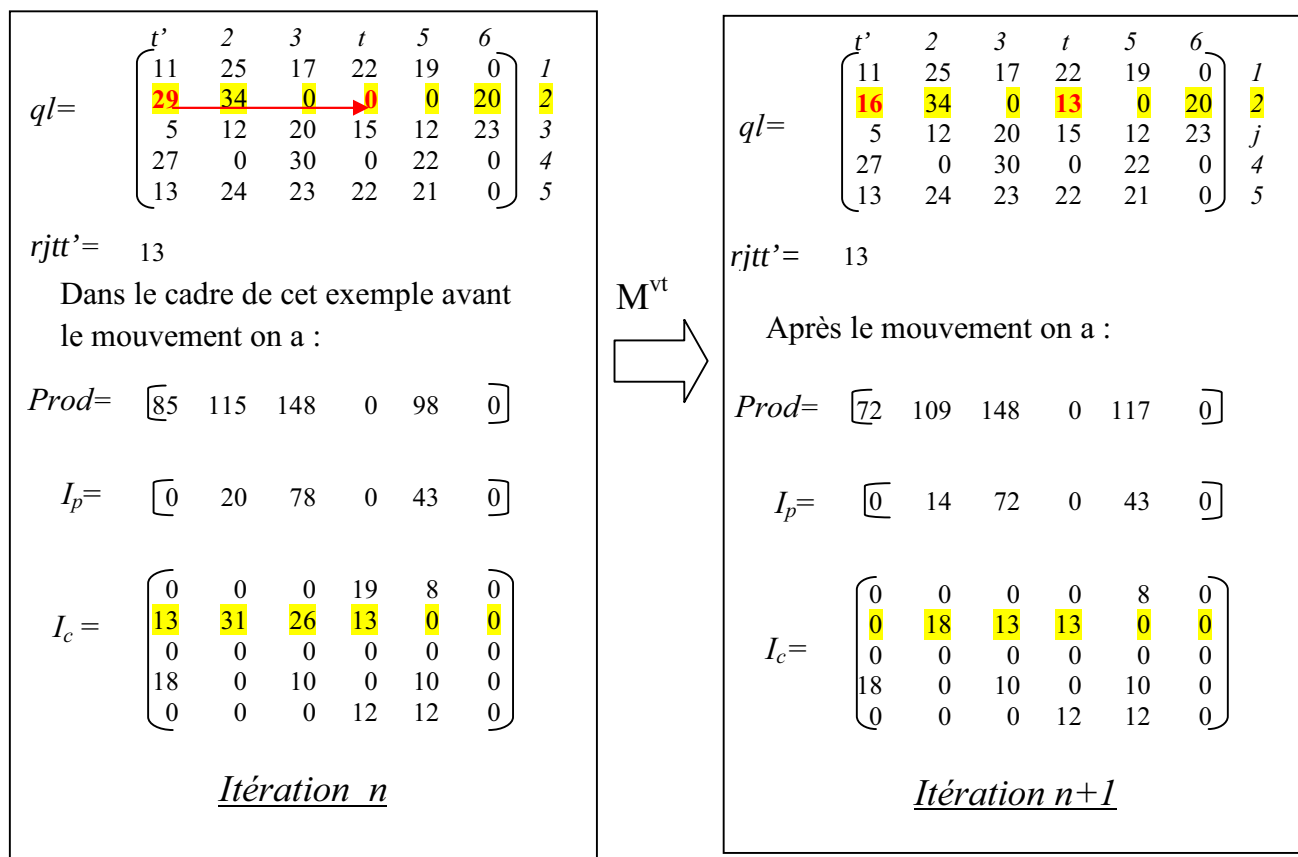


Figure III.1 : Exemple de *Forward move*

Nous pouvons remarquer l'effet du mouvement élémentaire *Forward move* sur la production, sur le stock usine et sur les stocks détaillants, ce qui va influencer directement sur le coût total.

Backward move

Le mouvement consiste à déplacer une quantité $r_{jtt'} \leq ql_{jt'}$ de la période t' à la période $t < t'$ pour le détaillant j

La quantité $r_{jtt'}$ est donnée par la formule suivante :

$$\min\{ql_{jt'}, W-ql_{jt}, diff_t, \min(I_{max_j} - I_{c_{jt}})\} \quad \tau=t, \dots, t'-1$$

L'exemple suivant illustre le mouvement *Backward move* qui consiste à déplacer une quantité $r_{jtt'} = 22$ calculée par la formule précédente, de la période $t'=5$ à la période $t=4$ ($t < t'$) pour le détaillant $j=4$:

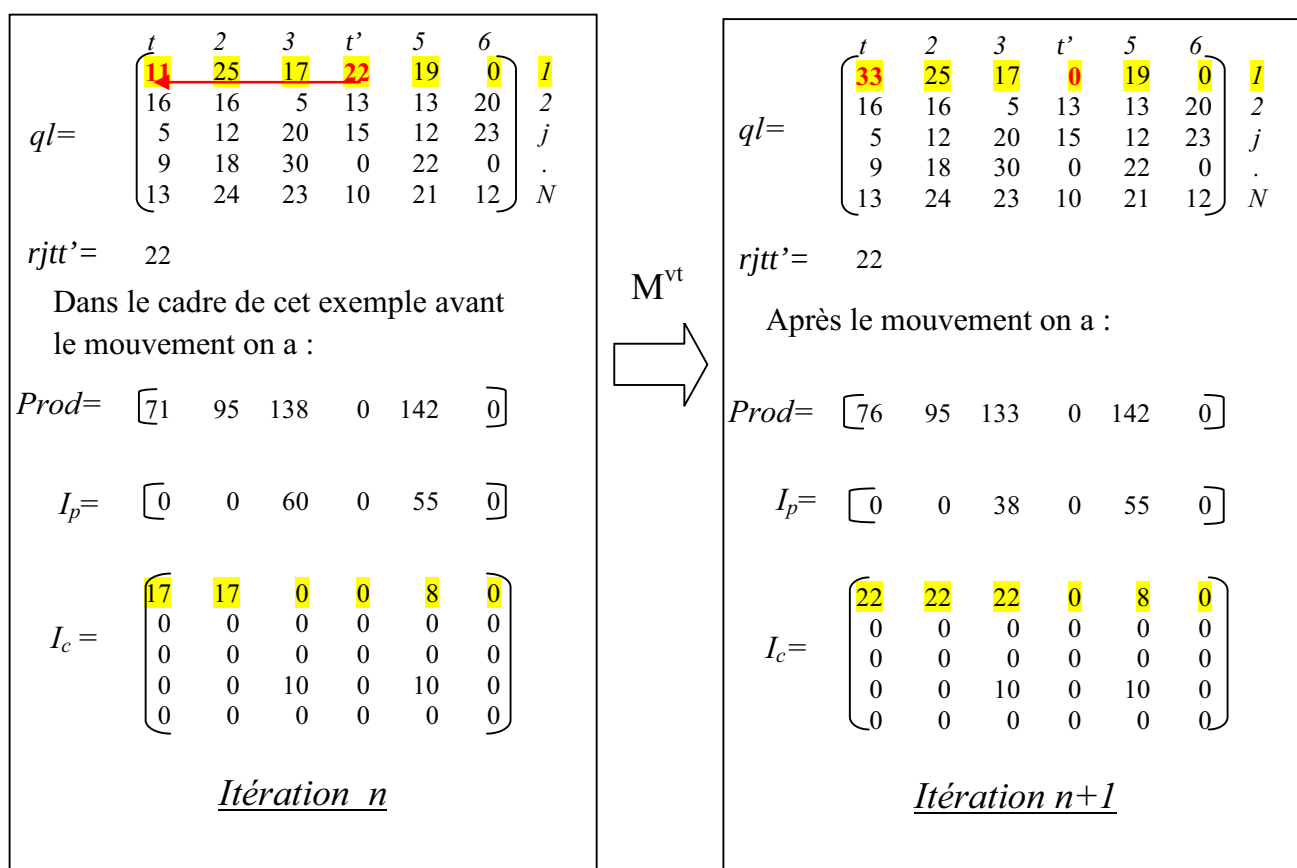


Figure III.2 : Exemple de *Backward move*

Nous pouvons aussi remarquer l'effet du mouvement élémentaire *Backward move* sur la production, sur le stock usine et sur les stocks détaillants, ce qui va influencer directement sur le coût total.

III.1.4 Algorithme général du problème

Nous présentons l'algorithme général du problème comme suit :

Algorithme 2 : Algorithme général du problème par la recherche Tabou

Début

Pour chaque instance **faire**

Génération des paramètres

Définition de la taille de la liste Tabou

Initialisation de la liste Tabou

Choix d'une solution initiale $ql=d$

Appel procédure (*Calcul_Cout_Total*)

bestcost :=cout_total

Tant que Critère d'arrêt n'est pas atteint **faire**

$ql\ 1:=ql$

Détermination de t_{alerte}

Pour $t=t_{alerte}+1$ à T **faire**

Pour $j=1$ à N **faire**

Pour $t'=t_{alerte}+1$ à T **faire**

Si $t'>t$ et $ql_{jt'}>0$ **alors**

faire un *backward move*

Appel procédure (*Calcul_Cout_Total*)

Comparer bestcost avec cout_total

Générer le voisinage

Fin si

Si $t'<t$ et $ql_{jt'}>0$ **alors**

faire un *forward move*

Appel procédure (*Calcul_Cout_Total*)

Comparer bestcost avec cout_total

Générer le voisinage

Fin si

Si $t'=t$ ou $ql_{jt'}\leq 0$ **alors**

'pas de mouvement'

Sin si

Fin pour

Fin pour

Fin pour

Choix du meilleur voisinage

Mise à jour de la liste Tabou

$bestcost := cout_total$

Fin tant que

Passer à l'instance suivante

Fin pour

Fin

III.1.4.1 Détermination de la période α_{jt}

α_{jt} : Identifie que le stock du détaillant j est plein jusqu'à la fin de la période t , alors nous ne pouvons plus livrer jusqu'à l'après période α_{jt} . L'algorithme suivant illustre le calcul de α .

Algorithme 3 : Calcule de α

Début

Entrée : T, N, d, W, I_{max}

Sortie : α

$\alpha_{jt} = T+1$ / initialisation de α /

Pour $j=1$ à N **faire**

Pour $t=1$ à $T-1$ **faire**

$S=0$

$t'=t+1$

Tant que $S \leq \min(I_{j}^{max}, W)$ **et** $t' \leq T-1$ **faire**

$S = S + d_{jt'}$

$t' = t' + 1$

Fin tant que

Si $S > \min(I_{j}^{max}, W)$ **alors**

$\alpha_{jt} = t'$

Fin si

Fin faire

Fin faire

Fin

III.1.4.2 Structure de la liste tabou

Initialement la liste Tabou (LT) est vide ($liste_Tabou = \emptyset$). On considère que LT est une matrice à deux colonnes. La première colonne est relative aux détaillants j et la seconde aux périodes réceptrices t . La gestion de la liste Tabou est de type **FIFO** (*First In First Out*).

Exemple : soit $[3,7]$ un élément de la liste Tabou qui représente les indices d'une quantité r'_{37} transférée pour le détaillant $j=3$ d'une période t' à la période réceptrice $t=7$. La figure III.4 suivante montre un exemple de la liste Tabou :

$$LT = \begin{pmatrix} j & t \\ 9 & 2 \\ 5 & 4 \\ 3 & 7 \\ . & . \\ . & . \\ . & . \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ . \\ . \\ TLT \end{matrix}$$

Exemple de la liste Tabou LT

Dans l'approche Tabou, que nous avons développé, le transfère (mouvement) d'une quantité r'_{37} de la période $t'=7$ à une période t pour le détaillant $j=3$ est un mouvement interdit sauf si le mouvement peut améliorer la solution.

III.1.4.4 Détermination de la taille de la liste tabou

La taille TLT de la Liste Tabou est à déterminer au préalable, elle varie avec les problèmes, mais c'est une donnée primordiale. En effet une liste trop petite peut conduire à un cycle (bouclage), alors qu'une liste trop grande peut interdire des transferts (mouvements) intéressants.

La taille de la liste Tabou TLT peut être définie de manière statique ou dynamique. Pour notre cas nous avons opté pour l'approche statique, et la détermination de la taille de la liste Tabou est calculée par la formule suivante :

$TLT = T \times (T-1) \times N \times \text{taux}$ où T est le nombre de périodes, N est le nombre de détaillants et $\text{taux} = 5\% / 10\% / 20\% / 30\% / 40\% / 50\%$. $T \times (T-1) \times N$ est le nombre maximal de mouvement (taille maximale du voisinage).

Exemple : pour $T=5$, $N=10$ et un $\text{taux}=20\%$ on trouve $TLT = 5 \times (5-1) \times 10 \times 20/100=40$ et $5 \times (5-1) \times 10=200$ mouvements possibles (taille du voisinage=200).

III.1.4.5 Présentation & choix de la solution initiale

Le choix d'une solution initiale, dans l'approche de recherche Tabou, est une étape essentielle, car c'est en fonction du choix que la solution peut converger vers l'optimum en un temps raisonnable.

Pour notre problème, nous avons essayé deux approches différentes :

1. On génère aléatoirement la matrice ql , cette approche n'a pas donné de bon résultats, en générale la solution diverge.
2. On considère pour la seconde approche que la quantité à livrer est égale à la demande ($ql=d$). les résultats obtenus dans ce cas sont meilleurs en qualité et en temps d'exécution.

III.1.4.6 Procédure de réparation

L'objectif de la réparation est de ne pas violer les contraintes de production, de stockage et la capacité de véhicule. Pour l'excès de production et le dépassement du nombre de véhicule, nous avons appliqué des pénalités respectives $p(s)$ et $v(s)$. Alors la solution est évaluée par une fonction de coût : $f(s) = c(s) + \gamma p(s) + \beta v(s)$, où γ et β sont des paramètres positifs définis au préalable. L'algorithme suivant décrit la procédure de réparation :

Algorithme 4 : Réparation de la solution

Début

Input : $T; J; P; x; \alpha$

Output: x

Pour $j = 1$ **à** N **faire**

$t_1 = 1$

$s = 0$

Tant que $t_1 < T$ and $s = 0$ **faire**

Si $\alpha_{jt1} = T + 1$ **alors**

$s = 1$

Fin si

$t_2 = \alpha_{jt1}$

Si $x_{jt2} = 1$ **alors**

$t_1 = \alpha_{jt2}$

Sinon

Tant que $t_2 > t_1$ and $x_{jt2} = 0$ **do**

$t_2 = t_2 - 1$

```

Si  $t_2 = t_1$  alors
     $k = \text{rand}(t_1 + 1 \text{ and } \alpha_{jtl})$ 
     $x_{jk} = 1$ 
     $t_1 = k$ 
Fin si
Si  $x_{jt2} = 1$  alors
     $t_1 = t_2$ 
Fin si
Fin tant que
Fin si
Fin tant que
Fin pour
Fin

```

III.1.5 Calcul des coûts

Le coût total (*cout_total*) engendré par la solution *ql* est donné par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Cout_total} = & \sum_{t=1}^T c^p \cdot y_t + \sum_{t=1}^T h^p \cdot P_t + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N h_j \cdot Ic_{jt} + \sum_{t=1}^T c^v \cdot z_t^v \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V c_j^c \cdot x_{jvt}
 \end{aligned}$$

La procédure *Calcul_Cout_Total*, nous permet le calcul du coût total (*cout_total*), pour une itération (n), Pour passer à l'itération (n+1) on fait un mouvement sur la matrice des quantités *ql* et chaque itération on compare le coût total (*cout_total*) trouvé avec le meilleur coût (bestcost). C'est ainsi que la solution s'améliore au fur à mesure, jusqu'à ce qu'on arrive au critère d'arrêt.

Nous rappelons que le coût total est un cumul des coûts : coût de production (*cout_production*), coût de stockage usine (*cout_stock_usine*), coût de stockage détaillants (*cout_stock_detaillants*), coût d'utilisation de véhicules (*cout_vehicules*) et coût de service (*cout_service*).

III.1.5.1 Coût de production

le coût de production est calculé par la formule suivante :

$$cout_production = c^p \times \sum_{t=1}^T prod_t$$

c^p : coût de setup de production.

$\sum_{t=1}^T prod$: la quantité produite est obtenue grâce à l'algorithme de *Florian & Klein [50]* qui définit le plan de production du problème *CCLSP*, en posant ql comme entrée (input) de l'algorithme, la production $prod$ est le résultat (output) à la fin de l'exécution de l'algorithme.

III.1.5.2 Coût de stockage

Le coût de stockage est composé du coût de stockage usine ($cout_stock_usine$) et le coût de stockage détaillants ($cout_stock_detaillant$).

- **Coût de stockage usine**

Le coût de stockage usine est calculé par la formule suivante :

$$cout_stock_usine = h^p \times \sum_{t=1}^T Ip_t$$

h^p : coût unitaire de stockage usine.

Nous proposons ci-dessous un algorithme permettant de calculer le stock usine Ip :

Algorithme 5 : calcul du stock usine Ip

Début

Initialization de Ip

Si $exces > 0$ **alors** / $exces$: excès de production /

$Ip_1 = prod_1 + exces - Ql_1$ / Ql_t : le cumul des ql à t /

Sinon

$Ip_1 = prod_1 - Ql_1$

Fin si

Pour $t=2$ à T **faire**

$Ip_t = Ip_{t-1} + prod_t - Ql_t$

Fin pour

Fin

- **Coût de stockage détaillant**

Le coût de stockage détaillants est calculé par la formule suivante :

$$cout_stock_detaillants = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N h_j \times Ic_{jt}$$

h_j : coût unitaire de stockage du détaillant j .

Nous proposons ci-dessous un algorithme permettant de calculer le stock détaillant Ic :

Algorithme 6 : calcul du stock usine Ic

Début

Initialisation de Ic

Pour $j = 1$ **à** N **faire**

$Ic_{j1} = ql_{j1} - d_{j1}$

Pour $t = 2$ **à** T **faire**

$Ic_{jt} = Ic_{jt-1} + ql_{jt} - d_{jt}$ / d_{jt} : la demande /

Fin pour

Fin pour

Fin

$$cout_stockage = cout_stock_usine + cout_stock_detaillants$$

III.1.5.3 Coût de distribution

Le coût de distribution est composé du coût de transport ($cout_transport$) et du coût de service ($cout_service$).

- **Coût de transport**

Le coût de transport est calculé par la formule suivante :

$$cout_transport = cveh \times \sum_{t=1}^T veh_utilise_t$$

$cveh$: coût fixe de transport

pour le calcul du coût de transport on a besoin du nombre de véhicules utilisés $veh_utilise$, à chaque période. Le nombre est calculé par l'algorithme *FFD (First Fit Decreasing)* (Algorithme 6). C'est un problème de *Bin Packing*, c'est ainsi qu'on détermine l'affectation des véhicules aux détaillants à chaque période.

Algorithme 7 : FFD (First Fit Decreasing) pour la période t **Début**

- 1- Trier les quantités à livrer ql dans un ordre arbitraire (ordre décroissant)
- 2- Placer la quantité courante dans le premier véhicule qui peut la contenir
- 3- Si pas assez d'espace libre, alors réserver un nouveau véhicule pour cette quantité
- 4- Garder les véhicules qui ne sont pas pleins dans l'espoir de remplir l'espace vide avec de nouvelles quantités
- 5- Si existent des quantités à charger dans les véhicules alors aller à 2

Fin

Ainsi nous calculons le nombre de véhicules utilisés à chaque période.

• **Coût de service**

Le coût de service est calculé par la formule suivante :

$$cout_service = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T c_j x_{jt}$$

c_j : coût de service détaillant j

Le calcul du coût de service est fonction de la matrice X de setup de livraison. La matrice X se calcule à partir de ql comme donnée par l'algorithme 7.

Algorithme 8 : Détermination de la matrice X à partir de ql **Début**

Initialisation de X / X initialisée à zéro /

Pour $j=1$ à N **faire**

Pour $t=1$ à T **faire**

Si $ql_{jt} > 0$ **alors**

$X_{jt} = 1$

Fin si

Fin pour

Fin pour

Fin

Le coût de distribution est donné par la formule suivante :

$$cout_distribution = cout_transport + cout_service$$

III.1.5.4 Calcul des pénalités**• Pénalité de production**

La pénalité de production est prise en considération en cas d'excès dans la production, elle est donnée par la formule suivante :

$$penal_production = \gamma \times cp \times excès$$

γ : paramètre positif, cp coût de production, $excès$: excès de production.

• Pénalité de véhicule

Si le nombre de véhicule (V) est dépassé, une pénalité de véhicule est prise en considération, elle est donnée par la formule suivante :

$$penal_vehicule = \beta \times cveh \times depas_veh$$

β : paramètre positif, $cveh$: coût fixe de transport, $depas_veh$: dépassement du nombre de véhicules.

Remarque : Pour notre cas et après des tests préliminaires nous avons pris :

$$\gamma=20000 \text{ et } \beta=3000$$

III.1.5.5 Coût total

Le coût total sans pénalités ou le coût ordinaire est la somme des coûts sans prendre en considération les pénalités, le coût total avec pénalités $cout_total_p$ est donné par la formule suivante :

$$cout_total_p = cout_total + penal_production + penal_vehicule$$

III.1.5.6 Calcul du Gap

Le gap est l'écart entre la solution trouvée et la solution optimale. Plus la valeur du Gap est proche de zéro plus la solution est proche de l'optimum, la formule suivante nous permet d'évaluer la solution trouvée :

$$Gap = \frac{cout_total_p - cout_optimal}{cout_total_p} \times 100$$

III.2 Méthode de recuit simulé

Il faut distinguer les méta-heuristiques qui ont la faculté de mémoriser des informations à mesure que leur recherche avance telle que la recherche Tabou, de celles qui fonctionnent sans mémoire, en aveugle, et qui peuvent revenir sur des solutions qu'elles ont déjà examinées on peut citer le recuit simulé.

Le recuit simulé était la seconde méta-heuristique que nous allons appliquer pour la résolution de notre problème.

Le choix de la méthode est justifié par les avantages qu'elle présente, elle offre des solutions de bonne qualité, tout en restant simple à programmer et à paramétrer. Elle offre aussi autant de souplesse d'emploi qu'un algorithme de recherche local classique, du fait qu'on peut inclure facilement des contraintes dans le corps du programme.

III.2.1 Principe de base

Le recuit simulé (simulated annealing) est souvent présenté comme la plus ancienne des méta-heuristiques, en tout cas, la première à mettre spécifiquement en œuvre une stratégie d'évitement des minimas locaux.

Le recuit simulé repose sur une analogie avec la métallurgie et le recuit des métaux : un métal refroidi trop vite présente de nombreux défauts qui correspondent à des excédents d'énergie interne. L'objectif du recuit est de minimiser ces excédents de façon à obtenir une configuration d'énergie minimale. Pour le réaliser, on réchauffe le métal ce qui a pour effet d'augmenter encore l'énergie interne, mais un réglage judicieux de la température de refroidissement permet de sortir de l'état initial et d'obtenir finalement une énergie interne plus faible. L'application de ce principe à l'optimisation est le suivant : Il est possible, contrairement à un algorithme de recherche locale, d'accepter une dégradation de la fonction objectif avec une certaine probabilité, sachant que cette dégradation pourra entraîner une

amélioration ultérieurement. On accepte d'augmenter l'énergie avec la probabilité $e^{-\Delta E/TT}$, Où TT est la température courante du système.

III.2.2 Notations spécifiques

- TT : la température,
- $g(TT)$: la fonction de température,

Le choix de la fonction de température est déterminant. Tout d'abord, il faut choisir la température initiale TT_0 , pour notre cas nous avons fait des tests sur plusieurs valeurs de la température TT_0 , et plusieurs fonctions de température, à la fin, nous avons trouvé que la valeur $TT_0=2500$ qui est une température relativement élevée et $g(TT)=0.01 \times TT$ donnent les meilleurs résultats.

- $\Delta f = f(s_{(i)}) - f(Mini)$: la différence entre la valeur du coût total (cout_total) calculé et la valeur du meilleur coût (bestcost) trouvé.
- p : nombre réel positif aléatoire compris entre 0 et 1 ($p \in [0,1]$).

III.2.3 Algorithme général

Le recuit simulé applique itérativement l'algorithme de Metropolis [41], pour engendrer une séquence de configurations qui tend vers l'équilibre thermodynamique. L'énergie du système est représentée par E et la température par TT . A partir d'une recherche locale quelconque pour un problème, on obtient une méthode de recuit comme suit :

Algorithme 9 : recuit simulé

Début

Générer la solution initiale $s_{(0)}$ et générer TT

$Mini = s_{(0)}$

Calcul de $f(Mini)$

Tant que $TT > 0$ **faire**

 Choix de $s_{(i)} \in V(s_{(i)})$

 Calcul de $f(s_{(i)})$

 Calcul de $\Delta f = f(s_{(i)}) - f(Mini)$

Si $\Delta f < 0$ **alors**

$Mini = s_{(i)}$

/ on accepte le voisin $s_{(i)}$ /

Sinon

 Générer un nombre réel aléatoire $p \in [0,1]$

```

Si  $p \leq e^{(-\Delta f/TT)}$  alors
    Mini =  $s_{(i)}$  / solution moins bonne, on accepte  $s_{(i)}$  /
Sinon
     $s_{(i)}$  est rejetée / on rejette le voisin  $s_{(i)}$  /
Finsi
Finsi
     $TT = g(TT)$  / avec g décroissante, par exemple  $T=0.9995 \times TT$  /
FinTq
Fin

```

III.2.4 Définition d'une solution

La matrice des quantités à livrer ql est le bloc clé des variables à partir de laquelle on peut déterminer les autres variables.

Nous définissons le voisinage et le mouvement de la même façon que dans la méthode de recherche Tabou, avec une seule exception, où on génère aléatoirement les indices : j (indice détaillant), t (indice période réceptrice) et t' (indice période donatrice).

III.2.5 Algorithme général du problème

Nous présentons l'algorithme général du problème comme suit :

Algorithme 10 : Algorithme général par le recuit simulé

Début

Pour chaque instance **faire**

Génération des paramètres

Définition la température TT

Choix d'une solution initiale $ql=d$

Appel procédure (*Calcul_Cout_Total*)

bestcost :=cout_total

Tant que $TT > 0$ **faire**

$ql_1 := ql$

Détermination de t_{alerte}

Générer j aléatoirement de 1 à N

Générer t aléatoirement de $t_{alerte}+1$ à T

Générer t' aléatoirement de $t_{alerte}+1$ à T

Si $t' > t$ **et** $ql_{jt'} > 0$ **alors**

Faire un *backward move*

Appel procédure (*Calcul_Cout_Total*)


```

    dd= cout_total- bestcost
    Recuit :=true
Fin si
Si  $t' < t$  et  $ql_{jt'} > 0$  alors
    Faire un forward move
    Appel procédure (Calcul_Cout_Total)
    dd= cout_total- bestcost
    Recuit :=true
Fin si
Si  $t' = t$  ou  $ql_{jt'} \leq 0$  alors
    'pas de mouvement'
    Recuit :=false
Sin si
Si recuit=true alors
    Si  $dd < 0$  alors
        bestcost :=cout_total / accepter le mouvement /
    Sinon
        Générer  $P$  aléatoire  $[0,1]$ 
        Si  $p \leq e^{(-dd/TT)}$  alors
            bestcost :=cout_total / accepter le mouvement /
        Sinon
             $ql = ql1$  / rejeter le mouvement /
        Fin si
    Fin si
Fin si
     $TT = 0.01 \times TT$ 
Fin tant que
    Passer à l'instance suivante
Fin pour
Fin

```

III.2.6 Présentation & choix de la solution initiale

Le choix de la solution initiale est le même que dans la méthode de recherche Tabou, nous avons choisi $ql_0 = d$ (initialement les quantités à livrer prennent la valeur de la demande).

III.2.7 Calcul des coûts

Le coût total (*cout_total*) engendré par la solution *ql* est donné par la formule suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Cout_total} = & \sum_{t=1}^T c^p \cdot y_t + \sum_{t=1}^T h^p \cdot P_t + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N h_j \cdot Ic_{jt} + \sum_{t=1}^T c^v \cdot z_t^v \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V c^c_j \cdot x_{jvt}
 \end{aligned}$$

Pour calculer le coût total nous procédons de la même manière que dans la méthode de recherche Tabou.

III.3 Hybridation de la recherche Tabou avec le recuit simulé

Afin d'optimiser la solution, nous avons proposé un algorithme de résolution basé sur l'hybridation entre deux méta-heuristiques.

-  prendre, toujours, la demande *d* comme solution initiale,
-  exécuter l'algorithme de recuit simulé pendant 50 secondes,
-  prendre la solution *ql* trouvée par le recuit simulé comme une solution initiale pour la recherche Tabou,
-  exécuter l'algorithme de recherche Tabou, pendant 300 secondes, pour la variante *TLT=50%* .

Les résultats de simulation, que nous allons voir dans le quatrième chapitre, montrent clairement l'efficacité de l'approche adoptée dans la résolution du problème.

Conclusion

Nous avons présenté le principe de base et l'algorithme général des deux approches (la recherche tabou & le recuit simulé) et leur application sur le problème. Nous avons également présenté la procédure de calcul de la solution ainsi que les coûts engendrés pour les deux approches.

Afin d'améliorer la solution trouvée nous avons conçu un algorithme hybride en nous basant sur les caractéristiques intrinsèques des deux méthodes utilisées.

Dans le quatrième chapitre nous allons présenter les résultats expérimentaux de la recherche Tabou, sous forme de tableaux annexes et graphes, interpréter et analyser les résultats, montrer l'effet de : variation de la taille de la liste Tabou et de variation des instances sur la qualité de la solution, faire une comparaison graphique entre les résultats obtenus par la méthode de recherche Tabou et ceux obtenus par la méthode de recuit simulé et enfin conclure le chapitre par la présentation et l'interprétation des résultats de l'approche hybride.

Chapitre IV

Validation de l'approche

Introduction

Pour valider l'approche proposée à savoir l'utilisation de la recherche Tabou et du recuit simulé et de leur hybridation pour résoudre un problème d'intégration production-stockage-distribution est présentée dans ce chapitre.

IV.1 Description des instances

Afin d'implémenter l'algorithme, nous avons utilisé le langage MATLAB version 9 (2011), sur une machine à processeur Intel® Core™ i5-3337U CPU 1.80GHz 1.80GHz, 4 Go de RAM /Windows 8 professionnel.

Les paramètres sont générés aléatoirement comme suit : $d_{jt} = U[5,25]$, $h_j^c = U[1,5]$, $I_j^{max} = dmoy \times U[2,6]$ / $dmoy$ = la demande moyenne , $C_j^c = U[100,500]$, $h^p = 1$, $c^p = 2000$, $c^v = 1000$.

La taille de la liste Tabou (TLT) est calculée par la formule donnée précédemment :

$$TLT = T \times (T-1) \times N \times Taux/100 \quad \text{où } Taux = 0/5/10/20/30/40/50, \quad T \times (T-1) \times N$$

Nous avons choisi une solution initiale $q^l = d$ (quantité à livrer = demande). L'appel de la procédure (*Calcul_Cout_Total*) nous permet de calculer les autres variables.

Pour les instances suivantes :

N prend les valeurs : 5,10,15,20 ;	}	Ce qui fait 36 instances.
V prend les valeurs : 2,3,4 ;		
T prend les valeurs : 3,6,9.		

Les différentes valeurs du *Gap* obtenu par les simulations au bout de 50, 100, 150, 200, 250 et 300 secondes, pour les 7 variantes du taux de la taille de liste Tabou, sont présentées en détail dans les tableaux 1,2,3,4,5,6,7, et la récapitulation des résultats dans le tableaux 8 (voir annexes).

Remarque : La colonne *Val. Opt.* représente la valeur optimale du coût calculée par *GAMS-CPLEX* et 50 Sec. signifie 50 secondes d'exécution..etc.

IV.2 Analyse des résultats fournis par la recherche Tabou

IV.2.1 Effet de variation de TLT sur le Gap moyen

Après une (01) seconde d'exécution de l'algorithme, nous avons constaté que la valeur moyenne du Gap est constante ($Gap=30$) et ce pour les sept (07) variantes de TLT .

La variation du Gap moyen en fonction du temps d'exécution pour différentes variantes de TLT (tableau 8 annexe) est présentée sur la figure IV.1.

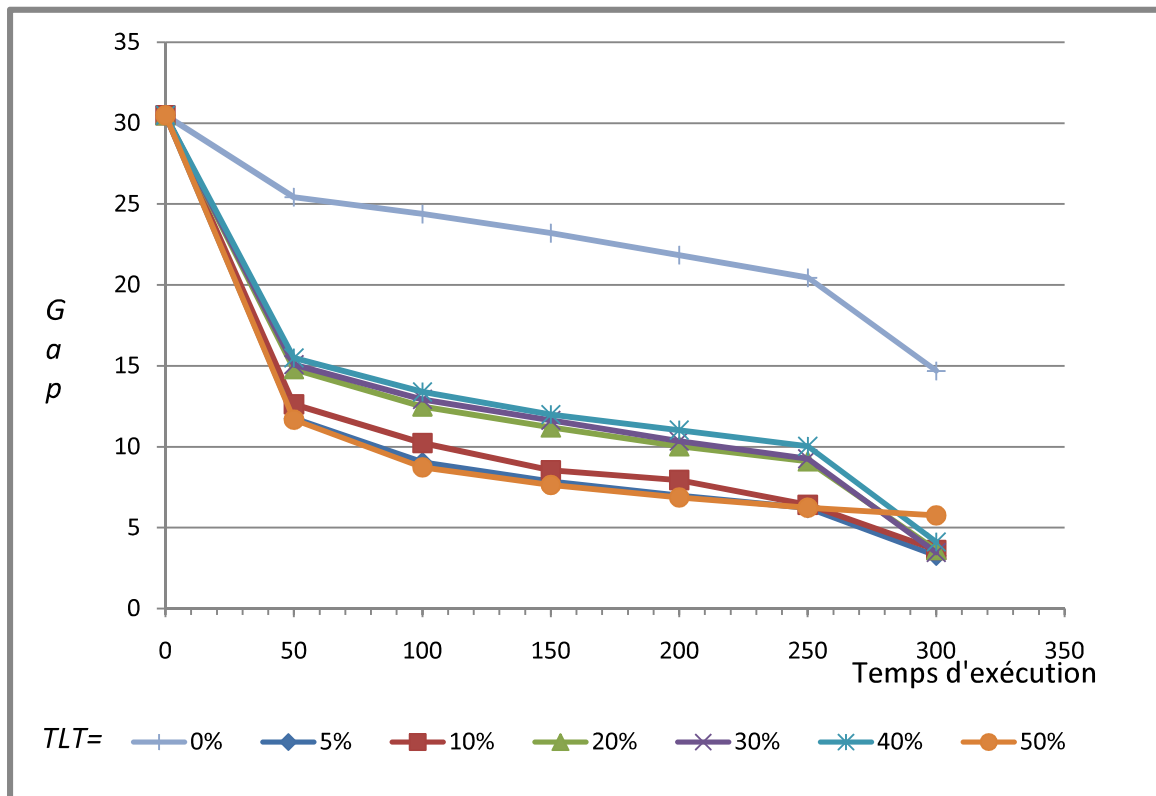


Figure IV.1 : Effet de variation de TLT sur le Gap moyen

IV.2.2 Interprétation et analyse des résultats

A partir des variations du Gap moyen en fonction du temps d'exécution pour les sept variantes de la liste Tabou on peut dire :

- $TLT=0\%$ signifie que l'approche Tabou n'est pas appliquée (pas de liste Tabou). On remarque pour cette variante que la solution diverge et le Gap est très important.
- La valeur du Gap moyen à 1 seconde d'exécution est le même pour toutes les variantes de TLT . (Gap moyen=30).

- Entre 50 et 250 secondes, les trois variantes : $TLT=5\%$, $TLT=10\%$ et $TLT=50\%$ donnent les meilleurs Gap.
- Entre 251 et 300 secondes, pour la variante : $TLT=50\%$ on remarque qu'il n'y a pas d'amélioration significative pour la solution.
- Entre 251 et 300 secondes, toutes les variantes convergent, à l'exception de celles de $TLT=50\%$ et bien sûr de $TLT=0\%$.

On peut conclure que la taille de la liste Tabou TLT variant entre 5% et 10% donne le meilleur *Gap moyen* pour toutes les instances.

IV.2.3 Effet de variation du nombre de détaillants N sur le Gap moyen

La présentation graphique de l'évolution du *Gap moyen* en fonction de TLT pour différentes valeurs du nombre de détaillants N (tableau 16 annexe) est donnée par la figure IV.2

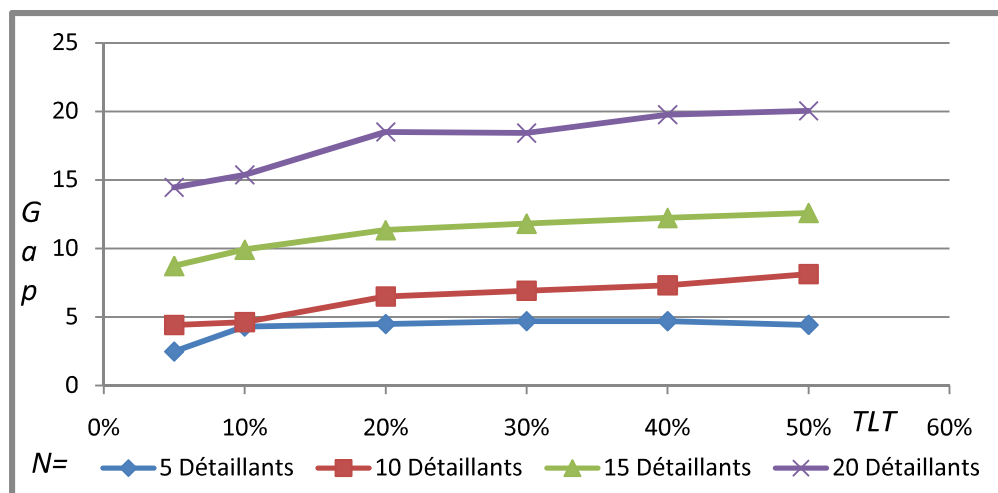
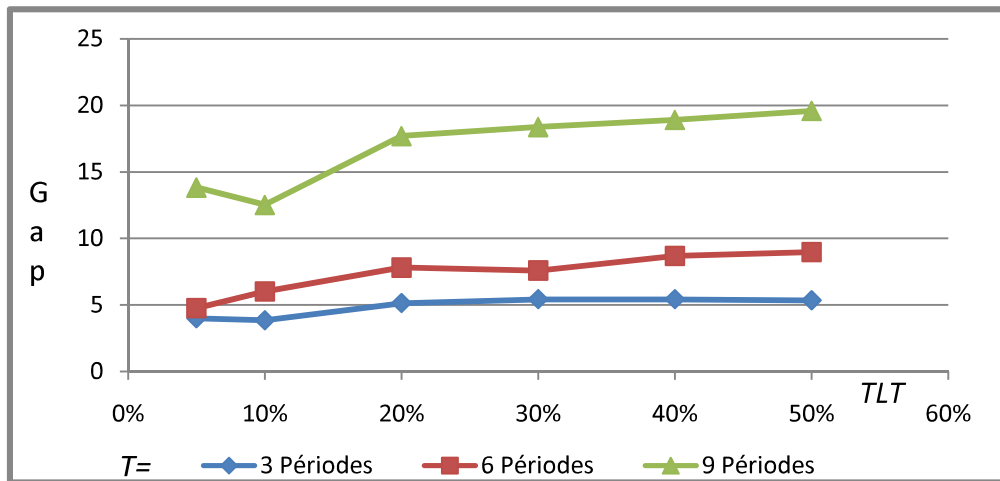


Figure IV.2 : Effet de variation de N sur le *Gap moyen*

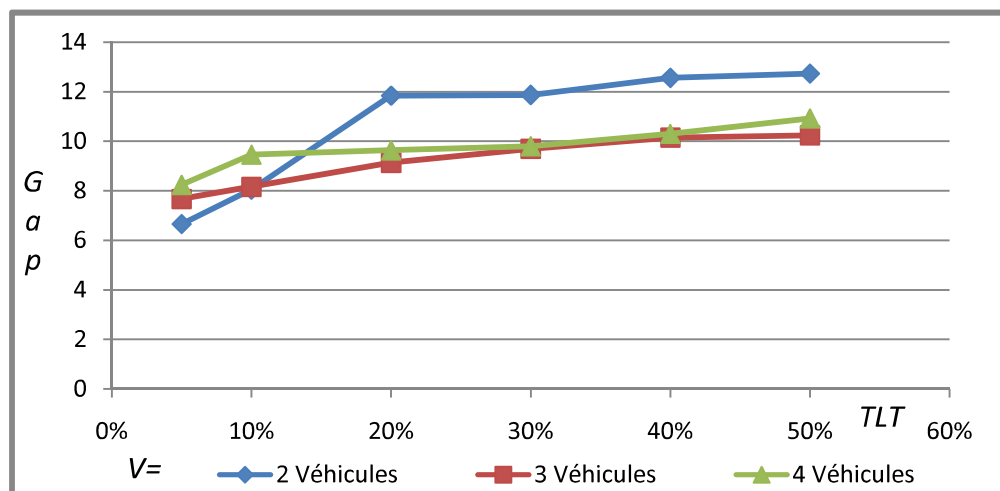
IV.2.4 Effet de variation du nombre de périodes T sur le Gap moyen

Nous présentons sur la figure IV.3 les variations du *Gap moyen* en fonction de TLT mais cette fois pour différentes périodes T (tableau 16 annexe)

Figure IV.3 : Effet de variation de T sur le *Gap moyen*

IV.2.5 Effet de variation du nombre de véhicules V sur le *Gap moyen*

D'une manière analogue nous représentons sur la figure IV.4 les variations du *Gap moyen* en fonction de la *TLT* mais pour différentes valeurs du nombre de véhicules V (tableau 16 annexe)

Figure IV.4 : Effet de variation de V sur le *Gap moyen*

IV.2.6 Interprétation et analyse des résultats

Nous pouvons constater à partir des figures IV.2,3,4 que la variation de N et T a un grand effet sur le *Gap moyen*, en effet plus les valeurs de N ou T augmentent plus le *Gap moyen* augmente et inversement. Par contre la variation du *gap moyen* est inversement proportionnel au nombre de Véhicules V , autrement dit plus le nombre V augmente plus le *gap moyen* diminue.

IV.3 Résultats fournis par le recuit simulé

L'application de la méthode de recuit simulé sur les 36 instances, déjà utilisées avec la recherche tabou, pour le calcul du *Gap moyen* a donné les résultats consignés sur le Tableau 17 annexe. La représentation graphique de ces résultats est donnée par la figure IV.5.

IV.3.1 Comparaison des résultats donnés par recherche Tabou et recuit simulé

Dans l'objectif de déterminer laquelle des deux méta-heuristiques (la recherche tabou et le recuit simulé) est la mieux adaptée à notre problème, nous avons comparé les valeurs du *Gap moyen* en fonction du temps d'exécution obtenu pour chacune des deux méthodes (figure IV.5).

Remarque : le *Gap moyen* pour la recherche Tabou correspond à la moyenne des *Gap* des sept variantes de la *TLT* (courbe Tabou Moyen sur la figure IV.5).

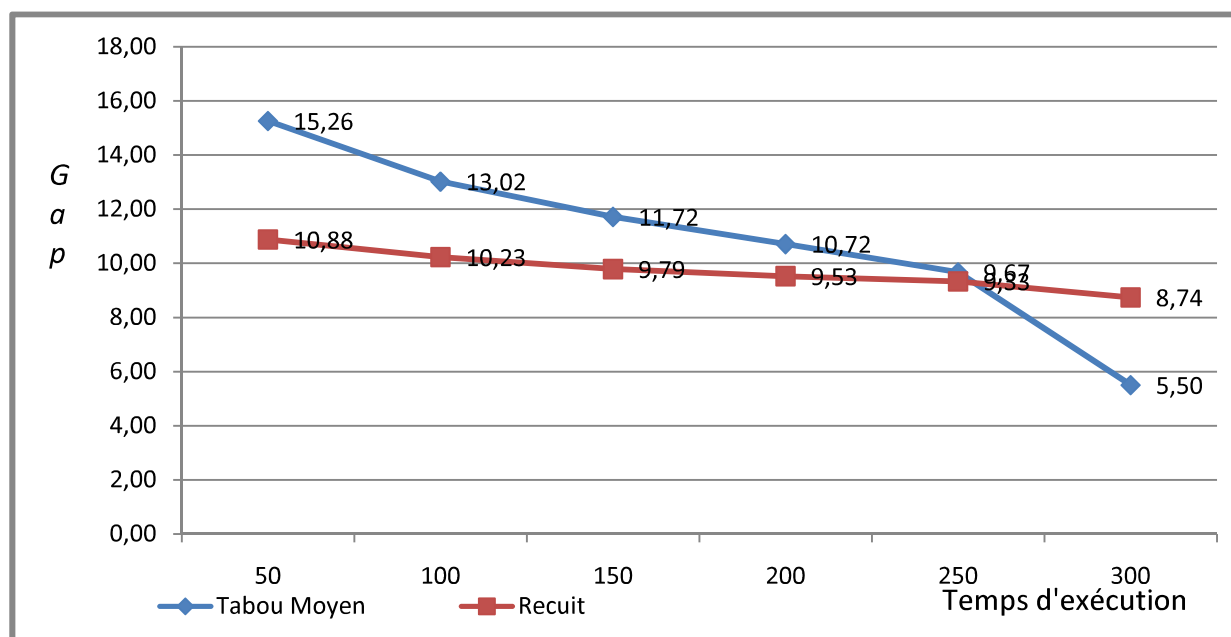


Figure IV.5 : Comparaison entre Tabou et Recuit

IV.3.2 Interprétation et analyse des résultats

Nous pouvons constater clairement que l'approche de recherche Tabou fait un mauvais démarrage, avec un *gap moyen* de l'ordre de 30, mais après 250 secondes d'exécution elle converge très vite, et son *Gap moyen* atteint la valeur de 5, alors que l'approche de recuit simulé démarre avec un *Gap moyen* acceptable, qui stagne avec le temps.

IV.4 Résultats fournis par l'approche hybride

Vu l'analyse faite à partir de la comparaison des deux méthodes, nous avons eu l'idée d'une hybridation entre les deux méthodes.

IV.4.1 Comparaison entre recherche Tabou, recuit simulé et l'hybridation

L'approche hybride que nous avons adoptée consiste à exécuter séquentiellement les deux approches de telle manière que le résultat de l'algorithme du recuit simulé serve de solution initiale à celui de la recherche Tabou (voir paragraphe III.3).

La Figure IV.6 compare la convergence de la solution fournie par la recherche Tabou pour TLT=50% (tableau 7 annexe) avec celle fournie par le recuit simulé (tableau 17 annexe) et celle fournie par hybridation des deux méthodes (tableau 18 annexe), en fonction du temps d'exécution.

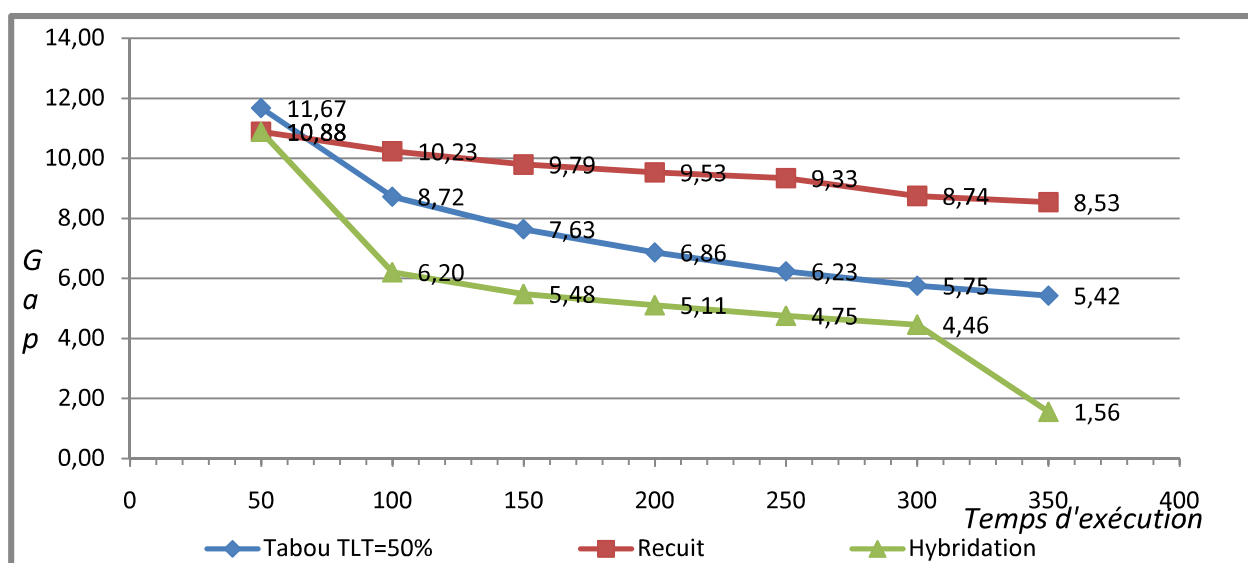


Figure IV.6 : Comparaison Tabou-Recuit-Hybride

IV.4.2 Interprétation et analyse des résultats

Nous pouvons constater clairement l'efficacité de l'approche hybride, en matière de qualité de la solution, ce qui va renforcer beaucoup plus notre contribution.

Conclusion

Le temps d'exécution (300 secondes) choisi comme critère d'arrêt est largement suffisant pour les petites instances.

Le *Gap moyen* est plus ou moins grand et pratiquement le même pour les sept variantes, ce qui met en cause le choix du temps d'exécution comme critère d'arrêt pour tous les tests.

Après les tests faits sur sept variantes de la taille de la liste Tabou (*TLT*), nous constatons que :

Plus *TLT* est petite (5% du voisinage) plus le nombre de mouvements acceptés est grand, ce qui explique le phénomène de bouclage dans la même zone de recherche.

Plus *TLT* est grande (50% du voisinage) plus le nombre de mouvements acceptés est petit et l'espace de recherche devient étroit.

Nous avons appliqué la méthode de recherche Tabou, pour résoudre notre problème sur des instances moyennes avec sept variantes de la taille de la liste Tabou, nous constatons que :

✚ les résultats obtenus montrent que l'approche est efficace pour résoudre les problèmes d'intégration.

Nous avons appliqué la méthode de recuit simulé, pour résoudre notre problème sur des instances, nous constatons que :

✚ les résultats obtenus montrent que l'approche est moins efficace pour résoudre le problème.

Les résultats obtenus par l'hybridation des deux approches sont de très bonne qualité. Donc notre approche peut être améliorée pour diminuer l'erreur et assurer un compromis entre la qualité de la solution retenue et le temps nécessaire de calcul. De plus on peut tester le modèle sur des instances larges et comparer les résultats obtenus avec d'autres approches de résolution.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à utiliser deux heuristiques basées sur la Recherche Tabou et le recuit simulé pour résoudre le problème d'intégration production-stockage-distribution. Le problème étudié est une structure particulière d'une chaîne logistique, où le modèle est composé d'un fournisseur qui assure la production d'un seul type de produit, expédié par une flotte de véhicules homogènes à un ensemble de détaillants situés dans la même région géographique.

Pour mieux permettre au lecteur de suivre notre travail, nous l'avons débuté par un bref exposé sur les notions de base de la chaîne logistique, de l'intégration et de la présentation des méthodes d'optimisation.

Ensuite nous pouvons dire que notre travail se scinde en trois parties :

Dans un premier temps, nous avons développé un algorithme basé sur la recherche Tabou, afin de résoudre le problème. Nous avons testé l'algorithme sur plusieurs instances de grandeurs moyennes et plusieurs variantes statiques de la taille de la liste Tabou. Les tests ont montré que la variante où la taille de la liste Tabou n'excède pas les 10% du voisinage donne les meilleurs résultats.

Ensuite et pour la même raison, nous avons développé un deuxième algorithme basé sur l'approche de recuit simulé. Les tests sur les mêmes instances et les mêmes paramètres ont montré que cette approche donne un bon signe de convergence au début et par la suite elle diverge.

Enfin, nous avons développé un nouvel algorithme d'hybridation de l'approche de recherche Tabou et l'approche de recuit simulé. L'approche hybride consiste à utiliser les résultats obtenus par l'algorithme de recuit simulé comme des données pour lancer l'algorithme de recherche Tabou. Les tests ont montré l'efficacité de l'hybridation, et les résultats sont très encourageants.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour notre travail.

Nous envisageons en premier lieu d'améliorer les performances de notre algorithme d'hybridation, en l'appliquant sur des modèles de chaînes logistiques à multi-produits ou multi-producteurs.

Nous envisageons aussi de tester l'hybridation sur des instances plus larges et également tester une hybridation avec d'autres méta-heuristiques.

Références bibliographiques

- [1] **S.Tayur, R.Ganeshan, M.Magazine** : Quantitative models for supply chain management. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] **M.R.Akbari Jokai** : L'évolution du concept de logistique. Revue Française de Gestion Industrielle. Vol 21(3), p 5-22 (2002).
- [3] **C.Poirier et S.E.Reiter** : La supply chain. Édition Dunod (2001).
- [4] **S.E.Merzouk** : Problème de dimensionnement de lots et de livraisons, Application au cas d'une chaîne logistique. Thèse de doctorat de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté. Soutenue le 08 Novembre 2007.
- [5] **D.Simchi-Levi, P.Kaminsky et E.Simchi-Levi** : Designing and managing the supply chain, Concepts, strategies and case studies. Irwin McGraw-Hill (1999).
- [6] **E.Despontin-Monsarrat** : Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises dans le cadre de la production à la commande. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III - Paul Sabatier. Soutenue le 10 décembre 2004.
- [7] **V.Giard** : Gestion de la production et des flux. édition ECONOMICA, Paris, ISBN 2717844988, 9782717844986, 3ème édition (2003).
- [8] **J.P.Breuzard et D.Fromentin** : Gestion pratique de la chaîne logistique, une vision globale des outils de management et de progrès. Les Édition démos (2004)
- [9] **I.Elmahi** : Modélisation et commande des systèmes de chaîne logistiques par les réseaux de Petri et l'algèbre des dioïdes. Thèse de doctorat de l'université de technologie de Belfort Montbéliard et de l'Université de Franche comté (2006).
- [10] **N.Brahimi, S.Dauzere-Peres, N.M.Najid et A.Nordli** : Etat de l'art sur les problèmes de dimensionnement des lots avec contraintes de capacité . 4ème conférence Francophone de MODélisation et SIMulation MOSIM'03.Toulouse (France). 23-25 avril 2003.
- [11] **J.Boissière** : Gestion des stocks dans une chaîne logistique de distribution en coordination avec la production. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble le 06 décembre 2004.
- [12] **G.W.DePuy, R.J.Moraga et G.E.Whitehouse** : Meta-RaPS. A simple and effective approach for solving the traveling salesman problem. Transportation Research Part E. Vol. 41, pp 115-130 (2005).

- [13] **N.Azi, M.Gendreau et J.Y.Potvin** : An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes. *European Journal of Operational Research*. Vol. 178, pp 755-766 (2007).
- [14] **P.Toth, D.Vigo** : Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*. Vol. 123, pp 487-512 (2002).
- [15] **B.I.Kim, S.Kim et S.Sahoo** : Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. Vol. 33, pp 3624-3642 (2006).
- [16] **F.Médioni** : Méthodes d'optimisation pour l'évitement aérien système centralisés, systèmes embarqués. Thèse de Doctorat, de l'école polytechnique de Grenoble. France. (1998).
- [17] **J.Hahmt et C.A.Yano** : The economics lot delivery scheduling problem. The single item case *Int. Journal of production Economics*. Vol 28, pp 235-252 (1992).
- [18] **L.D.Burns, R.W.Hall, D.E.Blumenfeld et C.F.Daganzo** : Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. *Operations Research*. Vol 33(3), pp 469-490, (1985).
- [19] **S.J.Mason, P.M.Ribera, J.A.Farris et R.G.Kirk** : Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. *Transportation Research, Part E* Vol 39, pp 141 - 159 (2003).
- [20] **A.M.Sarmiento et R.Nagi** : Un examen de l'analyse intégrée des systèmes de distribution de production. *IIE Transactions*. Vol 31, pp 1061-1074, (1999).
- [21] **P.Chandra et M.L.Fisher** : Coordination of Production and Distribution Planning. *European Journal of Operational Research*. Vol. 72, pp 503-517 (1994).
- [22] **P.Chandra** : Un modèle de distribution dynamique aux exigences de réapprovisionnement des entrepôts et clients. *European Journal of Operational Research*. Vol 44, pp 681-692 (1993).
- [23] **F.Fumero et C.Vercellis** : Développement de la production, des stocks et des calendriers de distribution. *Transportation Science* Vol 33, pp 330-340 (1999).
- [24] **V.A.Armentano , A.L.Shiguemoto et A.Løkketangen** : Recherche Taboue avec le chemin de re-lie pour un problème de production-distribution intégrée. *Ordinateurs et recherche opérationnelle*. Vol 38(8), pp 1199-1209, Août 2011.
- [25] **E.Arkin, D.Joneja et R.Roundy** : Computational complexity of uncapacitated multi-echelon production planning problems. *Operations Research Letters*. Vol 8(2), pp 61-66, (1989).
- [26] **M.Basseur** : Conception d'algorithmes coopératifs pour l'optimisation multi-objectif.

- Application aux problèmes d'ordonnancement de type Flow-shop. Thèse de doctorat de l'université Science et Technique de Lille. Soutenue le 21 juin 2005.
- [27] **N.Simons** : Optimisation des Architectures Numériques. Formulation du "Design Flow" sous forme d'un problème d'aide à la décision Multicritères. Thèse de maîtrise, Université Libre de Bruxelles, (2006).
- [28] **J.Dréo, A.Pétrowski, P.Siarry et E.Taillard** : Méta-heuristiques pour l'optimisation difficile. Edition Eyrolles, (2003).
- [29] **L. Dupont** : La gestion industrielle. Edition HERMES, (1998).
- [30] **V.Giard** : Gestion de la production et des flux. Edition ECONOMICA, Paris, 3ème édition (2003).
- [31] **P.Vallin** : La logistique. Modèles et méthodes du pilotage des flux. Edition ECONOMICA, ISBN 2-7178-4681-6, 3ème édition (2003).
- [32] **M.Boudia, M.A.Ould Louly, et C.Prins** : A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. Computers & Operations Research. Vol 34(11), pp 3402–3419, (2007).
- [33] **M.Boudia et C.Prins** : A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem. European Journal of Operational Research. Vol 195(3), pp 703–715, (2009).
- [34] **J.F.Bard et N.Nananukul** : A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. Computers & Operations Research, Vol 37(12), pp 2202–2217, (2010).
- [35] **J.F.Bard et N.Nananukul** : The integrated production-inventory-distribution-routing problem. Journal of Scheduling, Vol 12(3), pp 257–280, (2009).
- [36] **N.Brahimi et T.Aouam** : Integrated and decoupled models for the production routing problem with backlogging. Second International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing, Batna. Algeria, (2012).
- [37] **Y.Adulyasak, J.F.Cordeau, et J.Jans** : Formulations and branch-and-cut algorithms for multi-vehicle production and inventory routing problems. INFORMS Journal on Computing. Vol 26(1) pp 103-120, (2014).
- [38] **N.Absi, C.Archetti, S.Dauzère-Pérès, et D.Feillet** : An iterative two-phase heuristic approach for the production routing problem. Transportation Science. Vol 49(4), pp 784-795, (2014).
- [39] **J.Dréo et P.Siarry** : Méta-heuristiques pour l'optimisation et auto-organisation dans les systèmes biologiques. Techniques et Sciences Informatiques. Vol 25 pp 221-240, (2006).

- [40] **C.Duhamel** : Un Cadre Formel pour les Méthodes par Amélioration Itérative. Application à deux problèmes d'Optimisation dans les Réseaux. Thèse de Doctorat de l'université de Clermont-Ferrand 2. France (2001).
- [41] **N.Metropolis, , A.Rosenbluth, M.Rosenbluth, A.Teller et E.Teller** : Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. Journal of Chemical Physics. Vol 21(6) pp 1087-1092, (1953).
- [42] **E.Aarts, J.Korst, et P.Van Laarhoven** : Job shop scheduling by Simulated Annealing. Operations Research. Vol 40(1), pp 91-120, (1997).
- [43] **E.Taillard** : Introduction aux méta-heuristiques. Cours 3eme cycle informatique, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Cantone De Vaud. Genève, (2007).
- [44] **S.Amédée et R.F.Gérard** : Les Algorithmes génétiques. Thèse de fin d'année, Université Nice Sophia Antipolis, (2004).
- [45] **S.Kirkpatrick, C.Gelatt et M.Vecchi** : Optimization by simulated annealing. JSTOR, (1983).
- [46] **O.Taichi** : Toyota Production System, Beyond Large-Scale Production. Productivity Press, ISBN 0-915299-14-3, (1988).
- [47] **P.Baranger** : Gestion de la production. Vuibert Entreprise, (1987)
- [48] **J.Noll, J.Kélada et M.O.Diorio** : La gestion des opérations et de la production. 2^{ème} édition, Boucherville, Gaëtan Morin éditeur, (1994).
- [49] **R.L.Anderson et J.S.Dunkelberg** : Managing Small Businesses. Minneapolis/St. Paul, West Publishing Compagny, (1993).
- [50] **M.Florian and M.Klein** : Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints. Management Science. Vol 18(1), pp 12–20, (1971).
- [51] **A.Senoussi, N.K.Mouss, B.Penz, N.Brahimi et S.D.Pérès** : Modeling and solving a one-supplier multi-vehicle production-inventory-distribution problem with clustered retailers. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. DOI 10.1007/s00170-015-7966-5.

Annexes

Annexes

N°	TLT	Instances			Val. Opt.	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout < bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	00	5	2	3	10021	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	13,13	4	24
2	00	10	2	3	12226	15,18	13,40	11,77	10,47	10,47	10,47	7	34
3	00	15	2	3	14647	22,91	21,57	20,29	20,29	20,29	20,29	8	36
4	00	20	2	3	17897	30,83	29,68	28,47	27,27	26,29	25,32	9	34
5	00	5	2	6	18446	18,54	17,38	16,22	15,00	13,80	12,42	11	32
6	00	10	2	6	22660	24,84	23,92	23,06	22,20	21,34	20,45	10	29
7	00	15	2	6	28015	29,20	28,50	27,81	27,11	26,42	25,71	10	29
8	00	20	2	6	30155	34,41	33,79	33,16	32,51	31,91	0,00	10	29
9	00	5	2	9	23549	23,40	22,30	21,19	20,05	19,04	18,00	10	30
10	00	10	2	9	33840	30,96	30,31	29,65	28,99	28,32	27,64	10	29
11	00	15	2	9	39801	31,41	30,87	30,35	29,81	29,34	28,86	11	30
12	00	20	2	9	47852	38,12	37,74	37,36	36,98	36,60	0,00	9	28
13	00	5	3	3	11893	9,49	6,67	3,58	2,55	2,55	2,55	7	35
14	00	10	3	3	14188	13,53	11,76	9,93	8,48	7,32	7,16	11	37
15	00	15	3	3	16647	24,13	22,85	17,72	16,25	14,93	14,06	12	42
16	00	20	3	3	19897	31,09	30,04	28,99	27,93	26,83	25,80	10	34
17	00	5	3	6	21120	14,96	13,86	12,70	11,55	10,40	9,48	11	38
18	00	10	3	6	25069	26,65	25,89	23,17	22,37	21,56	20,76	10	38
19	00	15	3	6	30530	31,52	30,87	30,23	29,59	0,00	0,00	8	21
20	00	20	3	6	32959	36,58	36,05	34,27	33,70	33,12	32,57	11	30
21	00	5	3	9	27377	18,84	17,79	16,85	15,91	14,93	13,92	11	34
22	00	10	3	9	37485	33,14	32,56	31,96	30,37	29,76	29,16	10	29
23	00	15	3	9	43991	34,33	33,87	33,44	33,00	32,60	0,00	10	29
24	00	20	3	9	52041	39,72	39,39	39,06	38,73	38,39	38,05	10	29
25	00	5	4	3	13571	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40	4	40
26	00	10	4	3	15226	12,82	11,34	9,98	8,85	8,85	8,85	7	34
27	00	15	4	3	17653	19,75	18,55	17,42	17,42	17,42	17,42	8	38
28	00	20	4	3	20897	27,62	26,55	25,42	24,30	23,46	22,65	10	33
29	00	5	4	6	23450	21,12	17,33	15,18	14,14	13,13	12,24	9	23
30	00	10	4	6	27198	22,96	21,96	21,14	0,00	0,00	0,00	8	18
31	00	15	4	6	33172	27,21	26,58	25,97	25,35	24,73	24,11	10	29
32	00	20	4	6	35481	31,74	31,16	30,58	29,99	29,45	0,00	10	29
33	00	5	4	9	30825	24,81	22,09	19,18	17,41	16,43	15,44	8	24
34	00	10	4	9	41345	28,73	28,17	27,61	27,04	26,48	25,91	10	29
35	00	15	4	9	48463	30,25	28,83	27,79	27,28	26,79	0,00	8	21
36	00	20	4	9	56188	34,92	34,56	34,20	33,85	33,49	0,00	9	28
Sommés												331,00	1106,00
Moyennes (sur 36 instances)						25,42	24,38	23,20	21,84	20,44	14,69	9,19	30,72

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 1 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap moyen* (*TLT* = 0 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val. Opt.	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout < bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	2	5	2	3	10021	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	12335	14
2	3	10	2	3	12226	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16	5904
3	5	15	2	3	14647	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18	3518
4	6	20	2	3	17897	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28	2614
5	8	5	2	6	18446	3,56	1,64	0,85	0,05	0,05	0,05	890	1523
6	15	10	2	6	22660	3,44	3,04	2,72	2,72	2,72	2,72	41	1005
7	23	15	2	6	28015	2,12	1,94	1,81	1,80	1,80	1,67	56	540
8	30	20	2	6	30155	21,60	13,66	12,97	12,86	12,77	11,88	54	264
9	18	5	2	9	23549	7,60	5,83	5,34	5,20	5,20	5,20	30	475
10	36	10	2	9	33840	20,05	6,90	5,67	3,90	3,90	3,90	56	243
11	54	15	2	9	39801	28,17	23,29	19,47	13,24	7,94	5,99	71	92
12	72	20	2	9	47852	36,39	33,68	30,81	27,98	25,03	0,00	49	49
13	2	5	3	3	11893	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1181	1503
14	3	10	3	3	14188	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	16	5633
15	5	15	3	3	16647	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	21	2589
16	6	20	3	3	19897	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	25	1900
17	8	5	3	6	21120	2,25	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	23	2026
18	15	10	3	6	25069	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,35	29	571
19	23	15	3	6	30530	10,35	8,46	6,78	6,32	6,32	5,65	56	350
20	30	20	3	6	32959	24,02	11,96	7,09	5,43	4,03	2,60	81	229
21	18	5	3	9	27377	5,02	4,60	4,39	4,00	3,71	3,71	25	464
22	36	10	3	9	37485	20,81	11,13	7,67	6,91	5,79	0,00	52	168
23	54	15	3	9	43991	30,43	22,34	17,41	12,87	8,97	6,45	66	77
24	72	20	3	9	52041	38,21	36,19	33,82	28,79	25,58	0,00	41	41
25	2	5	4	3	13571	1,10	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	11	10077
26	3	10	4	3	15226	3,41	3,39	3,39	3,24	3,24	3,24	12	4337
27	5	15	4	3	17653	12,08	12,08	12,08	12,08	12,08	12,08	14	2689
28	6	20	4	3	20897	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	18	1844
29	8	5	4	6	23450	1,05	0,77	0,77	0,53	0,53	0,53	23	1840
30	15	10	4	6	27198	2,50	2,20	1,72	1,72	1,72	1,57	41	776
31	23	15	4	6	33172	6,34	3,25	3,25	3,24	3,24	3,24	47	436
32	30	20	4	6	35481	20,33	11,72	6,24	5,20	3,31	0,00	75	227
33	18	5	4	9	30825	6,55	5,32	4,88	4,73	3,37	3,37	35	459
34	36	10	4	9	41345	19,59	11,30	8,08	7,11	6,79	5,99	56	190
35	54	15	4	9	48463	25,18	21,38	18,21	16,18	13,02	0,00	60	77
36	72	20	4	9	56188	33,29	31,14	29,08	27,05	24,81	0,00	40	40
Sommes												15692	54784
Moyennes (sur 36 instances)						11,75	9,04	7,85	6,98	6,23	3,28	435,89	1521,78

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 2 : Effet de variation *TLT* sur le *Gap moyen* (*TLT* = 5 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	3	5	2	3	10021	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	13260	14
2	6	10	2	3	12226	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25	5399
3	9	15	2	3	14647	1,46	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	24	3162
4	12	20	2	3	17897	1,29	1,11	1,09	1,07	0,42	0,42	34	2109
5	15	5	2	6	18446	6,52	6,51	5,54	5,54	5,54	5,54	17	30
6	30	10	2	6	22660	5,90	5,04	4,02	4,02	4,02	4,02	32	35
7	45	15	2	6	28015	10,94	5,83	1,55	1,55	1,55	1,55	54	51
8	60	20	2	6	30155	22,59	15,40	7,78	4,35	4,35	4,35	67	69
9	36	5	2	9	23549	10,03	9,32	9,00	8,74	8,68	8,57	26	47
10	72	10	2	9	33840	23,36	13,87	6,00	5,46	5,07	4,69	53	66
11	108	15	2	9	39801	29,07	26,02	23,25	19,82	18,78	0,00	42	52
12	144	20	2	9	47852	37,16	35,62	34,06	32,57	30,81	0,00	28	28
13	3	5	3	3	11893	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	6133	6078
14	6	10	3	3	14188	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	16	5545
15	9	15	3	3	16647	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	24	2655
16	12	20	3	3	19897	7,82	7,82	7,41	7,36	7,36	7,36	29	1716
17	15	5	3	6	21120	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	18	17
18	30	10	3	6	25069	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	32	34
19	45	15	3	6	30530	10,35	6,79	5,19	5,19	5,19	5,19	51	56
20	60	20	3	6	32959	24,02	12,60	6,87	6,70	6,38	6,38	62	64
21	36	5	3	9	27377	5,02	4,63	4,33	4,33	4,33	4,33	22	44
22	72	10	3	9	37485	22,88	13,83	7,75	6,42	6,04	5,47	51	77
23	108	15	3	9	43991	32,70	25,96	21,40	17,41	13,89	0,00	51	51
24	144	20	3	9	52041	38,88	37,54	36,19	34,49	32,33	0,00	28	28
25	3	5	4	3	13571	0,07	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	1895	9485
26	6	10	4	3	15226	0,15	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	19	4287
27	9	15	4	3	17653	13,56	12,08	12,08	12,08	12,08	12,08	13	2529
28	12	20	4	3	20897	15,17	15,00	14,63	14,63	14,63	14,63	19	1609
29	15	5	4	6	23450	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	14	15
30	30	10	4	6	27198	4,80	4,15	3,40	3,10	3,03	2,97	34	46
31	45	15	4	6	33172	10,64	6,02	5,96	4,68	4,68	4,68	49	52
32	60	20	4	6	35481	23,23	14,91	7,36	7,07	6,63	4,65	61	87
33	36	5	4	9	30825	7,75	7,51	6,33	6,12	6,12	6,12	23	52
34	72	10	4	9	41345	21,02	14,32	8,94	8,08	7,74	0,00	46	72
35	108	15	4	9	48463	25,98	22,87	20,07	17,85	16,44	0,00	51	54
36	144	20	4	9	56188	34,01	32,57	31,14	29,74	28,02	0,00	28	28
Sommes												22431	45743
Moyennes (sur 36 instances)						12,99	10,52	8,68	8,04	7,65	3,45	623,08	1270,64

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 3 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap moyen* (*TLT* = 10 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	6	5	2	3	10021	6,93	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	5	7
2	12	10	2	3	12226	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	12	15
3	18	15	2	3	14647	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	16	17
4	24	20	2	3	17897	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	21	23
5	30	5	2	6	18446	6,52	6,51	5,54	5,54	5,54	5,54	17	30
6	60	10	2	6	22660	5,90	5,04	4,02	4,02	4,02	4,02	32	35
7	90	15	2	6	28015	17,74	10,18	9,12	8,28	7,40	0,00	52	66
8	120	20	2	6	30155	28,99	22,54	18,28	11,23	4,40	4,40	65	67
9	72	5	2	9	23549	10,03	9,32	9,00	8,74	8,68	8,57	26	47
10	144	10	2	9	33840	27,32	21,15	16,21	9,12	5,74	5,33	52	56
11	216	15	2	9	39801	30,46	28,61	26,47	24,30	22,29	0,00	30	30
12	288	20	2	9	47852	37,91	36,78	35,62	34,47	33,29	0,00	18	18
13	6	5	3	3	11893	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	8	47
14	12	10	3	3	14188	1,02	1,02	0,57	0,26	0,26	0,26	18	397
15	18	15	3	3	16647	1,74	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	23	458
16	24	20	3	3	19897	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	27	28
17	30	5	3	6	21120	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	18	17
18	60	10	3	6	25069	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	32	34
19	90	15	3	6	30530	16,63	5,42	5,28	5,28	5,28	5,28	49	50
20	120	20	3	6	32959	28,38	21,64	15,02	10,18	7,44	7,03	58	71
21	72	5	3	9	27377	5,02	4,63	4,33	4,33	4,33	4,33	22	43
22	144	10	3	9	37485	27,38	20,51	15,46	9,81	6,88	0,00	47	62
23	216	15	3	9	43991	33,53	30,43	25,96	22,34	20,02	0,00	31	31
24	288	20	3	9	52041	39,54	38,55	37,54	36,86	35,84	0,00	18	18
25	6	5	4	3	13571	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1100	321
26	12	10	4	3	15226	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	12	102
27	18	15	4	3	17653	4,79	3,80	3,77	3,77	3,77	3,77	17	25
28	24	20	4	3	20897	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	17	23
29	30	5	4	6	23450	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	14	15
30	60	10	4	6	27198	4,80	4,15	3,85	3,79	3,72	3,72	32	37
31	90	15	4	6	33172	15,47	8,09	6,02	5,96	4,68	4,68	49	54
32	120	20	4	6	35481	26,24	18,81	16,54	15,49	11,70	0,00	52	81
33	72	5	4	9	30825	7,75	7,51	6,33	6,12	6,12	6,12	23	52
34	144	10	4	9	41345	24,53	18,32	14,32	9,64	8,08	0,00	45	62
35	216	15	4	9	48463	26,87	25,57	23,65	22,00	19,86	0,00	29	29
36	288	20	4	9	56188	34,72	33,65	32,57	31,85	30,79	0,00	18	18
Sommés												2105	2486
Moyennes (sur 36 instances)						14,79	12,49	11,19	10,02	9,10	3,62	58,47	69,06

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 4 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap* moyen (*TLT* = 20 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	9	5	2	3	10021	6,93	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	5	7
2	18	10	2	3	12226	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	12	15
3	27	15	2	3	14647	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	16	17
4	36	20	2	3	17897	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	21	23
5	45	5	2	6	18446	6,52	6,51	5,54	5,54	5,54	5,54	17	30
6	90	10	2	6	22660	5,90	5,04	4,02	4,02	4,02	4,02	32	35
7	135	15	2	6	28015	19,43	10,36	5,83	1,55	1,55	1,55	54	51
8	180	20	2	6	30155	28,99	22,54	19,22	13,96	4,49	0,00	65	67
9	108	5	2	9	23549	10,03	9,32	9,00	8,74	8,68	8,57	26	46
10	216	10	2	9	33840	27,32	22,83	18,01	13,87	7,55	0,00	50	56
11	324	15	2	9	39801	30,98	29,52	27,72	26,36	24,56	0,00	23	23
12	432	20	2	9	47852	37,91	37,16	36,39	35,62	34,85	0,00	14	14
13	9	5	3	3	11893	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	7	7
14	18	10	3	3	14188	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	16	13
15	27	15	3	3	16647	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	22	20
16	36	20	3	3	19897	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	27	28
17	45	5	3	6	21120	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	18	17
18	90	10	3	6	25069	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	32	34
19	135	15	3	6	30530	16,63	6,60	5,28	5,28	5,28	5,28	49	50
20	180	20	3	6	32959	28,97	22,60	16,00	10,18	7,44	0,00	57	71
21	108	5	3	9	27377	5,02	4,63	4,33	4,33	4,33	4,33	22	43
22	216	10	3	9	37485	28,61	22,26	17,55	13,31	9,08	0,00	45	57
23	324	15	3	9	43991	33,97	32,70	30,01	27,59	24,59	0,00	23	23
24	432	20	3	9	52041	39,54	38,88	38,21	37,54	36,86	0,00	14	14
25	9	5	4	3	13571	1,85	1,17	1,10	1,10	1,10	1,10	9	27
26	18	10	4	3	15226	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	12	16
27	27	15	4	3	17653	4,79	3,80	3,77	3,77	3,77	3,77	17	25
28	36	20	4	3	20897	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	17	23
29	45	5	4	6	23450	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	14	15
30	90	10	4	6	27198	4,80	4,15	3,85	3,79	3,72	3,72	32	37
31	135	15	4	6	33172	16,20	10,82	8,52	7,62	4,81	4,23	44	68
32	180	20	4	6	35481	26,79	17,91	15,51	9,70	6,23	6,23	60	74
33	108	5	4	9	30825	7,75	7,51	6,33	6,12	6,12	6,12	23	51
34	216	10	4	9	41345	26,21	19,59	15,87	9,09	8,04	0,00	45	57
35	324	15	4	9	48463	27,35	25,18	23,26	21,38	19,56	0,00	31	31
36	432	20	4	9	56188	34,72	34,01	32,93	31,85	30,79	0,00	18	18
Sommés												989	1203
Moyennes (sur 36 instances)						15,08	12,93	11,63	10,35	9,26	3,47	27,47	33,42

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 5 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap moyen* (*TLT* = 30 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	12	5	2	3	10021	6,93	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	5	7
2	24	10	2	3	12226	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	12	15
3	36	15	2	3	14647	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	10,31	16	17
4	48	20	2	3	17897	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	13,08	21	23
5	60	5	2	6	18446	6,52	6,51	5,54	5,54	5,54	5,54	17	30
6	120	10	2	6	22660	5,90	5,04	4,02	4,02	4,02	4,02	32	35
7	180	15	2	6	28015	18,99	11,33	9,12	8,28	7,40	0,00	52	63
8	240	20	2	6	30155	30,23	24,04	20,23	16,96	11,77	9,92	56	75
9	144	5	2	9	23549	10,03	9,32	9,00	8,74	8,68	8,57	26	44
10	288	10	2	9	33840	27,97	22,83	18,01	13,87	7,16	5,39	51	58
11	432	15	2	9	39801	30,98	29,52	27,72	25,90	24,17	0,00	24	24
12	576	20	2	9	47852	38,29	37,91	37,54	37,16	36,78	0,00	8	8
13	12	5	3	3	11893	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	7	7
14	24	10	3	3	14188	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	16	13
15	36	15	3	3	16647	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74	22	20
16	48	20	3	3	19897	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	8,95	27	28
17	60	5	3	6	21120	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	18	17
18	120	10	3	6	25069	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	3,13	32	34
19	180	15	3	6	30530	22,41	10,35	6,79	5,19	5,19	5,19	51	57
20	240	20	3	6	32959	30,74	24,02	18,05	12,00	7,44	7,03	58	71
21	144	5	3	9	27377	5,02	4,63	4,33	4,33	4,33	4,33	22	43
22	288	10	3	9	37485	29,21	21,94	16,66	11,97	8,49	8,12	47	58
23	432	15	3	9	43991	33,97	32,70	30,01	25,96	22,82	0,00	25	25
24	576	20	3	9	52041	39,87	39,54	39,21	38,88	38,55	0,00	8	8
25	12	5	4	3	13571	1,85	1,17	1,10	1,10	1,10	1,10	9	27
26	24	10	4	3	15226	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	12	16
27	36	15	4	3	17653	4,79	3,80	3,77	3,77	3,77	3,77	17	25
28	48	20	4	3	20897	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	11,41	17	23
29	60	5	4	6	23450	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	14	15
30	120	10	4	6	27198	4,80	4,15	3,85	3,79	3,72	3,72	32	37
31	180	15	4	6	33172	17,02	9,26	6,02	5,96	4,68	4,68	49	52
32	240	20	4	6	35481	29,62	24,19	17,58	16,17	13,90	0,00	49	70
33	144	5	4	9	30825	7,75	7,51	6,33	6,12	6,12	6,12	23	51
34	288	10	4	9	41345	26,21	21,02	17,41	14,32	10,82	0,00	43	57
35	432	15	4	9	48463	27,35	25,98	24,81	23,26	21,60	0,00	24	24
36	576	20	4	9	56188	35,08	34,37	33,65	32,93	32,21	0,00	13	13
Sommes												955	1190
Moyennes (sur 36 instances)						15,48	13,38	11,98	11,02	10,02	4,11	26,53	33,06

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 6 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap moyen* (*TLT* = 40 %)

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	15	5	2	3	10021	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	5	7
2	30	10	2	3	12226	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12	15
3	45	15	2	3	14647	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16	17
4	60	20	2	3	17897	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21	23
5	75	5	2	6	18446	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17	30
6	150	10	2	6	22660	3,44	3,30	3,02	2,99	2,99	2,99	32	35
7	225	15	2	6	28015	11,17	2,12	1,80	1,67	1,67	1,67	54	52
8	300	20	2	6	30155	23,54	16,57	13,68	12,54	12,48	12,41	43	64
9	180	5	2	9	23549	7,60	5,10	5,05	5,05	5,03	5,00	29	30
10	360	10	2	9	33840	21,70	10,38	5,74	5,33	3,96	3,96	44	46
11	540	15	2	9	39801	28,17	23,80	19,85	15,02	9,07	7,55	19	19
12	720	20	2	9	47852	36,39	33,68	31,18	28,70	26,13	23,95	11	11
13	15	5	3	3	11893	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	7	7
14	30	10	3	3	14188	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	16	13
15	45	15	3	3	16647	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	22	20
16	60	20	3	3	19897	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	7,29	27	28
17	75	5	3	6	21120	2,25	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	18	17
18	150	10	3	6	25069	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	5,44	32	34
19	225	15	3	6	30530	10,35	4,19	3,47	3,02	2,95	2,71	49	50
20	300	20	3	6	32959	19,25	6,32	5,97	5,74	5,74	5,74	54	60
21	180	5	3	9	27377	5,02	4,60	4,39	4,00	3,71	3,71	22	42
22	360	10	3	9	37485	20,81	10,10	6,56	6,02	5,63	5,37	43	44
23	540	15	3	9	43991	30,43	21,86	17,00	12,60	8,23	5,09	19	19
24	720	20	3	9	52041	38,21	35,85	32,70	28,45	25,54	21,74	12	12
25	15	5	4	3	13571	1,10	1,10	0,06	0,06	0,06	0,06	9	27
26	30	10	4	3	15226	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	3,41	12	16
27	45	15	4	3	17653	12,08	12,08	12,08	12,08	12,08	12,08	17	25
28	60	20	4	3	20897	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	17	23
29	75	5	4	6	23450	1,05	0,84	0,82	0,82	0,82	0,82	14	15
30	150	10	4	6	27198	2,50	2,48	2,48	2,31	2,14	1,49	33	40
31	225	15	4	6	33172	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,43	49	53
32	300	20	4	6	35481	17,71	9,26	5,04	5,04	5,04	4,80	30	50
33	180	5	4	9	30825	6,55	5,32	5,05	3,00	3,00	3,00	25	50
34	360	10	4	9	41345	18,32	8,08	7,74	7,27	6,81	6,40	32	34
35	540	15	4	9	48463	24,43	20,36	17,07	13,51	11,68	9,54	15	15
36	720	20	4	9	56188	33,29	31,14	28,74	26,41	24,21	22,03	10	10
Sommés												887	1053
Moyennes (sur 36 instances)						11,67	8,72	7,63	6,86	6,23	5,75	24,64	29,25

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 7 : Effet de variation de *TLT* sur le *Gap* moyen (*TLT* = 50 %)

<i>TLT</i>	<i>Gap Moyen</i>						Mouvements acceptés	
	<i>50</i> <i>Sec</i>	<i>100</i> <i>Sec</i>	<i>150</i> <i>Sec</i>	<i>200</i> <i>Sec</i>	<i>250</i> <i>Sec</i>	<i>300</i> <i>Sec</i>	<i>Avec</i> <i>amelioration</i> <i>du coût</i>	<i>sans</i> <i>amelioration</i> <i>du coût</i>
0%	25,42	24,38	23,20	21,84	20,44	14,69	9	31
5%	11,75	9,04	7,85	6,98	6,23	3,28	436	1522
10%	12,99	10,52	8,68	8,04	7,65	3,45	623	1271
20%	14,79	12,49	11,19	10,02	9,10	3,62	58	69
30%	15,08	12,93	11,63	10,35	9,26	3,47	27	33
40%	15,48	13,38	11,98	11,02	10,02	4,11	27	33
50%	11,67	8,72	7,63	6,86	6,23	5,75	25	30
Moyenne	15,26	13,02	11,72	10,72	9,67	5,50	172	427

Tableau 8: Récapitulation du *Gap moyen* en fonction du temps d'exécution

<i>TLT =</i> <i>0 %</i>	Instances	<i>Gap moyen</i>						
		<i>01 Sec.</i>	<i>50 Sec.</i>	<i>100 Sec.</i>	<i>150 Sec.</i>	<i>200 Sec.</i>	<i>250 Sec.</i>	<i>300 Sec.</i>
<i>T</i>	<i>3</i>	26,78	18,91	17,66	16,09	15,28	14,83	14,51
	<i>6</i>	30,99	26,64	25,61	24,46	21,96	18,82	13,15
	<i>9</i>	33,69	30,72	29,87	29,05	28,29	27,68	16,42
<i>N</i>	<i>5</i>	24,29	16,74	15,22	13,82	12,90	12,20	11,51
	<i>10</i>	29,09	23,20	22,15	20,92	17,64	17,12	16,71
	<i>15</i>	32,16	27,86	26,95	25,67	25,12	21,39	14,50
	<i>20</i>	36,42	33,89	33,22	32,39	31,69	31,06	16,04
<i>V</i>	<i>2</i>	30,26	26,08	25,22	24,37	23,65	23,08	16,86
	<i>3</i>	32,67	26,17	25,13	23,49	22,54	19,37	16,13
	<i>4</i>	28,54	24,03	22,80	21,74	19,34	18,88	11,08
<i>Moyenne</i>		<i>30,48</i>	<i>25,42</i>	<i>24,38</i>	<i>23,20</i>	<i>21,84</i>	<i>20,44</i>	<i>14,69</i>

Tableau 9 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT = 0 %*

TLT = 5%	Instances	Gap moyen						
		01 Sec.	50 Sec.	100 Sec.	150 Sec.	200 Sec.	250 Sec.	300 Sec.
T	3	26,78	4,06	3,97	3,97	3,95	3,95	3,95
	6	30,99	8,58	5,40	4,19	3,83	3,55	2,99
	9	33,69	22,61	17,76	15,40	13,16	11,17	2,88
N	5	24,29	3,54	2,63	2,41	2,22	2,04	2,04
	10	29,09	8,40	4,85	3,88	3,48	3,32	2,56
	15	32,16	13,31	10,88	9,35	7,88	6,50	4,47
	20	36,42	21,75	17,81	15,77	14,36	13,05	4,05
V	2	30,26	10,64	7,89	7,03	6,04	5,35	3,01
	3	32,67	12,44	9,46	8,00	6,93	6,10	3,09
	4	28,54	12,17	9,77	8,53	7,98	7,23	3,73
Moyenne		30,48	11,75	9,04	7,85	6,98	6,22	3,27

Tableau 10 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT* = 5 %

TLT = 10%	Instances	Gap moyen						
		00 Sec.	50 Sec.	100 Sec.	150 Sec.	200 Sec.	250 Sec.	300 Sec.
T	3	26,78	4,14	3,87	3,78	3,78	3,72	3,72
	6	30,99	10,83	7,35	4,89	4,43	4,36	4,19
	9	33,69	20,34	17,37	15,92	14,85	2,43	4,19
N	5	24,29	4,67	4,52	4,20	4,15	4,15	4,13
	10	29,09	9,06	6,08	3,72	3,39	3,25	2,28
	15	32,16	15,54	12,31	10,52	9,30	8,64	3,18
	20	36,42	22,69	19,18	16,28	15,33	14,55	4,20
V	2	30,26	12,75	10,29	8,09	7,32	7,00	2,82
	3	32,67	12,66	9,95	8,28	7,68	7,14	3,24
	4	28,54	13,55	11,32	9,68	9,13	8,80	4,28
Moyenne		30,48	12,62	10,22	8,54	7,94	6,40	3,62

Tableau 11 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT* = 10 %

TLT = 20%	Instances	Gap moyen						
		00 Sec.	50 Sec.	100 Sec.	150 Sec.	200 Sec.	250 Sec.	300 Sec.
T	3	26,78	5,49	5,11	5,06	5,04	5,04	5,04
	6	30,99	13,47	9,45	7,89	6,73	5,43	3,81
	9	33,69	25,42	22,92	20,62	18,30	16,82	2,03
N	5	24,29	5,05	4,65	4,34	4,29	4,29	4,27
	10	29,09	11,16	8,85	7,10	5,12	4,24	2,53
	15	32,16	17,51	13,64	12,32	11,40	10,44	2,71
	20	36,42	25,47	22,82	21,00	19,28	17,43	4,98
V	2	30,26	16,65	14,40	13,08	11,53	10,34	5,04
	3	32,67	14,02	11,46	9,96	8,70	7,95	2,69
	4	28,54	13,72	11,61	10,54	9,84	9,01	3,14
Moyenne		30,48	14,80	12,49	11,19	10,02	9,10	3,62

Tableau 12 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT* = 20 %

<i>TLT = 30%</i>	Instances	<i>Gap moyen</i>						
		<i>00 Sec.</i>	<i>50 Sec.</i>	<i>100 Sec.</i>	<i>150 Sec.</i>	<i>200 Sec.</i>	<i>250 Sec.</i>	<i>300 Sec.</i>
<i>T</i>	<i>3</i>	26,78	5,69	5,37	5,36	5,36	5,36	5,36
	<i>6</i>	30,99	13,77	9,79	7,90	6,05	4,51	3,47
	<i>9</i>	33,69	25,78	23,63	21,63	19,65	17,92	1,59
<i>N</i>	<i>5</i>	24,29	5,32	4,85	4,53	4,48	4,48	4,46
	<i>10</i>	29,09	11,48	9,37	7,75	6,06	4,77	2,02
	<i>15</i>	32,16	17,93	14,56	12,94	11,73	10,68	2,99
	<i>20</i>	36,42	25,59	22,95	21,30	19,14	17,12	4,41
<i>V</i>	<i>2</i>	30,26	16,83	14,66	13,20	11,86	10,33	4,36
	<i>3</i>	32,67	14,26	12,17	10,82	9,72	8,83	2,33
	<i>4</i>	28,54	14,15	11,96	10,88	9,48	8,63	3,71
<i>Moyenne</i>		<i>30,48</i>	<i>15,08</i>	<i>12,93</i>	<i>11,63</i>	<i>10,35</i>	<i>9,26</i>	<i>3,47</i>

Tableau 13 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT = 30 %*

<i>TLT = 40%</i>	Instances	<i>Gap moyen</i>						
		<i>00 Sec.</i>	<i>50 Sec.</i>	<i>100 Sec.</i>	<i>150 Sec.</i>	<i>200 Sec.</i>	<i>250 Sec.</i>	<i>300 Sec.</i>
<i>T</i>	<i>3</i>	26,78	5,69	5,37	5,36	5,36	5,36	5,36
	<i>6</i>	30,99	14,77	10,82	8,52	7,41	6,22	4,26
	<i>9</i>	33,69	25,98	23,94	22,06	20,29	18,48	2,71
<i>N</i>	<i>5</i>	24,29	5,32	4,85	4,53	4,48	4,48	4,46
	<i>10</i>	29,09	11,62	9,49	7,83	6,49	4,97	3,53
	<i>15</i>	32,16	18,62	15,00	13,36	12,26	11,30	2,85
	<i>20</i>	36,42	26,36	24,17	22,19	20,84	19,34	5,60
<i>V</i>	<i>2</i>	30,26	16,98	14,93	13,65	12,76	11,52	5,51
	<i>3</i>	32,67	14,97	12,63	11,12	9,73	8,77	3,59
	<i>4</i>	28,54	14,49	12,57	11,16	10,57	9,78	3,23
<i>Moyenne</i>		<i>30,48</i>	<i>15,48</i>	<i>13,38</i>	<i>11,98</i>	<i>11,02</i>	<i>10,02</i>	<i>4,11</i>

Tableau 14 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT = 40 %*

<i>TLT = 50%</i>	Instances	<i>Gap moyen</i>						
		<i>00 Sec.</i>	<i>50 Sec.</i>	<i>100 Sec.</i>	<i>150 Sec.</i>	<i>200 Sec.</i>	<i>250 Sec.</i>	<i>300 Sec.</i>
<i>T</i>	<i>3</i>	26,78	5,69	5,37	5,36	5,21	5,21	5,21
	<i>6</i>	30,99	15,78	12,15	9,03	7,73	6,95	2,10
	<i>9</i>	33,69	26,45	24,85	22,86	21,46	20,20	1,67
<i>N</i>	<i>5</i>	24,29	5,54	4,95	4,20	4,12	4,11	3,62
	<i>10</i>	29,09	12,35	10,45	8,98	7,63	6,66	2,71
	<i>15</i>	32,16	19,67	16,34	13,48	12,52	11,62	1,93
	<i>20</i>	36,42	26,34	24,76	23,01	21,60	20,77	3,72
<i>V</i>	<i>2</i>	30,26	17,62	15,71	13,51	12,82	11,97	4,76
	<i>3</i>	32,67	14,99	13,12	11,61	10,51	9,61	1,53
	<i>4</i>	28,54	15,31	13,54	12,14	11,07	10,79	2,68
<i>Moyenne</i>		<i>30,48</i>	<i>15,97</i>	<i>14,12</i>	<i>12,42</i>	<i>11,47</i>	<i>10,79</i>	<i>2,99</i>

Tableau 15 : Effet de variation des instances sur le *Gap moyen* pour *TLT = 50 %*

<i>TLT</i> INSTANCES		5%	10%	20%	30%	40%	50%
T	3	3,98	3,84	5,13	5,42	5,42	5,34
	6	4,76	6,01	7,8	7,58	8,67	8,96
	9	13,83	12,52	17,69	18,37	18,91	19,58
N	5	2,48	4,3	4,48	4,69	4,69	4,42
	10	4,42	4,63	6,5	6,91	7,32	8,13
	15	8,73	9,92	11,34	11,81	12,23	12,59
	20	14,47	15,37	18,5	18,42	19,75	20,03
V	2	6,66	8,05	11,84	11,87	12,56	12,73
	3	7,67	8,16	9,13	9,69	10,14	10,23
	4	8,24	9,46	9,64	9,8	10,3	10,92

Tableau 16 : Récapitulation des variations du *Gap moyen* en fonction des instances

Annexes

N°	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
	N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout < bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	5	2	3	10021	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	12	120283
2	10	2	3	12226	2,40	2,40	2,24	1,62	1,21	1,21	2	93979
3	15	2	3	14647	5,94	5,94	5,45	2,90	2,90	2,90	0	82765
4	20	2	3	17897	9,93	9,51	9,03	9,03	9,03	9,03	0	76915
5	5	2	6	18446	5,09	5,09	3,97	3,97	3,97	3,97	0	62074
6	10	2	6	22660	9,75	8,60	8,57	8,57	6,54	6,54	0	42952
7	15	2	6	28015	14,44	12,37	12,37	11,90	11,90	11,90	0	45551
8	20	2	6	30155	18,18	18,03	18,03	17,34	17,34	17,34	0	49960
9	5	2	9	23549	12,40	12,17	12,17	12,11	12,03	10,85	0	35727
10	10	2	9	33840	18,16	17,66	16,73	16,58	16,55	16,55	0	29826
11	15	2	9	39801	21,74	21,31	21,31	21,08	21,08	20,98	0	27881
12	20	2	9	47852	24,01	23,28	22,22	22,22	22,22	22,22	0	19542
13	5	3	3	11893	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	12	127898
14	10	3	3	14188	2,16	0,90	0,05	0,05	0,02	0,02	5	120572
15	15	3	3	16647	4,23	2,64	2,64	2,64	2,61	2,61	0	95583
16	20	3	3	19897	6,11	5,01	5,01	3,74	3,74	2,62	0	66369
17	5	3	6	21120	4,50	4,50	4,50	2,89	2,89	2,27	0	66042
18	10	3	6	25069	11,70	8,28	7,71	7,71	7,26	7,26	0	55314
19	15	3	6	30530	11,33	10,59	10,44	10,44	10,44	10,44	0	42354
20	20	3	6	32959	17,47	16,11	14,14	13,82	13,28	12,43	0	42412
21	5	3	9	27377	10,65	10,65	10,46	10,46	10,33	10,33	0	39279
22	10	3	9	37485	16,83	16,08	15,24	15,24	15,20	0,00	0	27131
23	15	3	9	43991	20,25	19,88	19,78	19,08	18,29	18,29	0	23712
24	20	3	9	52041	23,64	22,77	22,42	22,42	21,41	21,16	0	19342
25	5	4	3	13571	0,09	0,06	0,06	0,04	0,04	0,02	6	112322
26	10	4	3	15226	0,99	0,13	0,13	0,02	0,02	0,02	4	89393
27	15	4	3	17653	7,05	5,63	2,28	2,28	2,28	2,28	0	76664
28	20	4	3	20897	8,13	8,13	8,13	7,91	7,91	7,91	0	70006
29	5	4	6	23450	3,94	3,94	3,94	3,94	3,71	3,71	0	48219
30	10	4	6	27198	6,35	6,35	5,97	5,97	5,10	5,10	0	34796
31	15	4	6	33172	13,02	12,80	12,39	12,39	12,39	12,37	0	58977
32	20	4	6	35481	14,33	13,78	13,78	13,78	13,70	13,49	0	39567
33	5	4	9	30825	12,79	10,58	9,96	9,96	9,96	9,96	0	34628
34	10	4	9	41345	13,54	13,54	13,54	13,54	13,54	12,42	0	21922
35	15	4	9	48463	18,54	17,93	17,19	17,19	17,09	16,44	0	19587
36	20	4	9	56188	21,89	21,60	20,53	20,07	20,04	20,03	0	21208
Sommés											41	2 040 752
Moyennes (sur 36 instances)					10,88	10,23	9,79	9,53	9,33	8,74	1,14	56687,56

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 17 : Calcul du *Gap moyen* par recuit simulé

Annexes

N°	TLT	Instances			Val Opt	Gap						Nombre de mouvements acceptés	
		N	V	T		50 Sec	100 Sec	150 Sec	200 Sec	250 Sec	300 Sec	Avec amélioration du coût <i>cout<bestcout</i>	Sans amélioration du coût <i>Meilleur voisin</i>
1	2	5	2	3	10021	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0	14059
2	3	10	2	3	12226	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	6806	0
3	5	15	2	3	14647	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1955	1955
4	6	20	2	3	17897	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9	2802
5	8	5	2	6	18446	2,90	0,38	0,09	0,02	0,02	0,02	77	2043
6	15	10	2	6	22660	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	12	1112
7	23	15	2	6	28015	2,29	2,03	1,99	1,99	1,99	1,99	17	630
8	30	20	2	6	30155	5,63	4,94	4,31	3,78	3,59	3,55	46	427
9	18	5	2	9	23549	9,06	8,65	8,29	8,18	5,79	5,79	20	384
10	36	10	2	9	33840	3,87	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	202	43
11	54	15	2	9	39801	9,77	6,94	5,71	5,54	5,50	0,00	47	156
12	72	20	2	9	47852	17,02	10,79	5,97	5,08	5,01	4,95	53	111
13	2	5	3	3	11893	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	7140	6885
14	3	10	3	3	14188	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	6709	0
15	5	15	3	3	16647	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	3941	0
16	6	20	3	3	19897	2,19	1,81	1,81	1,81	1,81	1,81	12	2704
17	8	5	3	6	21120	0,16	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	11	2438
18	15	10	3	6	25069	1,87	1,38	1,38	1,15	1,06	1,06	18	1025
19	23	15	3	6	30530	4,62	3,92	3,70	3,60	3,60	3,60	24	644
20	30	20	3	6	32959	4,08	3,30	1,98	1,55	1,51	1,51	35	413
21	18	5	3	9	27377	4,73	3,27	3,08	3,08	3,08	2,80	16	561
22	36	10	3	9	37485	5,90	5,66	5,36	5,36	5,36	5,36	29	323
23	54	15	3	9	43991	13,73	8,68	8,04	7,89	7,67	0,00	55	168
24	72	20	3	9	52041	15,59	11,52	8,16	6,48	6,03	5,25	55	115
25	2	5	4	3	13571	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	3	12616
26	3	10	4	3	15226	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5	5358
27	5	15	4	3	17653	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	5	2957
28	6	20	4	3	20897	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	4,22	2654	3
29	8	5	4	6	23450	0,52	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	116	2141
30	15	10	4	6	27198	2,34	1,78	1,15	0,59	0,29	0,29	25	947
31	23	15	4	6	33172	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	15	579
32	30	20	4	6	35481	6,31	6,24	5,68	4,98	4,13	3,52	50	334
33	18	5	4	9	30825	6,66	4,18	4,14	3,88	2,43	2,43	22	597
34	36	10	4	9	41345	7,87	7,44	6,83	6,67	6,67	6,19	30	310
35	54	15	4	9	48463	11,53	7,57	5,60	5,42	5,18	4,22	48	159
36	72	20	4	9	56188	13,58	9,52	6,35	5,92	0,00	0,00	51	68
Sommés												30313	65067
Moyennes (sur 36 instances)						4,68	3,52	2,95	2,77	2,43	1,97	842,03	1807,42

Val.Opt. = valeur optimale du coût

Tableau 18 : Calcul du *Gap moyen* par Hybridation Tabou-Recuit