

Table des matières



Table des figures	9
Liste des tableaux	12
Glossaire	13
Introduction générale	15
1 Transport et conteneurisation	22
1.1 Introduction	23
1.2 Choix du moyen de transport	24
1.3 Transport Terrestre	25
1.3.1 Transport Routier	25
1.3.2 Transport Ferroviaire	26
1.4 Transport Aérien	26
1.5 Transport Maritime	27
1.5.1 La révolution du transport maritime	28
1.5.2 Les intervenants du transport maritime	28
1.5.3 La tarification de transport sur une ligne maritime	30
1.5.4 Le transport maritime de marchandises	31
1.5.5 Les types de navires	31
1.6 Conteneurisation	32
1.6.1 Naissance du conteneur et sa révolution	32
1.6.2 Principe de la standardisation	34
1.6.3 Structure physique d'un terminal maritime à conteneurs	36
1.6.4 Modes d'expédition des conteneurs	37
1.6.5 Processus de chargement / déchargement des conteneurs	38
1.6.6 Avantages et inconvénients de la conteneurisation	39
1.7 Conclusion	40
2 Logistique inverse dans le transport maritime conteneurisé	42
2.1 Introduction	43
2.2 Logistique	43

2.3	Logistique inverse	44
2.4	Optimisation dans le secteur de transport maritime	49
2.5	Synthèse	53
2.6	Méthodes d'optimisation	54
2.6.1	Classification des méthodes d'optimisation	54
2.7	Conclusion	63
3	Systèmes d'Aide à la Décision	65
3.1	Introduction	66
3.2	L'aide à la décision	66
3.2.1	La décision	67
3.2.2	Les différents types de décisions	67
3.2.3	Le processus de la décision	68
3.3	Les Systèmes d'Aide À la Décision (SAD)	70
3.3.1	Les Systèmes Interactifs d'Aide À la Décision (SIAD)	71
3.3.2	Modèles de l'opérateur humain et du système homme machine	76
3.3.3	Approches structurelles de la coopération homme-machine	79
3.4	Classification des Systèmes d'Aide à la Décision	81
3.4.1	Classification au niveau utilisateur	81
3.4.2	Classification au niveau conceptuel	81
3.4.3	Classification au niveau système	81
3.4.4	Classification au niveau connaissance	82
3.5	Conclusion	82
4	Contribution	86
4.1	Introduction	88
4.2	Conduite et supervision des systèmes complexes : Cas d'un problème de retour des conteneurs vides	88
4.3	Interaction de l'armateur pour la gestion des conteneurs / demandes clients	89
4.3.1	Tâche et activité de l'armateur maritime	89
4.3.2	Gestion des demandes clients en exploitation normale	89
4.3.3	Gestion des demandes clients en cas de perturbations	89
4.3.4	Retour à la normale	90
4.4	Modèle comportemental de l'armateur	90
4.5	Modèle décisionnel adopté pour l'armateur	91
4.6	Classification du système décisionnel proposé	93
4.7	Modélisation UML du système décisionnel proposé	93
4.8	Présentation de l'état initial du système modélisé	95
4.9	Processus de traitement des demandes clients	97
4.10	Approche 1 : Recherche Tabou (RT)	99
4.10.1	Présentation de la méthode RT	99
4.10.2	Fonctionnement de l'algorithme RT pour la recherche des conteneurs vides	100
4.10.3	Synthèse	103
4.11	Approche 2 : Algorithme Génétique (AG)	103
4.11.1	Présentation de l'AG	104

4.11.2	Fonctionnement de l'AG appliqué à la recherche des conteneurs vides . . .	104
4.11.3	Synthèse	109
4.12	Approche 3 : Branch & Bound (B&B)	109
4.12.1	Présentation de B&B	110
4.12.2	Convergence de B&B	111
4.12.3	Fonctionnement de B&B pour le retour des conteneurs vides	111
4.12.4	Synthèse	112
4.13	Conclusion	113
5	Étude de cas	114
5.1	Introduction	115
5.2	Étude de cas : Recherche Tabou	115
5.2.1	Architecture fonctionnelle du système associé à la RT	115
5.2.2	Scénario d'exécution de la RT	116
5.3	Étude de cas : Algorithmes Génétiques	118
5.3.1	Architecture fonctionnelle du système associée à l'AG	118
5.3.2	Scénario d'exécution de l'AG	119
5.4	Étude de cas : Branch & Bound	121
5.4.1	Architecture fonctionnelle du système associé à B&B	121
5.4.2	Scénario d'exécution de B&B	121
5.5	Étude comparative	123
5.6	Conclusion	125
	Conclusion générale & perspectives	127
	Bibliographie	129
A	Méthodes d'optimisation utilisées	139
A	Introduction	140
B	Présentation de la Recherche Tabou	140
B.1	Principe d'intensification et diversification	141
B.2	Sélection du meilleur voisin	141
B.3	Critères d'arrêt de la méthode RT	142
C	Présentation de l'Algorithme Génétique	142
C.1	Méthodes de sélection	142
C.2	Méthodes de croisement	143
C.3	Critères de convergence de l'AG	143
D	Présentation de Branch & Bound	143
D.1	Stratégies de parcours de l'arbre généré par B&B	143
D.2	Principe de séparation	144
D.3	Principe d'évaluation	144
E	Conclusion	144

B	Mise en œuvre du système proposé	146
A	Introduction	147
B	Outils de développement	147
C	Description de l'application	148
C.1	Retour des conteneurs vides en appliquant la Recherche Tabou	151
C.2	Retour des conteneurs vides en appliquant l'Algorithme Génétique	151
C.3	Retour des conteneurs vides en appliquant Branch & Bound	155
D	Conclusion	156

Table des figures

1.1	Représentation du système de transport : la confrontation demande et offre de transport	24
1.2	Armateurs mondiaux	29
1.3	La croissance du commerce international utilisant le transport maritime conteneurisé	33
1.4	Aspect technique du conteneur	34
1.5	Marquage de conteneur	35
1.6	Disposition d'un terminal maritime à conteneurs	36
1.7	Modes d'expédition des conteneurs	38
1.8	Chargement et déchargement des conteneurs	39
2.1	La chaîne logistique : flux de produit de l'usine vers le consommateur	44
2.2	La logistique inverse	45
2.3	Etapes de la logistique inverse	46
2.4	Classification des méthodes d'optimisation métaheuristiques	57
2.5	Principe d'un algorithme évolutionnaire	61
2.6	Principe de l'algorithme génétique	62
2.7	Principe de colonies de fourmis	63
3.1	Types de décision	67
3.2	Modèle IDC de Simon	69
3.3	Processus de décision selon Simon	69
3.4	Processus de décision selon Mintzberg	70
3.5	Architecture des SIAD selon Sprague et Carlson	72
3.6	Intégration de systèmes experts attachés aux composants du SIAD	74
3.7	Intégration d'un système expert dans un SIAD comme un composant séparé	75
3.8	Architecture des SIAD selon Marakas	75
3.9	Principe de supervision selon Millot	76
3.10	Décomposition multiniveau d'un grand système selon [80]	77
3.11	Modèle de résolution de problème selon Rasmussen, révisé par Hoc	78
3.12	Structure de coopération homme-machine verticale	80
3.13	Structure de Coopération Homme-machine horizontale	80

4.1	Modèle comportemental de l'armateur	91
4.2	Modèle décisionnel proposé	92
4.3	Diagramme de classe du système proposé	94
4.4	Diagramme de séquence du système proposé	95
4.5	Réseau de Transport Maritime considéré	96
4.6	Processus de traitement d'une demande client	97
4.7	Processus de transfert des conteneurs pleins	98
4.8	Principe de recherche des conteneurs vides avec la RT	102
4.9	Exemple d'individus (liste de ports) de la population initiale	105
4.10	Point de coupure pour croisement	107
4.11	Croisement des individus	108
4.12	Mutation des individus	109
4.13	Partitionnement du problème en sous problèmes,	111
4.14	Principe de retour des conteneurs vides en utilisant B & B	112
5.1	Matrice de distance	116
5.2	Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant la RT	117
5.3	Sénario des demandes clients traitées en utilisant la RT	117
5.4	Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant l'AG	118
5.5	Un fragment de la population initiale	120
5.6	Individus croisés	120
5.7	Individus mutés	120
5.8	Solution optimale pour le retour des conteneurs vides en utilisant l'AG	121
5.9	Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant l'algorithme B&B	122
5.10	Arbre généré par B&B pour l'obtention de la solution optimale	123
5.11	Représentation des résultats de l'étude comparative	124
A.1	Intensification & Diversification.	141
B.1	NetBeans 8.1	147
B.2	MySQL Workbench	148
B.3	Connexion avec la base de données	149
B.4	Liste des ports du réseau	149
B.5	Réseau de Transport Maritime	150
B.6	Liste des conteneurs	150
B.7	Liste des demandes clients	151
B.8	Résultats de retour des CV avec la RT	152
B.9	Résultats de retour des CV avec l'AG	152
B.10	Paramètres de l'AG	153
B.11	Extrait de la population initiale générée par l'exécution de l'AG	154
B.12	Opération de croisement et de mutation de l'AG	154
B.13	Solution finale de l'AG	155
B.14	Solution finale de B&B	155

B.15 Arbre généré par B&B lors de la recherche des CV 156

Rapport-Gratuit.com

Liste des tableaux

1.1	Dimensions universelles des conteneurs.	35
1.2	Avantages et inconvénients des conteneurs	40
2.1	Différence entre la logistique inverse et la logistique directe.	47
5.1	Résultats de l'étude comparative	124

Glossaire

- AG** : Algorithme Génétique
- BAF** : Bunker Adjustment Factor
- BDD** : Base De Données
- B&B** : Branch and Bound
- B&C** : Branch and Cut
- B&C&P** : Branch and Cut and Price
- B&P** : Branch and Price
- BIC** : Bank Identifier Code
- CAF** : Currency Adjustment Factor
- CDDL** : Common Development and Distribution License
- CP** : Conteneur Plein
- CRP** : Components Requirements Planning
- CV** : Conteneur Vide
- DSS** : Decision Support System
- EDI** : Environnement de Développement Intégré
- EVP** : Équivalent vingt pieds
- FCL** : Full Container Load
- FIFO** : First In First Out
- GLS** : Guided Local Search
- IDC** : Intelligence Design Choice
- IDEC** : Inland Depots for Empty Containers
- ILS** : Iterated Local Search

IDMSS : Intelligent Decision Making Support System

ISO : International Organization for Standardization

JDK : Java Development Kit

LCL : Less than Container Load

NP : Non déterministe Polynomial

NVOCC : Non Vessel Operating Common Carrier

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale

OCM : Optimal Control Model

ONU : Organisation des Nations Unies

ORC : Origin Receipt Charge

POD : Port of Discharge

POL : Port of Loading

PQS : Programmation Quadratique Séquentielle

PTU : Périmètre de Transport Urbain

Ro-Ro : Roll on - Roll off

RT : Recherche Tabou

RTM : Réseau de Transport Maritime

SAD : Système d'Aide à la Décision

SGBD : Système Gestionnaire de Base de Données

SGBM : Système Gestionnaire de Base de Modèles

SIAD : Système Interactif d'Aide à la Décision

TER : Transport Express Régional

THC : Terminal Handling Charge

TEU : Twenty-foot Equivalent Unit

UML : Unified Modeling Language

URL : Uniform Resource Locator

VNS : Variable Neighbourhood Search

Introduction générale



Contexte de l'étude

Notre étude s'inscrit dans le cadre du transport maritime qui symbolise un outil favorisé pour les échanges universels. Le transport maritime représente un mécanisme privilégié pour le commerce international, il est fortement concurrencé par le chemin de fer et la route.

Ce mode de transport est passé par de nombreuses révolutions et a subi plusieurs transformations et améliorations pour s'adapter à l'évolution des échanges de marchandise entre les nations.

Historiquement, les marchandises étaient conditionnées dans des cartons, des caisses marines ou des palettes, et transportées par des navires de type cargo polyvalent. Puis, pour répondre à l'augmentation de ce type de trafic, des navires spécialisés, appelés porte-conteneurs, ont vu le jour. Ils sont conçus pour ne transporter que des conteneurs, et équipés de rails pour optimiser les opérations de chargement et déchargement dans les ports.

Le conditionnement des marchandises en conteneurs leur assure une meilleure protection contre la casse, la perte et le vol.

Notre étude s'insère aussi dans le cadre des travaux de recherche réalisés dans le domaine de la logistique inverse ou bien la logistique des retours. La logistique inverse représente la gestion du flux des produits retournés à partir du client vers le fabricant. Parfois, le consommateur n'est pas satisfait du produit livré, et décide de le retourner vers le producteur. Dans ce cas, on est face au flux de la logistique des retours, où le consommateur va renvoyer son produit vers le centre de distribution, qui à son tour va envoyer le produit retourné vers le service après-vente pour une remise à l'état neuf, un recyclage ou parfois, carrément un rejet.

Dans cette étude, ce n'est pas un retour de marchandises, suite à une insatisfaction du client qui nous intéresse, mais plutôt un retour des contenants (conteneurs vides).

Plus exactement, notre intérêt se concentre sur les problèmes liés à la conteneurisation qui participe à l'augmentation du trafic maritime mondial puisqu'elle facilite le transport de tous types de marchandises. Dans ce contexte, nous nous intéressons au flux de retour des

conteneurs vides qui représente la logistique de retour dans un réseau de transport maritime.

Problématique abordée

La compétitivité commerciale d'une compagnie maritime de transport de conteneurs est importante car elle reflète directement le bon fonctionnement et la gestion efficace au niveau des différentes décisions prises dans cette compagnie

Cependant, ce bon fonctionnement dépend de plusieurs facteurs tel que : les relations de travail, le nombre et le type des appareils de manutention, les aires de stockage des conteneurs, ainsi que la disponibilité des conteneurs vides au niveau de ces zones de stockage pour satisfaire le client qui veut envoyer une marchandise quelconque.

En effet, les armateurs de conteneurs cherchent avant tout à assurer le remplissage de leurs navires en conteneurs pleins, quel que soit le type de marchandises. Ils tentent d'équilibrer le nombre de conteneurs transportés à l'aller et au retour entre deux continents, mais malheureusement, le déséquilibre des balances commerciales des pays se répercute sur les échanges conteneurisés, certains pays produisent plus que d'autres, et certains pays importent plus de marchandises qu'ils exportent. Ceci influence le flux des conteneurs transportés par voie maritime qui devient ainsi déséquilibré.

Pour cette raison, les armateurs de conteneurs se trouvent face à deux problèmes majeurs : un équilibrage des flux de conteneurs difficile à atteindre et une rentabilité des lignes qui se dégrade.

Les compagnies doivent gérer des transports de conteneurs chargés ainsi que des repositionnements de conteneurs vides pour garder l'équilibre de la distribution de leurs conteneurs. La gestion des conteneurs vides pèse sur la rentabilité des lignes car si les conteneurs pleins sont payés par le chargeur, les vides sont à la charge de l'armateur.

Les opérateurs de conteneurs¹ rencontrent des problèmes de déséquilibre de la distribution de leurs conteneurs à travers le réseau à cause des conteneurs envoyés et qui ne sont pas retournés par la suite. Réellement, la distribution des conteneurs d'une compagnie n'est pas toujours équitable entre les différents ports. Le retour des conteneurs à leurs origines n'est pas garanti, ce qui provoque un déséquilibre dans la distribution et parfois la non satisfaction des demandes, ceci engendre une forte influence sur la rentabilité des lignes du réseau. Autrement dit, le nombre de conteneurs exportés d'un port p vers un autre port p' est supérieur au nombre de conteneurs importés dans le port p , ceci ne respecte pas la conservation de flux de conteneurs entre les ports du réseau de transport maritime. Par conséquent, un déséquilibre se produit au niveau distribution de conteneurs.

Pour mieux organiser toutes les opérations liées à la gestion des conteneurs, les spécialistes et experts ont convenu de l'importance de la mise en place d'un service logistique qui constitue

1. Par exemple : Maersk, MSC et CMA CGM.

un élément déterminant de la compétitivité de la compagnie en question.

Ainsi, une optimisation de la chaîne logistique peut permettre non seulement d'améliorer la performance économique et écologique mais aussi être bien souvent une source de gains, de productivité, et d'efficacité pour les entreprises concernées. Il s'agit d'optimiser tous les composants de la chaîne logistique qui permettent à une entreprise de gérer efficacement le cycle qui conduit de la conception à la commande et à la livraison. Un seul objectif : livrer aux clients, en temps, des produits de qualité au meilleur prix.

Les enjeux des optimisations souhaitées peuvent être relativement différents :

1. Optimiser la configuration logistique pour gagner sur les coûts de transports et de stockage ;
2. Optimiser le coût de distribution (entre l'usine et les clients sans pour autant dégrader les délais) ;
- 3 Optimiser les processus et organisations qui contribuent à la livraison des produits à la date promise ;
4. Optimiser les délais de fabrication des produits ;
5. Optimiser le coût du flux de retour (logistique inverse) qui représente l'intérêt de la présente étude (coût de retour des conteneurs vides) ;
6. ...

La question qui se pose est : comment organiser ou réorganiser les circuits de flux au mieux pour répondre dans le délai promis aux clients, de telle façon que cette organisation soit la plus efficace et la moins coûteuse que possible pour l'entreprise ou la compagnie ? La réponse à cette question (multiple) passe par l'utilisation de logiciels spécialisés qui peuvent aider le décideur à prendre la meilleure décision.

Quel que soit le domaine d'activité : industrie, distribution, santé, ou bien le transport, la performance de l'entreprise a une influence sur la satisfaction de ses clients et sur ses résultats. Une stratégie logistique pertinente permettra de satisfaire les clients tout en maximisant le gain de l'entreprise.

Contribution

Aujourd'hui, la conteneurisation représente 80% du trafic international de marchandises transportées. Le conteneur est un outil qui a révolutionné les échanges de marchandises au travers le monde et qui a ainsi favorisé la mondialisation. En effet, la conteneurisation fait partie des inventions qui ont bouleversé le transport maritime de marchandises. Elle a réellement pris son essor avec la normalisation internationale concernant la taille des conteneurs, ce qui permet une manutention facile, une adaptation à tous les types de transports (maritime, routier, et ferré), et facilite les opérations de transport de pré et post acheminement vers et depuis un

terminal maritime. Aussi, cette invention a permis la possibilité de transporter toutes sortes de marchandises.

Le transport maritime a grandement bénéficié de cette révolution et actuellement l'ensemble des ports mondiaux sont capables d'accueillir des conteneurs.

Cependant de nouvelles problématiques sont apparues, et une mise en place d'une logistique est devenue nécessaire pour mieux gérer le flux des conteneurs.

En fait, le mouvement des conteneurs n'est pas rentable lorsqu'il s'agit d'un retour à vide. Effectivement les échanges commerciaux sont inégaux car les importations venant de certains pays sont plus nombreuses que les exportations. De ce fait, il se crée un déséquilibre au niveau de la distribution des conteneurs entre les ports et un déficit commercial dans les mouvements de ces derniers.

Pour aider l'armateur des conteneurs dans la prise de décision dans le cas de retour des conteneurs vides, nous proposons dans ce travail, un modèle décisionnel.

Notre proposition présentée dans cette thèse, permet de prendre en charge les demandes clients qui nécessitent la disponibilité des conteneurs vides dans le port source où se présente le client. Dans le cas où la compagnie peut satisfaire le client, alors un traitement de cette demande est réalisé directement, tandis que si la compagnie n'a pas assez de conteneurs vides disponibles dans la zone de stockage pour répondre à la demande, l'armateur peut déclencher une recherche de ces conteneurs vides à moindre coût via le modèle décisionnel proposé dans cette étude. Le noyau du modèle proposé est articulé autour de trois algorithmes d'optimisation adoptés et adaptés pour notre cas d'étude.

Dans ce manuscrit, nous envisageons trois solutions pour le problème de retour des conteneurs vides transportés dans un réseau de transport maritime. La première solution est une solution approchée à base d'une seule solution avec l'algorithme de la Recherche Tabou [52]. La deuxième solution est aussi approchée mais basée sur une population de solutions en utilisant l'algorithme Génétique [62]. Finalement, la troisième solution est une solution exacte en utilisant l'algorithme de Branch & Bound [91].

Nos contributions rejoignent les travaux de recherche menés dans le secteur de l'aide à la décision [10], [11]. Plus précisément, nous nous intéressons à la logistique de retour des conteneurs vides dans un réseau transport maritime [12].

Notre objectif à travers cette thèse est de proposer un outil d'aide à la décision pour un armateur de conteneur afin de réduire les charges liés au transport des conteneurs vides. Cet outil propose des solutions optimales pour le retour des conteneurs vides. L'armateur décide d'adopter ou non l'une des solutions proposées par le système.

Organisation de la thèse

La présente thèse est organisée de la manière suivante :

La première partie de la thèse est une synthèse de l'état de l'art qui se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre aborde des généralités sur le transport dans son ensemble et spécialement le transport maritime conteneurisé en présentant les différentes terminologies et concepts qui sont liés à ce mode de transport.

Le deuxième chapitre expose quelques notions sur la logistique, notamment la logistique inverse où nous présentons un état de l'art sur les travaux liés à notre travail. Aussi, ce chapitre présente quelques travaux de la littérature sur le problème d'optimisation dans le secteur de transport maritime. Nous présentons ainsi les méthodes d'optimisation, particulièrement une classification de ces méthodes.

Le troisième chapitre présente les terminologies liées au domaine de l'aide à la décision à savoir : la décision, type de décision, et processus décisionnel, ensuite nous nous concentrons sur les systèmes d'aide à la décision. Une classification de tels systèmes a été donnée à la fin de ce chapitre.

La deuxième partie de la thèse est consacrée à la présentation de notre contribution à travers deux chapitres comme suit :

Le quatrième chapitre détaille notre contribution qui se résume en la proposition d'un système d'aide à la décision destiné à un armateur de conteneurs en proposant des solutions pour un retour optimal des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime.

Le cinquième chapitre présente des scénarios d'exécution en déroulant chacun des trois algorithmes adaptés pour la résolution du problème de retour des conteneurs vides traité dans cette thèse.

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale où nous ouvrons des perspectives et pistes de recherche à notre travail.

Finalement, la troisième partie de cette thèse expose sous forme d'annexes l'implémentation et la présentation du fonctionnement de l'application prenant en charge le modèle décisionnel proposé et le noyau d'algorithmes dédiés à la résolution du problème de retour des conteneurs vides.

Première partie : Synthèse de l'état de l'art

Rapport-Gratuit.com

Chapitre 1

Transport et conteneurisation

Ce chapitre est dédié à la présentation des systèmes de transport suivie par la description des différents concepts liés au domaine du transport maritime et la conteneurisation. Ceci s'avère nécessaire pour délimiter le cadre général de la problématique soulevée dans cette étude.

Plan

1.1	Introduction	23
1.2	Choix du moyen de transport	24
1.3	Transport Terrestre	25
1.3.1	Transport Routier	25
1.3.2	Transport Ferroviaire	26
1.4	Transport Aérien	26
1.5	Transport Maritime	27
1.5.1	La révolution du transport maritime	28
1.5.2	Les intervenants du transport maritime	28
1.5.3	La tarification de transport sur une ligne maritime	30
1.5.4	Le transport maritime de marchandises	31
1.5.5	Les types de navires	31
1.6	Conteneurisation	32
1.6.1	Naissance du conteneur et sa révolution	32
1.6.2	Principe de la standardisation	34
1.6.3	Structure physique d'un terminal maritime à conteneurs	36
1.6.4	Modes d'expédition des conteneurs	37
1.6.5	Processus de chargement / déchargement des conteneurs	38
1.6.6	Avantages et inconvénients de la conteneurisation	39
1.7	Conclusion	40

1.1 Introduction

En reliant le producteur et le consommateur, l'industrie du transport joue un rôle primordial dans l'activité économique de la chaîne de production. Le transport est le déplacement des objets, marchandise, ou individus d'un endroit à un autre.

Le transport représente le déplacement de personnes ou de biens d'un endroit à un autre. Les transports modernes constituent un système. Chaque sous-système (selon le mode de transport) est constitué d'une infrastructure, des véhicules (individuels ou regroupés en rames) ou de flux continus (pour les transports par conduites¹) et de techniques d'exploitation précises [81].

Un mode de transport est une forme particulière de transport qui se distingue principalement par le moyen de transport utilisé, et l'infrastructure qu'il met en œuvre. Lorsque plusieurs modes de transport sont associés pour assurer une opération de transport, on parle d'un transport multimodal.

Dans un sens plus général, un mode de transport est un moyen utilisé pour se déplacer du point source vers le point destination. Il existe différents modes de transport, tel que la voiture, la motocyclette et le vélo, qui sont des moyens de transports individuels. Il y a également les modes de transport en commun, tels que les bus, le métro, le train,... et bien d'autres. Il y a également les bateaux et les avions, qui sont en général des moyens de transport de masse utilisés pour le déplacement sur de longues distances.

Selon Vermot-Desroches [128], le transport n'est qu'une matérialisation des besoins d'interaction spatiale. La demande de déplacements est donc déterminée par des comportements d'activités des individus et renvoie donc à un ensemble complexe et spatialement varié d'activités telles que le travail, les loisirs, les achats et les résidences.

La Figure (1.1) [18] met en évidence que les déplacements urbains sont le résultat de la confrontation entre une offre de transport, le système physique de transport, et une demande de déplacements.

Pour transporter une personne ou une marchandise, il est possible d'utiliser successivement plusieurs modes de transport. Les raisons de coût, de rapidité et de sécurité guident le choix des modes de transport qui seront mis en œuvre. Parfois, c'est la géographie, le climat et plus généralement l'environnement (îles, montagnes, inondations, ...) qui nous guide dans le choix d'un mode de transport plutôt qu'un autre.

1. Le transport par conduites est obtenu par différence de pression à l'intérieur d'une infrastructure fixe, sans utilisation d'engin mobile.

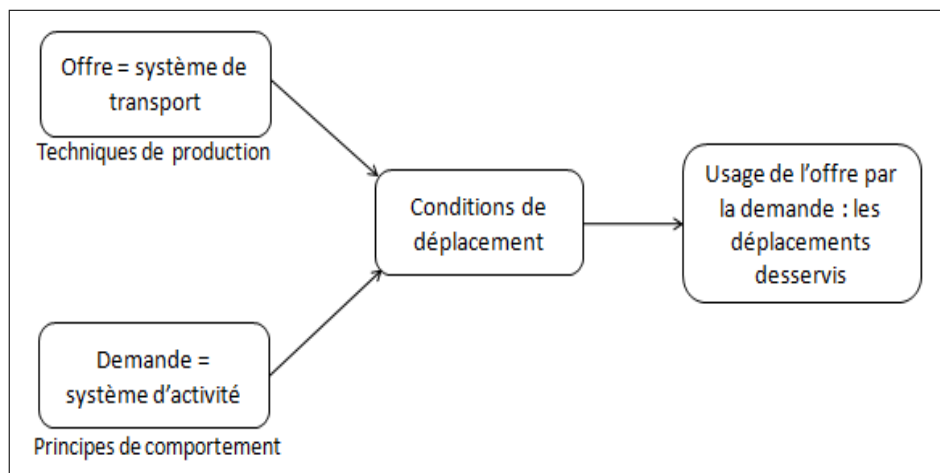


FIGURE 1.1 – Représentation du système de transport : la confrontation demande et offre de transport

1.2 Choix du moyen de transport

Pour toute opération d’acheminement, les entreprises exportatrices choisissent leur mode de transport en fonction de certains facteurs qui sont fonctions de la marchandise à transporter et de la disponibilité du mode de transport. Parmi ces facteurs [28, 5] :

1. La nature des marchandises (périssables, dangereuses, sèches, surgelées...) : elle permet de savoir si ces marchandises nécessitent des conditions particulières de transport ;
2. Le conditionnement et emballage des marchandises : transport de marchandises en vrac (solide, liquide ou gazeux), de marchandises conventionnelles (caisses, fûts, cuves, billes de bois, tubes,...) ou de marchandises conteneurisées ;
3. La quantité des marchandises à transporter : elle permet une estimation d’espace et de la capacité de transport nécessaire (taille, dimensions, nombre des véhicules de transport) ;
4. Le délai de livraison : pour classer les modes de transport en fonction de leur rapidité ;
5. Le coût : une analyse de coût permet d’identifier le moyen de transport qui est le plus réalisable et avantageux financièrement.

Le commerce mondial a connu une croissance vertigineuse ces dernières années, ce qui implique une augmentation des opérations de transport. En général, le transport représente un élément stratégique du système économique qui met en valeur la compétitivité du vendeur, et détermine le niveau de croissance des échanges commerciaux sur le plan international [5].

Par conséquent, nous pouvons dire que toute opération d’acheminement de marchandise, qu’elles soit au niveau national ou international, nécessite un moyen de transport. Ce transport

peut être fait par plusieurs modes qui sont classés selon les voies utilisées.

1.3 Transport Terrestre

Le transport terrestre regroupe le transport routier et le transport ferroviaire.

1.3.1 Transport Routier

Le transport routier est une activité réglementée de transport terrestre, qui s'exerce sur la route. Il englobe à la fois le transport routier de personnes et le transport routier de marchandises. Dans ce mode de transport, nous distinguons deux classes de transport :

Transport Inter-Urbain

Le transport interurbain vise à répondre aux besoins de transport à l'extérieur des agglomérations (villes). Ce sont des lignes express régionales et inter-régionales comme le TER français². Le transport de marchandises interurbain consiste à transporter la marchandise entre villes ou régions [108].

Transport Urbain

Le transport urbain correspond aux services s'effectuent à l'intérieur d'un seul Périmètre de Transport Urbain (PTU). Un PTU peut concerner le territoire d'une commune ou de plusieurs communes [118].

Un tel système de transport se situe à la jonction d'un système de localisation de l'habitat et des activités et d'un système complexe de pratiques et relations sociales. Il permet de couvrir une ville en répondant à ses besoins de transport selon ses transformations [17].

Le développement progressif du trafic urbain incite les grandes villes à donner priorité aux transports publics. Le transport urbain traite en réalité le transport individuel comme la voiture ou le vélo ainsi que de transports en commun. Autrement dit, le transport urbain concerne les divers moyens de transport qui sont propres à une ville ou un milieu urbain. Les systèmes de transport urbain sont classés en plusieurs catégories : les systèmes de transport non guidés et les systèmes de transport guidés tels que le tramway et le métro [25], [19].

Le réseau d'autobus est le système de transport non guidé le plus répandu. L'avantage du bus est de pouvoir contrôler son itinéraire. L'absence d'une infrastructure dédiée induit un coût d'exploitation peu important et permet de desservir des zones à faible densité de population. Les principaux inconvénients des systèmes de transport non guidés sont leur grande instabilité face à un événement instantané, leur totale dépendance vis-à-vis de la circulation routière,

2. Transport Express Régional est un réseau Français de trains de voyageurs et de cars, créé en 1986.

et leur gestion du personnel qui est lourde et difficile. Les inconvénients, de ce mode de transport, ont conduit les exploitants des grandes agglomérations à l'utiliser en complément d'autres systèmes guidés [25].

La principale caractéristique des systèmes de transport guidés est qu'ils sont exploités en sites propres. Ils mettent en œuvre des véhicules guidés par un moyen mécanique ou électronique. Par conséquent, ils ne sont pas totalement dépendant de la circulation. A la différence du métro qui dispose réellement d'un site propre, le tramway est plus ou moins dépendant de la circulation du fait qu'il emprunte généralement les voies routières [19].

Le transport routier est bien adapté pour le transport de marchandise grâce au transport porte à porte³, avec moins de manutention, délais relativement courts (grâce aux infrastructures routières et aux procédures douanières allégées), et un rapport vitesse/prix avantageux.

En revanche, le transport routier n'est pas recommandé pour les longues distances à cause de la sécurité et les délais qui dépendent des trajets parcourus et des conditions climatiques [60].

1.3.2 Transport Ferroviaire

Le transport ferroviaire de marchandises ou de personnes nécessite la mise en œuvre d'infrastructures de transferts, pour acheminer et transborder les personnes ou les biens jusqu'à leurs destinations. Le transport ferroviaire s'effectue sur des voies ferrées, ce qui comprend : le train, le métro et le tramway.

Pour que les trains de marchandises puissent traverser librement les frontières, il est indispensable d'avoir en place une interconnexion active des réseaux. Dans certains pays les réseaux ferroviaires sont nationaux et les liaisons trans-frontalières avec des pays voisins n'ont jamais été construites ou bien ils ne fonctionnent plus. En Europe, les différents réseaux ferroviaires nationaux sont plutôt bien interconnectés, mais la qualité des liaisons trans-frontalières est souvent moins bonne que celle des corridors nationaux [28].

Ce mode de transport est surtout avantageux pour le transport de marchandises. Il est bien adapté aux longues distances et aux tonnages importants tout en respectant des délais avec des prix compétitifs. Néanmoins, le transport ferroviaire est inadapté aux distances courtes. Souvent, il nécessite de la manutention pour un pré et un post acheminement de marchandises [28].

1.4 Transport Aérien

C'est un mode de transport apparu au cours du 20^{ième} siècle, d'abord réservé à une élite, il s'est rapidement démocratisé, monopolisant les liaisons transcontinentales [131].

3. Transport de marchandise à partir de lieu de production (usine) vers le lieu de consommation (client).

Le transport aérien est observé, contrôlé ou animé par des organisations comme l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). Ce mode de transport s'adresse principalement aux voyageurs, mais le transport de fret aérien se développe de plus en plus avec la mise en service des avions cargos spécialisés [104].

Le transport aérien est un transport de trafic régulier, il offre un transport rapide, sécurisé. Il est bien adapté pour les marchandises légères et périssables avec un emballage peu coûteux et des faibles primes d'assurances. Aussi, de nombreuses zones géographiques peuvent être desservies.

Malgré tous les avantages qu'il apporte, le transport aérien rencontre quelques limites à cause de la capacité de transport qui n'est pas grande, et la non adaptation pour certaines marchandises (dangereuses ou autres nécessitant des conditions particulières de transport).

1.5 Transport Maritime



Le transport maritime consiste à déplacer des marchandises ou des personnes pour l'essentiel par voie maritime, même si, occasionnellement ce transport nécessite des opérations pour le pré acheminement ou post-acheminement. Initialement, le transport maritime a été le moyen de découvrir et d'explorer les nouveaux continents (découverte de l'Amérique et exploration des pôles par exemple). Par la suite, Il a surtout permis de développer et d'intensifier le commerce international [5].

En effet, le transport maritime a connu un premier saut technologique au début du 19^{ème} siècle avec l'apparition de la machine à vapeur, qui permet d'accélérer les transports sur l'eau en s'affranchissant des contraintes naturelles (vents et courants) qui pouvant y'arriver sur les lignes maritimes [68]. Les possibilités de massification offerte par le transport maritime, ont permis une croissance des échanges commerciaux dans le monde. C'est un moyen de transport bien adapté aux matières pondéreuses transportées sur de longues distances par de gros navires.

Une grande part revient au transport maritime et en particulier le transport conteneurisé des marchandises. En effet, l'étude réalisée par l'Organisation des Nations Unies en 2009 sur le transport maritime, a montré que malgré la crise économique connue dans cette période, les échanges à l'échelle mondiale passent de plus en plus par voie maritime et parfois beaucoup plus dans le cas des pays en développement [130].

Le transport maritime est bien adapté pour tout type de marchandises, il est conseillé pour la marchandise volumineuse, lourde, non périssable et pour de longue distance à des prix compétitifs. Cependant, ce mode de transport offre un service avec un temps de transit plus longs. Aussi, il dépend de la route et du chemin de fer car il nécessite toujours le transport de pré et de post acheminement de marchandise [44, 5].

Dans les sous-sections qui suivent, nous nous dirigeons vers les concepts liés au transport

maritime qui représente le domaine de la présente étude.

1.5.1 La révolution du transport maritime

L'objectif de toute compagnie maritime est de pouvoir répondre à la demande croissante de la clientèle dans le domaine du transport. En effet, le secteur du transport maritime qui est privilégié pour le commerce international, a lui-même connu plusieurs révolutions qui ont concouru à une réduction des coûts de ce mode de transport [68]

Première révolution

Cette révolution est caractérisée par l'apparition de la conteneurisation grâce à l'initiative de l'opérateur américain, Malcom Mc Lean, à la fin des années 1950. Le transport des marchandises conteneurisé constitue une forme de standardisation dans le secteur maritime. Les conteneurs constituent des unités standards qui peuvent être chargés et déchargés plus rapidement. Aussi, leur stockage sur les portes-conteneurs est également plus facile pendant les périodes de transit.

Deuxième révolution

La deuxième révolution dans le transport maritime est celle du transport multimodal. En effet, pour atteindre une destination, la marchandise transportée dans un conteneur, doit emprunter successivement plusieurs moyens de transport : navire, route, chemin de fer, etc.

Troisième révolution

L'informatisation et l'automatisation représentent les caractéristiques majeures de cette troisième révolution, en permettant l'accélération de la circulation des documents nécessaires dans le transport maritime et la réduction des coûts traditionnellement associés.

1.5.2 Les intervenants du transport maritime

Dans le processus du transport maritime, plusieurs acteurs interagissent pour réussir cette opération [43, 5] :

L'armateur : c'est la personne qui s'occupe du transport maritime. Il peut être propriétaire, exploitant ou simple affréteur⁴ d'un navire, son rôle est de transporter les marchandises par voie maritime à partir du port d'embarquement (POL – Port of Loading) jusqu'à ce que cette dernière soit déchargée au niveau du port de déchargement (POD – Port of

4. À l'aide d'un contrat, l'armateur (fréteur) s'engage à mettre un navire à la disposition d'un affréteur pour le transport de marchandises ou de personnes.

Discharge), en temps et en bon état. L'armateur est en relation avec la plupart des autres intervenants.

- Les transitaires et les commissionnaires de transport ou les chargeurs qui sont des clients qui expédient leurs marchandises ;
- Les manutentionnaires qui effectuent les opérations portuaires ;
- Le remorqueur qui va assister la manœuvre du navire en le poussant, le tractant ou le freinant ;
- L'agent d'assurance maritime qui assure le navire, la cargaison et qui assume la responsabilité en cas d'accident.
- Les sociétés de réparation de conteneurs.

Les trois plus gros armateurs mondiaux, Figure (1.2)⁵, sont Maersk, MSC et CMA CGM, mais il en existe des dizaines.



FIGURE 1.2 – Armateurs mondiaux

Dans les ports où il n'est pas installé, l'armateur va confier sa mission à un agent maritime.

Le consignataire de navire (agent maritime) : C'est le représentant de l'armateur, il remplit les formalités administratives, et s'occupe de l'escale des navires (tous les besoins d'un navire : remorqueurs, réparations, relations avec l'administration maritime, etc). Aussi, il prend en charge le suivi des marchandises transportées, ainsi que les besoins de l'équipage (relève, visite médicale, etc) .

Le courtier maritime (Shipbroker) : Sa profession peut être divisée en deux fonctions distinctes :

A- Une activité commerciale : qui consiste à servir d'intermédiaire entre l'acheteur et le vendeur d'un navire neuf (entre un armateur et un chantier) ou un navire d'occasion (entre deux armateurs), soit pour la location (l'affrètement) d'un navire (entre celui qui a une marchandise à transporter et celui qui possède le navire approprié).

B- Une activité administrative, qui englobe le calcul des droits de port, la négociation dans la conclusion du contrat, et même dans l'exécution du contrat par la suite.

Le shipchandler : Il permet de ravitailler les navires (en tabacs, alcools, produits alimentaires et toutes autres demandes spécifiques.) .

5. www.lemarin.fr/articles/detail/items/alliance-maersk-msc-cma-cgm-un-geant-des-navires-geants.html

Le Non-Vessel-Operating Common Carrier (ou NVOCC) : C'est une invention de la pratique américaine. Il désigne un acheteur de capacités de transport maritime qu'il offre ensuite à ses clients sous sa propre responsabilité. Il procède souvent au groupage et dé-groupage des marchandises de divers clients mises dans un même conteneur.

Le chef de quai : Le chef de quai organise et veille sur le bon déroulement des opérations de réception, de tri et de livraison des conteneurs. Il gère une équipe de manutentionnaires, et choisit les méthodes de transport et de stockage appropriées.

Le transporteur de conteneur : Il assure les pré-acheminements et post-acheminements des conteneurs entre l'usine ou l'entrepôt et le port.

L'agent d'exploitation : Il planifie, organise le travail des personnels de conduite, et détermine les solutions techniques pour assurer le transport de marchandises. L'agent d'exploitation veille sur le bon déroulement de l'acheminement des marchandises et la satisfaction du client.

1.5.3 La tarification de transport sur une ligne maritime

De manière générale, le coût du transport maritime est fonction du volume transporté. De nos jours, les navires deviennent de plus en plus grand et ont des capacités de transport importantes. Par conséquent, une baisse régulière du coût unitaire d'un transport.

Pour déterminer le prix, le transporteur calcule le coût à la cellule (l'emplacement d'un conteneur, sur un porte-conteneurs). Pour cela, il considère les frais de fonctionnement du navire, équipage, assurances, les coûts inhérents à la route desservie, frais de passage portuaire, et les coûts éventuels de canaux.

Les surcharges tarifaires maritimes sont des frais perçus par les transporteurs en supplément du tarif négocié et qui dépendent d'un contexte spécifique.

BAF : Bunker Adjustment Factor : Cette surcharge tarifaire correspond aux fluctuations du cours du pétrole brut. Les compagnies maritimes ont commencé à l'appliquer suite au premier choc pétrolier de 1973.

CAF : Currency Adjustment Factor : Cette surcharge tarifaire correspond aux fluctuations du cours du dollar. La grande majorité des taux de fret maritimes étant calculés en dollars américains, les compagnies se couvrent contre les risques de change grâce à cette surcharge.

THC : Terminal Handling Charge : Les THC représentent les frais de manutention au port de chargement et de déchargement. Le montant peut en être fixe dans le cas d'un conteneur ou variable dans le cas de fret non conteneurisé (selon la taille ou le poids).

ORC : Origin Receipt Charge : Cette surcharge est payable uniquement au départ des ports de Chine. Elle permet de financer le développement très rapide des ports chinois.

Port Congestion : Un navire se présentant dans un port congestionné devra attendre,

parfois plusieurs jours, avant de pouvoir décharger sa cargaison. Les compagnies appliquent donc une surcharge afin de compenser cette « perte de revenus ».

1.5.4 Le transport maritime de marchandises

Le transport maritime, par ses possibilités de massification du transport de marchandises, a facilité la croissance des échanges dans le monde. Réellement, le transport des marchandises s'impose dès qu'il y a une activité commerciale.

Réduire le coût de ce transport, constituait un souci majeur pour des transporteurs. En effet, les navires sont de plus en plus grands, dont le but est de transporter des quantités de marchandises beaucoup plus importantes. Néanmoins, cette situation pose un problème du changement d'échelle concernant le volume de marchandises transportées sur terre (opérations de pré et post acheminement) et sur mer. Ce problème ne peut être résolu que par la mise en place des zones de stockage au niveau des ports ou bien par la transformation des matières importées sur place dans les zones industrialo-portuaires . L'une des solutions retenues est la spécialisation des navires selon le type de cargaison (pétrolier, méthanier, bananier, minéralier, vraquier, porte-conteneurs, etc.) [68].

Dans ce qui suit, nous présentons les différents types de navires ainsi que leurs caractéristiques.

1.5.5 Les types de navires

Le navire est un véhicule spécialement conçu pour le transport des passagers et des marchandises par voie marine. Il appartient généralement à un armateur qui peut l'exploiter directement sur des lignes maritimes régulières ou le louer à un affréteur. plusieurs types de navires peuvent être distingués :

Les navires de transport de charge

Les navires de charge représentent les navires transportant des marchandises, qui regroupent eux-mêmes deux types de navires selon la nature de leur cargaison :

1. Les bateaux de transport de marchandises sèche : ce type de navire regroupe les portes-conteneurs (des navires spécialisés dans le transport des conteneurs), les cargos de divers (des navires polyvalents pouvant transporter pratiquement n'importe quel produit sec), les vraciers (des navires qui transportent tout ce qui est solide en vrac, contenu dans de grandes cales), des rouliers (Roll on - Roll off ou Ro-Ro : Ces navires transportent des charges généralement lourdes et encombrantes comme le matériel de travaux publics qui peuvent être chargés par roulage).
2. Les bateaux de transport de produits liquides et gazeux (navires citernes) : En général, cette catégorie comprend les navires transportant le pétrole, les produits chimiques,

les produits alimentaires liquides ainsi que les navires gaziers.

Les navires de transport de personnes

Les navires à passagers comprennent eux-mêmes deux grands types de navires :

1. Les navires de croisières (cruising ships) : Ce sont généralement de grands navires, capables de transporter le plus souvent plusieurs milliers de passagers à travers toutes les mers du monde.
2. Les transbordeurs ou car-ferries ou ferries (ferry-boats) : Ce sont des véhicules exploités pour des trajets très courts selon des horaires réguliers. Ce sont des navires transportant plusieurs centaines de passagers, de nombreuses voitures et des dizaines de poids lourds.

La section suivante est consacrée à la présentation de la conteneurisation qui a permis une révolution économique remarquable pour le commerce international.

1.6 Conteneurisation

Au début du 19^{ième} siècle, la recherche d'un système d'emballage standard et sécurisé pour les marchandises transportées par voie maritime constituait un souci des marchands, des chargeurs et des transporteurs.

En effet, dès les années 1970, les armateurs maritimes ont cherché à limiter les délais d'escale des navires dont le but est de gagner du temps et satisfaire une clientèle de plus en plus exigeante sur la qualité du service.

Le transport conteneurisé représente un outil avantageux et indispensable dans la chaîne logistique des réseaux de production et de distribution à une échelle mondiale. Le conteneur permet une livraison des marchandises porte à porte, de l'entreprise (usine) au magasin de distribution (client). Les armateurs de lignes maritimes régulières qui exploitent les portes-conteneurs et gèrent les parcs de conteneurs, font des efforts d'organisation pour pouvoir optimiser le fonctionnement des réseaux de transport maritimes [44].

D'après les armateurs, le conteneur permet de réduire non seulement le temps de chargement et de déchargement, mais aussi, il constitue un moyen pour mieux protéger la marchandise pendant le temps de transit [5].

1.6.1 Naissance du conteneur et sa révolution

L'idée de la conteneurisation est apparue dans les années cinquante aux États-Unis par Malcolm Mac Lean, l'entrepreneur qui affrétait le navire Ideal-X. Ce dernier ne connaissait rien sur les bateaux et le transport maritime en transportant sa première cargaison. Son but était de casser les prix et contourner la réglementation américaine, qui imposait des tarifs

de transport de marchandises par camion. Effectivement, Malcolm Mac Lean, avait l'idée de charger uniquement les remorques des camions avec une grue au lieu de charger tout le camion en entier sur un bateau occupant de la place inutilement.

L'expérience a commencé exactement le 26 avril 1956, dans le port de New York, où une grue chargeait 58 remorques des camions dans le bateau Ideal-X qui date de la seconde guerre mondiale, 5 jours plus tard, l'Ideal-X débarquait au port d'Houston, et attendu par 58 camions prêts à accrocher les remorques et transporter les marchandises à leur destination. C'était une expérience réussie, et Mac Lean a franchi le pas vers le monde de la conteneurisation [126].

Face aux multiples avantages du conteneur, les pays développés, ont opté pour son usage et son expansion. La conteneurisation s'est concentrée "principalement sur quelques grands flux représentant environ 70 % du trafic articulé autour des Etats - Unis, d'Europe et de l'Extrême-Orient. Progressivement, les pays en voie de développement ont essayé de s'adapter à ce nouveau type d'emballage pour le transport de marchandises.

La croissance du commerce international en volume de marchandise transportée par voie maritime et de la flotte mondiale, illustre la relation d'interdépendance entre le transport maritime conteneurisé et l'économie, Figure (1.3) [44].

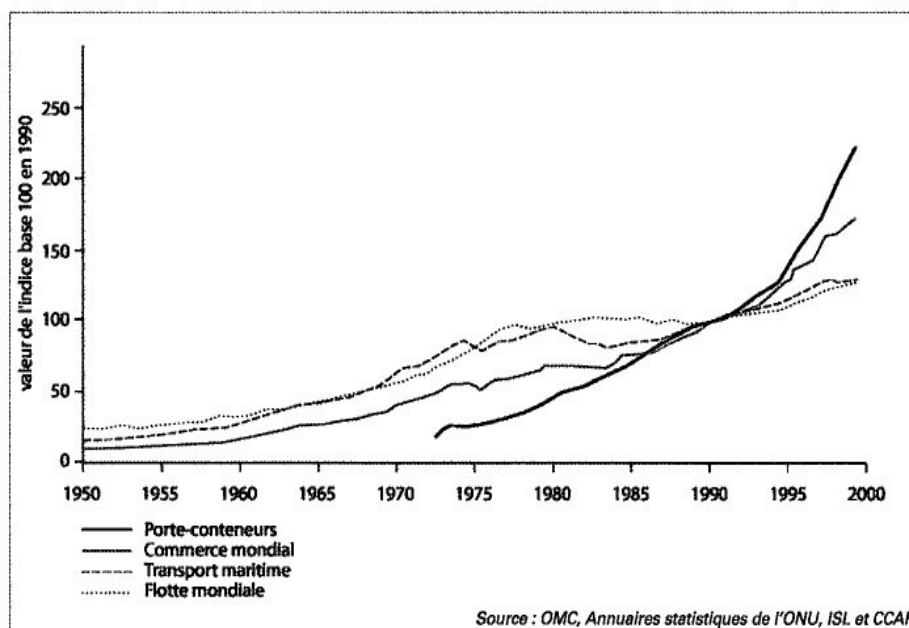


FIGURE 1.3 – La croissance du commerce international utilisant le transport maritime conteneurisé

1.6.2 Principe de la standardisation

Le transport conteneurisé a entraîné une baisse des coûts en réduisant les opérations de manutention, la casse des produits ainsi que le vol. La chaîne logistique a été simplifiée et le produit est transporté dans le conteneur de porte-à-porte.

Afin de pouvoir assurer son rôle dans le transports mondial, le conteneur doit être transporté indifféremment par n'importe quel mode de transport (la route, les rails ou la mer) et être repérable à toutes les étapes de la chaîne logistique de transport. L'utilisation de conteneur implique l'application de quelques règles précises répondant aux normes de résistance et de dimensions.



FIGURE 1.4 – Aspect technique du conteneur

1. Les dimensions

Un conteneur est une boîte rectangulaire de dimension universelle, Figure (1.4), selon la normalisation internationale qui représente la clé de succès de la conteneurisation. L'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) a codifié la construction des conteneurs sous les normes ISO 668 et ISO 1496. Ces normes concernent non seulement les dimensions intérieures et extérieures des conteneurs mais aussi, les règles de construction pour garantir la sécurité de la manutention et de transport [126].

Selon la norme ISO établie en 1967, trois grandes séries de conteneurs peuvent être distinguées, dont la longueur est respectivement de 20 pieds ou Équivalent vingt pieds EVP (Twenty-foot Equivalent Unit TEU), 30 pieds et 40 pieds, Table (1.1).

	Longueur (m)		Largeur (m)		Hauteur (m)	
	Interieure	Exterieur	Interieure	Exterieur	Interieure	Exterieur
20 pieds	5, 867	6, 058	2, 330	2, 438	2, 350	2, 591
40 pieds	11, 998	12, 591	2, 330	2, 438	2, 350	2, 591

TABLE 1.1 – Dimensions universelles des conteneurs.

2. Les normes de construction

- Le plancher : en bois d'une épaisseur de 28 mm, résiste au passage de chariots de plus de 5 tonnes.
- L'armature : constituée de cadre en acier de 5 mm, permet de supporter le poids de 5 autres conteneurs posés par-dessus, reposant uniquement sur les 4 coins du conteneur.
- Le toit : en acier, épais de 1,5 mm doit pouvoir supporter une charge de 300 kg sur une surface de 60 cm x 30 cm sans subir aucune détérioration .
- Les pièces de coin : la particularité des conteneurs réside dans les pièces de coin (coins ISO). Chacun des huit coins du conteneur est sous forme d'un cube en acier percé sur trois côtés et bien ajusté pour être fixé sur le conteneur.

3. **Le marquage d'un conteneur** En 1969, le BIC (Bank Identifier Code) a proposé un code d'identification internationale des conteneurs. Ce code a été normalisé par ISO 6346, où chaque conteneur est identifié par un numéro qui lui est propre tout au long de la durée de son existence, Figure (1.5). Ce numéro est composé de :

- Un code de propriétaire ou opérateur (armateur) de 4 à 7 lettres.
- Un numéro de série de 6 chiffres.
- Un chiffre d'auto-contrôle destiné à valider l'exactitude de l'enregistrement et la transmission de données.

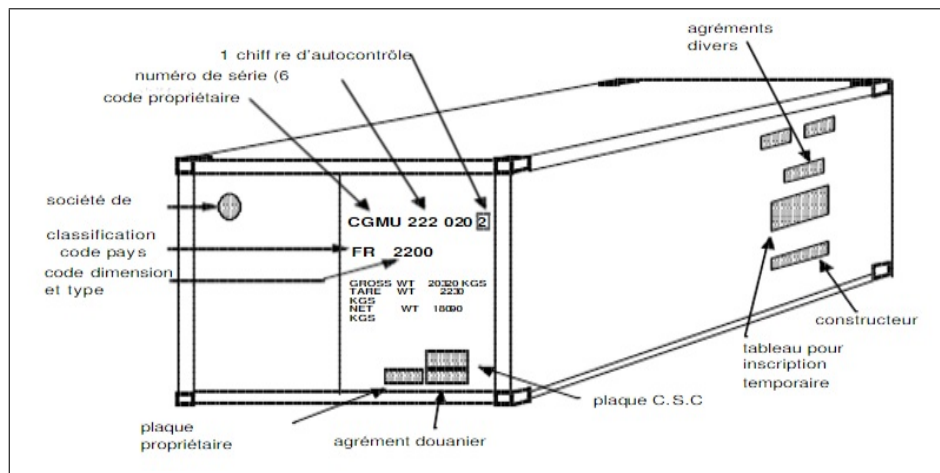


FIGURE 1.5 – Marquage de conteneur

Grâce à la standardisation de la taille et des accroches des conteneurs, ces derniers sont manipulés, de manière souvent automatisée. Ces conteneurs sont principalement destinés aux transports des produits manufacturés mais peuvent aussi transporter d'autres produits : fruits et légumes, produits alimentaires finis, liquides ou voitures en utilisant alors des conteneurs spécialisés - citernes, réfrigérées ou autres - mais toujours aux dimensions standards.

Les conteneurs de 20 et 40 pieds de longueur (environ six et douze mètres) sont les plus utilisés. Ils servent au transport des marchandises dites sèches, conditionnées en caisses, cartons, balles, palettes, etc. Mais d'autres conteneurs plus spécifiques ont été créés comme les conteneurs-citernes et les conteneurs frigorifiques. Le conteneur standard de 20 pieds sert comme une unité de référence pour estimer la capacité de stockage d'un navire et évaluer les flux sur une ligne maritime régulière.

1.6.3 Structure physique d'un terminal maritime à conteneurs

Un terminal maritime de conteneur peut être divisé en trois zones. Chaque zone est responsable de certaines opérations réalisées. La Figure (1.6) représente la structure physique d'un port maritime spécialisé dans la manutention des conteneurs [35].

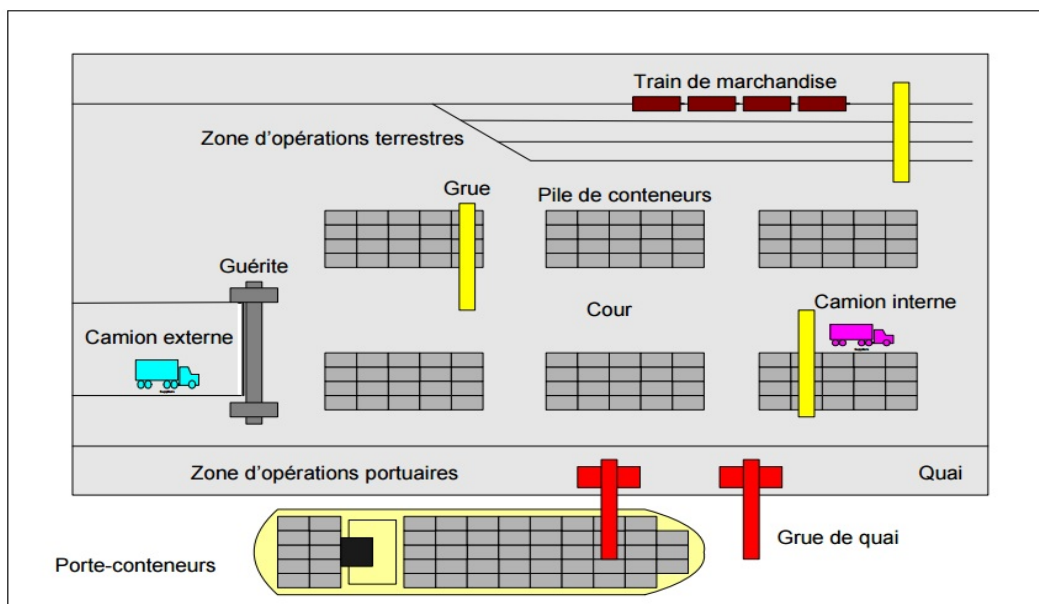


FIGURE 1.6 – Disposition d'un terminal maritime à conteneurs

Zone d'opérations portuaires

Cette zone permet le transfert des conteneurs entre le navire et le terminal. Elle comporte l'équipement manipulé (les grues de quai) pour le chargement et déchargement des conteneurs

ainsi que les différentes opérations entre le quai et la zone de stockage du terminal.

Le taux d'occupation du quai qui signifie sa capacité opérationnelle (réelle) par rapport à sa capacité théorique (physique) est déterminée par la longueur du navire et sa durée de séjour dans le terminal [135].

Le taux d'utilisation détermine le rapport de la capacité réelle du quai sur sa capacité théorique. Le terminal ne peut se fier seulement à la variable temps pour déterminer le taux d'occupation du quai mais aussi à la variable distance (distance entre les navires sur le quai).

Zone de stockage du terminal

La zone de stockage est la zone où sont déposés les conteneurs lorsqu'ils sont déchargés d'un navire ou bien en attente pour être chargés. Cette zone intermédiaire pour absorber temporairement le flux des conteneurs en provenance et à destination des navires et les autres moyens de transport. Aussi, cette zone permet de faire une opération de tri de conteneurs selon différents critères afin de faciliter les opérations dans les autres zones.

Zone d'opération terrestre

Dans cette zone sont effectués toutes les opérations de réception et d'expédition des conteneurs. Elle représente une interface entre le terminal maritime et les autres moyens de transport (les camions, les trains) pour le pré ou post acheminement.

1.6.4 Modes d'expédition des conteneurs

D'après [68], une marchandise peut être empotée dans un conteneur selon deux façons :

- Conteneur complet FCL (Full Container Load) : la solution la plus répandue où toute la marchandise appartient à un même client qui loue le conteneur.
- Groupage maritime LCL (Less than Container Load) : cette méthode est utilisée pour les petits envois. Dans ce cas, les lots de marchandises seront regroupés afin de remplir un conteneur complet.

Pour toute opération d'expédition de conteneur, il existe quatre modes principaux [84] comme illustré sur la Figure (1.7)⁶ :

- FCL/FCL : Conteneur complet du lieu de départ au lieu d'arrivée, soit 1 expéditeur et 1 destinataire.
- FCL/LCL : Conteneur complet au lieu de départ pour différents destinataires à l'arrivée, on doit dégroupier une fois le conteneur est arrivé à destination, soit 1 expéditeur et plusieurs destinataires.
- LCL/FCL : Conteneur chargé de plusieurs lots de marchandise qui appartiennent à des fournisseurs différents mais destinés au même destinataire.

6. <http://slideplayer.fr/slide/2270456/>

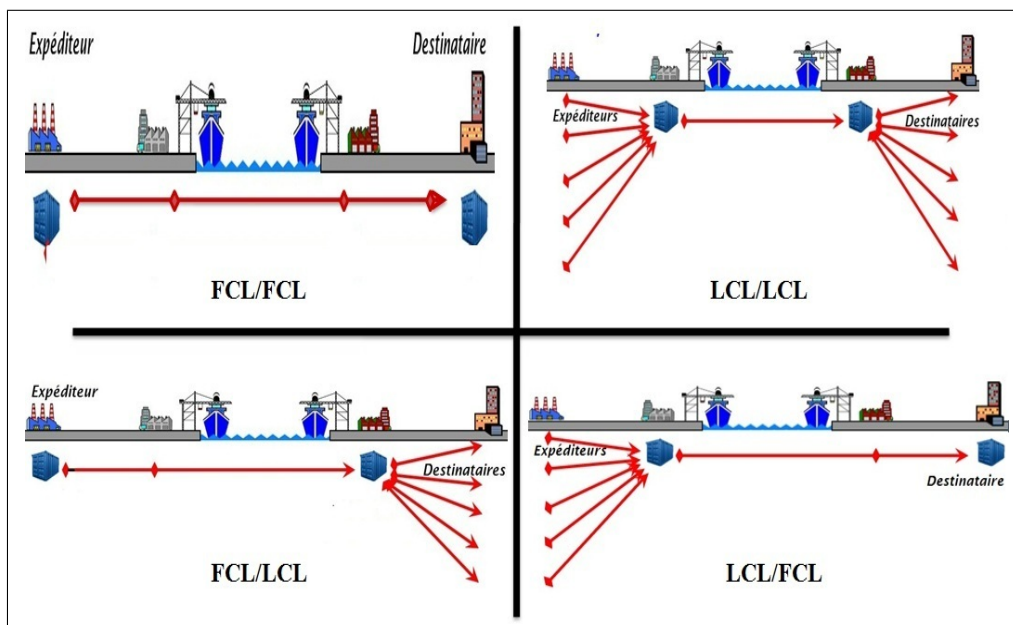


FIGURE 1.7 – Modes d'expédition des conteneurs

- LCL/LCL : Conteneur chargé de plusieurs lots de fournisseurs différents pour être livré après dépotage à différents destinataires.

1.6.5 Processus de chargement / déchargement des conteneurs

Le transport de la marchandise dans un réseau de transport maritime passe par un processus de chargement et déchargement des conteneurs au niveau du terminal à conteneurs (quais et zones de stockage), Figure (1.8), selon le type de marchandise, comme suit [68] :



FIGURE 1.8 – Chargement et déchargement des conteneurs

1. Déchargement des conteneurs lors de la réception

- Placer les navires au niveau du quai au regard des portiques (grues de quai pour soulever les conteneurs) ;
 - Désarrimer les conteneurs qui sont liés les uns aux autres par les pièces de coin durant la traversée ;
 - Fixer les verrous permettant d'accrocher et de soulever le conteneur par les portiques ;
 - Commencer le déchargement des conteneurs ;
 - Ranger les conteneurs dans la zone de stockage ou placement sur remorque ou wagon ;
- Une fois le déchargement terminé, les manœuvres s'inversent pour commencer le chargement des conteneurs à bord du navire.

2. Chargement des conteneurs pour une livraison

- Contrôler l'état des conteneurs (extérieur/intérieur) ;
- Spécifier le type de conteneur suivant la marchandise transportée ;
- Affecter les marchandises à des emplacements précis en fonction de leurs destinations ;
- Identifier les conteneurs qui quittent le port ;
- Organiser le plan de chargement sur le navire ;
- Veiller à ce que la stabilité du navire soit respectée ;

L'ensemble des opérations de transport de fret, ainsi que tous les services impliqués dans la réception, la livraison et la manutention des biens pour que ceux-ci soient livrés au moment voulu chez le destinataire constitue la logistique du transport qui fera l'objectif du prochain chapitre.

1.6.6 Avantages et inconvénients de la conteneurisation

Selon [68], le déplacement des marchandises par conteneurs à plusieurs avantages comme le suivi et la sécurité contre les vols lors du transport. Néanmoins la conteneurisation présente

quelques points négatifs tel que le coût d'investissement qui provoque une adaptation difficile pour les pays en cours de développement. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des conteneurs peuvent être synthétisés dans le tableau (1.2).

Avantages	Inconvénients
<ol style="list-style-type: none"> 1. Sécurité de l'expédition de la marchandise. 2. Meilleur suivi et plus grande traçabilité. 3. Protection contre le vol, les chocs et les intempéries 4. Économie sur l'emballage et l'assurance. 5. Résolution des problèmes de stockage de la marchandise. 6. Rapidité des opérations de manutention. 7. Évacuation rapide et régulière de la marchandises. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Investissement coûteux. 2. Besoin de manutentions. 3. Adaptation difficile pour les pays en voie de développement concernant et les ports, les moyens de transport. 4. Déséquilibre des flux de marchandises. 5. Nécessité d'une protection préventive comme la ventilation pour certaines marchandises. 6. Déséquilibre de la distribution des conteneurs. 7. La conservation de flux de conteneurs entre les ports du Réseau de Transport Maritime (RTM) n'est pas respectée.

TABLE 1.2 – Avantages et inconvénients des conteneurs

1.7 Conclusion

De nos jours, le commerce évolue de plus en plus rapidement est spécialement au niveau international. Cette évolution massive nécessite un réseau de transport pour pouvoir produire des biens et les transférer du producteur vers le consommateur et répondre à ses besoins qui ne cessent d'accroître avec le temps et l'évolution technologique. Ceci constitue une chaîne logistique, où le transport représente un mécanisme indispensable pour assurer la satisfaction des clients dans cette chaîne.

Ce premier chapitre a été l'occasion de fournir une vue d'ensemble sur le transport en général. Nous avons présenté spécialement, les différentes terminologies et concepts liés au transport maritime conteneurisé qui représente le cadre général de notre étude, et ce dans le but de contourner et de maîtriser la problématique abordée.

Comme nous le constatons, la conteneurisation dans le transport maritime a apporté plusieurs avantages cités précédemment. Cependant, les armateurs des conteneurs sont face à un problème majeur, qui est le déséquilibre au niveau de la distribution des conteneurs sur le réseau de transport maritime. Cette situation n'est qu'une conséquence des conteneurs qui sont envoyés et ne sont pas retournés à l'origine, que nous considérons comme étant le flux

de retour ou logistique inverse des conteneurs vides dans cette étude.

Dans le chapitre qui suit, nous allons se rapprocher de ce contexte, en présentant la logistique de retour dans l'industrie maritime et en détaillant les outils d'optimisation qui peuvent être utiles pour la résolution de tels problèmes..

Rapport-Gratuit.com

Logistique inverse dans le transport maritime conteneurisé

Dans ce chapitre, nous commençons d'abord par introduire la logistique en générale, par la suite, nous nous dirigeons vers la logistique inverse, le cadre qui englobe cette étude, où nous présentons un état de l'art concernant les travaux qui ont été proposé dans la littérature. Également, nous présentons quelques travaux existants à propos l'optimisation dans le secteur maritime. Ensuite, nous détaillons les méthodes de résolution pour le problème d'optimisation, spécialement le problème de retour des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime qui représente l'intérêt de cette étude.

Plan

2.1	Introduction	43
2.2	Logistique	43
2.3	Logistique inverse	44
2.4	Optimisation dans le secteur de transport maritime	49
2.5	Synthèse	53
2.6	Méthodes d'optimisation	54
2.6.1	Classification des méthodes d'optimisation	54
2.7	Conclusion	63

2.1 Introduction

Le transport maritime est l'un des modes de transport le plus important pour le transport des marchandises. En effet, depuis le milieu des années soixante, un nouveau concept s'est intégré dans le marché de transport par mer : celui des conteneurs maritimes.

Le transport maritime conteneurisé couvre l'essentiel des matières premières (pétrole et produits pétroliers, charbon, minerai de fer, céréales, bauxite, alumine, phosphates, etc.). À côté de ce transport en vrac, il couvre également le transport de produits préalablement conditionnés se présentant sous forme de cartons, caisses, palettes, ce que l'on a coutume d'appeler de la marchandise diverse.

La conteneurisation a connu un essor remarquable depuis sa création, elle a permis une révolution à la fois dans le mode de transport ainsi que pour toute la chaîne logistique depuis le fournisseur jusqu'au client final ou consommateur.

Quelque soit le domaine d'activité : industrie, santé, transport ou autre, la performance de l'entreprise a une forte influence sur la satisfaction de ses clients. Avec l'avancement technologique dans l'environnement d'aujourd'hui où tout va très vite, une logistique pertinente est indispensable pour établir les démarches nécessaires avec des partenaires éloignés et pouvoir aboutir à une stratégie particulièrement efficace.

Une optimisation de la chaîne logistique peut permettre non seulement d'améliorer la performance économique et écologique mais aussi elle représente une source de gains de productivité et d'efficacité pour les entreprises concernées. Optimiser une chaîne logistique consiste à mettre en place les solutions requises pour mieux coordonner et mobiliser les différents services de l'entreprise d'une part, et d'autre part d'optimiser la gestion et la mise à disposition des ressources correspondant aux besoins afin d'atteindre les objectifs visés.

2.2 Logistique

Le terme logistique est d'origine militaire apparu aux environs du 19^{ème} siècle. Il s'agissait de l'organisation du ravitaillement des militaires dans le but de conserver leurs capacités opérationnelles.

La logistique est le moyen qui permet de réaliser les différentes tâches relatives à l'activité de l'entreprise, avec une prise en compte des conséquences de ces tâches sur la performance globale de l'entreprise. C'est une gestion efficace du flux physique et du flux d'informations d'une entreprise, dont le but est de livrer le produit souhaité, dans les meilleurs délais, avec un bon prix pour satisfaire le client.

Une chaîne logistique est représentée par l'ensemble des entreprises (maillons de la chaîne) interdépendantes qui se coordonnent pour la réalisation des activités (approvisionnement de matière première, production et distribution) et assurer la circulation des produits ou services

à partir de leur conception jusqu'à leur livraison aux clients, Figure (2.1) [34].

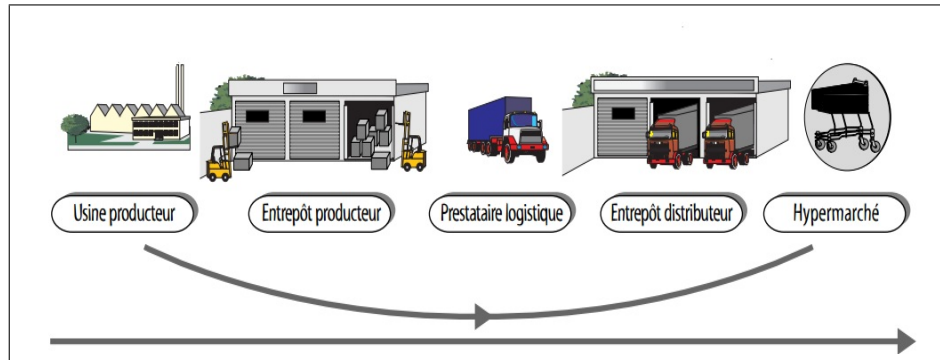


FIGURE 2.1 – La chaîne logistique : flux de produit de l'usine vers le consommateur

Dans une chaîne logistique, on distingue deux catégories de flux logistiques : .

1. Flux logistique interne à l'entreprise : il représente le flux de production d'une entreprise, sa concerne la circulation de matières et composants dans le milieu de fabrication.

2. Flux logistiques externes : nous pouvons distinguer un premier flux d'approvisionnement (flux en amont de la fabrication) qui concerne la circulation des matières et consommables depuis le magasin du fournisseur jusqu'au magasin de l'entreprise de production. Et un second flux de distribution (flux en aval de la fabrication) qui représente le cheminement des produits finis ou semis finis de l'entrepôt de l'entreprise jusqu'à ce lui d'une autre entreprise cliente de commerce ou consommateur. Les flux (en amont et en aval de fabrication) de la logistique externe sont assurés par un ensemble d'opérations : d'emballage, de manutention, de transport et de stockage des produits.

Pour conclure, il n'existe pas une définition précise ou universelle de la logistique. La plupart des définitions synthétisées dans les travaux de [26] et [34] mettent le point sur le fait que la logistique est une fonction transversale qui assure la coordination entre l'offre du fabricant et la demande du client et qui garantit les liens des flux physiques et d'informations entre les différents intervenants. Aussi, pour satisfaire le client d'une entreprise, une logistique fiable est soumise à des exigences de livraison du produit voulu au bon endroit, dans les meilleurs délais, avec un meilleur rapport qualité / prix.

2.3 Logistique inverse

Selon [96], la logistique inverse est considérée comme « *le mouvement des produits du consommateur vers le producteur à travers une chaîne de distribution* ». Une autre définition plus précise de [36] qui dit que « *la logistique inverse répond à la nécessité de retirer du service les produits après usage et de les traiter en les détruisant, en les transformant ou en les recyclant, dans le but de réduire les coûts en valorisant les produits récupérés et, de plus*

en plus, dans le but de répondre aux exigences du respect de l'environnement ».

Landrieu [74] remarque quelques difficultés au niveau de la logistique inverse, Figure (2.2) :

1. La collecte et les transports ;
2. L'identification des produits et le tri ;
3. Les opérations de traitement pour la récupération ;
4. Le basculement du flux poussé au flux tiré ;
5. La détermination d'une dotation globale.

Certaines sont d'ordre tactique, d'autres du niveau opérationnel.

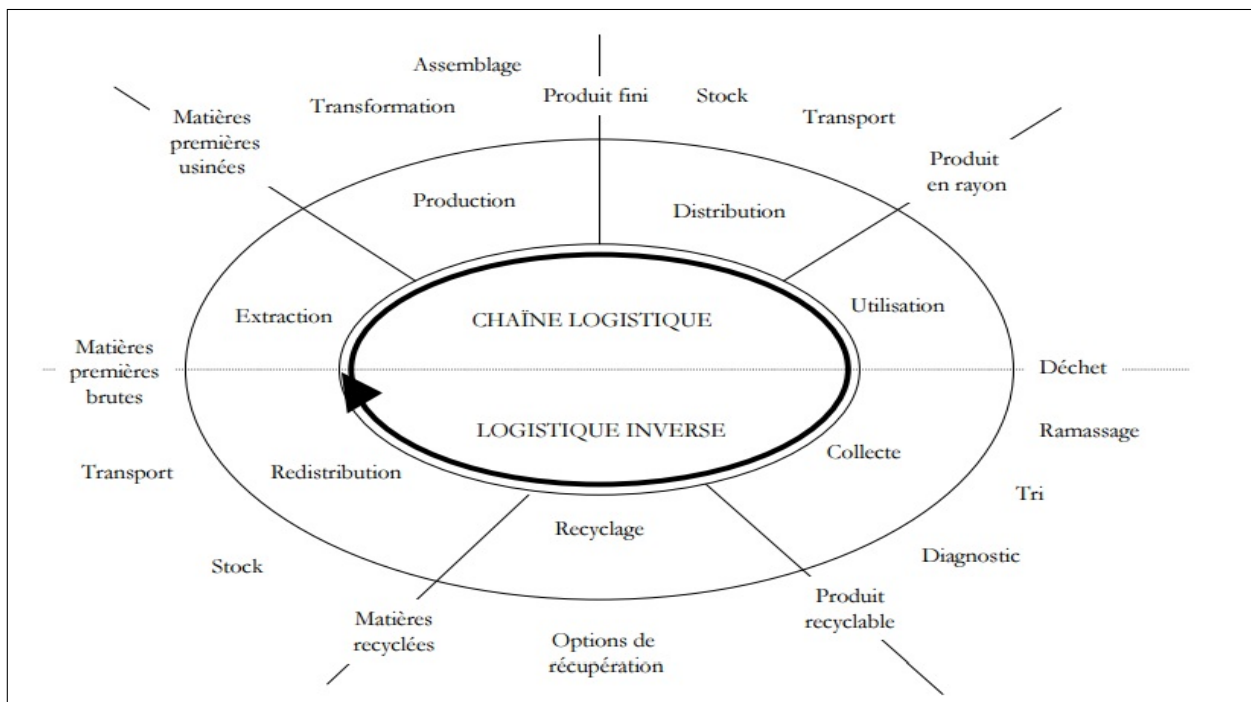


FIGURE 2.2 – La logistique inverse

La logistique inverse comprend plusieurs étapes comme le montre la Figure (2.3) [72] :

Première étape : C'est l'entrée dans le système de logistique inverse. Tibben-Lembke et Rogers [125] considèrent que cette étape est cruciale pour réussir à gérer le système de retour et assurer sa rentabilité, en séparant les produits défectueux ou sans garantie dès leur arrivée.

Deuxième étape : Cette étape représente la collecte des produits retournés. Elle permet de récupérer le produit auprès du client peu importe qu'il soit externe ou interne.

Troisième étape : L'étape de tri consiste à décider vers où le produit sera acheminé pour la prochaine étape. Cette étape exige que le produit retourné doit être examiné ou testé pour déterminer son état. Ensuite, une décision concernant sa disposition sera prise.

Quatrième étape : Dans cette étapes deux choix de disposition sont présentés : le renouvellement ou le retrait. Pour le renouvellement, différents choix ont été proposé dans [125], comme le montre la Figure (2.3).

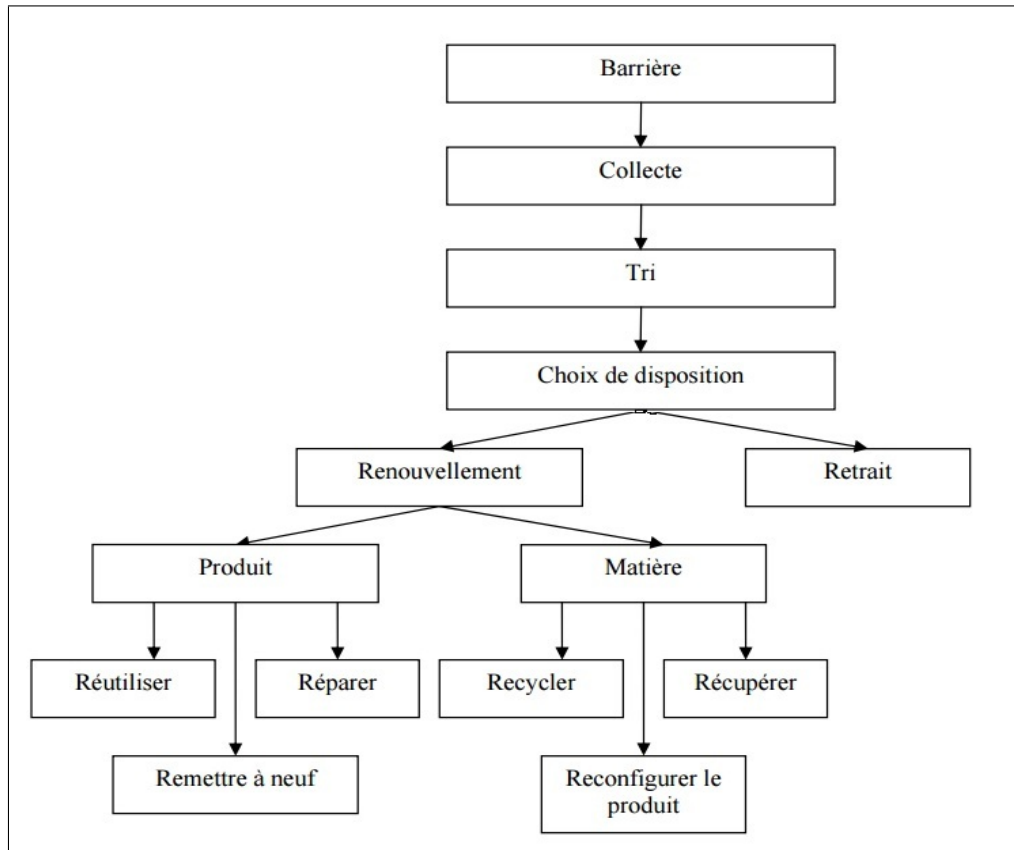


FIGURE 2.3 – Étapes de la logistique inverse

La table (2.1), synthétise quelques points de différence entre la logistique traditionnelle (directe) et la logistique inverse [105].

De nos jours, et avec l'évolution technologique, l'informatique est devenu un outil indispensable à toute entreprise qui ne veut pas rester en marge de la mondialisation. C'est un moyen dont toute entreprise doit disposer pour son développement interne et externe. En effet, la gestion de l'information dans une entreprise est considérée comme un noyau dans la gestion logistique, car si la performance de la logistique peut être jugée sur la base de la vitesse, la fiabilité et le coût global de circulation des flux physiques, elle ne s'améliore que grâce à un travail basé sur le flux d'information en relation avec le flux physique de l'entreprise.

À court terme, la logistique d'entreprise vise l'optimisation du flux physique, par contre, sur un moyen à long terme, son objectif est de mettre en place des plans pour optimiser les paramètres de production, de transport, et de stockage, ainsi que de gagner du temps et donc de l'argent, d'où l'intérêt de l'outil d'informatique au sein d'une entreprise qui permet une

Aspects	Logistique directe	Logistique inverse
Prévision	Relativement simple	Plus difficile
Distribution	Claire (un à plusieurs)	Pas claire (plusieurs à un)
Emballage des produits	Uniforme	Non uniforme
Chemin	Défini	Indéfini
Prix	Relativement uniforme	Dépend de plusieurs facteurs
Coût de distribution	Facilement identifiable	Difficilement identifiable
Gestion des stocks	Cohérente	Incohérente
Négociation	Directe entre les parties	Complicé
Marketing	Bien connu	Complicé selon plusieurs facteurs
Visibilité du processus	Plus transparent	Moins transparent

TABLE 2.1 – Différence entre la logistique inverse et la logistique directe.

meilleure gestion de flux d'information relative au flux physique.

La logistique inverse a des besoins assez variés dont le but est de bien gérer le flux de retour et pouvoir prendre des décisions rapidement et efficacement pour l'intérêt de l'entreprise. Par conséquent, l'évolution des technologies de l'informatique et de la communication a poussé la plupart des praticiens et chercheurs à proposer plusieurs travaux dans le domaine de la logistique et spécialement la logistique de retour ou inverse.

Le travail de Gupta et Veerakamolmal [55] propose un modèle analytique basé sur une méthodologie nommé "Components Requirements Planning" (CRP), dont le but est de donner à l'entreprise une façon économique de récupération des produits en déterminant le nombre de composants requis afin de remettre à neuf les produits retournés à chaque période de temps.

En 2001, Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard, et Wassenhove [38] ont proposé une programmation linéaire mixte en nombre entier pour le traitement du problème classique de localisation d'un entrepôt avec des caractéristiques spécifiques d'un réseau de récupération de produits retournés. Ils ont considéré que seulement une partie des produits récupérés pourront servir et les autres sont disposés sans tenir compte de la capacité de l'entrepôt.

Aussi, Shih [110] a proposé un modèle en programmation linéaire mixte qui permet de déterminer le nombre et l'emplacement des nouvelles installations pour le recyclage d'appareils ménagers et d'ordinateurs personnels à Taiwan. Ce modèle maximise les revenus de la vente des matériaux récupérés en minimisant le coût total de la logistique inverse (coût de transport, coût des opérations, coûts de traitement, et coût d'enfouissement des déchets industriels).

En 2002, Un modèle analytique linéaire à temps discret a été proposé par Hu, Sheu, et Huang dans [64] pour résoudre un problème de Minimisation des coûts de la logistique inverse. Le travail a concerné le traitement des déchets dangereux.

Un modèle analytique a été proposé par Fleischmann, Kuik, et Dekker [39], où ils ont

développé une extension du modèle traditionnel de gestion des stocks pour un seul item et un taux de retour suivant une distribution de Poisson.

Un autre modèle de programmation non linéaire mixte en nombre entier et les Algorithmes génétiques a été proposé en 2006 par Min, Ko H., et Ko C. [88], pour étudier le problème de gestion des produits retournés. Le modèle proposé a été appliqué sur des produits retournés à partir de ventes en ligne visant à minimiser le nombre des centres de collecte et de ramassage de ces produits retournés.

En 2008, Zhou et Wang [137], ont proposé une conception d'un réseau de logistique inverse avec la considération des options de réparation et de récupération simultanément. Pour cela, un modèle mathématique de programmation linéaire a été proposé, où la fonction objective du modèle vise à minimiser le coût total du système pour la prise en charge des produits retournés.

De son côté, Srivastava [120], en 2008 a proposé une conception d'un réseau de logistique inverse. Il a proposé une conception à trois niveaux (les produits retournés par les clients, les centres de collection, les usines). Il considère que le client représente la source des produits retournés. La fonction objectif proposée vise à maximiser le profit qui est égale aux revenus des reventes moins la somme des coûts de la logistique inverse et le prix de traitement.

Aussi, Lee, Gen, et Rhee [76], en 2009, ont abordé un problème de la logistique inverse pour un processus de remise à neuf des produits retournés. Ce problème est l'un des problèmes les plus importants dans l'environnement pour la récupération des produits utilisés. Le modèle proposé s'intéresse à la minimisation du coût total de la logistique inverse en utilisant les algorithmes génétiques combinés avec une méthode basée sur la priorité et une méthode heuristique.

Toujours dans le contexte de la logistique inverse, Mutha et Pokharel [94], en 2009 ont présenté une stratégie pour la conception d'un réseau de logistique inverse et de re-fabrication utilisant des nouveaux ou des anciens modules des produits. Les produits retournés doivent être consolidés dans l'entrepôt avant qu'ils ne soient envoyés aux centres de retraitement pour l'inspection et le démontage. Les pièces démontées sont envoyés pour la re-fabrication ou au marché secondaire comme étant des pièces détachées. La fonction objectif consiste à minimiser le coût du processus de retour des produits à savoir le coût de transport, le coût de stockage, le coût d'élimination des pièces non utilisées et le coût d'assemblage.

Pour mieux structurer les activités de la logistique de retour, Lambert, Riopel, et Abdul-Kader [73] en 2011, ont proposé un système conceptuel décisionnel en considérant sept éléments du processus de retour des produits, à savoir le système de coordination, contrôle, collecte, tri, traitement, ainsi que, le système d'information et le système d'élimination. Chacun de ces éléments a été examiné selon un processus de cartographie générique, un aspect économique et des mesures de performance, avec une distinction par rapport aux décisions stratégiques, tactiques, et opérationnels. Le modèle a été appliqué pour une entreprise de fabrication des

petits équipements électroniques.

En 2012, Alumur, Nickel, Saldanha-da-Gama, et Verter [4] ont proposé une programmation linéaire en nombre entier pour la conception d'un réseau de logistique inverse de périodes multiples. La fonction objectif maximise le gain qui égale à la somme de profit provenant des centres de recyclage, des usines de fabrication externe, et du marché secondaire moins les coûts fixes d'établissement des installations, d'exploitation, de transport, et les coûts de possession des stocks et d'achat des composants. Le modèle a été appliqué sur des machines à laver et sèche-linges qui sont ramassées à partir de 40 centres de collecte situés dans les 40 villes les plus peuplées en Allemagne.

Ramezani, Bashiri, et Tavakkoli-Moghaddam [100], en 2013, ont présenté un modèle stochastique multi-objectifs pour la conception de réseau logistique directe/inverse dans un environnement incertain, avec trois échelons dans la direction vers l'avant (les fournisseurs, les usines, centres de distribution) et deux échelons dans la direction vers l'arrière (les centres de collecte et centres de stockage) pour maximiser le profit et la réactivité du client.

En 2015, Bennekrouf, Belkaid, et Neki [13] ont traité le problème d'optimisation de localisation des centres de collecte, de désassemblage et de refabrication pour une chaîne logistique dans un environnement stochastique où la quantité et la qualité des produits à retraités sont incertaines. Ils ont proposé un modèle mathématique linéaire en nombre entier pour la prise des décisions concernant les localisations des sites potentielles et les orientations du flux physique.

En 2016, Agrawal, Singh, et Murtaza [2] ont traité le problème de disposition des produits retournés en logistique inverse. Les auteurs ont développé une approche pour la sélection de la meilleure alternative en utilisant la théorie des graphes et une approche matricielle. Un cas d'entreprise de fabrication de mobile est discuté pour l'illustration de cette proposition .

Récemment, en 2017, Alshamsi et Diabat [3] ont contribué avec une approche heuristique en utilisant un algorithme génétique pour le problème de localisation des nœuds d'un réseau de logistique inverse. Le problème a été formulé pour le cas de retour des appareils électroménagers dans la région du Golfe .

La logistique inverse représente un domaine qui a pris plus d'ampleur ces dernières années, il s'agit d'un système de gestion des produits retournés par le client et récupérés par l'entreprise, qui comprend des actions de recyclage, de démontage, de re-fabrication, ... pour la récupération des biens du client.

2.4 Optimisation dans le secteur de transport maritime

Le transport est considéré comme un maillon indispensable de la chaîne logistique, qui assure la liaison entre les différents intervenants, de l'approvisionnement à la distribution (fournisseurs, usines, entrepôts, clients). Il mérite une attention particulière. En effet, le transport

joue un rôle majeur dans la qualité du service offerte pour le client, puisqu'il est directement lié aux retards des livraisons, erreurs, pertes, casses, vols, etc...

Aussi, le transport représente une partie extrêmement concrète dans le système de la logistique inverse, car il permet la circulation et l'échange du flux physique entre les différentes entités du réseau. Les opérations de transport existent notamment dans le secteur de la collecte, de l'acheminement vers les centres de traitement des produits et de recyclage des déchets, ou lors de la redistribution des produits vers les marchés secondaires [16].

Le transport maritime représente le moyen le plus utilisé pour transporter les marchandises sur des longues distances. En effet, de nombreuses recherches ont montré l'importance de l'optimisation dans le secteur de transport maritime, et plusieurs travaux peuvent être trouvés mais qui se préoccupaient de la logistique directe qui est facile à gérer par rapport à l'incertitude de la logistique inverse. Dans ce qui suit, nous allons survoler quelques études qui ont abordé le problème d'optimisation dans le secteur de transport maritime.

En 2000, Crainic [27] a proposé une modélisation d'un réseau de transport maritime sous forme de graphe contenant des nœuds(sommets) reliés par des liens. En règle générale, les liens sont dirigés et représentés par des arcs dans le réseau. Certains des sommets représentent les origines de la demande de transport pour un ou plusieurs produits, et d'autres représentent les destinations de ce trafic. Les liens peuvent avoir diverses caractéristiques, comme la longueur, la capacité et le coût. En particulier, des coûts fixes peuvent être associés à certains ou à tous les liens, indiquant que dès qu'un arc particulier a été choisi pour être utilisé, un coût fixe est attribué, au-delà du coût d'utilisation, qui est dans la plupart du temps liés au volume de trafic sur le lien. L'objectif est de sélectionner des liens dans un réseau, avec des capacités, afin de satisfaire la demande de transport des marchandises au plus bas coût possible.

En 2006, un travail de Jula, Chassiakos, et Ioannou [66] a été proposé. Ce dernier vise à trouver une meilleure correspondance entre l'offre et la demande dans le transport conteneurisé au niveau des ports de Los Angeles et Long Beach. Les auteurs ont proposé une modélisation mathématique qui minimise le nombre et le coût des mouvements dynamiques (stockage, chargement, déchargement) des conteneurs vides, où ils ont supposé que les conteneurs appartiennent à une seule classe de conteneurs et que les demandes sont connues à l'avance. Un cas d'étude de la solution proposée a été appliqué sur les ports cités précédemment.

En 2007, Shintani, Imai, Nishimura, et Papadimitriou [111] ont proposé une solution pour le problème de routage des navires portes conteneurs sur le réseau de transport maritime. Une solution avec les algorithmes génétiques a été proposée pour permettre à la compagnie de définir l'ordre d'escale des navires au niveau des ports choisis. Ensuite ils ont proposé une modélisation mathématique qui maximise le gain concernant les voyages des navires en exploitant l'espace vide sur les navires déployés pour le retour des conteneurs vides.

Un autre travail de Chang, Jula, Chassiakos, et Ioannou [22] a été proposé en 2008 et qui se préoccupait du problème de repositonnement des conteneurs vides. Les auteurs ont décomposé

le problème en sous problèmes ensuite ils ont présenté un modèle en programmation linéaire pour minimiser le coût d'échange des conteneurs vides transportés par voie maritime. Ils ont utilisé des données sur les port de Los Angeles et Long Beach pour tester la proposition.

Di Francesco, Crainic, et Zuddas [31] ont abordé le problème de repositionnement des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime, en proposant une programmation linéaire en nombre entier qui permet de minimiser les coûts de stockage, chargement et déchargement de conteneurs vides. Cette proposition a considéré que l'ensemble des ports est fixe dès le départ et ne tient pas compte de la gestion des conteneurs pleins sur le réseau.

Une formulation de programmation mixte en nombres entiers a été proposée en 2010 par Gelareh, Nickel, et Pisinger [47] pour la modélisation des réseaux hub-and-spoke¹ dans un environnement concurrentiel. Le travaille adresse la concurrence entre un nouveau fournisseur de lignes maritimes et un opérateur dominant existant, fonctionnant tous les deux sur les réseaux hub-and-spoke. La nouvelle compagnie maximise sa part de marché, qui dépend de la durée de service et du coût de transport par la localisation d'un nombre prédéfini des hubs dans les ports candidats et établie la conception de son réseau par la suite.

Un autre travail de Gelareh et Meng en 2010 [46] se préoccupait du développement de modèles pour un problème de déploiement de la flotte à court terme concernant les opérations de transport maritime. les auteurs ont présenté d'abord un modèle de programmation non linéaire mixte en nombres entiers dans le quel les vitesses optimales des différents navires sur les différentes lignes sont interprétées comme leurs temps de déplacement optimales réalistes. Par la suite, ils ont procédé à la linéarisation du modèle non linéaire proposé pour obtenir un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers qui peut être résolu par un solveur standard tel que CPLEX. Leur proposition détermine le modèle optimal de la fréquence du service d'une ligne maritime.

En 2011, Gelareh et Pisinger [48] ont développé un modèle en programmation linéaire à nombres entiers mixtes pour modéliser un réseau de transport maritime Hub-and-spoke et le déploiement de la flotte simultanément. Le modèle est capable de déterminer un réseau de moyeu cyclique, et de trouver la capacité de la ligne de moyeu et les lignes d'alimentation. Leur proposition est destinée à être utilisée pour une seule région, donc une seule ligne de centre est considérée, et le nombre de ports est limité entre 10 et 20 ports.

Lei et Church [77] ont proposé une programmation linéaire en nombre entier afin de pouvoir localiser les zones de stockage des conteneurs vides à l'extérieur du port, et minimiser le kilométrage impliqué dans le déplacement des conteneurs vides entre les expéditeurs, les sites de stockage. Les auteurs ont proposé une modélisation au niveau stratégique pour mieux gérer les conteneurs vides et contrôler le comportement avide des entreprises de camionnage

1. Le hub and spoke (moyeu et rayons) employé par le transport aérien au départ ensuite il a été adopté par le transport maritime dans les années 1990. Le hub est le point vers lequel convergent les différentes lignes (des rayons).

individuel.

En 2011, un travail a été présenté dans [85] par Meng et Wang, en proposant une modélisation pour un réseau de service des lignes maritime hub-and-spoke avec les opérations de repositionnement des conteneurs vides. Cette proposition a introduit d’abord un concept de ” *segment* ” défini comme une paire de ports commandés et servis par une ligne de transport maritime, ensuite, les auteurs ont développé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour minimiser le coût d’exploitation fixe des lignes maritimes, le coût variable associé au transport de conteneurs pleins, et le coût variable du repositionnement des conteneurs vides.

En 2012, une proposition a fait l’objet d’un travail présenté dans [116] par Song et Dong. Cette proposition a traité le problème du routage des cargaisons des marchandises et le problème de repositionnement des conteneurs vides au niveau opérationnel pour un réseau de transport maritime avec plusieurs lignes de service, multiples navires déployés et multiples voyages réguliers. Les chercheurs ont proposé une modélisation en programmation linéaire en nombre entier combinée avec une heuristique pour minimiser le coût total dans l’horizon de planification, y compris : le coût de chargement et déchargement des conteneurs aux ports d’origine, le coût de transbordement et le coût des demandes des clients, le coût d’attente aux ports de transbordement pour le stockage temporaire de conteneurs chargés, et le coût de transport des conteneurs vides.

Dans [90], Mittal, Boile, Baveja, et Theofanis ont présenté une analyse stochastique concernant le volume de commerce utilisant les conteneurs à travers une modélisation en programmation linéaire en nombre entier. Le travail présenté vise la minimisation du coût du système lors de repositionnement des conteneurs vides. L’idée se repose sur la notion d’un système IDEC (dépôts intérieurs des conteneurs vides) pour un repositionnement régional des conteneurs vides.

En 2013, Shuaian, Qiang, et Zhuo ont proposé un modèle mathématique pour générer des chemins de conteneurs en tenant compte des contraintes opérationnelles [112]. Ils ont donné d’abord une représentation du réseau de transport maritime, ensuite, sur la base du réseau opérationnel, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers est formulé dont le but est d’obtenir tous les chemins des conteneurs, pour chaque paire Origine-Destination, avec un coût minimal. Enfin, ils ont ajouté des contraintes au modèle de programmation linéaire, à l’exclusion des chemins déjà obtenus, afin de trouver tous les chemins de conteneurs.

Nous citons également le travail de Gelareh, Maculan, Mahey, et Monemi [45] présenté en 2013, où les auteurs ont proposé un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers pour la conception du réseau de transport maritime, avec une allocation des navires selon la taille de la chaîne (les compagnies de transport maritime divisent leurs régions de service en plusieurs chaînes composées d’un ensemble ordonné des ports). Le travail permet d’assurer un bon réglage de la fréquence de service au niveau de chaque chaîne et mieux exploiter les portes conteneurs.

Aussi, nous citons le travail proposé dans [32] par Di Francesco, Lai, et Zuddas, qui a traité le problème de repositionnement des conteneurs vides dans les réseaux maritimes en cas de présence des perturbations portuaires possibles. Le travail considère l'incertitude des données liées à la problématique par une approche de programmation stochastique avec différents scénarios qui sont inclus dans la proposition.

Song et Dong [115] ont proposé une conception pour une ligne de service maritime de longue distance en tenant compte de la structure de la ligne, le déploiement des navires et du repositionnement des conteneurs vides. L'objectif était de minimiser le coût total des charges d'un service de ligne maritime de longue distance, y compris les coûts liés au navire, le coût de consommation de carburant, les charges portuaires, le coût de transfert et de stockage des conteneurs pleins et vides. Concernant le repositionnement des conteneurs vides, ils ont proposé un algorithme pour minimiser les mouvement de chargement et déchargement de ces derniers.

En 2016, un travail a été proposé dans par Yachba, Gelareh, et Bouamrane afin de résoudre le problème de placement des conteneurs dangereux une fois que ces derniers sont déchargés des navires et en attente d'être livrés [134]. Les auteurs ont proposé un modèle pour optimiser l'espace de stockage disponible en utilisant l'algorithme génétique. L'intérêt de ce travail était de pouvoir identifier le meilleur emplacement d'un conteneur dangereux dans la zone de stockage du terminal maritime.

En 2017, Wang, Qu, Wang, et Yi ont proposé une modélisation en programmation linéaire en nombre entier pour minimiser les coûts de manutention (chargement, déchargement et transbordement) des conteneurs [132]. L'idée est de ré-emballer les conteneurs de types 20 pieds dans des conteneurs de type 40 pieds car la manutention d'un conteneur de 40 pieds est moins coûteuse que la manutention de deux conteneurs de 20 pieds.

2.5 Synthèse

Une organisation est dite fiable lorsque la probabilité de remplir sa mission sur une durée définie correspond à celle spécifiée dans le contrat ou le cahier des charges. Dans le cas de la logistique, la fiabilité se traduit par la capacité à livrer des commandes parfaites conformément aux demandes des clients.

La logistique joue un rôle vital dans la société en assurant la mise à disposition des produits et des services aux consommateurs ou clients tout en synchronisant la chaîne de l'offre avec la demande à satisfaire. Parmi ses principales ressources, elle utilise le transport pour assurer la liaison entre les différents maillons de la chaîne logistique.

Le transport maritime représente une préoccupation avec une importance cruciale. En effet, les différentes compagnies et entreprises fournissent de grands efforts dans le but de détecter des possibilités de réduction des coûts associés à ce transport. Toutefois, pour être

compétitif, la compagnie du transport maritime doit améliorer ses services et baisser ses coûts. De ce fait, plusieurs interrogations s'imposent : Comment peut-on assurer un meilleur acheminement de marchandises ? Comment peut-on minimiser les retards ?, Comment doit-on procéder afin d'augmenter les capacités de stockage ? et aussi Comment optimiser le retour des conteneurs vides qui représente l'intérêt de ce travail . Toutes ces questions peuvent être posées au niveau des différentes activités s'exerçant dans un port à conteneurs.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la logistique de retour des conteneurs vides dans le transport maritime qui représente un sérieux problème pour les armateurs de conteneurs. En d'autres termes, nous cherchons à optimiser les frais de ce retour via un système d'aide à la décision proposé pour l'armateur. Ce système fournit des solutions optimales pour le retour des conteneurs vides selon trois algorithmes d'optimisation. Dans ce qui suit, nous présentons une classification des méthodes de résolution concernant les problèmes d'optimisation.

2.6 Méthodes d'optimisation

Lorsque l'évolution d'une méthode de résolution est prévisible et ne laisse aucune place au hasard, celle-ci est dite une méthode déterministe. Ces méthodes sont qualifiées de méthodes locales, elles convergent vers un optimum dépendant uniquement du point de départ, qu'il soit local ou global.

A l'opposé, les méthodes dites stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes qui peuvent mener à des résultats différents pour des conditions initiales et des paramètres de contrôle identiques. Les techniques stochastiques sont considérées comme des méthodes globales qui permettent de localiser l'optimum global [56].

2.6.1 Classification des méthodes d'optimisation

La rencontre des problèmes d'optimisation dans la vie quotidienne a poussé les chercheurs à proposer des méthodes de résolution et à réaliser de grands efforts pour améliorer les performances en termes de temps de calcul nécessaire et/ou de la qualité de la solution proposée.

Au fil des années, plusieurs méthodes de résolution des problèmes d'optimisation ont été proposées. Ces méthodes sont regroupées en deux classes principales : la classe de méthodes exactes et la classe de méthodes approchées [56].

A. Classe des méthodes exactes ou déterministes

Le but des méthodes exactes réside dans le fait qu'elles assurent l'obtention de la solution optimale du problème traité. Elles permettent de parcourir la totalité de l'espace de recherche de manière à examiner toutes les solutions ayant le potentiel d'être meilleures que la solution optimale trouvée au cours de la recherche.

Néanmoins, les méthodes exactes nécessitent un coût de recherche souvent élevé en termes de ressources requises. En effet, le temps de recherche ainsi que l'espace mémoire nécessaire pour l'obtention de la solution optimale par une méthode exacte sont souvent trop grands, notamment pour des problèmes d'optimisation de grandes tailles. De ce fait, la complexité de ce type d'algorithmes augmente exponentiellement avec la taille du problème à résoudre, elle devient très importante face à des problèmes comprenant plusieurs variables de décision, fonctions objectifs et contraintes [56]. Parmi les méthodes exactes, nous pouvons citer :

1. **L'algorithme de retour arrière (Backtracking) :** C'est l'algorithme d'énumération le plus classique. Son principe est de parcourir les valeurs des variables par instantiation et revenir en arrière sur des décisions prises afin de sortir d'un blocage. Afin d'aboutir à une configuration consistante, une nouvelle valeur est affectée à la variable x_i en respectant son domaine de définition. Le processus est répété à chaque itération jusqu'à l'émergence d'une solution optimale. Si toutes les possibilités ont été essayées sans donner de bonnes solutions, dans ce cas là on dit que le problème est irréalisable. Grâce à son principe qui permet une exploitation complète de l'espace de recherche, cet algorithme garantit l'aboutissement à la solution optimale. Néanmoins, il est très lent s'il s'agit d'un problème de grande taille [51].
2. **La méthode Branch & Bound :** La méthode B&B est une des méthodes qui permettent la résolution exacte de problèmes d'optimisation. B&B propose un mécanisme de recherche très intelligent, qui lui permet une bonne exploitation de l'espace de recherche et l'aboutissement à la solution optimale plus rapidement que d'autres méthodes exactes en combinant deux principes : la séparation et l'évaluation.

Cette méthode consiste à diviser le problème en sous problèmes de manière à représenter le problème sous forme d'un arbre, où chaque nœud correspond à une solution partielle. Chacune des solutions partielles potentielles possède une borne supérieure et une autre inférieure, qui sont utilisées pour couper quelques branches de l'arbre et ainsi éviter d'explorer tout l'espace de solutions. En effet, si l'évaluation d'un nœud x_i a montré que sa qualité est supérieure à la borne supérieure, le sous arbre en question sera éliminé ; sinon, le nœud sera divisé en sous nœuds. Ce processus se répète tant qu'il reste des branches non parcourues et la recherche continue jusqu'à trouver la solution optimale si elle existe.

L'utilisation de la méthode B&B nécessite quelques paramètres tel-que : une solution initiale permettant de commencer la recherche ; une stratégie permettant la division du problème en sous problèmes ; une fonction permettant le calcul des différentes bornes ; une stratégie de parcours de l'arbre : parcourir en profondeur, en largeur ... etc [91]. Par la suite, plusieurs améliorations de l'algorithme B&B ont été proposées, y compris les algorithmes : Branch and Cut (noté B&C) [95], Branch and Price (noté B&P) [8],

Branch and Cut and Price (B&C&P) [7].

3. **Méthodes mathématiques :** Pour déterminer un optimum, les méthodes mathématiques s'appuient sur la connaissance d'une direction de recherche donnée souvent par le gradient de la fonction objectif par rapport aux paramètres. L'inconvénient principal des méthodes à base de gradient est que la dérivée de la fonction objectif n'est pas toujours connue, alors il faut l'estimer par différences finies. Parmi les méthodes mathématiques qui existent, nous citons [107, 23, 40] :

- La méthode du gradient conjugué ;
- La méthode quasi-Newton ;
- La méthode de Programmation Quadratique Séquentielle (PQS) ;
- La méthode des directions conjuguées de Powell,
- Les méthodes d'apprentissage automatique.

Malgré que les méthodes exactes ont l'avantage d'obtenir des solutions dont l'optimalité est garantie, elles ont généralement le défaut d'être très coûteuses en terme de temps de réponse pour des problèmes de grande taille. Pour cela, des méthodes approchées ont été proposées. Ces méthodes visent à générer des solutions de haute qualité en un temps de calcul raisonnable, mais il n'existe aucune garantie de trouver la solution optimale.

B. Classe des méthodes approchées ou stochastiques (Métaheuristiques)

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation.

Les métaheuristiques ont reçu beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs qui ont montré leur efficacité dans de nombreux domaines d'application en résolvant plusieurs problèmes d'optimisation. A vrai dire, l'efficacité d'une métaheuristique dans la résolution d'un problème d'optimisation est liée à sa capacité d'établir un équilibre entre l'opération d'exploitation des solutions trouvées au cours de la recherche et l'opération d'exploration de l'espace de recherche pour identifier d'autres solutions de très bonne qualité [33, 124].

La plupart des métaheuristiques sont inspirées des systèmes naturels, à titre d'exemple, nous citons : le recuit simulé qui est inspiré d'un processus métallurgique, les algorithmes évolutionnistes et les algorithmes génétiques qui sont inspirés des principes de la biologie, la recherche tabou qui s'inspire de la mémoire des êtres humains, les algorithmes basés sur l'intelligence d'essaim comme l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, l'algorithme de colonies de fourmis, l'algorithme de colonies d'abeilles . L'ensemble des métaheuristiques proposées dans la littérature sont classées selon deux ensembles : des métaheuristiques à base de solution unique et des métaheuristiques à base de population de solutions, Figure 2.4 [51].

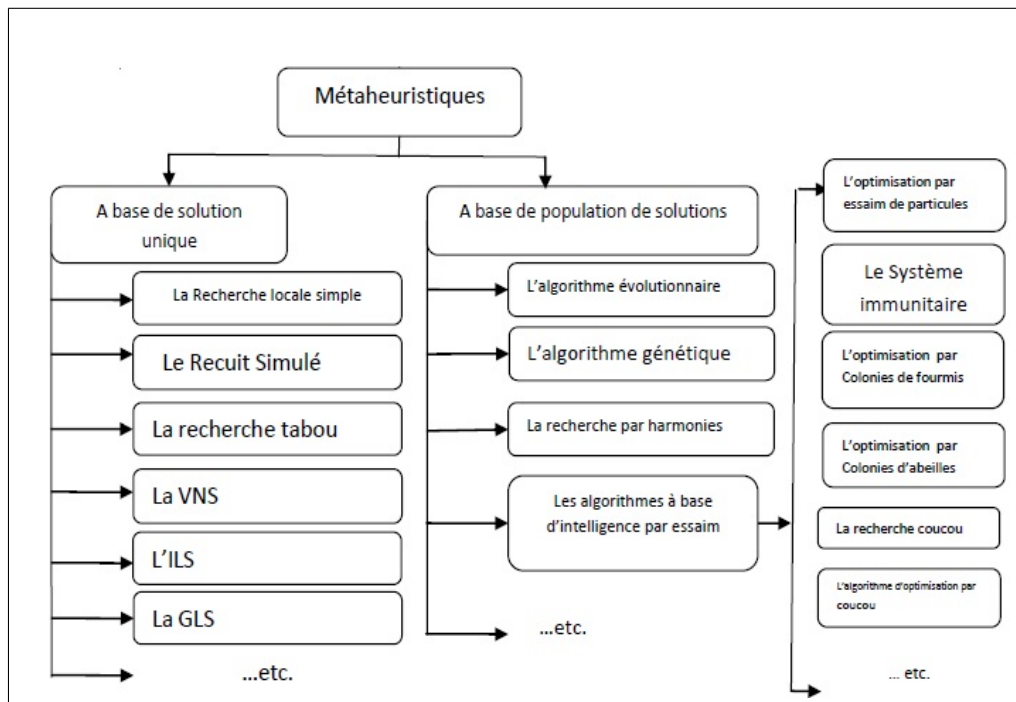


FIGURE 2.4 – Classification des méthodes d'optimisation métaheuristiques

B.1 Métaheuristiques à base de solution unique

Elles manipulent et transforment une seule solution durant le processus de recherche. Elles sont aussi appelées méthodes de trajectoire. Ces méthodes d'optimisation débute la recherche avec une seule solution initiale. Elles se basent sur la notion du voisinage pour améliorer la qualité de la solution courante, où une série de modifications est faite sur la solution initiale en fonction de son voisinage. Le but de ces modifications locales est d'explorer l'espace de voisinage de la solution actuelle afin d'améliorer progressivement sa qualité au cours des différentes itérations [51].

De nombreuses méthodes à base de solution unique ont été présentées dans la littérature. Parmi lesquelles : la descente, le recuit simulé, la recherche tabou, la recherche à voisinage variable (VNS : Variable Neighbourhood Search), la recherche locale réitérée (ILS : Iterated Local Search), la recherche locale guidée (GLS : Guided Local Search)... etc [123, 65].

1. **La méthode de recherche locale** : En algorithmique, la recherche locale est une méthode générale utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation, c'est à dire des problèmes où nous cherchons la meilleure solution dans un ensemble de solutions candidates. Son principe consiste à explorer le voisinage de la solution courante afin d'améliorer sa qualité progressivement. A chaque itération, l'algorithme modifie un ensemble de composantes de la solution courante pour permettre le déplacement vers une solution voisine de meilleure qualité. Le processus est répété itérativement jusqu'à

la satisfaction du critère d'arrêt.

L'algorithme (1) résume les étapes de l'algorithme général de la descente. La recherche est entamée par la construction d'une solution initiale s et l'évaluation de sa qualité $f(s)$. Ensuite, le processus d'amélioration sera répété tant que la condition d'arrêt n'est pas vérifiée .

Algorithm 1 LA RECHERCHE LOCALE SIMPLE (LA DESCENTE)

Ensure: Engendrer une solution initiale s

```

1: begin
2: Calculer  $f(s)$ 
3: while la condition d'arrêt n'est pas vérifiée do
4:   Modifier  $s$  pour obtenir une nouvelle solution voisine  $s'$ 
5:   Calculer  $f(s')$ 
6:   if  $f(s')$  est meilleure que  $f(s)$  then
7:      $s \leftarrow s'$ 
8:   end if
9: end while
10: Retourner  $S$ 
11: end

```

L'avantage de la recherche locale simple revient à sa simplicité et à sa rapidité. Cependant, son problème réside dans le fait d'être bloquée par le premier optimum local rencontré, et qui peut être très loin de l'optimum global.

2. **Le recuit simulé :** Le principe du recuit simulé se base sur la procédure du recuit des métaux utilisés par les métallurgistes². En effet, les thermodynamiciens ont remarqué qu'une baisse brutale de la température d'un liquide entraîne une reproduction d'un optimum local, alors qu'une baisse progressive de la température du liquide permet d'aboutir à un optimum global (une structure bien construite).

Le principe consiste à faire des modifications à partir d'un état initial d'un système donnée, alors on obtient un autre état. Soit celui-ci permet d'améliorer le critère que l'on cherche à optimiser, soit il le dégrade. Si un état améliorant le critère est accepté, alors la recherche est guidée vers l'optimum dans le voisinage de l'état de départ. L'acceptation d'un mauvais état permet d'explorer une plus grande partie de l'espace des états possibles et éviter converger rapidement vers un optimum local. Le principe du recuit simulé est résumé avec l'algorithme (2) [51].

C'est l'idée des métallurgistes qui savent que si le métal refroidit trop vite, il contiendra beaucoup de défauts microscopiques et s'il refroidit progressivement, une structure bien ordonnée sera obtenue[69].

2. La métallurgie est la science qui étudie les métaux, leurs élaborations, leurs propriétés, et leurs traitements.

Algorithm 2 RECUIT SIMULÉ**Ensure:** $S \leftarrow S^0$ /* Engendrer une configuration initiale S^{0*} /

- 1: Initialiser T en fonction du schéma de refroidissement
- 2: **begin**
- 3: **repeat**
- 4: Engendrer un voisin aléatoire S' de S
- 5: Calculer $D = f(S') - f(S)$
- 6: **if** *CritMetropolis*(D, T) **then**
- 7: $S \leftarrow S'$
- 8: **end if**
- 9: Mettre T à jour en fonction du schéma de refroidissement
- 10: **until** (condition fin)
- 11: Retourner la meilleure configuration trouvée
- 12: **end**

Le recuit simulé est la première métaheuristique qui a été proposée. Il possède des propriétés de convergence intéressantes. Cependant, le recuit simulé est peu utilisé en pratique à cause de problème de choix des nombreux paramètres, tels que la température initiale, la loi de décroissance de la température, ainsi que les critères d'arrêt.

3. **La Recherche Tabou :** La Recherche Tabou (RT) est une métaheuristique à base d'une solution unique, proposée en 1986 par Glover F. [52]. Cette méthode fait appel à un ensemble de règles pour guider la recherche de manière intelligente. L'optimisation de la solution avec la recherche tabou se base sur deux mécanismes : la notion du voisinage et une mémoire pour orienter le processus de la recherche.

En parcourant le voisinage de la solution courante s , la recherche tabou ne s'arrête pas au premier optimum local rencontré. Elle examine un échantillonnage de solutions du voisinage de la solution s et retient toujours la meilleure solution voisine s' , afin d'échapper de la vallée de l'optimum local et donner au processus de la recherche d'autres possibilités pour explorer l'espace de recherche, et trouver l'optimum global .

Les solutions de mauvaise qualité peuvent avoir de bons voisinages et donc guider la recherche vers de meilleures solutions. Cependant, cette stratégie peut créer un phénomène de cyclage (retomber sur des solutions déjà parcourues plusieurs fois). Afin de pallier à ce problème, la recherche tabou propose l'utilisation d'une mémoire permettant le stockage des dernières solutions rencontrées pour ne pas les visiter dans les prochaines itérations et tomber dans le problème du cyclage répétitif. Cette mémoire est appelée " *la liste tabou* " comme le montre l'algorithme (3).

La taille de la liste tabou est limitée, ce qui empêche l'enregistrement de toutes les solutions rencontrées. C'est la raison pour laquelle la liste tabou procède avec la stratégie FIFO (Firs In First Out), où la plus ancienne solution sera écartée pour laisser place

à la dernière solution rencontrée [53] .

Algorithm 3 RECHERCHE TABOU

Ensure: $S \leftarrow S^0$ /* Engendrer une solution initiale S^0 */

```

1:  $S^* \leftarrow S$ ;
2:  $f^* \leftarrow f(S)$ ;
3:  $T \leftarrow \Phi$  /* liste tabou initialement vide */
4: begin
5: repeat
6:    $m \leftarrow$  le meilleur mouvement parmi les mouvements non tabous
7:    $S \leftarrow S \oplus m$ 
8:   if  $f(S) < f(S^0)$  then
9:      $S^* \leftarrow S$ ;  $f^* \leftarrow f(S)$ 
10:  end if
11:  Mettre  $T$  à jour
12: until (condition fin)
13: Retourner  $S^*$ 
14: end

```

B.2. Métaheuristiques à base de population de solution

Ces méthodes sont basées sur la notion de population. Elles s'appliquent sur un ensemble de solutions afin d'en extraire la meilleure qui représente l'optimum global et la solution du problème traité. L'idée d'utiliser un ensemble de solutions au lieu d'une seule solution renforce la diversité de la recherche et augmente la possibilité d'émergence de solutions de bonne qualité. Les algorithmes évolutionnaires, les algorithmes génétiques ou encore les algorithmes de colonies de fourmis sont des exemples de métaheuristiques à base de population de solutions.

1. **Algorithmes évolutionnistes** : Les méthodes évolutionnistes reposent sur une analogie avec la théorie de l'évolution naturelle. Précisément, la théorie de l'évolution exposée par [29], qui se base sur le principe de la sélection naturelle, selon laquelle, les individus les mieux adaptés à leur environnement survivent et peuvent se reproduire pour donner des enfants encore mieux adaptés de génération en génération. Contrairement aux techniques d'optimisation qui explorent l'espace à partir d'un point unique, les méthodes évolutionnistes commencent à partir d'un ensemble de configurations initiales, c'est-à-dire d'une population d'individus, et la font évoluer à partir d'opérateurs à transition aléatoire, la sélection et l'évolution, Figure (2.5). En effet, la combinaison des caractéristiques des individus peut former au fil des générations de nouveaux individus beaucoup plus adaptés à leur environnement et qui peuvent avoir plus de chances de survivre que leurs parents.

Les algorithmes évolutionnistes forment une classe principale de trois sous classes d'algorithmes [51] : les stratégies d'évolution, la programmation évolutionnaire et les algorithmes génétiques.

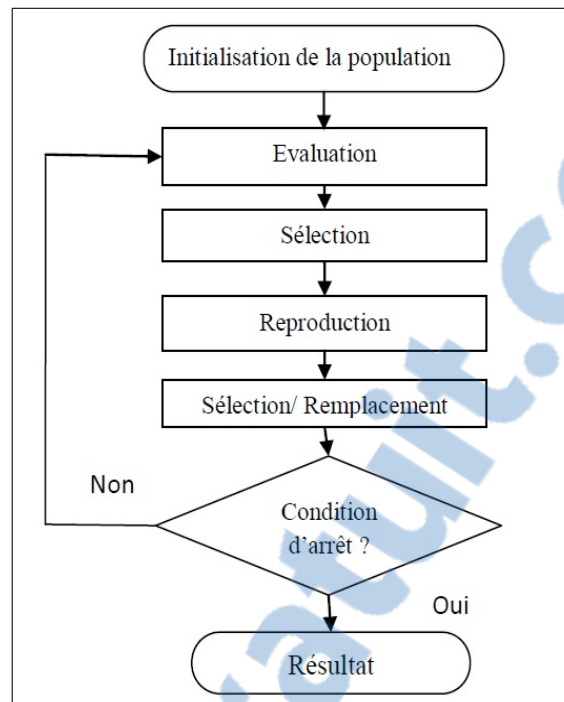


FIGURE 2.5 – Principe d'un algorithme évolutionnaire

- *Les stratégies d'évolution* : Elles ont été conçues pour la résolution des problèmes d'optimisation continus [14].
 - *La programmation évolutionnaire* : Ces algorithmes ont été conçus pour faire évoluer des structures d'automates d'état fini [41].
 - *L'algorithme génétique* : Il sera expliqué dans la section suivante. Il est à noter qu'il existe une sous classe de la classe des algorithmes génétiques appelée " *Programmation génétique*" qui utilise des structures arborescentes pour représenter les individus de la population [71].
2. **Algorithme génétique** : L'algorithme génétique représente une célèbre métaheuristique évolutionnaire. Il a été proposé par Jhon Holland en 1975 [62] en s'inspirant des mécanismes biologiques tels que les lois de Mendel [29]. Cet algorithme imite le processus des êtres vivants dans leur évolution. De ce fait, l'algorithme génétique utilise le même vocabulaire que la biologie et la génétique classique, tels que : gène, chromosome, individu, population et génération.
- *Un gène* : est un ensemble de symboles représentant la valeur d'une variable. Dans la plupart des cas, un gène est représenté par un seul symbole.
 - *Un chromosome* : est un ensemble de gènes, présentés dans un ordre donné d'une manière qui prend en considération les contraintes du problème à traiter.
 - *Un individu* : est composé d'un ou de plusieurs chromosomes. Il représente une

solution possible au problème traité.

◦ *Une population* : est représentée par un ensemble d'individus (l'ensemble des solutions possibles pour un problème donné).

◦ *Une génération* : est une succession d'itérations suivant un ensemble d'opérations pour pouvoir passer d'une population à une autre.

Gherboudj [51] a synthétisé les étapes de l'algorithme génétique au niveau de la Figure (2.6). Grâce à des opérations d'évaluation, de sélection, de reproduction (croisement et mutation) et de remplacement, la population initiale comportant un ensemble d'individus va évoluer pendant un ensemble de génération (itérations) jusqu'à ce le critère d'arrêt soit vérifié.

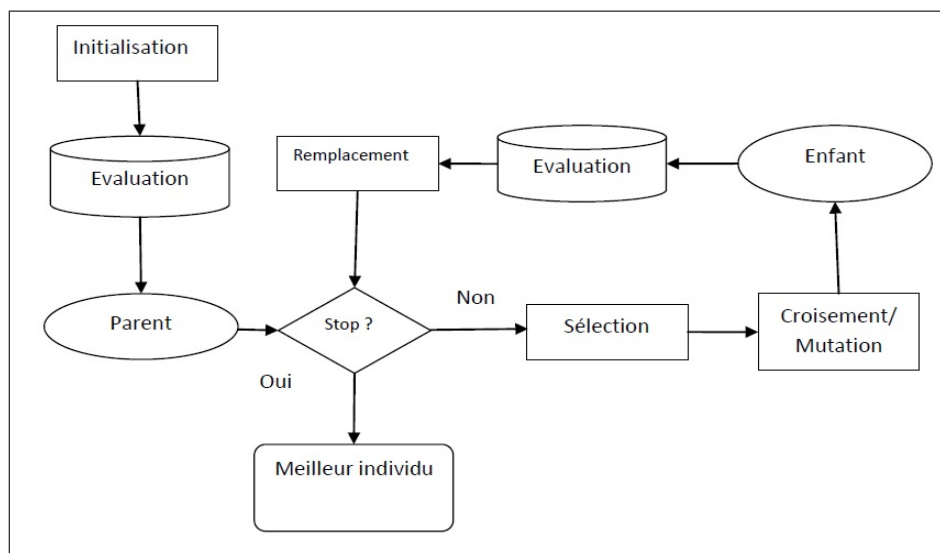


FIGURE 2.6 – Principe de l'algorithme génétique

3. **Algorithme de colonies de fourmis** : L'algorithme de colonies de fourmis est l'un des algorithmes basés sur l'intelligence par essaim qui forment une branche d'algorithmes inspirés des phénomènes naturels. Ces algorithmes imitent le comportement collectif de certaines espèces dont le but de développer des métaheuristiques permettant la résolution de différents problèmes d'optimisation [51].

L'algorithme de colonies de fourmis a été introduit au début des années 90 par Maniezzo dans [82]. Les chercheurs se sont inspiré du comportement des fourmis lors de leur déplacement entre la fourmilière et la source de nourriture. Les fourmis sont des insectes qui travaillent par coopération pour le bien du groupe. L'objectif du comportement collectif des fourmis est de collecter la nourriture en parcourant le plus court chemin sans perdre le chemin de retour menant à leur nid.

Au début de la recherche, les fourmis se propagent aléatoirement en prenant des che-

mins de différentes tailles, sur ces chemins, les fourmis déposent une matière appelée " *Phéromone* " d'intensités égales. Afin d'attirer l'attention des autres fourmis. En retournant au nid, chaque fourmi dépose du phéromone un peu contenant un message concernant la qualité du site visité. Les fourmis ont tendance de suivre le chemin de la plus forte intensité de phéromone. En effet, plus le chemin est court, plus la quantité de phéromone déposée est élevée, et plus l'intensité de phéromone est grande, plus le nombre de fourmis passant par ce chemin augmente. Par conséquent, le chemin le plus long sera écarté car l'intensité de phéromone est petite et s'évapore rapidement, Figure (2.7).

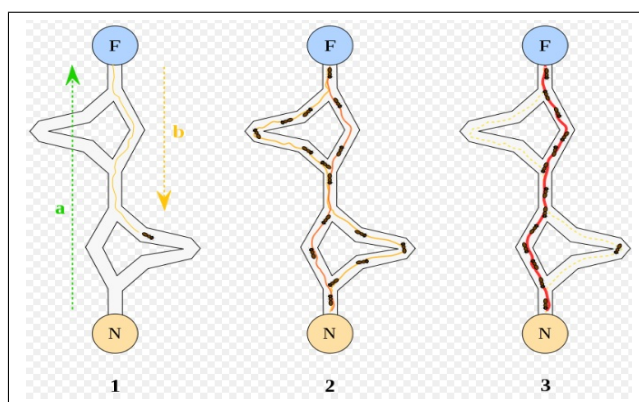


FIGURE 2.7 – Principe de colonies de fourmis

2.7 Conclusion

Le présent chapitre a été l'occasion de s'approcher au domaine de logistique et plus précisément la logistique inverse qui concerne la gestion du flux des produits retournés à partir du client vers le fabricant. Parfois, le consommateur n'est pas satisfait du produit livré, et décide de le retourner vers le producteur. Dans ce cas, on est face au flux de la logistique des retours.

La secteur de transport maritime conteneurisé a été aussi présent dans ce chapitre, qui devient de plus en plus important pour le transport des marchandises. En effet, les différentes compagnies et entreprises de transport conteneurisé font de grands efforts pour optimiser des coûts associés à ce transport et améliorer la qualité de service.

Afin de mettre le point sur tout ce qui est relié à notre travail, un état de l'art a été donné afin de s'approcher plus à cet axe de recherche qui a conduit naturellement les chercheurs à s'intéresser et à proposer des modèles adéquats.

Aussi, à travers ce chapitre, nous avons survoler sur les méthodes d'optimisation qui peuvent être réunis selon deux grandes classes : les méthodes déterministes (exactes) et les

méthodes approchés (stochastiques).

L'état de l'art nous a permis de constater que plusieurs questions et problèmes décisionnels se posent pour un opérateur au niveau de la logistique de retour et précisément, le retour des conteneurs vides dans un réseau transport maritime au quel nous nous intéressons via cette étude.

Le prochain chapitre fera l'objectif de l'Aide à la Décision et la présentation des Systèmes d'Aide à la Décision.

Systemes d'Aide à la Décision

*D*ans ce chapitre, nous commençons par introduire le domaine de l'aide à la décision, en présentant la décision et le processus décisionnel. Ensuite, nous nous attachons à la présentation des systèmes d'aide à la décision qui ont subi de nombreuses évolutions depuis leur apparition, ce qui nous a poussé à donner une classification pour ces systèmes.

Plan

3.1	Introduction	66
3.2	L'aide à la décision	66
3.2.1	La décision	67
3.2.2	Les différents types de décisions	67
3.2.3	Le processus de la décision	68
3.3	Les Systemes d'Aide À la Décision (SAD)	70
3.3.1	Les Systemes Interactifs d'Aide À la Décision (SIAD)	71
3.3.2	Modèles de l'opérateur humain et du système homme machine	76
3.3.3	Approches structurelles de la coopération homme-machine	79
3.4	Classification des Systemes d'Aide à la Décision	81
3.4.1	Classification au niveau utilisateur	81
3.4.2	Classification au niveau conceptuel	81
3.4.3	Classification au niveau système	81
3.4.4	Classification au niveau connaissance	82
3.5	Conclusion	82

3.1 Introduction

Durant la gestion d'un projet, une organisation, ou une entreprise, la prise de décision est souvent nécessaire, elle peut avoir des incidences sur le bon déroulement des différentes activités et une forte influence sur la qualité de service. Par ailleurs, la prise de décision pour les équipes étant en relation directe avec le client, est très importante car elle détermine la fidélité et l'engagement des clients.

La prise de décision est un processus de raisonnement qui s'appuie sur des arguments, et qui vise à sélectionner une solution parmi différentes alternatives (solutions possibles). Cela devient complexe lorsque plusieurs informations croisées rentrent en jeu. Cependant, pour éviter tout hasard et ambiguïté, il est possible de prendre la meilleure décision sans aucune doute, et aucun regret grâce à un outil d'aide à la décision.

Un Système d'Aide à la Décision (SAD) est destiné à faciliter la prise de décision au niveau d'une entreprise. Le SAD vise à exploiter les données opérationnelles d'une organisation pour assurer un bon pilotage du système. Un SAD bien conçu est un logiciel interactif qui aide les décideurs à dégager des solutions utiles à partir de données brutes, de documents, ou de connaissances personnelles, pour prendre les meilleures décisions.

Avec l'évolution technologique, les dirigeants d'entreprise disposent de nouveaux outils informatiques connus sous le nom des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) [21].

3.2 L'aide à la décision

Zararé [136] trouve que l'aide à la décision utilise des techniques et des méthodologies issues du domaine des mathématiques appliquées telles que l'optimisation, les statistiques, la théorie de la décision ainsi que des théories de domaines moins formels tels que l'analyse des organisations et les sciences cognitives.

Roy et Bouyssou [106] considèrent l'aide à la décision comme étant l'activité de celui qui prend appui sur des modèles clairement formulés, cherchant à obtenir des éléments de réponses aux questions qui se posent en intervenant (décideur) dans un processus de décision. D'après les auteurs, l'aide à la décision prend appui sur trois principe :

- La réalité du premier ordre : l'aide à la décision est basée sur les principaux aspects de la réalité qui se rapportent à des objets de connaissance qui peuvent être regardés comme des données suffisamment stables pour que la référence puisse être faite à l'état exact ou à la valeur exacte.
- Le décideur : c'est un acteur bien déterminé, doté de pleins de pouvoirs, agissant selon un système de préférences rationnelles au sens d'un certain corps d'axiomes excluant l'ambiguïté et la contradiction pour prendre une décision ;
- L'optimum : dans toute situation devant entraîner une décision, il existe au moins une

décision optimale.

3.2.1 La décision

En parcourant la littérature, plusieurs définitions de la décision peuvent être trouvées, parmi les quelles, nous citons la définition de Levine et Pomerol qui ont décrit la décision comme étant " *une action qui est prise pour faire face à une difficulté ou répondre à une modification de l'environnement* " [79].

Roy et Bouyssou ont représenté la décision par " *un individu isolé (décideur) qui exerce librement un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné dans le temps* " [106].

Aussi, Schärllig a défini la décision comme " *un choix entre plusieurs alternatives* " ou encore par le fait que " *la décision concerne le processus de sélection de but ou d'alternatives* " [109].

3.2.2 Les différents types de décisions

À travers la littérature [136], [19], [1], nous distinguons trois types de décision. Cela est illustré sur la Figure (3.1).

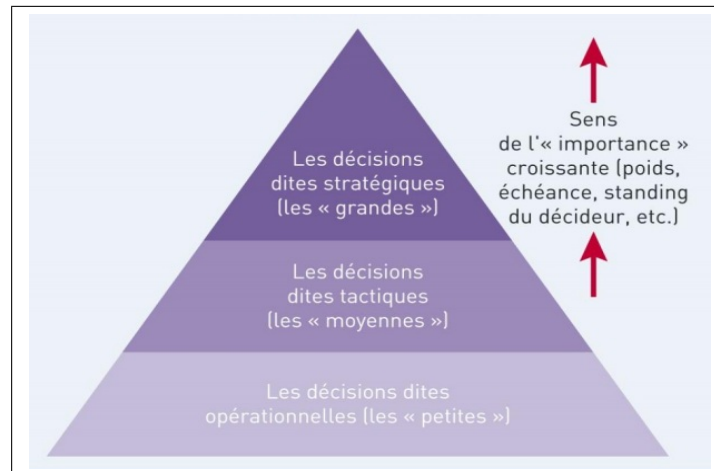


FIGURE 3.1 – Types de décision

- Les décisions stratégiques visent les relations de l'entreprise avec son environnement concernant des activités engendrant des décisions dont les conséquences sont à long terme (ex. : décision de produire un nouveau type de produit) ;
- Les décisions tactiques portent sur des activités conduisant à des décisions dont les conséquences sont à moyen terme (ex. : une décision prise par le directeur des ressources humaines pour organiser des formations pour les salariés) ;

– Les décisions opérationnelles concernent les décisions dont les conséquences sont à court terme (ex. : établissement des plannings de production).

3.2.3 Le processus de la décision

L'Aide à la Décision est une activité qui s'articule autour d'un processus de décision. Ce dernier peut être défini comme étant " *le déroulement des confrontations et des interactions régulées par différents processus compensatoires, apparaissant successivement entre les différents acteurs* " [106].

Dans la littérature, deux types de processus de décision sont distingués : le processus décisionnel séquentiel, et le processus décisionnel non séquentiel

Processus décisionnel séquentiel

En 1910, Dewey [30] a proposé un processus décisionnel en cinq étapes pour la résolution des problèmes :

1. Sensation de difficulté,
2. Définition du caractère de cette difficulté,
3. Suggestion des solutions possibles,
4. Évaluation de la suggestion,
5. Observation et expérimentation pour pouvoir accepter ou rejeter la suggestion.

Le processus de décision adopté dans la plupart des travaux d'aide à la décision est le processus de Simon [113]. En effet, Simon a proposé le modèle IDC (Intelligence Design Choice) ou « Intelligence-Modélisation-Choix » qui décrit le processus décisionnel en trois phases comme le montre la Figure (3.2).

1. La phase d'intelligence (investigation) : qui est représentée par

- Une étude de contexte et formulation du problème décisionnel.
- Une confrontation entre situation perçue et situation voulue.
- Une définition de valeurs, d'objectifs, de frontières, d'actions (solutions) possibles.

2. La phase de conception (modélisation) : cette phase est représentée par le développement et l'analyse du modèle, elle est caractérisée par

- Une élaboration du modèle avec le développement des différentes alternatives permettant la résolution du problème.
- Une description de l'état du système si une action (alternative ou solution) est appliquée.

3. La phase de choix (sélection) : cette étape consiste à faire :

- Une évaluation, comparaison, classement des actions (solutions) possibles.

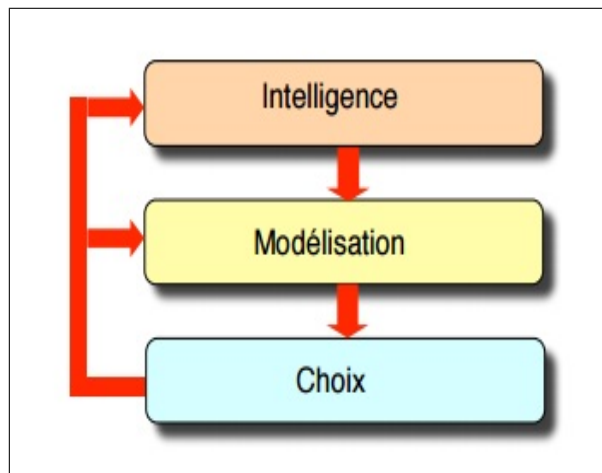


FIGURE 3.2 – Modèle IDC de Simon

- Un choix d'une action possible (si aucune action n'est satisfaisante pour le décideur, retourner vers l'une des phases antérieures).

D'après la littérature [114], une quatrième étape d'**Évaluation** peut exister dans le processus décisionnel. Cette étape consiste à confirmer le choix effectué ou à remettre en question le processus de décision en retournant vers l'une des trois étapes précédente (Intelligence, Conception, Choix) comme le montre la Figure (3.3).

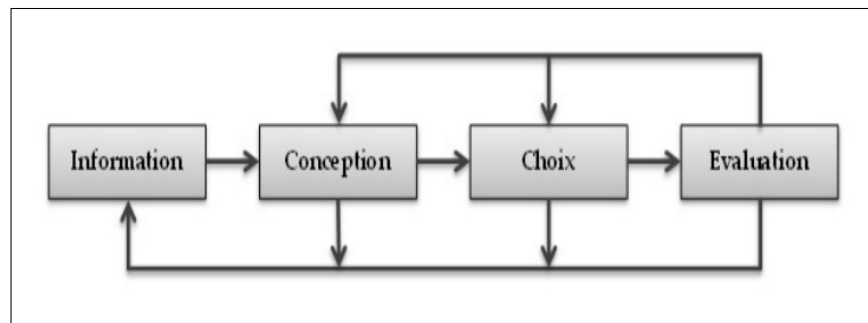


FIGURE 3.3 – Processus de décision selon Simon

Processus décisionnel non séquentiel

En 1976, Mintzberg, Raisinghani, et Theoret [89] ont proposé un processus de décision non séquentiel, basé sur le modèle de Simon, où la relation entre les phases et routines de leur proposition est circulaire plutôt que linéaire, Figure (3.4).

1. Phase d'identification (« intelligence » de Simon) : se compose de deux routines :

- Identification de la décision : les problèmes et opportunités sont identifiés dans un flot de données ambiguë et principalement verbal.

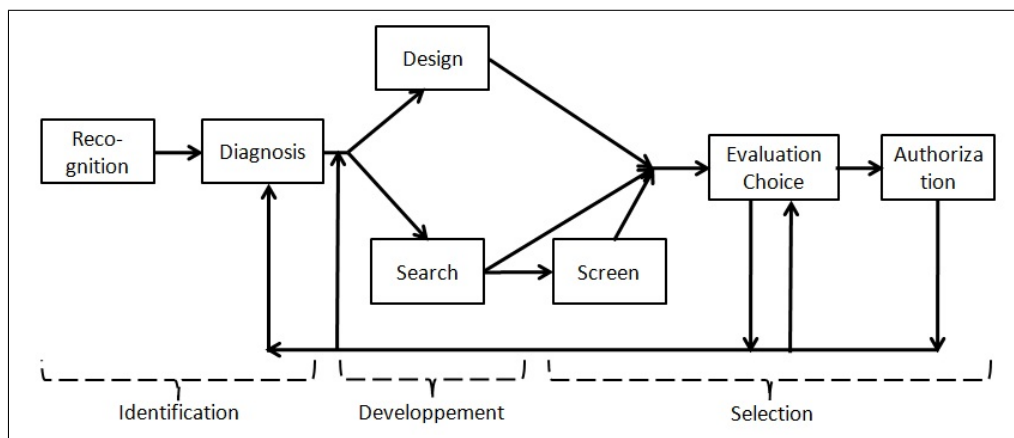


FIGURE 3.4 – Processus de décision selon Mintzberg

— Diagnostic ou exploitation des canaux d'information existant et ouverture de nouveau canaux pour clarifier et définir les issues.

2. Phase de développement (« conception » de Simon) : permet de définir et clarifier les options. Cette phase est composée de deux routines :

- Recherche : recherche de solutions prêtes à l'emploi.
- Conception : développement de nouvelles solutions ou modification des solutions existantes.

3. Phase de sélection (« choix » de Simon) : elle est composée de trois routines :

- Écran : si les alternatives considérées sont prêtes pour être intensivement évaluées, les alternatives sous-optimales y sont éliminées.
- Évaluation-choix : choix réel entre les alternatives selon trois modes possibles : jugement (intuitif), négociation et analyse.
- Autorisation : approbation pour la solution choisie et acceptation au plus haut niveau de la hiérarchie.

Afin de supporter cette prise de décision de la manière la plus efficace possible, le développement des Système d'Aide à la Décision est nécessaire et inévitable. La section qui suit est consacrée à la présentation de ces systèmes.

3.3 Les Systèmes d'Aide À la Décision (SAD)

La notion des Systèmes d'Aide à la Décision (SAD) est la traduction du concept de Decision Support System (DSS) qui a été introduit par l'école Anglosaxone. La mise en place de ce type de logiciel est dans le but de faciliter la prise de décision dans une entreprise ou organisation. Un des premiers auteurs à l'avoir proposé est Scott Morton [92] avec la notion de Système de Décision et de Gestion (Management Decision System).

Un Système d'Aide à la Décision avec une interaction de la part de l'utilisateur (le décideur) pour les problèmes peu ou mal structurés en connectant un ensemble d'informations et des jugements humains, est considéré comme un Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD). Dans un tel système, le décideur a le contrôle du processus de décision et peut remettre en cause les recommandations du système.

Klein [70] voit que les problèmes de décision traités par un SIAD se caractérisent par les ou l'une des caractéristiques suivantes :

1. Les préférences, jugements, intuitions et l'expérience du décideur sont essentiels.
2. La recherche d'une solution implique un mélange de recherche d'information, de formalisation ou définition et structuration du problème, du calcul et de la manipulation de données.
3. La séquence des opérations de recherche d'une solution n'est pas connue à l'avance parce qu'elle peut être fonction des données, être modifiée, peut ne donner que des résultats partiels, ou encore peut être fonction des préférences de l'utilisateur.
4. Les critères pour la décision sont nombreux, en conflit et fortement dépendant de la perception de l'utilisateur.
5. La solution doit être obtenue en un temps limité.
6. Le problème évolue rapidement.

La section suivante donne des définitions qui constituent un bref historique des SIAD.

3.3.1 Les Systèmes Interactifs d'Aide À la Décision (SIAD)

Gorry et Morton [54] ont été les premiers à définir un SIAD comme étant un système informatique qui supporte le décideur dans des situations de prise de décision non structurée.

Nous trouvons aussi, la définition de Keen et Morton [67] qui considèrent que le concept d'aide à la décision interactive est basé sur l'équilibre entre le jugement humain et le traitement des informations par l'ordinateur. D'après eux, l'aide apportée par les SIAD implique l'utilisation d'ordinateurs pour :

- Assister les décideurs dans leur processus de décision pour des tâches semi structurées.
- Aider plutôt que remplacer le jugement des décideurs.
- Améliorer la qualité de la prise de décision.

À leur tour, Sprague et Carlson [119] considèrent que les SIAD peuvent être caractérisés comme des systèmes informatisés, interactifs qui aident les décideurs en utilisant des données et des modèles pour résoudre des problèmes mal structurés. Cette définition est basée sur les données et les modèles qui définissent l'architecture du SIAD proposé, Figure (3.5). Cette architecture est composée : d'une interface Homme/Machine ; d'un Système Gestionnaire de

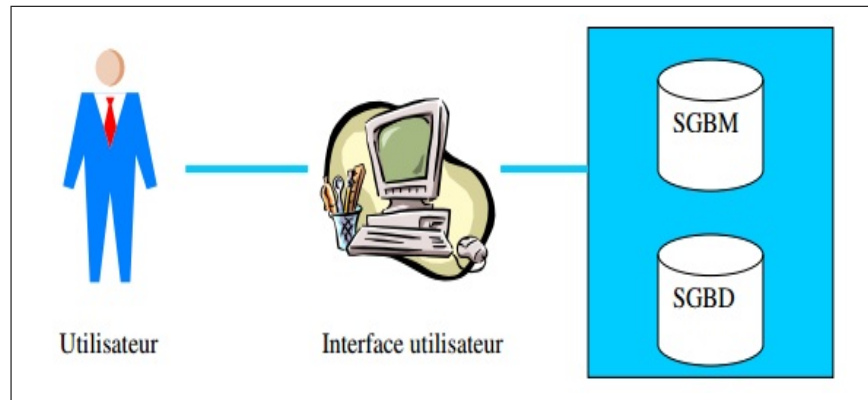


FIGURE 3.5 – Architecture des SIAD selon Sprague et Carlson

Base de Données (SGBD) contenant une base de données ainsi qu'un Système Gestionnaire de Base de Modèles (SGBM) incluant une base de modèles.

Le module SGBD joue le rôle d'une mémoire. En effet, ce module permet de sauvegarder les données, de façon permanente ou temporaire, ainsi que la gestion (enregistrement ou effacement) des données volatiles selon le souhait de l'utilisateur. Les données volatiles symbolisent les résultats obtenus au cours de traitement des données. Tandis que les données permanentes représentent les statistiques ou autres données décrivant une situation courante ou passée.

Le module SGBM permet d'organiser, trier, stocker les modèles quantitatifs de l'organisation grâce à des modèles et des procédures de calcul (outils de programmation mathématiques, de modèles de prédiction, de simulation, de modèles financiers...) qui sont manipulés dans les différents traitements des données.

Pour Checroun [24], les SIAD représentent des *systèmes* d'information *interactifs* qui sont conçus dans le but d'*aider* les décideurs à exploiter des *données* et des *modèles* pour résoudre des problèmes peu ou *non structurés*. Checroun propose une signification à chaque mot clé de sa définition comme suit :

- *Système* : ensemble complexe et maîtrisable (au sens pilotable).
- *Interactif* : couplage Homme-Machine qui veut dire l'ergonomie et le contrôle par l'utilisateur. L'utilisation conversationnelle de l'ordinateur est nécessaire.
- *Données et modèles* : le système d'information comporte non seulement les informations brutes mais aussi les traitements nécessaires à une mise en forme compréhensible (tris, sélections, calculs, éditions), de même que les outils élaborés pour analyser, comprendre, communiquer, démontrer...etc
- *Problèmes non structurés* : c'est le lot commun à tous les problèmes posés par le management. Une grande part est faite à l'intuition, au tâtonnement, à l'expérience du décideur. Le SIAD ne constitue qu'un élément du processus de décision.
- *Aider* : fournir au décideur une amplification de raisonnement et non pas une substi-

tution à ce raisonnement par une modélisation des processus qui caractériseraient ce dernier.

Checroun [24] a décrit le processus de décision avec trois principes :

1. **Le principe rationnel (économique)** : les processus de décision doivent maximiser la valeur attendue du résultat en déterminant les coûts et les risques de chaque alternative.
2. **Le principe heuristique** : la prise de décision consiste à rechercher la première alternative tel que le rapport coût/efficacité soit acceptable.
3. **Le principe du consensus** : effectuer des comparaisons successives entre les alternatives jusqu'à obtenir le consensus des décideurs.

Balasubramanian, Nochur, Henderson, et Kwan ont présenté le processus décisionnel selon cinq étapes [6] :

- Étape 1 : la définition du contexte et du but de la décision, car la décision est faite pour atteindre un but que ce soit pour résoudre un problème donné ou pour construire un projet.
- Étape 2 : l'identification ou la génération des options à considérer.
- Étape 3 : la spécification des facteurs, hypothèses, raisons et autres informations pertinentes à considérer.
- Étape 4 : l'évaluation des options par rapport aux facteurs, hypothèses et autres variables pertinentes pour prendre une décision.
- Étape 5 : la validation de la décision avec examen des résultats.

Aronson, Liang, et Turban [127] ont proposé une intégration des systèmes experts dans un SIAD selon deux modes fondamentaux : une intégration des systèmes experts dans les composants du SIAD, et une intégration d'un système expert comme un composant séparé, comme illustré sur les Figures (3.6) et (3.7) respectivement.

- Intégration des systèmes experts dans les composants du SIAD : l'incorporation des systèmes experts vise à enrichir la fonction des composants du SIAD. Cette intégration permet aux utilisateurs de réaliser des requêtes de haut niveau telles que des interrogations de type « Comment ? » et « Pourquoi ? ».
- Intégration d'un système expert comme un composant séparé : Dans le second mode d'intégration, un système expert est ajouté au SIAD initial de tel façon que le système expert complète le SIAD dans une ou plusieurs étapes du processus décisionnel. Le système expert fournit les connaissances du domaine et recommande des stratégies de résolution durant le processus.

Aussi, Forgionne, Mora, Cervantes, et Gelman ont proposé une architecture de SIAD intelligent (IDMSS) capable de supporter toutes les phases du processus de décision d'une manière continue, intégrée et complète [42]. Un SIAD intelligent est un système à base de connaissances soit dans le système gestionnaire de base de données, soit dans le système gestionnaire de base de modèles soit dans l'interface homme/machine. L'intérêt d'un tel système est de

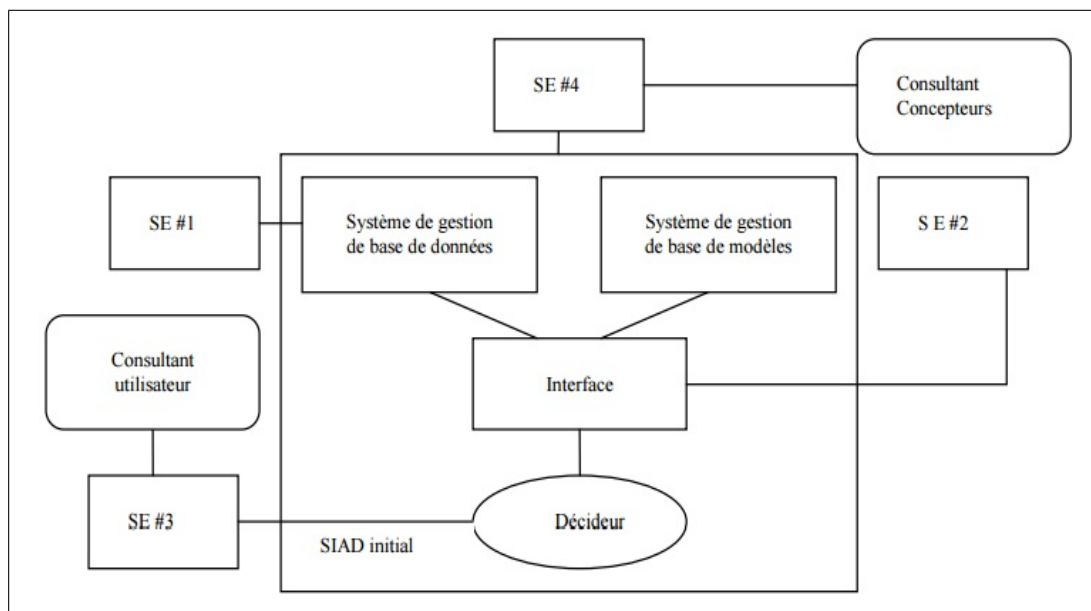


FIGURE 3.6 – Intégration de systèmes experts attachés aux composants du SIAD

pouvoir apporter une aide selon le type de raisonnement de la prise de décision.

Dans le domaine de la gestion de production, Tahon et Trentesaux [122] ont remédié aux inconvénients du processus décisionnel proposé par Simon pour la gestion de production à savoir le type de décision qui ne peut être qu'une décision de choix et l'absence de dynamique. Pour cela, ils ont proposé, un processus décisionnel pour les systèmes de gestion de production qu'ils ont nommé processus de pilotage décisionnel, contenant deux activités en plus que celles de Simon : « évènement » (en amont) et « application » (en aval).

Selon Marakas [83] un Système Interactif d'Aide à la Décision est composé de cinq composant comme le montre la Figure (3.8) :

- Un système gestionnaire de base de données : qui stocke, organise, et trie les données pertinentes pour un contexte particulier de décision ;
- Un système gestionnaire de base de modèles : qui possède un rôle similaire au système gestionnaire de base de données excepté qu'il organise, trie, stocke les modèles quantitatifs de l'organisation ;
- Un moteur de connaissances : qui remplit les tâches relatives à la reconnaissance de problèmes et à la génération de solutions finales ou intermédiaires aussi bien que des fonctions relatives à la gestion du processus de résolution de problème.
- Une interface utilisateur : qui est un élément clé des fonctionnalités du système global.
- Un utilisateur : qui fait partie intégrante du processus décisionnel.

Zarató [136] voit qu'un système d'aide à la décision doit aider un décideur dans la résolution de problèmes non programmés, mal structurés (ou semi structurés), et doit aussi posséder des

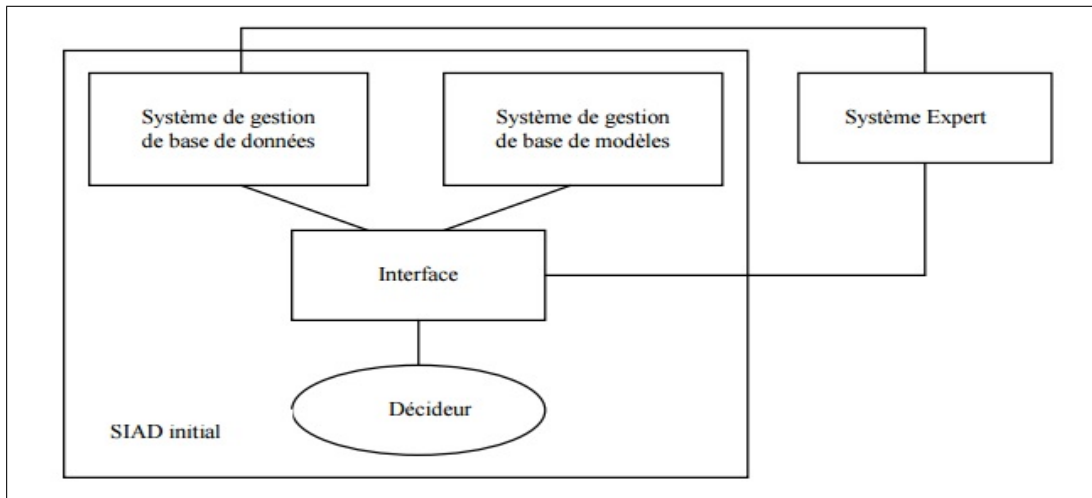


FIGURE 3.7 – Intégration d'un système expert dans un SIAD comme un composant séparé

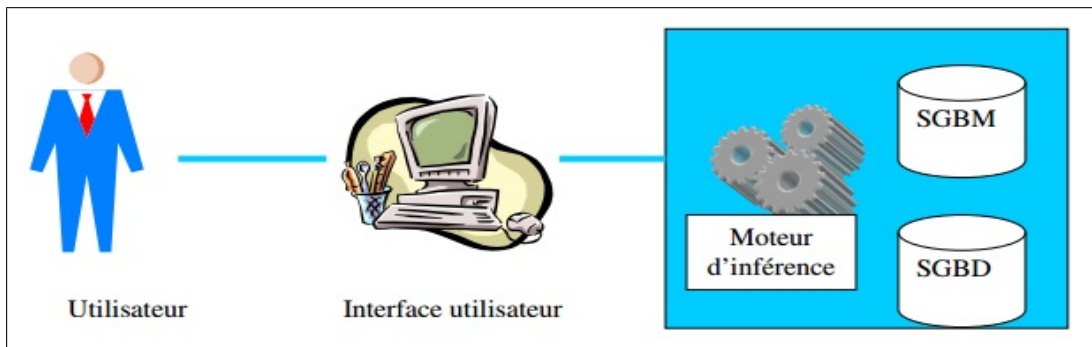


FIGURE 3.8 – Architecture des SIAD selon Marakas

facilités interactives afin d'interroger l'utilisateur.

Bouamrane [19] a présenté un système d'aide à la décision pour la régulation d'un réseau de transport urbain. Il a proposé une adaptation du modèle générique de Hoc [61], où le processus décisionnel du régulateur d'un réseau de transport urbain a été identifié à travers cinq étapes : Acquisition des perturbations, Analyse des perturbations, Construction des solutions, Évaluation, Implémentation.

Hamdadou et Bouamarne [57] ont proposé une modélisation d'un système d'aide à la décision qui permet d'optimiser la qualité de la décision dans le contexte de la gestion des terres. La modélisation proposée compte trois phases principales à savoir la phase de structuration du modèle, la phase d'exploitation, et la phase de concrétisation des résultats obtenus.

En 2010, Adla [1] a proposé une modélisation du processus de prise de décision collective en trois phases principales : Pré-décision ; Décision ; et Post-décision. La phase « Pré-décision » permet la compréhension collective des objectifs, elle est primordiale pour le déroulement de la prise de décision. La dernière phase « Post-décision » referme cet espace et permet

d'assurer un suivi de la décision, d'évaluer la qualité de celle-ci et d'influencer les négociations futures. Quant à la seconde phase qui est la phase de « Décision », elle comprend quatre étapes cognitives principales qui constituent les éléments constructeurs de tout processus de prise de décision selon le modèle de Simon [114] pour la prise de décision individuelle.

3.3.2 Modèles de l'opérateur humain et du système homme machine

D'après Millot [86], il existe trois courants de modélisation correspondant à trois périodes de l'histoire des systèmes homme-machine :

- **Le courant facteurs humains « Human Factors »** : qui a une vision ergonomique selon une approche de modélisation des composants perceptibles par les opérateurs (capteurs), avec une analyse de l'activité humaine.
- **Le courant automatique humaine « Human Engineering »** : les chercheurs dans ce facteur s'appuient sur des théories de la physique pour tenter de modéliser l'opérateur humain. Différents modèles représentent ce facteur : la théorie de l'information, le modèle OCM et le modèle de la régulation de l'activité humaine.
- **Le courant ingénierie cognitive « cognitive engineering »** : les rôles des opérateurs humains se déplacent vers des tâches de supervision, essentiellement de décision, beaucoup moins réactives que précédemment. Ces tâches sont de nature cognitive et reposent dans leur modélisation sur les sciences cognitives telles que l'Intelligence Artificielle, la psychologie du travail, la sociologie et l'ergonomie. La Figure (3.9) illustre ce principe de supervision. L'aide à la décision peut concerner la conduite ou la gestion de production, la surveillance, le diagnostic, l'accommodation ou la configuration de l'installation en cas de défaillances.

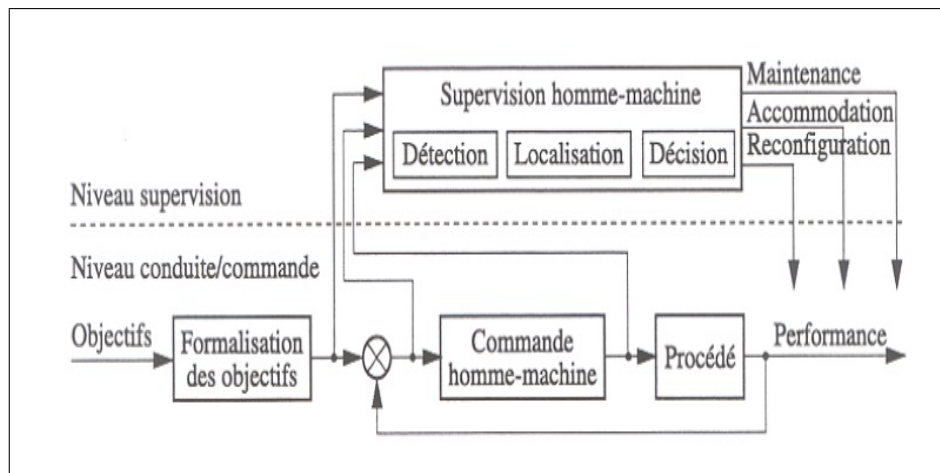


FIGURE 3.9 – Principe de supervision selon Millot

Deux difficultés peuvent être retrouvés lors de la modélisation d'un système homme-

machine. Une première difficulté qui est liée à la modélisation du système technique, et une seconde qui est liée à la modélisation de la prise de décision humaine.

Modélisation du système technique

La norme NFE 90-001 définit un système technique comme "un ensemble d'éléments interconnectés de façon logique, qui se coordonnent pour réaliser une tâche précise". Néanmoins, la grande dimension d'un tel système rend les méthodes classiques de modélisation et d'identification coûteuse en temps et conduit à des modèles impropres pour une simulation en temps réel. Dans ce but, des travaux sur la modélisation systémique ont été proposés [75], [37] et ont produit plusieurs méthodes d'analyse et de modélisation comme SAGACE, et SADT en décomposant le système global selon deux axes : l'axe (buts/moyens) et l'axe (tout/partie), Figure (3.10).

Quatre niveaux de modèles peuvent être distingués selon l'axe (buts/moyens), à savoir le niveau des objectifs, le niveau des fonctions, le niveau des comportements et le niveau des composants. Où les deux niveaux supérieurs concernent la nature et la réalisation des fonctions (et leur séquençement) assurées par les comportements du niveau physique.

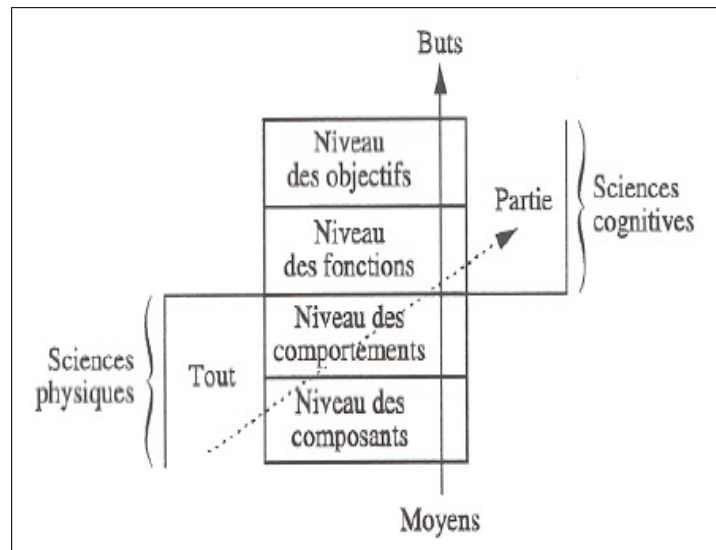


FIGURE 3.10 – Décomposition multiniveau d'un grand système selon [80]

Parmi les approches possibles de modélisation, nous pouvons citer les modèles qualitatifs, les réseaux de Petri, etc [50]. Les prises de décisions relatives à la mise en œuvre des fonctions sont très souvent les résultats d'algorithmes d'optimisation, ou bien d'une expertise humaine, qui peut être mise en œuvre sous forme de règles. Alors, on est face à l'Intelligence Artificielle, et dont l'une des problématiques concerne l'extraction, et la modélisation des savoir-faire humains [63].

Modélisation de la prise de décision humaine

Plusieurs modélisations ont été proposées, tel que le modèle de H.A Simon [113] et le modèle du processus de pilotage décisionnel proposé par Tahon et Trentesaux, qui vient compléter et enrichir celui de Simon en ajoutant deux étapes complémentaires pour pouvoir piloter un processus dynamique [122].

L'intégration de l'opérateur humain dans la supervision d'un grand système a conduit à la proposition d'un modèle décrivant les différents comportements de l'opérateur pour la résolution des problèmes de décision [101], [102]. Ce modèle a été ensuite révisé par Hoc [61], Figure (3.11).

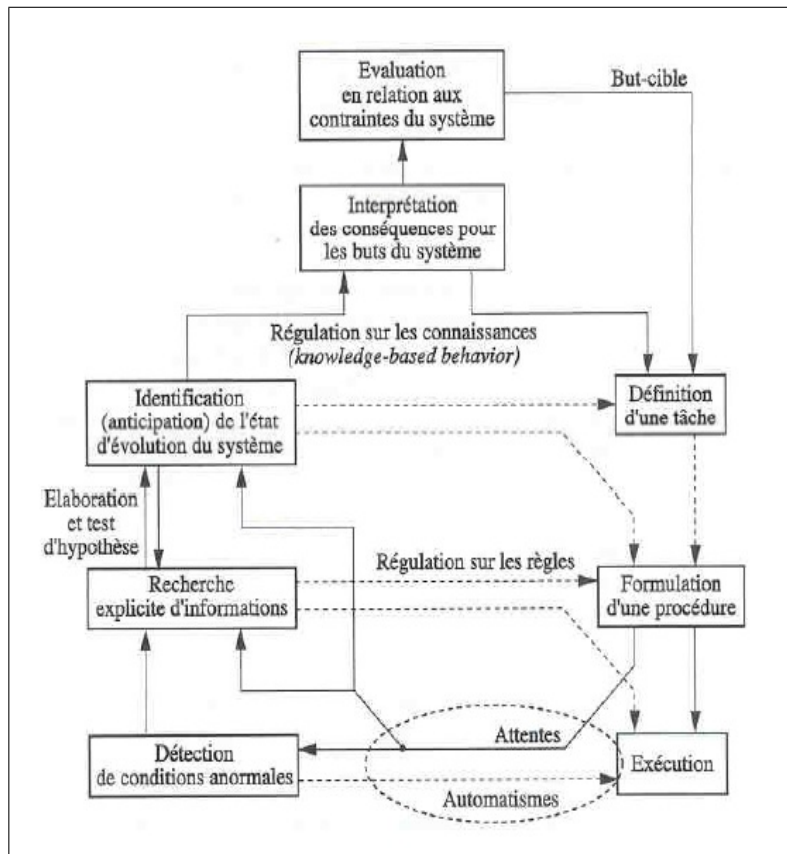


FIGURE 3.11 – Modèle de résolution de problème selon Rasmussen, révisé par Hoc

Pour synthétiser le schéma illustré sur la Figure (3.11), nous pouvons dire que suite à une détection d'une situation anormale, l'opérateur évalue la situation en observant les informations disponibles, identifie (diagnostic) ou anticipe (pronostic) l'état du système. Ensuite, il élabore une solution en fonction des contraintes et des risques encourus. Cette solution est planifiée selon le but ciblé avec des procédures, ce qui constitue la tâche à exécuter. Si cette tâche résulte en une action, celle-ci est exécutée.

La révision de Hoc complète le modèle initial de Rasmussen, en précisant les mécanismes cognitifs de l'évaluation de situation : diagnostic et/ou pronostic par une méthode de génération d'hypothèses puis de test de ces hypothèses. Il introduit également une dimension temporelle (diagnostic : état présent, pronostic : état futur, attentes de l'évolution du système pour reboucler sur une nouvelle évaluation de la situation),[86]. De plus, ce modèle propose trois niveaux de comportement :

1. Le comportement basé sur les compétences (skills-based behaviour) : l'opérateur bien entraîné exécute spontanément l'action adéquate dès qu'il détecte les conditions anormales (modèles d'automatique tels que OCM).
2. Le comportement basé sur des règles (rule-based behaviour) : l'opérateur expert ayant identifié l'état du système applique directement une tâche prédéfinie qu'il a apprise (modèles de systèmes à base de connaissances).
3. Le comportement basé sur les connaissances (knowledge based behaviour) : l'opérateur invente une solution à un problème qu'il n'a jamais rencontré (Modèles de planification en Intelligence Artificielle).

3.3.3 Approches structurelles de la coopération homme-machine

La nécessité d'intégrer des outils d'aide à la décision dans les systèmes homme-machine, a poussé les chercheurs à proposer des approches visant essentiellement une structure favorisant la prévention et/ou la résolution de conflit décisionnel pouvant apparaître entre les deux types de décideurs (humain et artificiel) [87].

D'un point de vue structurel, deux structures génériques existent dans la littérature, respectivement verticale (hiérarchique) et horizontale (hétérarchique).

Structure verticale

Ici, l'opérateur est responsable de toutes les variables du processus de décision et il peut faire appel si nécessaire à l'outil d'aide à la décision qui lui fournira des conseils. Cette situation est schématisée sur la Figure (3.12) [86]. Dans ce cadre, deux principes peuvent être distingués :

- Le premier principe vise à guider l'opérateur dans sa démarche de résolution de problème pour l'amener à découvrir lui-même une solution. Le temps de décision peut être assez long, par conséquent, cela peut exclure les situations urgentes.
- Le second principe vise les situations urgentes, dans lesquelles l'opérateur peut « perdre » ses capacités de raisonnement objectif suite au stress par exemple. De ce fait, il convient de lui proposer des solutions, car la pression temporelle peut être un obstacle et ne lui permet pas de découvrir les solutions.

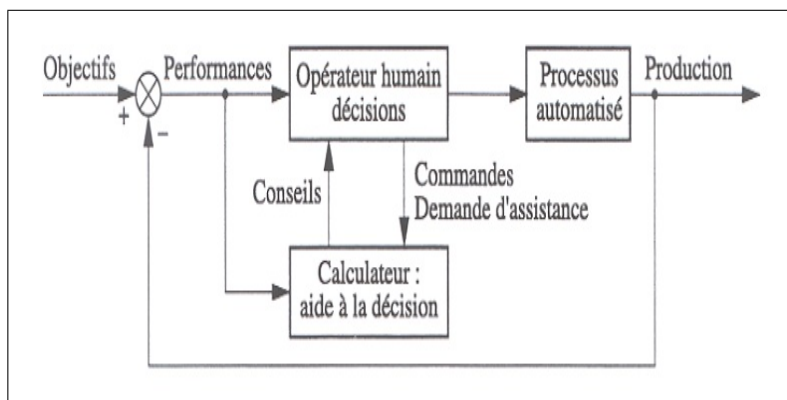


FIGURE 3.12 – Structure de coopération homme-machine verticale

Structure horizontale

Dans la structure horizontale, les sorties de l’outil d’aide sont connectées aux actionneurs du système de commande du procédé, ce qui suppose que cet outil possède des capacités de raisonnement en temps réel. Les deux décideurs, opérateur et outil d’aide sont alors au même niveau hiérarchique, et les tâches de supervision ainsi que les actions qui en résultent peuvent être réparties dynamiquement entre eux. Cette structure permet de soulager l’opérateur dans les situations de surcharge de travail, Figure (3.13) [86].

Cette coopération peut être mise en œuvre selon deux principes :

- Le premier est une répartition dynamique explicite, commandée par l’opérateur via une interface de dialogue.
- Le second est une répartition implicite, gérée par le système.

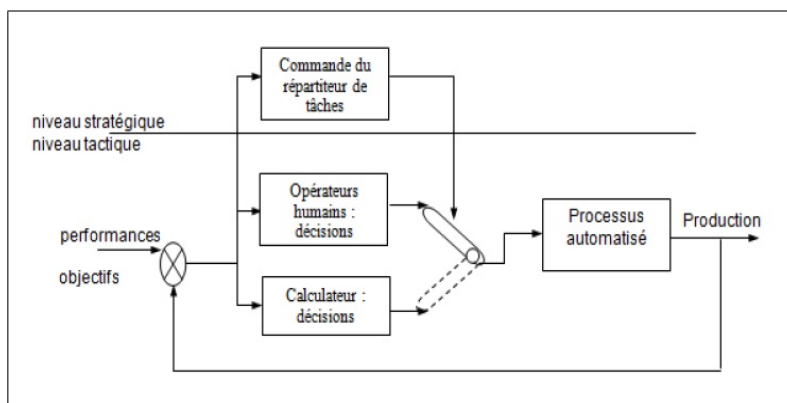


FIGURE 3.13 – Structure de Coopération Homme-machine horizontale

3.4 Classification des Systèmes d'Aide à la Décision

La classification des systèmes d'aide à la décision peut être réalisée selon différents critères. Une synthèse de classification a été donnée dans [1] comme suit :

3.4.1 Classification au niveau utilisateur

Une classification d'un point de vue utilisateur a été faite par Hattenschwiler, Moresino, et Schroff dans [59]. Les chercheurs ont distingué les SIAD coopératifs, actifs et passifs :

1. Un SIAD passif est un système qui aide le processus décisionnel mais qui ne peut apporter des solutions ou des suggestions de décisions explicites.
2. Un SIAD actif peut apporter des solutions ou suggestions de décisions explicites.
3. Un SIAD coopératif permet au décideur de modifier, de compléter ou d'affiner les suggestions de décisions fournies par le système avant de les valider. Ce type des SIAD permettent aussi d'améliorer, compléter et affiner les suggestions du décideur, et recommence le processus décisionnel à nouveau jusqu'à ce qu'une solution consolidée soit générée.

3.4.2 Classification au niveau conceptuel

D'un point de vue conceptuel, Power a distingué quatre types génériques de Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision [97] :

1. un SIAD basé sur les données qui est caractérisé par la manipulation d'une série temporelle de données internes à l'organisation et quelquefois de données externes ;
2. un SIAD orienté modèle qui est déterminé par la manipulation d'un modèle de simulation, d'optimisation, financier et statistique. Un SIAD orienté Modèle utilise des données pour aider les décideurs à analyser une situation, mais n'est pas nécessairement basé sur les données.
3. un SIAD orienté documents qui fournit une expertise de résolution de problèmes qui sont spécialisés et stockés comme des faits, des règles, ou dans des structures similaires ;
4. un SIAD orienté communication supporte plus qu'une personne travaillant sur une tâche partagée.

3.4.3 Classification au niveau système

D'un point de vue système, Power [98] a divisé les SIAD en deux groupes :

1. Les SIAD d'entreprise : qui sont reliés à de larges entrepôts de données et servent à plusieurs gestionnaires dans l'entreprise ;

2. Les SIAD de bureau ou simple utilisateur : qui est un petit système résidant dans un ordinateur d'un gestionnaire individuel.

3.4.4 Classification au niveau connaissance

Lévine et Pomerol [78] ont proposé une autre classification d'un point de vue connaissance, en distinguant quatre classes selon la nature des connaissances utilisées :

1. Les systèmes à base de savoir théorique relatif au problème, qui calcule les décisions optimales ou satisfaisantes ou simulent les résultats de décision envisagées ;
2. Les systèmes à base de savoir faire d'un expert qui sont construits à partir des connaissances utilisées par les experts du domaine pour résoudre chacun des problèmes de ce domaine.
3. Les systèmes à base de savoir factuel, en particulier les systèmes utilisant des réseaux de neurones, généralement construits par apprentissage par le système d'un grand nombre de problèmes du domaine qui ont déjà été rencontrés et, plus ou moins bien, résolus.
4. Les systèmes informatiques classiques combinant une base de données fournissant les informations utiles à la prise de décision, un tableur calculant quelques éléments de décision, et éventuellement un grapheur¹ permettant de les présenter sous un format ergonomique.

3.5 Conclusion

Prendre les meilleures décisions peut s'avérer difficile en fonction de la situation et de l'importance de la décision à prendre. En effet, la mise en place des Systèmes d'Aide à la Décision a modifié considérablement la décision prise, en permettant au décideur de mieux gérer la masse et la complexité de l'information pour mieux intervenir.

La prise de décision est une préoccupation fondamentale pour tout dirigeant d'entreprise. Autrement dit, toute organisation dépend structurellement de la nature des décisions qui sont prises par le décideur.

Les Système d'Aide à la Décision conçus ne sont pas forcément dédiés au pilotage de l'entreprise (niveau stratégique), ils peuvent aussi être destinés à un décideur dans un niveau tactique ou opérationnel.

A travers le présent chapitre, nous nous sommes rapproché du domaine de l'aide à la décision. Plus exactement, nous l'avons commencé par la présentation de l'aide à la décision, ainsi, nous avons parlé des types de décision et du processus décisionnel. Ensuite, les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision ont été présentés en mettant l'accent sur leur historique, leurs

1. Programme permettant de générer des graphiques, comme des histogrammes ou des graphiques à secteurs circulaires, à partir de données chiffrées

évolutions technologiques dans le temps, ainsi que certaines de leurs particularités et leur classification.

Le chapitre qui suit sera consacré à la description de notre contribution à savoir un système d'aide à la décision pour le retour des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime.

Deuxième partie : Contribution de la thèse

Chapitre 4

Contribution

Le présent chapitre vise la présentation détaillée d'un système d'aide à la décision proposé pour le retour des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime. Il comporte trois modules pour la résolution de ce problème. Le premier module est représenté par un algorithme approché à base d'une seule solution (Recherche Tabou), le seconde permet de trouver un retour optimal des conteneurs vides en utilisant un autre algorithme approché à base de population de solution (Algorithmes Génétiques). Le troisième module offre la possibilité de trouver une solution optimale en utilisant un algorithme exact (Branch & Bound).

Plan

4.1	Introduction	88
4.2	Conduite et supervision des systèmes complexes : Cas d'un problème de retour des conteneurs vides	88
4.3	Interaction de l'armateur pour la gestion des conteneurs / demandes clients . .	89
4.3.1	Tâche et activité de l'armateur maritime	89
4.3.2	Gestion des demandes clients en exploitation normale	89
4.3.3	Gestion des demandes clients en cas de perturbations	89
4.3.4	Retour à la normale	90
4.4	Modèle comportemental de l'armateur	90
4.5	Modèle décisionnel adopté pour l'armateur	91
4.6	Classification du système décisionnel proposé	93
4.7	Modélisation UML du système décisionnel proposé	93
4.8	Présentation de l'état initial du système modélisé	95
4.9	Processus de traitement des demandes clients	97
4.10	Approche 1 : Recherche Tabou (RT)	99
4.10.1	Présentation de la méthode RT	99

4.10.2	Fonctionnement de l'algorithme RT pour la recherche des conteneurs vides	100
4.10.3	Synthèse	103
4.11	Approche 2 : Algorithme Génétique (AG)	103
4.11.1	Présentation de l'AG	104
4.11.2	Fonctionnement de l'AG appliqué à la recherche des conteneurs vides . .	104
4.11.3	Synthèse	109
4.12	Approche 3 : Branch & Bound (B&B)	109
4.12.1	Présentation de B&B	110
4.12.2	Convergence de B&B	111
4.12.3	Fonctionnement de B&B pour le retour des conteneurs vides	111
4.12.4	Synthèse	112
4.13	Conclusion	113

4.1 Introduction

L'objectif d'une compagnie maritime propriétaire des conteneurs est de satisfaire ses clients en maximisant son gain. Bien-sûr, pour assurer un transport de marchandise avec de meilleures conditions, il faut l'emballer et l'arranger dans des conteneurs vides. Toutefois, ces conteneurs ne sont pas toujours disponibles au niveau de certains ports qui exportent beaucoup plus qu'ils importent. Ce problème de disponibilité des conteneurs vides est l'un des problèmes majeurs rencontrés par l'armateur (tels que le contrôle, la supervision, la prévision, la réparation, le chargement, le déchargement, le stockage ...).

Dans le cadre de cette étude, nous contribuons à la résolution de ce problème par la proposition d'un modèle décisionnel permettant d'aider l'armateur dans la prise de décision lors de la recherche de ses conteneurs vides à moindre coût pour satisfaire ses clients

En ce sens, nous nous sommes intéressés à l'étude de la manière avec laquelle sont retournés les conteneurs vides vers un port en proposant des solutions optimales (un retour moins coûteux) pour l'armateur qui doit payer cet frais de retour.

Nous décrivons dans ce chapitre le modèle comportemental d'aide à la décision proposé à travers une approche structurée, aussi, nous présentons le système décisionnel selon une modélisation UML. Ensuite, nous présentons l'état initial du système modélisé, pour passer à la description du noyau de notre contribution (algorithmes d'optimisation), qui comporte trois sous systèmes complémentaires.

4.2 Conduite et supervision des systèmes complexes : Cas d'un problème de retour des conteneurs vides

Lors de la présence d'un client au niveau d'un port source pour envoyer une marchandise vers un port destination, il va demander un certain nombre de conteneurs vides qui doivent être disponibles dans le stock de ce port pour charger sa marchandise.

La difficulté apparait lorsque les conteneurs vides ne sont pas disponibles au niveau de la zone de stockage du port source de la demande client, alors la compagnie doit lancer une recherche de ces derniers pour satisfaire le client. Le problème est comment mettre en place un système d'aide à la décision qui permet :

- D'assurer la surveillance du réseau de transport maritime en ce qui concerne la distribution des conteneurs vides,
- Le diagnostic consistant à identifier les meilleurs chemins de retours des conteneurs vides,
- D'aider l'opérateur de la compagnie à prendre la décision pour retourner les conteneurs vides manquants vers le port source de la demande client à un coût minimal.
- Accroître le gain de la compagnie maritime possédant les conteneurs.

4.3. INTERACTION DE L'ARMATEUR POUR LA GESTION DES CONTENEURS / DEMANDES CLIENTS

Le travail de l'armateur en cas de problème d'indisponibilité de conteneurs vides consiste à trouver le meilleur retour par rapport à l'état actuel du réseau (planification à un instant T) afin d'assurer la satisfaction du client tout en optimisant les frais de retour pour la compagnie car si le coût de transport des conteneurs pleins est réglé par le client, le coût de transport des conteneurs vides retournés est à la charge de la compagnie en question (minimiser le coût de retour des conteneurs vides pour accroître le gain de la compagnie).

4.3 Interaction de l'armateur pour la gestion des conteneurs / demandes clients

Cette section est consacrée à la description détaillée de l'interaction de l'armateur de conteneurs dans un réseau de transport maritime en cas de présence des clients qui demandent des conteneurs vides.

4.3.1 Tâche et activité de l'armateur maritime

L'armateur est la personne qui s'occupe du transport maritime proprement parler. Sa mission est d'assurer le transport des marchandises des clients à partir d'un port source A vers un port destination B par la mer, dans les délais, et en bon état.

La tâche de l'armateur vis-à-vis du client peut être classifiée selon deux cas qui peuvent se présenter en fonction de l'état du système (niveau de stock des conteneurs vides dans le port source) : Gestion en exploitation normal et Gestion en cas de perturbation (manque de conteneurs vides dans le port source).

4.3.2 Gestion des demandes clients en exploitation normale

Dans la situation où le trafic des conteneurs est normal (il existe des conteneurs vides disponible au niveau du stock du port source de la demande client), l'armateur doit suivre l'évolution de celui-ci, en mettant à jour le niveau du stock de chaque port concerné par le transfert (arrivé/départ) des conteneurs, afin qu'il reste dans un certain intervalle de normalité et satisfaire les clients.

Dans ce cas de figure, l'armateur surveille le trafic des conteneurs. Il observe notamment leur distribution sur le réseau maritime afin d'atteindre l'objectif de qualité de service et satisfaire sa clientèle sans délai d'attente.

4.3.3 Gestion des demandes clients en cas de perturbations

Dès que l'armateur détecte la présence d'une perturbation (manque de conteneurs vides pour envoyer la marchandise d'un client), celui-ci prend les mesures nécessaires pour la

résolution de ce problème et reprendre favorablement à la demande du client.

Dans ce cas, les autres demandes clients présentes dans ce port sont mises en attente pendant le temps de trouver des conteneurs vides et terminer le traitement de la demande client qui est en cours. L'armateur peut faire appel à l'outil d'aide à la décision proposé pour trouver et retourner des conteneurs vides à moindre coût vers le port où le besoin est signalé. Le système en question propose des solutions optimales de retour des conteneurs vides pour l'armateur. Ce dernier peut accepter ou ignorer l'aide recommandée par le système proposé.

4.3.4 Retour à la normale

Une fois que la perturbation est maîtrisée (retour des conteneurs vides et satisfaction du client), l'armateur doit rétablir une gestion fluide des autres demandes au niveau de ce port.

4.4 Modèle comportemental de l'armateur

Pour le cas d'un armateur gérant le flux de ses conteneurs à partir de son poste de contrôle et de supervision, deux niveaux comportementaux sont identifiés à savoir :

- Une recherche aléatoires des conteneurs vides selon les disponibilités des autres ports au niveau de leurs zones de stockage, n'impliquant presque pas d'intervention de la part de l'armateur.
- Une recherche basée sur le Système d'Aide à la Décision proposé (la proposition de solutions de retour optimal des conteneurs vides adaptées à la situation à laquelle l'armateur est confronté) qui nécessite l'intervention de l'armateur pour décider et valider l'une des solutions données par le SAD proposé.

Par conséquent, nous pouvons dire que le développement du SAD pour le retour des conteneurs vides est considéré comme étant situé dans le courant d'ingénierie cognitive (voir section 3.3.2, chapitre 3) du fait que la tâche de l'armateur est orientée vers une tâche de supervision et beaucoup plus de décision.

L'analyse du comportement de l'armateur par rapport au SAD proposé nous a permis de considérer que la structure verticale (voir section 3.3.3, chapitre 3) est la plus appropriée pour le cas d'étude présenté dans cette thèse car l'armateur reste toujours le premier responsable sur toute décision prise concernant le retour des conteneurs vides.

L'armateur peut donc demander l'aide du système selon le besoin suite à une détection d'un problème de manque de conteneurs vides. Le SAD lui propose des solutions optimales et c'est à l'armateur de décider d'adopter l'une des solutions ou carrément ignorer l'aide proposée. La Figure (4.1) permet de synthétiser cela.

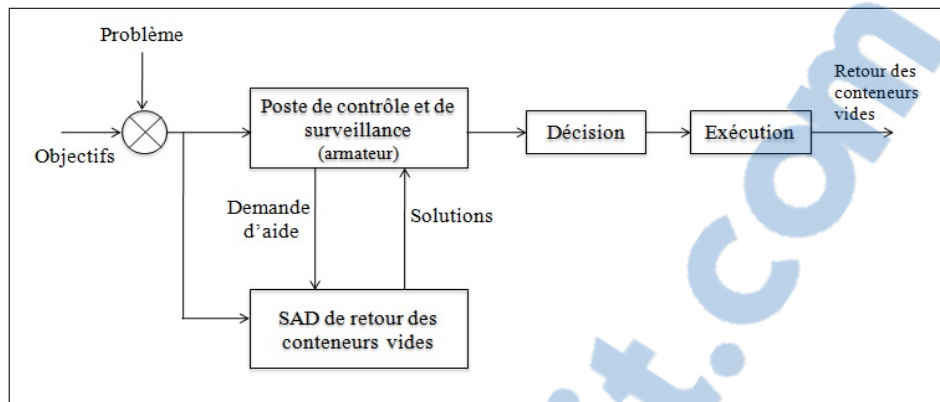


FIGURE 4.1 – Modèle comportemental de l'armateur

4.5 Modèle décisionnel adopté pour l'armateur

Le modèle d'aide à la décision présenté dans cette étude pour le problème de retour des conteneurs vides est inspiré de celui proposé par Bouamrane [19]. Ce modèle décisionnel proposé pour le cas d'un armateur de conteneurs dans un réseau de transport maritime est décomposé en cinq phases distinctes. Chacune de ces phases comprend un ensemble d'étapes comme le montre la Figure (4.2).

Phase 1 (Acquisition des demandes clients) : Après avoir configuré l'état initial du système et la distribution des conteneurs sur le réseau maritime, chaque demande client (demande des conteneurs vides pour envoyer la marchandise) est affectée vers le port adéquat selon le port source.

Phase 2 (Analyse des demandes clients) : Observation des demandes et identification de l'état du système concernant les stocks des conteneurs vides. Si un manque est remarqué, le système détecte cette pénurie et détermine le nombre des conteneurs vides manquants pour la satisfaction du client.

Phase 3 (Construction des solutions de retour des conteneurs vides) : Ici, l'armateur a la possibilité de lancer un mécanisme qui lui permet de construire des solutions pour la recherche des conteneurs vides à moindre coût. Ce mécanisme propose trois solutions réalisables optimales selon trois algorithmes d'optimisation différents qui sont invisibles pour l'armateur :

- Algorithme de la Recherche Tabou.
- Algorithme Génétique.
- Algorithme de Branch & Bound.

Phase 4 (Choix et validation d'une solution) : C'est une étape de choix de l'une des solutions proposées par le système. Une fois que l'armateur a fait son choix, il doit

le valider.

Phase 5 (Adoption de la solution retenue) : Cette phase vise essentiellement à l'acceptation sociale du résultat donné par le système. C'est une mise en œuvre de la décision retenue par l'armateur.

Le décideur (armateur) est libre d'accepter une des solutions proposées par le système ou d'ignorer l'aide proposée.

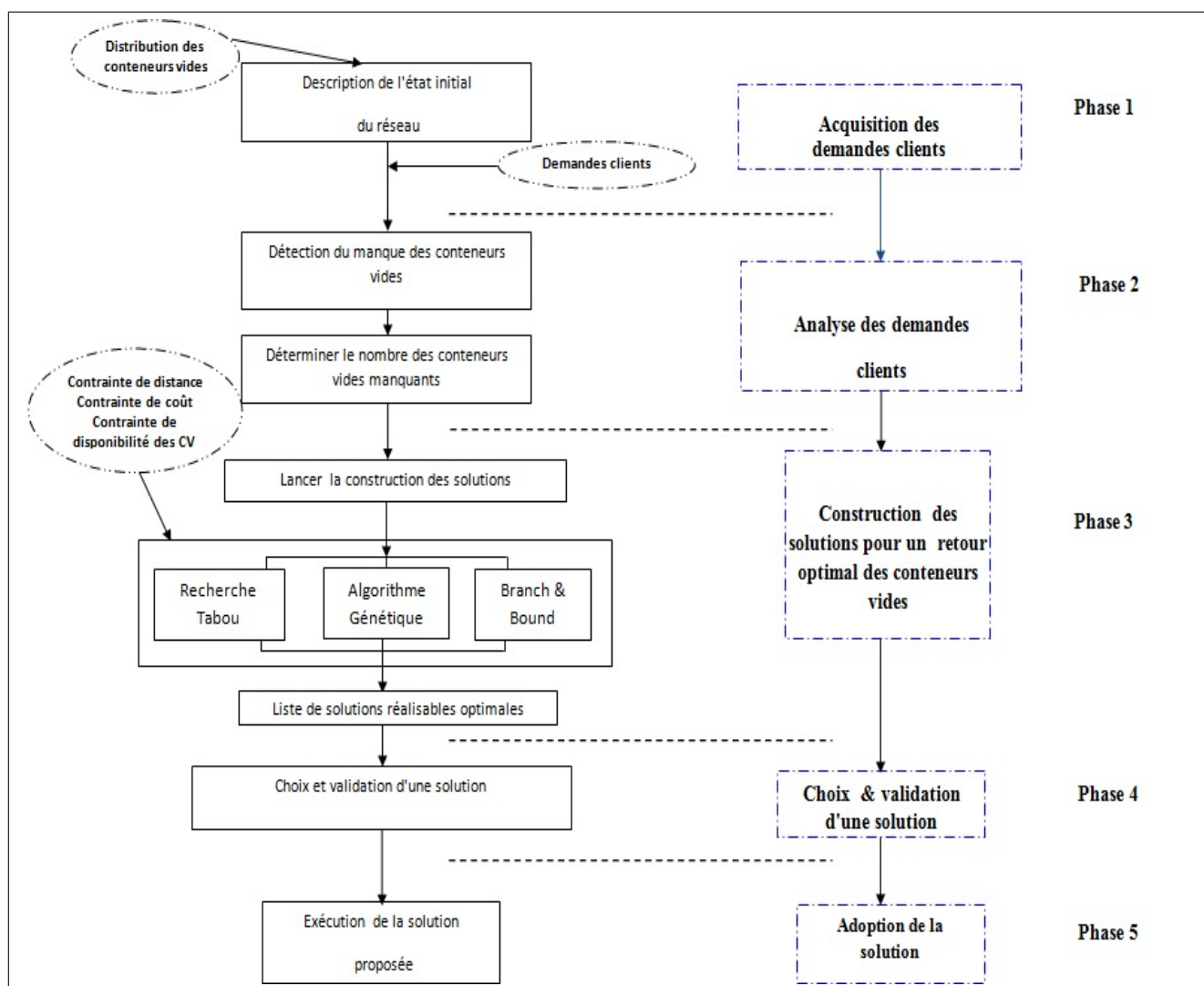


FIGURE 4.2 – Modèle décisionnel proposé

4.6 Classification du système décisionnel proposé

D'après la classification des SIAD (voir section 3.4, Chapitre 3), nous pouvons considérer le système d'aide à la décision proposé pour l'armateur de la manière suivante :

- D'un point de vue utilisateur : c'est un SIAD passif qui aide le processus décisionnel mais qui ne peut apporter des solutions d'une manière explicite. L'interaction de l'armateur est nécessaire pour valider ou non la solution proposée par le système.
- D'un point de vue conceptuel : c'est un SIAD orienté modèle basé sur un modèle d'optimisation en utilisant des données pour aider le décideur à analyser et prendre une décision.
- D'un point de vue système : c'est un SIAD de bureau (SIAD avec un simple utilisateur).
- D'un point de vue connaissance : le système proposé peut être classé parmi les systèmes à base du savoir théorique relatif au problème. Il calcule les solutions possibles pour proposer des décisions optimales réalisables.

4.7 Modélisation UML du système décisionnel proposé

Pour décrire les différentes étapes de conception de notre modèle décisionnel, nous avons utilisé le langage UML (Unified Modeling Language) pour plusieurs raisons [93] :

1. UML est un langage qui sert à décrire des modules d'un système (réel ou logiciel) ;
2. Il possède un système de notation pour modéliser les systèmes en utilisant des concepts orienté-objets ;
3. Il permet de faire des simulations avant de construire un système ;
4. Il représente un standard de modélisation, une notation : il s'agit donc d'un outil et non d'une méthode ;
5. Il permet de représenter l'aspect traitement du système aussi bien que l'aspect de données ;
6. Il permet d'obtenir une modélisation de très haut niveau indépendante des langages et des environnements ;
7. Il peut être appliqué à toutes sortes de systèmes ne se limitant pas au domaine informatique.

D'après [99], le diagramme de classes permet de modéliser les classes du système et leurs relations indépendamment d'un langage de programmation particulier. En effet, il est utilisé dans le but d'avoir une vue logique et d'identifier les éléments du domaine, les relations et les interactions entre ces éléments.

Le diagramme de classes modélise les concepts du domaine d'application ainsi que les concepts internes créés dans le cadre de l'implémentation d'une application .

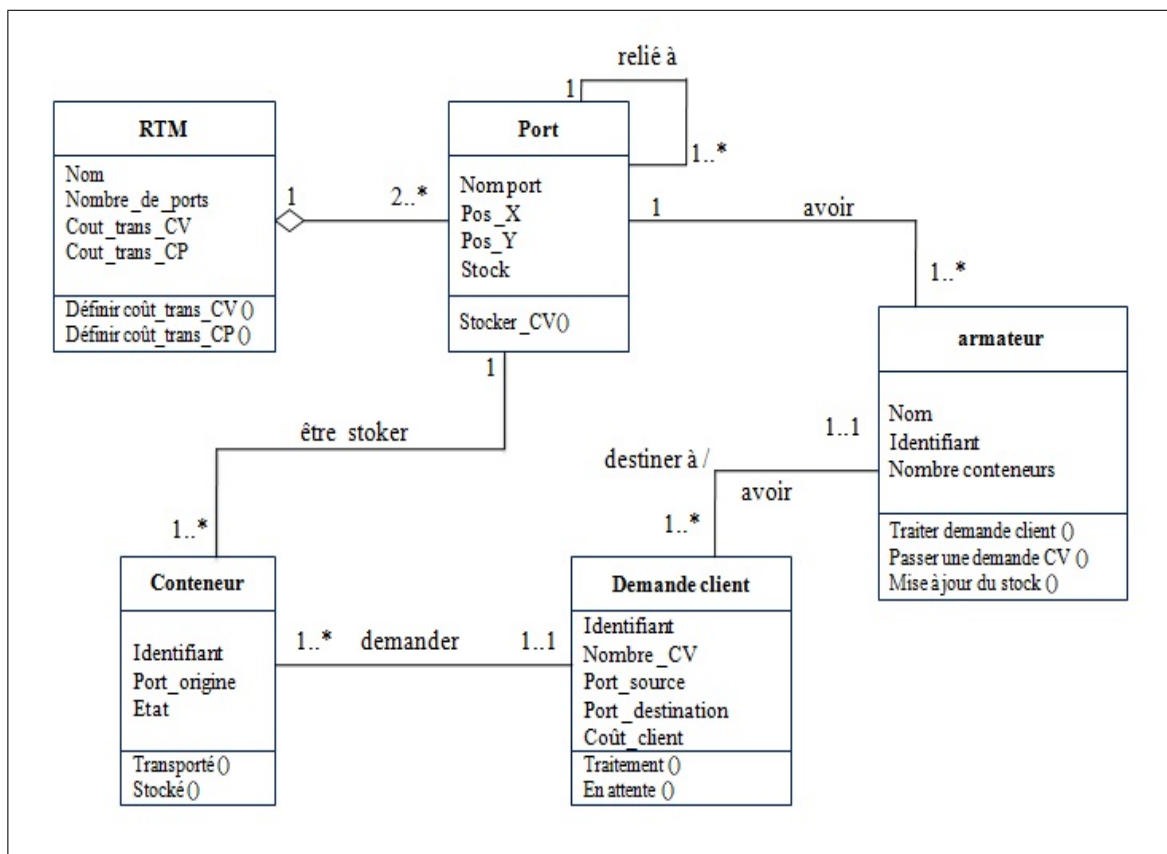


FIGURE 4.3 – Diagramme de classe du système proposé

Nous pouvons structurer la modélisation proposée dans ce travail par le diagramme de classe illustré sur la Figure (4.3). Ce diagramme montre la partie statique de la modélisation. Il permet de présenter les classes du système proposé ainsi que les différentes relations entre celles-ci en faisant abstraction des aspects temporels et dynamiques du système.

Le diagramme de classe proposé est composé de cinq classes distinctes : Réseau de Transport Maritime (RTM), Port, Armateur, Demande client, Conteneur. Ces classes sont connectées via des relations.

- La classe RTM : Un RTM est composé d’au-moins deux ou plusieurs ports reliés entre eux.
- La classe Port : Un port peut être relié à un ou plusieurs autre ports. Aussi un port peut avoir un ou plusieurs armateurs.
- La classe Armateur : Un armateur peut recevoir plusieurs demandes clients.
- La classe Demande client : Plusieurs demandes clients peuvent être destinées à un seul armateur.
- La classe Conteneur : Un ou plusieurs conteneurs peuvent être demandés par la même demande client. Aussi, un ou plusieurs conteneurs peuvent être stockés sur le même

port.

Pour illustrer le flux entre le client, l'armateur et le système proposé, nous présentons un diagramme de séquence, Figure (4.4). Ce diagramme permet de modéliser le coté dynamique du système en décrivant comment ses éléments interagissent entre eux à travers les échanges de messages.

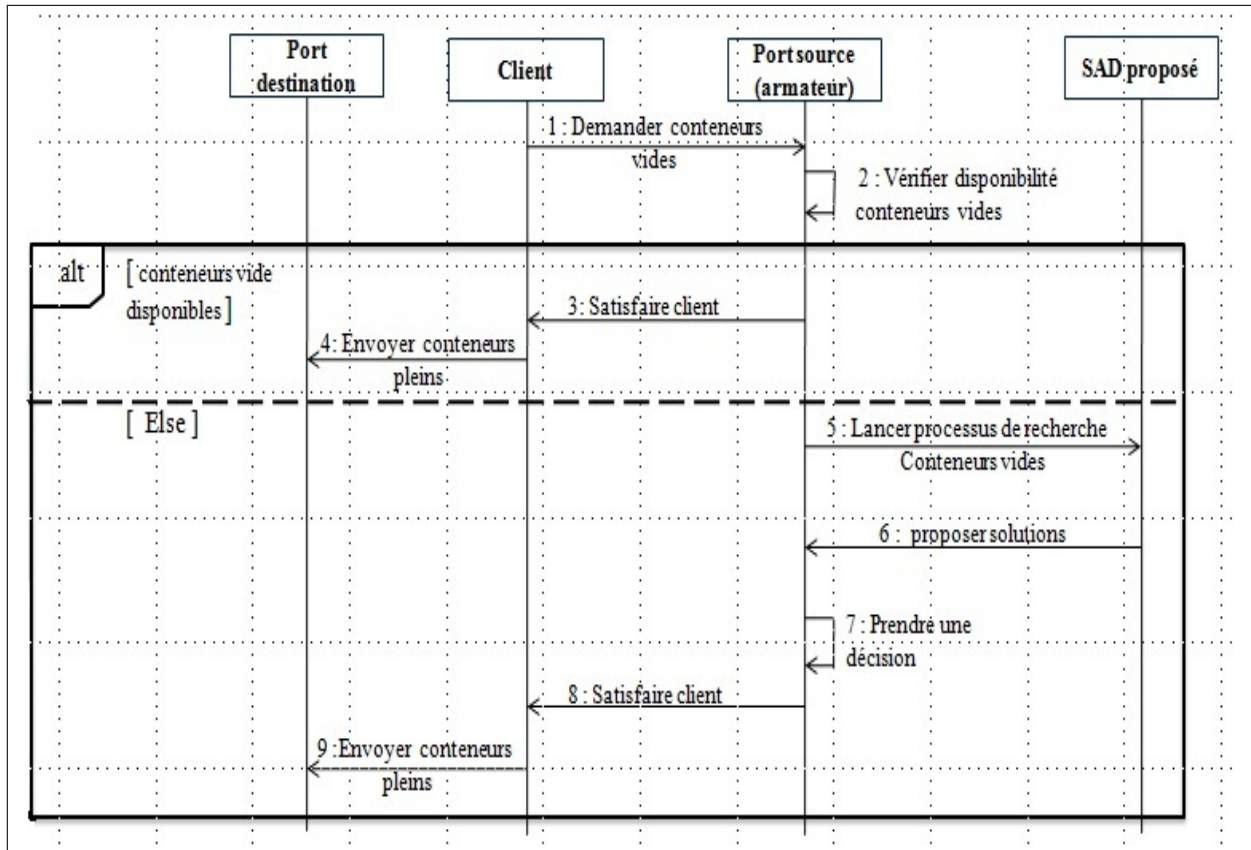


FIGURE 4.4 – Diagramme de séquence du système proposé

4.8 Présentation de l'état initial du système modélisé

Notre contribution dans la présente étude s'inscrit dans le cadre de l'aide à la décision en proposant une optimisation des frais de retour des conteneurs vides. Le système développé permet la résolution d'une problématique de prise de décision dans le domaine de transport maritime conteneurisé. Plus précisément, il permet d'aider le décideur (armateur) pour trouver un retour optimal des conteneurs vides en cas de besoin pour satisfaire le client à envoyer sa marchandise.

Notre travail fournit à l'armateur (décideur) un système d'aide à la décision s'articulant autour de trois méthodes d'optimisation à savoir : Recherche Tabou, Algorithme Génétique

et Branch & Bound.

Pour la configuration de l'état initial du système, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Le travail présenté s'adresse à une seule compagnie de conteneurs.
- Le réseau de transport maritime adopté pour valider notre proposition est composé de ($n = 18$) de ports régionaux reliés entre eux, comme illustré sur la Figure (4.5).

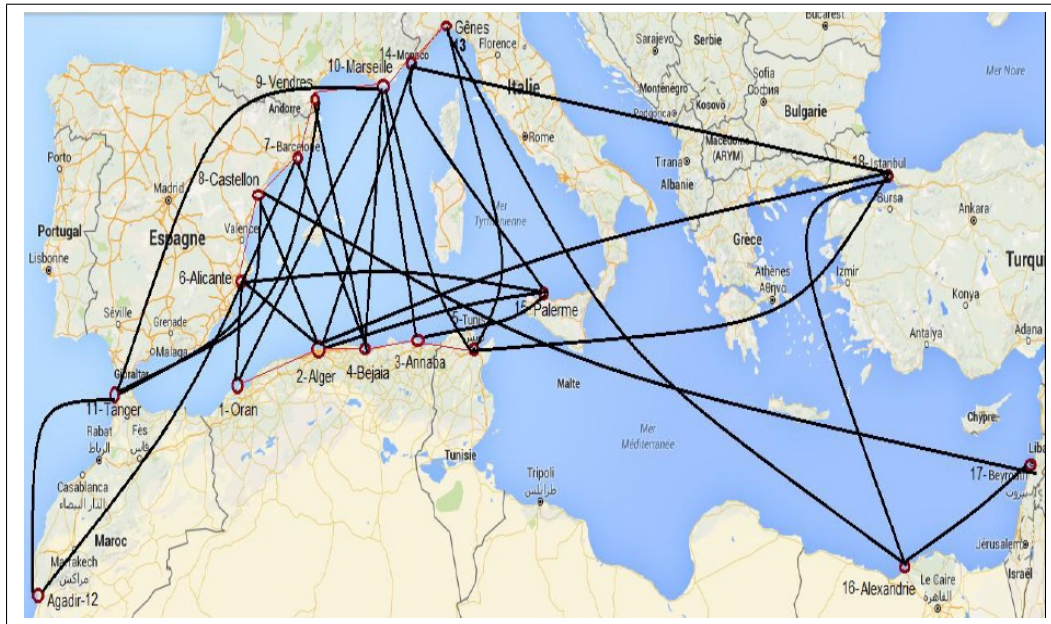


FIGURE 4.5 – Réseau de Transport Maritime considéré

- Chaque port du réseau est représenté par son identifiant ainsi que toutes les informations telles que : le nom, les coordonnées géographiques (localisation), la capacité totale de sa zone de stockage, le nombre des conteneurs vides stockés initialement.
- Les conteneurs sont de même type (conteneurs standards).
- Des conteneurs vides sont affectés initialement à chaque port du réseau maritime.

Après avoir présenté l'état initial du système, nous passons à la génération des demandes clients. Les demandes sont numérotées suivant leur ordre d'arrivée au niveau d'un port. Chaque demande est affectée au port qui lui correspond (selon le port source). La demande client est caractérisée par :

- Un port source,
- Un port destination,
- Un nombre de conteneurs vides requis par le client pour transporter la marchandise,
- Un état pour savoir si la demande est mise en attente dans la file d'attente du port source, ou elle est traitée.
- Un coût client qui est calculé selon le nombre des conteneurs pleins envoyés pour

transporter la marchandise du client et la distance de transport.

Une fois la génération des demandes est terminée, nous lançons leur traitement qui se termine quand toutes les demandes générées seront traitées.

Dans ce qui suit, nous expliquons le processus de traitement des demandes clients et le transfert des conteneurs.

4.9 Processus de traitement des demandes clients

Lorsque l'armateur au niveau d'un port p reçoit une demande de la part d'un client qui a besoin des conteneurs vides pour envoyer une marchandise (le client va exporter un certain nombre de conteneurs n_{exp}), deux cas peuvent se présenter selon la disponibilité des conteneurs vides dans le stock du port p . La Figure (4.6) illustre le processus de traitement d'une demande client.

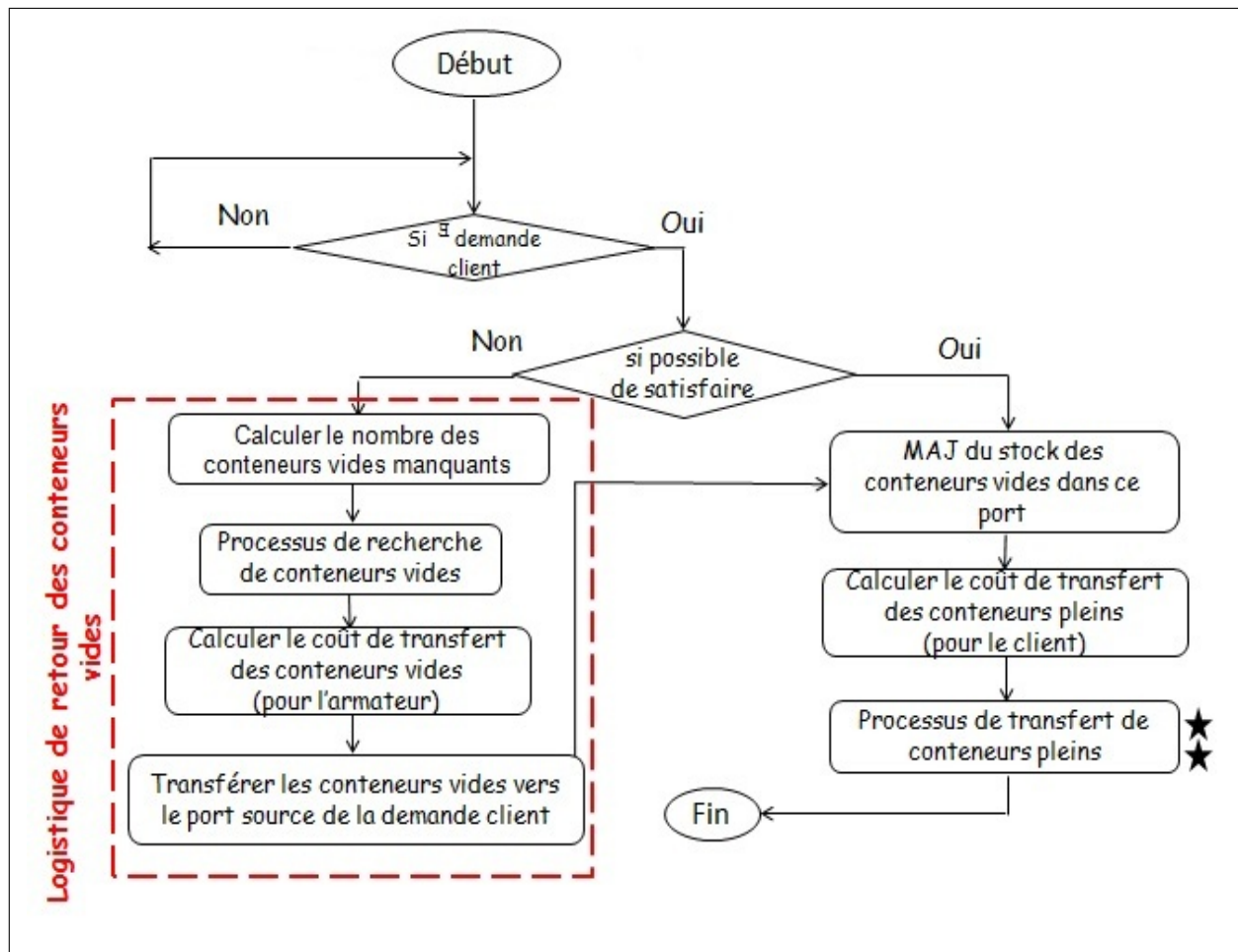


FIGURE 4.6 – Processus de traitement d'une demande client

- **Cas 1** : stock du port $p \geq n_{exp}$ alors pas de problème dans ce cas, les conteneurs sont disponibles. Ils seront exploités en mettant à jours le stock du port source et du port destination une fois que les conteneurs envoyés arrivent à destination. Les conteneurs pleins sont alors transférés selon le processus schématisé sur la Figure (4.7).
- **Cas 2** : stock du port $p < n_{exp}$, dans ce deuxième cas, nous avons le nombre de conteneurs à exporter qu'est supérieur au nombre de conteneurs vides disponibles au niveau du stock du port p (port source de la demande client). Par conséquent, l'armateur ne peut pas satisfaire la demande directement et expédier l'ensemble des conteneurs demandés par son client.

Dans cette situation, l'armateur peut recourir à l'outil d'aide à la décision proposé dans cette étude pour l'aider dans sa recherche de conteneurs vides à moindre coût et satisfaire le client. Une fois les conteneurs vides disponibles, ces derniers vont être remplis et envoyés selon le processus illustré sur la Figure (4.7).

Le processus de recherche des conteneurs vides qui représente le noyau du SAD proposé, est expliqué dans les sections qui suivent. Ce noyau est représenté par la troisième phase du modèle décisionnel illustré au niveau de la Figure (4.2).

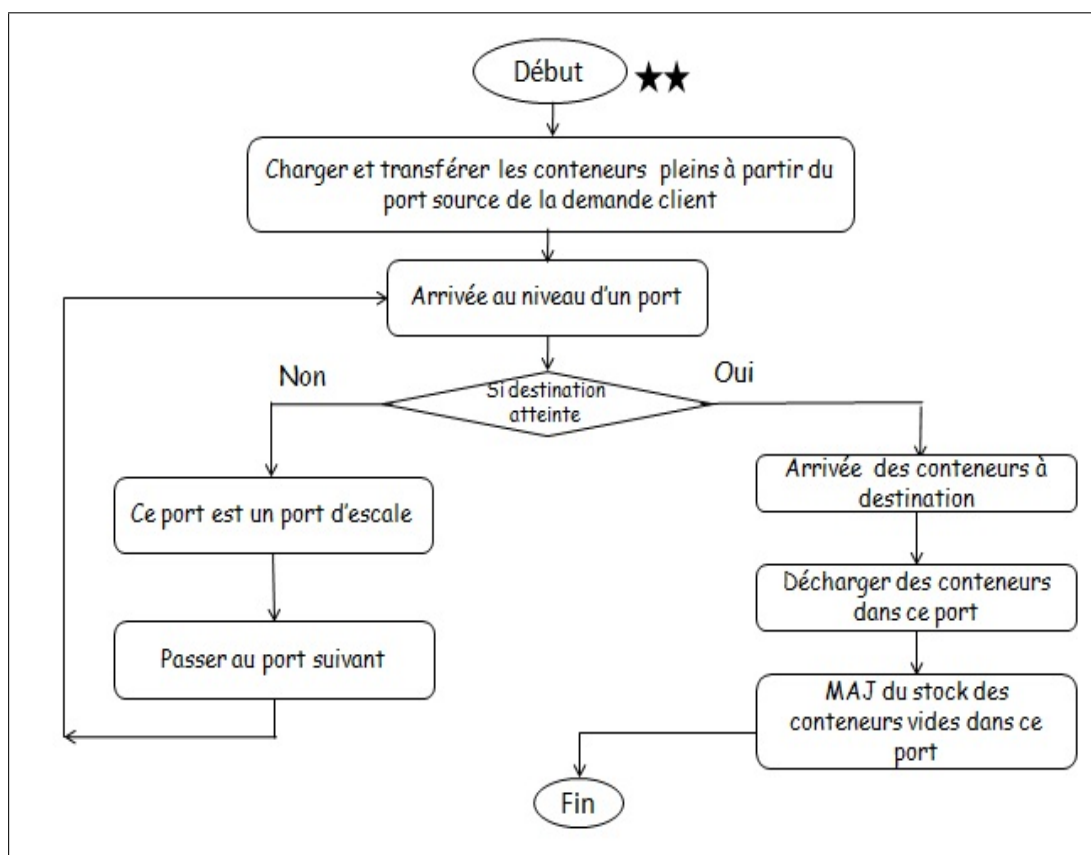


FIGURE 4.7 – Processus de transfert des conteneurs pleins

En effet, nous considérons que l'armateur aura accès à une boîte noire (composée des trois algorithmes) offrant trois solutions pour la résolution du problème de retour des conteneurs vides. Les trois solutions proposées sont accompagnées par une évaluation selon le coût pour permettre à l'armateur d'en choisir une ou de carrément rejeter les solutions données par le SAD proposé.

Les paramètres les plus importants pour fixer le coût d'exploitation d'une ligne maritime ou un tronçon sont :

- L'assurance entre chaque pair de ports
- Les frais du canal
- Le BAF (Bunker Adjustment Factor) modifie le coût du transport en fonction du coût du baril de pétrole qui représente la principale source d'énergie pour le transport.

Concernant notre cas d'étude, nous avons utilisé la distance euclidienne entre les ports pour déterminer le coût de la ligne (le coût varie proportionnellement selon la distance de transport).

4.10 Approche 1 : Recherche Tabou (RT)

Pour la recherche des conteneurs vides à moindre coût, nous utilisons une première approche avec la Recherche Tabou (RT). Cette dernière est une méthode de recherche locale. Son avantage est d'avoir un paramétrage simplifié, et un fonctionnement simple à comprendre.

Une étude présentée dans [121] a démontré l'efficacité de la RT pour les problèmes de transport. Aussi, l'efficacité de la méthode RT fait qu'elle est largement utilisée dans la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire. Elle a été testée avec succès sur des grands problèmes classiques (voyageur de commerce, ordonnancement d'ateliers). Elle est fréquemment appliquée sur les problèmes de constitution de planning, de routage, d'exploration géologique, etc.

4.10.1 Présentation de la méthode RT

Pour une description formelle de cette méthode, on s'est inspiré de la description présentée dans [133] qui est comme suit :

Soit N l'ensemble de toutes les solutions possibles, et F une fonction à optimiser et qui détermine la valeur $F(S)$ de toute solution S dans N .

Le problème à résoudre est donc le suivant :

$$\begin{aligned} & \text{Max } F(S) \\ & \text{Sous contraintes : } S \in N \end{aligned}$$

On appelle voisinage, la fonction V qui associe un sous-ensemble de N à toute solution $S \in N$. Ainsi un voisin de S est toute solution $S' \in V(S)$.

Une solution $S \in N$ est considérée comme étant un maximum local dans un voisinage V si : $F(S') \leq F(S) \forall S' \in V(S)$.

Une solution $S \in N$ est dite un maximum global si : $F(S') \leq F(S) \forall S' \in N$.

Les positions déjà examinées sont conservées dans une file gérée d'une manière FIFO (appelée liste tabou) d'une taille donnée, ajustable selon le cas d'étude. Dans certaines situations, cela peut nécessiter l'archivage d'une grande quantité d'informations pour mémoriser ces points. Cette difficulté peut être réglée par le fait de garder en mémoire que les mouvements précédents, associés à la valeur de la fonction à optimiser [23].

Selon Soriano et Gendreau [117], le rôle de la mémoire dans la Recherche Tabou n'est pas limité à un contrôle à court terme du déroulement de l'exploration, en mémorisant ce que l'algorithme vient de faire récemment, afin d'éviter de retourner vers des solutions déjà visitées. La mémoire peut influencer sur l'exploration de l'espace des solution grâce à l'incorporation de deux concepts : intensification et diversification.

Pour plus de détails sur la RT veuillez voir l'Annexe A.

4.10.2 Fonctionnement de l'algorithme RT pour la recherche des conteneurs vides

Pour la recherche des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime, nous avons utilisé la méthode de la Recherche Tabou. La Figure (4.8) permet de décrire le principe de cette méthode appliquée à notre cas d'étude.

L'algorithme (4) permet de mieux expliquer la recherche de conteneurs vides quand une demande client se présente au niveau d'un port source P_s , tel que ce port aura besoin d'un nombre de conteneurs vides $nbcont$ pour satisfaire cette demande. Une fois la Recherche Tabou terminée, le port voisin qui est sélectionné pour envoyer des conteneurs vides à moindre coût enverra le nombre requis de conteneurs vides au port source de la demande client à un coût (qui représente la fonction objectif) calculé en fonction de la distance entre chaque paire de ports pour le transfert des conteneurs vides manquants selon la formule (4.1). L'armateur des conteneurs dans le port source P_s doit payer ce montant et satisfaire la demande de son client.

$$C_{ks} = Pu * dist_{ks} * nbcont \quad (4.1)$$

- C_{ks} : Le coût de transport des conteneurs vides retournés à partir du P_k vers P_s .
- Pu : Le coût de transport d'un conteneur vide.
- $dist_{ks}$: La distance entre le port demandeur des conteneurs vides P_s et le port P_k .
- $nbcont$: Le nombre des conteneurs vides manquants, qui vont être transportés vers P_s .

Algorithm 4 RECHERCHE TABOU POUR LE RETOUR DES CONTENEURS VIDES

```

1: int j=1;
2: Créer la ListeTabou /* ListeTabou initialement vide */
3: Choisir une solution initiale P / P ∈ voisinage de  $P_s$  /*  $P_s$  est le port source de la demande
   client */
4:  $P_0 \leftarrow P$ ;
5: begin
6: while  $StockP_0 < nbcont$  do
7:    $ListeTabou \leftarrow P_0$ ;
8:   Choisir une autre solution initiale P / P ∈ voisinage de  $P_s$ ;
9:    $P_0 \leftarrow P$ ;
10: end while
11: repeat
12:   for ( $intk = 2; k \leq nbvoisins; k++$ ) do
13:     if ( $stockP_k \geq nbcont$ ) and ( $stockP_k > stockP_j$ ) and ( $P_k \neq P_0$ ) then
14:       /*  $nbcont$  est le nombre des conteneurs vides manquants */
15:       /*  $nbvoisins$  est le nombre des ports voisins du port  $P_s$  */
16:        $P_j \leftarrow P_k$ ;
17:     end if
18:   end for
19:   if ( $coutP_0 \ll coutP_k$ ) then
20:      $ListeTabou \leftarrow P_k$ ; /* maintenir l'ancienne solution  $P_0$  */
21:   else
22:      $ListeTabou \leftarrow P_0$ ; /* maintenir la nouvelle solution  $P_k$  */
23:      $P_0 \leftarrow P_k$ ;
24:   end if
25: until (Tous les ports voisins de  $P_s$  sont évalués) /* condition d'arrêt */
26: Retourner  $P_0$ 
27: end

```

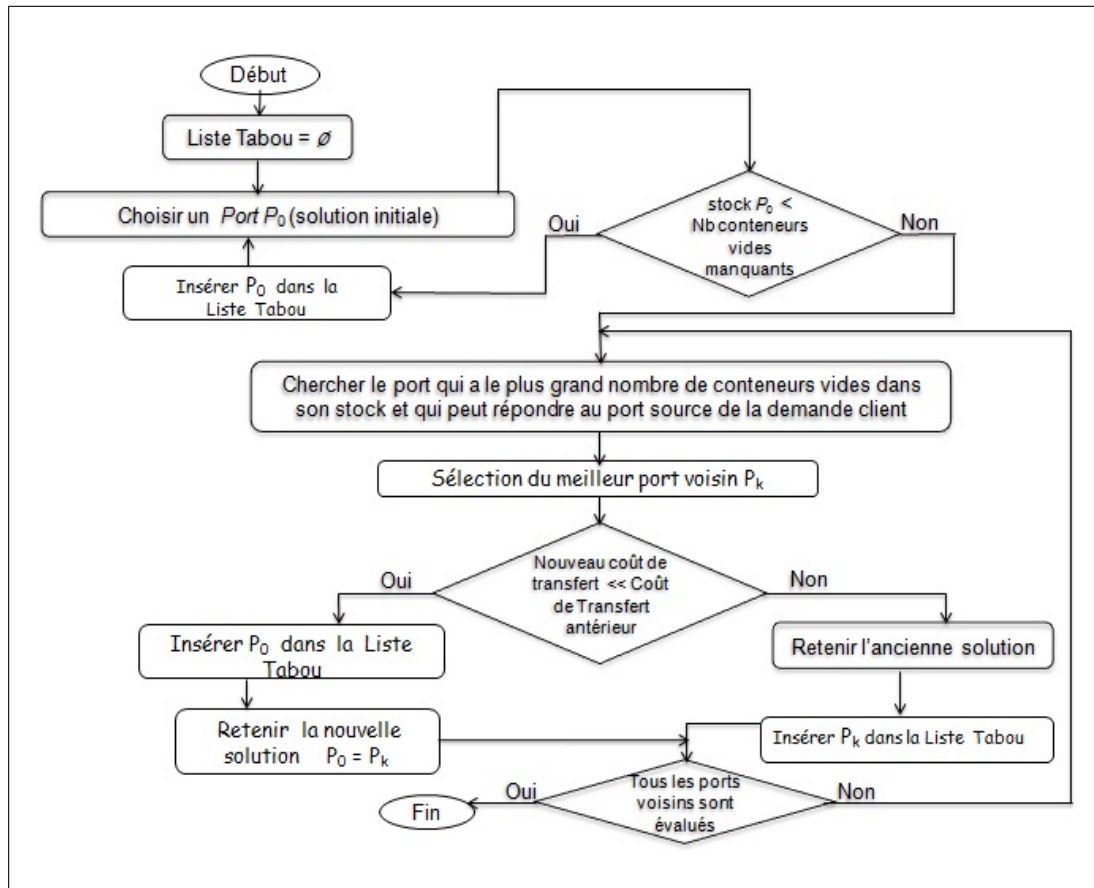


FIGURE 4.8 – Principe de recherche des conteneurs vides avec la RT

Dans la présente étude, nous supposons qu'une recherche de conteneurs vides ne peut être effectuée sans qu'un besoin des CV est détecté par l'armateur suite à une demande client au niveau d'un port pour l'envoi des marchandises vers un autre port de destination, et en admettant que ces conteneurs sont de même type, avec certaines contraintes :

- Contrainte de disponibilité des conteneurs vides : lors de la recherche d'un port voisin, le travail proposé vise la recherche du port qui contient le plus de conteneurs vides disponibles afin de maintenir une répartition équilibrée sur le réseau mais avec le contrôle du coût du retour s'il n'est pas assez élevé par rapport au coût du retour d'un autre port qui contient moins de conteneurs vides dans son stock.
- Si une quantité de conteneurs vides demandés n'est pas trouvée en entier sur un des ports du réseau, la méthode ne peut garantir une solution totale, mais partielle. L'armateur peut toujours utiliser l'outil d'aide à la décision qui lui propose d'autres solutions optimales suivant deux autres approches (AG et B&B).
- Contrainte de coût du transport des conteneurs vides : chaque conteneur vide doit être

transporté avec un coût calculé en unité "μ" par rapport à la distance entre les ports. Ce coût doit être aussi minime que possible pour le propriétaire de ces conteneurs.

- Contrainte de distance pour l'expédition des conteneurs vides : la distance entre chaque paire de ports devrait être minimal pour assurer un gain maximal à l'entreprise (le coût est proportionnel à la distance).

4.10.3 Synthèse

Dans cette section, nous avons expliqué la première approche pour la recherche des conteneurs vides à moindre coût. Cette proposition permet de trouver une solution optimale réalisable en offrant un retour selon le nombre des conteneurs vides manquants à partir d'un seul port du réseau pour réduire les opérations d'entrée/sortie à partir d'un port d'escale qui coûtent très cher.

Néanmoins, dans le cas où la RT ne trouve pas de solution totale (la quantité suffisante des conteneurs vides) à partir d'un seul port, une solution optimale mais partielle peut être donnée selon le niveau du stock de chaque port voisin. La proposition d'une solution partielle nécessite la mémorisation du niveau des stocks des ports voisins examinés auparavant.

Pour pallier à ce problème de la mémoire avec RT, nous proposons une recherche en utilisant les Algorithmes Génétiques.

La section suivante est consacrée à la présentation de cette deuxième approche, dont le principe de la recherche est basé sur une population de solutions.

4.11 Approche 2 : Algorithme Génétique (AG)

La deuxième approche fait appel aux Algorithmes Génétiques. Ces derniers proposés par Holland [62] opèrent sur une population d'individus codés par des chaînes de symboles appelées chromosomes. Ces chaînes sont munies d'une fonction d'évaluation appelée fonction *Fitness*. Cette dernière correspond à une mesure d'adaptation avec le milieu d'application de l'AG.

Les AG sont des méta-heuristiques destinées à la résolution des problèmes d'optimisation complexes. Le principe d'une telle méthode d'optimisation est d'explorer l'espace des solutions potentielles en essayant de converger vers la meilleure solution. Alors, il est important d'éviter une convergence prématurée de l'algorithme vers un optimum local.

En effet, l'AG offre une grande liberté dans le paramétrage et dans l'implémentation des différents traitements, ce qui permet de simuler l'environnement, sa population et son évolution, et aboutir à une solution approchée, en un temps raisonnable.

4.11.1 Présentation de l'AG

Les Algorithmes Génétiques sont des méthodes basées sur des phénomènes biologiques. Il s'inspire de l'évolution des espèces dans leur cadre naturel [29].

L'AG est un algorithme stochastique itératif basé sur une population d'individus représentant les solutions potentielles du problème d'optimisation à traiter.

Avant d'expliquer le fonctionnement de l'AG, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique :

- Une population sera un ensemble d'individus.
- Un individu sera une solution possible (un vecteur représentant le niveau de stock des conteneurs vides dans chaque port du réseau sauf le port demandeur des conteneurs vides).
- Un chromosome sera une partie d'une solution possible, donc d'un individu (nombre des conteneurs vides pouvant être pris à partir d'un port donné).
- Une génération est une itération de l'algorithme (ensemble d'individus).

La population initiale va évoluer de génération en génération, grâce à des opérateurs de sélection et de reproduction. Les individus sont sélectionnés en fonction de leur adaptation (avec la fonction *Fitness*). Les mieux adaptés auront plus de chance de se reproduire et donc de transmettre leurs caractéristiques héréditaires.

Pour la création de nouveaux individus (reproduction), deux mécanismes sont distingués : le premier est le croisement qui permet de combiner les génotypes de deux parents et fournit deux descendants. Le second est l'opérateur de mutation qui change un des chromosomes d'un individu.

La divergence génétique désigne la variété des génotypes présents dans la population. Il est important de savoir que lorsque cette diversité devient très faible, il y a très peu de chance pour qu'elle augmente à nouveau.

Elle devient nulle lorsque tous les individus sont identiques. Cette situation est appelée une convergence de l'algorithme. Néanmoins, si cela se produit trop tôt, il se peut que l'algorithme a convergé vers un optimum local et on parle alors d'une *convergence prématurée*. Plus de détails sur la convergence de l'AG sont donnés au niveau de l'annexe A.

Dans notre cas d'étude, l'AG pour la recherche des conteneurs vides converge après un certain nombre de générations (lorsque les solutions optimales générées deviennent stables).

4.11.2 Fonctionnement de l'AG appliqué à la recherche des conteneurs vides

L'Algorithme Génétique comprend six étapes distinctes, qui sont décrites comme suit :

Étape 1 : Création de la population initiale (ensemble de solutions potentielles)

La première étape de l'AG permet la production des individus (solutions possibles pour le problème à résoudre) de la population initiale.

Malgré que cet opérateur n'intervient qu'une seule fois et au début de la recherche, mais il joue un rôle non négligeable dans la convergence vers l'optimum global. En fait, le choix de la population initiale peut rendre la recherche de la solution optimale plus facile et plus rapide selon [62].

La population initiale dans notre étude est un ensemble de solutions potentielles, où chaque solution correspond à un individu. Les individus sont représentés par des vecteurs de taille $n-1$ (ensemble de tous les ports du réseau sauf le port demandeur). La valeur de chaque case i (chromosome) d'un vecteur (individu) correspond au nombre des conteneurs vides qui peuvent être pris du port représenté par la case i . Autrement dit, une solution possible (individu) est représentée par un vecteur (de taille $n-1$). Chaque case de ce vecteur indique le nombre des CV qui peuvent être retournés à partir d'un port P vers le port demandeur des CV, tel que ce nombre ne doit pas être supérieur au nombre des CV disponibles dans la zone de stockage de ce port P . Aussi, le nombre total des CV retournés selon ce vecteur doit être conforme avec le nombre des CV manquants dans le port demandeur (il faut que la solution soit réalisable et conforme à la demande).

Considérons que le réseau maritime régional contenant 18 ports, Figure (4.5). A titre d'exemple, si l'armateur au niveau d'un port nommé "P16" a besoin de 20 conteneurs vides pour satisfaire une demande client, alors qu'il ne possède que 10 conteneurs vides disponibles dans son stock. Il va lui-même chercher les 10 conteneurs manquants.

Les individus (vecteurs de taille $n-1$, n correspond au nombre des port du réseau maritime) sont générés aléatoirement sans dépasser le nombre des conteneurs vides disponibles dans la zone de stockage de chaque port et sans dépasser le nombre de conteneurs vides demandés par le port "P16". Deux vecteurs de la population initiale sont illustrés sur la Figure (4.9).

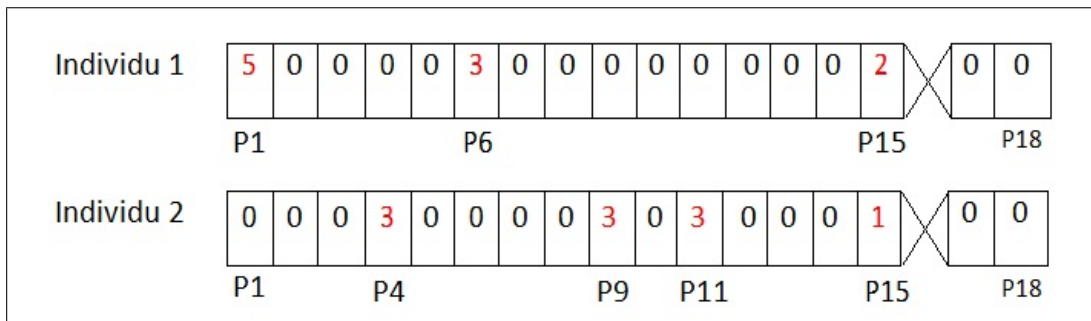


FIGURE 4.9 – Exemple d'individus (liste de ports) de la population initiale

Pour le 1^{er} individu de la Figure (4.9), 5 CV vont être pris du port "P1", 3 CV du port

"P6", et 2 CV du port "P15", au total on a 10 CV. Pour remplir les champs des vecteurs, il faut choisir des valeurs conformes au nombre de CV demandés (manquants) et disponibles. Par exemple : si P1 possède que 3 CV et on met 6 CV, on est confronté à un cas de solution non réalisable. De ce fait, il faut vérifier le stock de chaque port cible (qui dispose des CV dans son stock) lors de la génération des individus de la population initiale.

Étape 2 : Évaluation des individus

Une fois que la population initiale est créée, nous allons chercher les individus les plus attirants, ceux qui vont participer à l'amélioration de notre population. Pour cela, nous passons à une étape d'évaluation de ces individus. L'évaluation d'un individu est calculée dans notre étude selon les formules (4.2, 4.3) comme suit :

$$Fitness = \sum_{k=1}^{n-1} P_k \quad (4.2)$$

$$P_k = pu * dist_k * nbcont_k \quad (4.3)$$

Avec :

- P_k : Prix des conteneurs vides transportés d'un port P_k vers le port demandeur P_s (port source de la demande client).
- pu : Prix unitaire pour transporter un conteneur vide
- $dist_k$: Distance entre le port demandeur P_s et le port expéditeur P_k .
- $nbcont_k$: Nombre de conteneurs vides transportés à partir du port P_k vers P_s .

Nous calculons par exemple la fonction Fitness de l'individu 1, Figure (4.9) comme suit :

- Calculer la distance entre le port "P16" et les ports d'où les conteneurs vides vont être retournés (P1, P6, P15).
- Calculer le prix de transport des conteneurs vides à partir de chaque port vers le port demandeur (port source de la demande client) selon la formule (4.3).
- Calculer la somme finale de l'individu (tous les conteneurs vides transportés) selon la formule (4.2).

Étape 3 : Sélection des individus (Classement et choix des vecteurs)

Pour enrichir notre population au fur et à mesure avec les générations, la sélection tend à augmenter l'importance des bonnes solutions par rapport aux mauvaises. C'est une heuristique utilisée par l'algorithme génétique : les bonnes solutions sont supposées être les plus prometteuses pour la génération des descendants. L'opérateur de sélection est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de se reproduire. D'une manière

générale, la probabilité de survie d'un individu est directement reliée à son efficacité dans la population de la génération courante. Essentiellement quatre méthodes de sélection (voir annexe A) sont distinguées dans la littérature [15] .

Alors pour sélectionner les individus aptes à être croisés et mutés, nous avons utilisé la méthode *Élitiste* (Voir Annexe A), en mettant un ordre croissant selon les coûts calculés avec la fonction d'évaluation Fitness (étape précédente). Après classement des individus, ces derniers sont sélectionnés pour se reproduire selon les étapes qui vont suivre.

Étape 4 : Croisement des individus (Intersection des vecteurs)

Le croisement consiste à copier et recombinaison des chromosomes de deux individus parents de façon à former deux nouveaux individus fils possédant des caractéristiques issues des deux parents suivant un taux de croisement. Dans la présente étude, ce taux est fixé à 80% de la population sélectionnée dans l'étape précédente.

Il existe différents types de croisement, qui sont détaillés brièvement au niveau de l'Annexe A.

Dans ce travail, nous avons utilisé le croisement avec un seul point de coupure. Prenons l'exemple des deux individus parents de la Figure (4.9) et appliquons le croisement sur un seul point choisi au hasard. Comme on le remarque sur la Figure (4.10) :

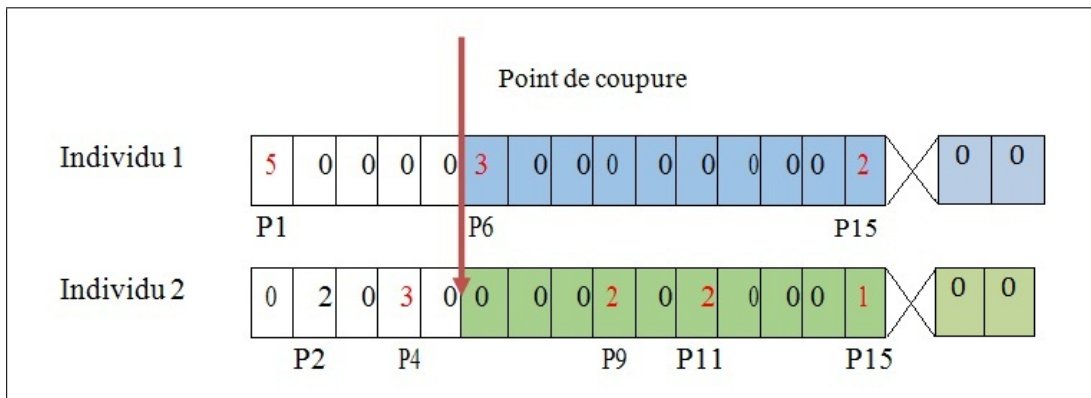


FIGURE 4.10 – Point de coupure pour croisement

Après le croisement des individus 1 et 2, nous obtenons les individus enfants 1.1 et 2.1 qui sont illustrés sur la Figure (4.11) :

Il faut tenir compte du nombre de conteneurs vides demandés sur chaque individu enfant, si le nombre procuré après l'opération de croisement est supérieur ou inférieur au nombre de la demande, l'individu sera éliminé et ne sera plus considéré comme solution réalisable. Si au niveau des enfants ce nombre est conforme à la demande (10 conteneurs vides selon l'exemple), alors la solution sera réalisable.

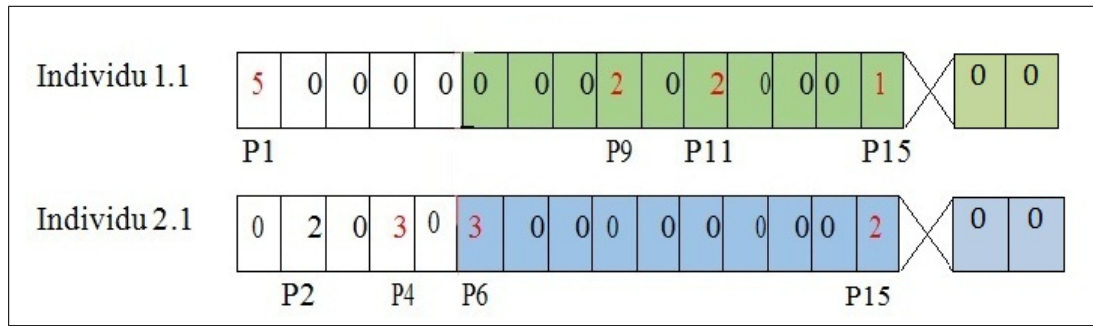


FIGURE 4.11 – Croisement des individus

Étape 5 : Mutation des individus (Changement des vecteurs)

La mutation prend en entrée un individu I sélectionné pour la mutation et renvoie un individu muté I' obtenu par transformation locale de l'un ses chromosomes [9]. Le but de la mutation est d'éviter que l'algorithme converge vers un minimum local (convergence prématurée de l'algorithme).

Les individus qui peuvent être sélectionnés pour la mutation sont ceux qui restent de l'étape précédente (20 % restants du croisement). Dans ce travail, ils seront sélectionnés suivant un taux de mutation qui est égale à 10 %.

Il peut s'avérer efficace de modifier aléatoirement un individu de la population en modifiant un ses chromosomes. Rien ne nous assure que l'individu muté sera meilleur ou moins bon, mais il apportera des possibilités supplémentaires qui pourraient bien être utiles pour la génération de nouvelles solutions (individus) à condition que l'individu muté soit de la forme d'une solution potentielle (réalisable).

Pour la mutation des individus, on procède de la manière suivante :

On sélectionne 10 % parmi les individus qui restent après le croisement pour les muter afin de se reproduire et s'améliorer dans la prochaine génération. Pour la technique de cette opération, on a évité de changer une valeur aléatoire (nombre de conteneurs vides) d'une case (port) choisie aléatoirement pour éviter le cas de non égalité des valeurs introduites avec le nombre de conteneurs vides demandés qui aboutit certainement à une solution non réalisable.

Une façon pour ne pas tomber dans ce cas est de choisir au hasard un champ (port) déjà donneur, annuler la quantité offerte « Q » de conteneurs vides et remettre le champ à 0 ($Q=2$ à partir du port "P11"), sélectionner un autre champ au hasard, vérifier s'il dispose de « Q » conteneurs vides, si c'est le cas, on ajoute cette quantité à ce champ-là. La Figure (4.12) montre une opération de mutation sur l'individu 1.1 de la Figure (4.11).

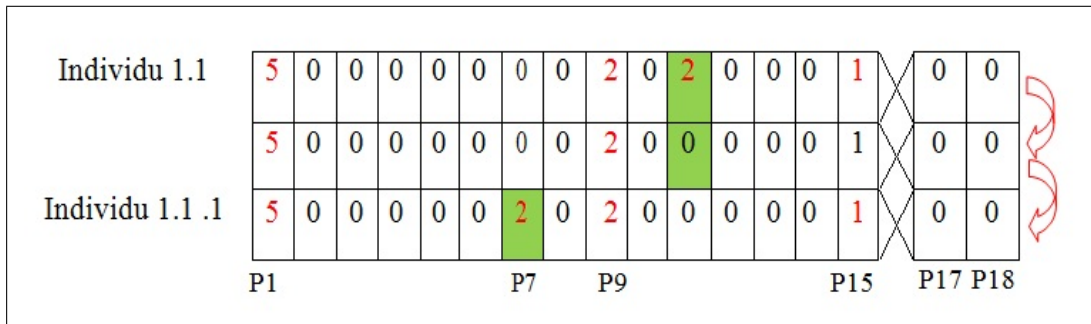


FIGURE 4.12 – Mutation des individus

Étape 6 : Réitération du processus

Généralement il n'est pas possible de trouver des solutions convenables en moins de 10 générations et au bout de 500 générations, les solutions n'évoluent plus. Mais ceci n'est qu'un ordre de grandeur, tout dépend du problème à résoudre. Ce n'est pas une méthode exacte. Le nombre de générations est laissé à l'appréciation du programmeur qui a l'opportunité d'évaluer les individus de sa population avant et/ou après les phases de leur création avant de les insérer dans la future population.

Dans le cadre de notre étude, 50 générations ont été largement suffisantes pour stabiliser la solution.



4.11.3 Synthèse

Cette section a été consacrée à la présentation d'une seconde approche de retour des conteneurs vides en exploitant l'AG. Cet algorithme classé dans les méthodes d'optimisation approchées, Il nous a permis d'aboutir à une solution optimale (sous forme d'un vecteur ou individu) après un certain nombre de générations. Cependant, rien ne garantit que la solution théorique optimale a été trouvée par l'AG (algorithme est dit incomplet, [103]). Les solutions se rapprochent des bonnes solutions, mais sans plus. Pour remédier à cette situation, nous avons proposé une dernière approche de recherche des conteneurs vides à moindre coût en utilisant un algorithme exacte pour garantir la proposition d'une solution optimale par le système proposé. Par conséquent, l'armateur peut trouver dans l'ensemble des solutions qui lui sont proposées un retour optimal des conteneurs vides et satisfaire son client à envoyer sa marchandise tout en réduisant les charges de la compagnie maritime (retour à moindre coût).

4.12 Approche 3 : Branch & Bound (B&B)

La troisième approche de notre outil d'aide à la décision destiné à l'armateur correspond à une recherche des conteneurs vides en utilisant l'algorithme exacte B&B.

Un algorithme exact d'optimisation est un algorithme qui cherche, en parcourant tous les optimums possibles, une solution faisable, si jamais ne celle-ci existe. Par ailleurs si cet algorithme ne trouve pas de solutions, on en déduit que le problème n'a pas de solutions. Si le problème inclut une optimisation, alors la solution trouvée par l'algorithme exact est dite la meilleure solution possible.

Pour la résolution du problème de retour des conteneurs vides à moindre coût, nous avons proposé une approche exacte en utilisant la méthode de Branch & Bound, qui présente l'avantage de pouvoir trouver une solution exacte en un temps raisonnable si l'espace de recherche n'est pas très grand.

4.12.1 Présentation de B&B

Le principe de cette méthode n'est pas d'énumérer toutes les solutions réalisables mais de restreindre progressivement l'ensemble des solutions réalisables. Il s'agit d'une recherche de solution optimale dans un ensemble combinatoire de solutions possibles.

La méthode B&B se base d'abord sur la séparation ou division (Branch) du problème en sous-problèmes plus petits. Ensuite, la méthode utilise une évaluation pour la suppression des parties qui ne contiennent pas la solution optimale jusqu'à obtention de la preuve de l'optimalité d'une solution. L'algorithme B& B se base sur quelques paramètres :

- Développement de l'arborescence (construction des nœuds successeurs à l'aide d'une heuristique)
- Critère de séparation ou division d'un nœud en deux ou plus sous nœuds.
- Stratégie de parcours de l'arborescence (voir Annexe A).
- Heuristique donnant la fonction d'évaluation.

L'algorithme Branch & Bound est appelé aussi algorithme de séparation et évaluation. Cela peut être résumé dans les points suivant :

- Séparer : Diviser le problème en sous-problèmes .
- Évaluer : Calculer le coût de la solution optimale d'un sous-problème.
- Le calcul d'une bonne solution réalisable (borne) est un élément qui peut se révéler important, dont le but est d'évaluer certaines solutions et décider, soit les exclure, soit les maintenir comme des solutions potentielles. La performance de B&B dépend de sa capacité d'exclure des solutions partielles le plus tôt possible.

Autrement, le principe de B&B peut être formulé comme suit [91] :

Soit F l'ensemble des solutions admissibles d'un problème d'optimisation combinatoire :

$$\text{Min} C^T X; \tag{4.4}$$

avec $X, C \in F$.

L'ensemble F sera divisé en une collection finie de sous-ensembles F_1, F_2, \dots, F_k . Le problème de la formule précédente va être résolu séparément avec $X, C \in F_i$.

Les sous-ensembles F_1, F_2, \dots, F_k peuvent ne pas être suffisants pour la résolution du problème initial. Dans cette situation, le même système de division va être appliqué pour chaque sous ensemble. La présentation de l'arborescence obtenue est illustrée dans la Figure (4.13).

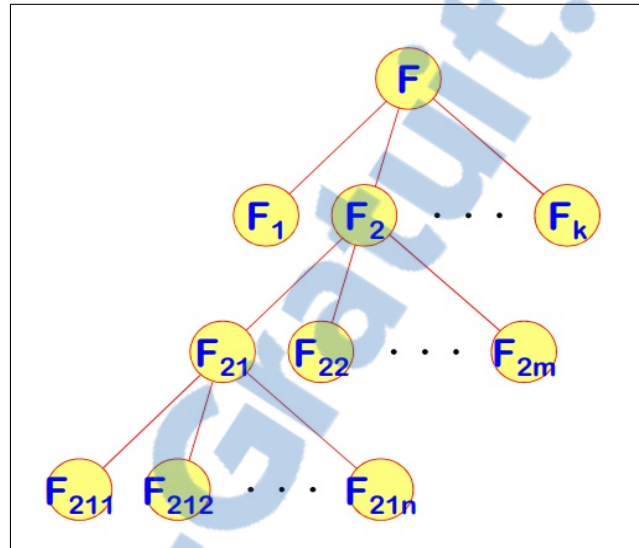


FIGURE 4.13 – Partitionnement du problème en sous problèmes,

Plus d'informations sur le principe de séparation et d'évaluation sont données au niveau de l'Annexe A.

4.12.2 Convergence de B&B

Si l'algorithme B&B se termine à l'itération j alors x^j est la solution optimale (ce qui n'est pas garanti). En revanche, si l'algorithme est infini, alors il engendre une suite infinie des sous ensembles (subdivisions successives). Dans cette étude, l'algorithme de B&B pour la recherche de conteneurs vides converge après un certain nombre d'itérations.

4.12.3 Fonctionnement de B&B pour le retour des conteneurs vides

Lorsqu'un client se présente au niveau d'un port nommé $P1$ en demandant 30 conteneurs vides (30 CV) pour envoyer sa marchandise (conteneurs pleins CP), alors que l'armateur ne dispose que 10 CV dans son le stock au niveau de ce port. L'armateur peut alors utiliser l'outil d'aide à la décision pour pouvoir trouver les 20 CV qui restent à moindre coût, et prendre

la bonne décision concernant les ports d'où les CV peuvent être retournés vers le port source $P1$.

La méthode B&B fonctionne selon l'arborescence illustrée dans la Figure (4.14) :

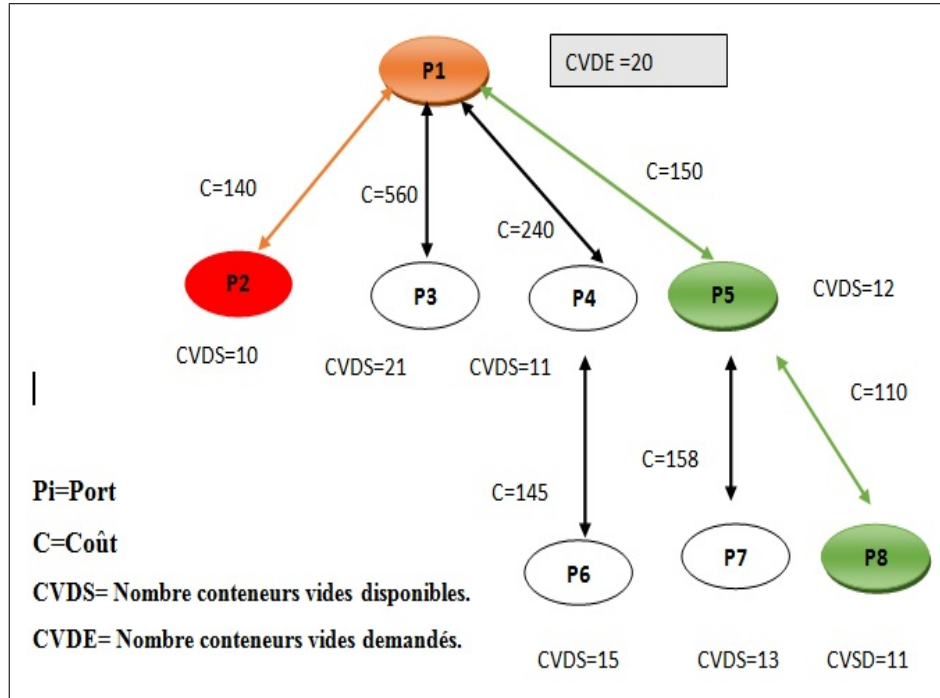


FIGURE 4.14 – Principe de retour des conteneurs vides en utilisant B & B

L'armateur cherche 20 CV à partir des port voisins de $P1$. En vérifiant le stock de $P2$ qui est de 10 CV, nous déduisons que ce port ne peut pas satisfaire la demande de l'armateur, ensuite nous essayons de diviser ce nœud, mais comme ce port n'a pas de voisin alors nous constatons que c'est une solution non réalisable. Nous passons au deuxième port voisin de $P1$. on vérifie son stock de conteneurs vides qui est égale à 21. Alors on s'arrête à ce niveau avec une première solution réalisable.

Ce processus est répété jusqu'à ce que l'ensemble des ports voisins soient évalués. À la fin, nous remarquons que la solution optimale proposée permet de retourner 8 CV à partir de $P8$ vers $P5$ et retourner $(12 + 8)$ CV à partir de $P5$ vers $P1$ (solution réalisable avec le moindre coût).

4.12.4 Synthèse

Pour aider l'armateur dans la recherche des conteneurs vides à partir d'un port, nous avons proposé dans cette section un outil qui permet de le faire en appliquant l'algorithme exacte B&B.

L'algorithme B&B permet d'aboutir à une solution optimale en divisant un problème en un

ensemble de sous-problèmes (structure arborescente) par principe de séparation et évaluation de chaque nœud pour voir l'intérêt de l'exploration d'un sous-ensemble de l'arborescence ou de l'éliminer. La principale force d'une telle méthode réside dans la simplicité du principe général sur lequel elle se fonde. Néanmoins, l'inconvénient est le temps de calcul qu'elle requiert lorsque l'espace de solution est très grand.

Chaque algorithme se distingue par sa façon d'explorer l'espace des solutions qui englobe les bonnes comme les mauvaises solutions ainsi que celles qui respectent les contraintes comme celles qui ne les respectent pas.

4.13 Conclusion

La conception est une phase très importante dans le processus de développement des applications, elle permet de mettre le point sur les différentes fonctionnalités offertes par le produit à réaliser. En effet, ce chapitre a été l'occasion de fournir une vue détaillée sur le modèle décisionnel qui peut être utilisé dans le cadre du transport maritime des conteneurs, spécialement pour le retour optimal des conteneurs vides.

Dans ce but, une description claire et précise sur le système d'aide à la décision proposé a été présentée. Aussi, nous avons présenté le noyau de ce système à savoir les trois approches de recherche des conteneurs vides : la Recherche Tabou, l'Algorithme Génétique et l'algorithme de Branch & Bound. Les algorithmes utilisés sont des méthodes d'optimisation qui cherchent un objet mathématique en minimisant (ou en maximisant) une fonction objectif, qui décrit la qualité de la solution pour la résolution d'un problème d'optimisation combinatoire (un problème dont les ensembles de solutions réalisables sont finis mais combinatoires).

Le chapitre qui suit sera consacré à la concrétisation des différents modules du système proposé, par l'implémentation du modèle décrit dans ce chapitre, ainsi que l'interprétation des différents résultats obtenus via le déroulement de quelques scénarios d'exécution.

Chapitre 5

Étude de cas

Ce chapitre se concentre sur une étude de cas à travers le déroulement des scénarios d'exécution de chaque algorithme composant le noyau du système proposé, à savoir l'algorithme de Recherche Tabou, les Algorithmes Génétiques et l'algorithme Branch & Bound, pour la résolution du problème d'optimisation de retour des conteneurs vides dans un réseau transport maritime.

Plan

5.1	Introduction	115
5.2	Étude de cas : Recherche Tabou	115
5.2.1	Architecture fonctionnelle du système associé à la RT	115
5.2.2	Scénario d'exécution de la RT	116
5.3	Étude de cas : Algorithmes Génétiques	118
5.3.1	Architecture fonctionnelle du système associée à l'AG	118
5.3.2	Scénario d'exécution de l'AG	119
5.4	Étude de cas : Branch & Bound	121
5.4.1	Architecture fonctionnelle du système associé à B&B	121
5.4.2	Scénario d'exécution de B&B	121
5.5	Étude comparative	123
5.6	Conclusion	125

5.1 Introduction

L'objectif de toute conception est de produire un logiciel pour prouver et confirmer les déclarations théoriques de départ, et d'aboutir à un produit final, exploitable par les utilisateurs.

Nous avons effectué une série d'expérimentations dont les résultats et les interprétations font l'objet du présent chapitre.

Nous commençons d'abord par décrire un premier scénario d'exécution avec l'algorithme de la Recherche Tabou, ensuite nous passons à un deuxième scénario avec l'Algorithme Génétique. Le troisième scénario est présenté à travers le déroulement d'un exemple en appliquant l'algorithme Branch & Bound. Finalement, nous présentons une étude comparative entre les différents algorithmes appliqués pour le problème d'optimisation de retour des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime.

Pour développer les méthodes d'optimisations citées précédemment, nous prenons en compte les contraintes suivantes :

- La demande de client : pas de retour des conteneurs vides sans besoin signalé par l'armateur pour satisfaire les clients.
- La disponibilité des conteneurs vides dans les stocks lors de la génération des solutions.
- La distance entre les ports (pour calculer le coût de transport)
- Le coût de transfert des conteneurs vides doit être minimal (dans cette étude, le coût est proportionnel à la distance)

La matrice de distance calculée suivant les coordonnées géographiques (x, y) de chaque port, est illustrée sur la Figure (5.1).

5.2 Étude de cas : Recherche Tabou

La Recherche Tabou est une méta-heuristique qui se base sur une seule solution comme solution de départ pour résoudre un problème d'optimisation. Le principe de la RT consiste à parcourir l'ensemble des solutions possibles en partant d'une solution initiale (le port qui ne trouve pas de conteneurs vides va choisir un port de son voisinage comme une solution initiale) et en se déplaçant à chaque itération vers les autres voisins (ports), afin de trouver une solution pour le retour des conteneurs vides à moindre coût.

5.2.1 Architecture fonctionnelle du système associé à la RT

L'organigramme de la Figure (5.2) illustre l'architecture fonctionnelle du système d'optimisation de retour des conteneurs vides en utilisant la méthode de la Recherche Tabou.

Le résultat final est une solution optimale pour un retour des conteneurs vides à moindre coût vers un port du réseau de transport maritime afin de satisfaire le client de l'armateur au

	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 17	Port 18
Port 1	0	414	Nul	Nul	Nul	305	Nul	Nul		Nul	Nul
Port 2	414	0	Nul	366	Nul	358	Nul	450		Nul	2600
Port 3	Nul	Nul	0	402	301	Nul	Nul	Nul		Nul	Nul
Port 4	Nul	366	402	0	Nul	Nul	573	Nul		Nul	Nul
Port 5	Nul	Nul	301	Nul	0	Nul	Nul	Nul		Nul	2300
Port 6	305	358	Nul	Nul	Nul	0	Nul	248		Nul	Nul
Port 7	Nul	Nul	Nul	573	Nul	Nul	0	280		Nul	Nul
Port 8	Nul	450	Nul	Nul	Nul	248	280	0		3200	Nul
⋮									0		
Port 17	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	3200	Nul	0	Nul
Port 18	Nul	2600	Nul	Nul	2300	Nul	Nul	Nul	Nul	Nul	0

FIGURE 5.1 – Matrice de distance

niveau de ce port.

5.2.2 Scénario d'exécution de la RT

Sur un réseau de 18 ports, Figure (4.5), nous avons réalisé un scénario avec les paramètres suivants :

- Nombre total des conteneurs : 166 affectés initialement d'une façon équitable à l'ensemble des ports.
- Nombre des demandes clients : 20 affectées d'une façon aléatoire à l'ensemble des ports du réseau maritime.

Le système de recherche des conteneurs vides est déclenché dans le cas où l'armateur ne trouve pas assez de conteneurs vides pour satisfaire un client au niveau d'un port du réseau.

Dans ce qui suit, nous déroulons le traitement d'une demande client qui a nécessité de lancer une recherche des conteneurs vides par l'armateur. Par exemple, la demande N° 11, où un nombre de 17 conteneurs vides a été exigé par le client pour envoyer ses biens à partir du port 3 vers le port 6 alors que le stock des conteneurs vides dans le port 3 contenait seulement 13 CV. Face à cette situation l'armateur peut déclencher une recherche des CV en utilisant l'outil d'aide proposé dans cette étude.

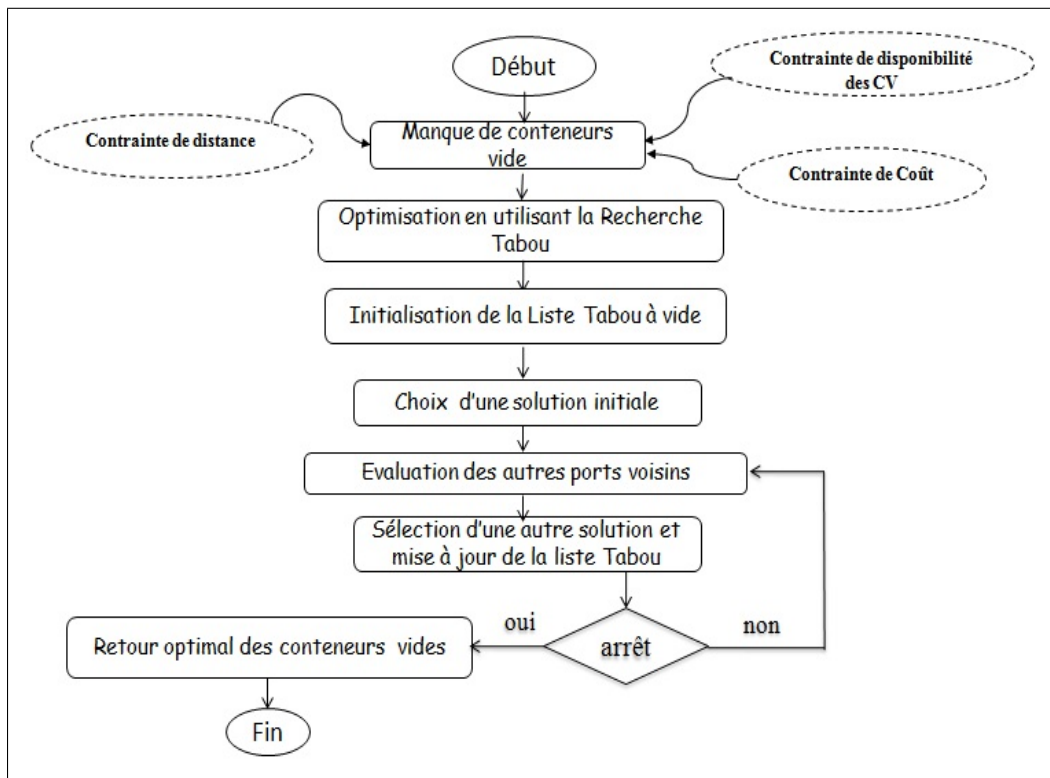


FIGURE 5.2 – Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant la RT

La solution optimale trouvée par la RT est de transférer les 4 conteneurs manquant à partir du port 2 à un coût de 992, beaucoup moins cher comparativement à une solution trouvée avec une recherche d'une manière aléatoire qui est de 5724, Figure (5.3).

Demandes	Ports Src.	Ports Dst.	Nbre. Conteneurs	Etat	port voisin retenu	Nbr Cont.Vide manquants	coût_trans_cont_vide avecRT	coût_trans_cont_vide sans RT...
Demande 8	1	2	16	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 9	3	1	10	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 10	6	2	10	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 11	3	6	17	traité avec RT	port 2	4	992	5724
Demande 12	3	5	12	traité avec RT	port 2	12	2976	17172
Demande 13	3	4	10	traité avec RT	port 2	10	2480	4500
Demande 14	1	5	20	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 15	4	1	23	traité avec RT	port 1	1	1000	1950
Demande 16	5	1	16	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 17	1	4	8	traité sans RT	---	0	---	---
Demande 18	3	2	8	traité avec RT	port 2	8	1984	11448

FIGURE 5.3 – Scénario des demandes clients traitées en utilisant la RT

5.3 Étude de cas : Algorithmes Génétiques

L'algorithme génétique est une méthode d'optimisation classée dans la catégorie des méta-heuristiques qui manipulent une population de solutions à la fois. Pour un atteindre un optimum, cette méthode évolue en passant d'une génération à une autre par des mécanismes de sélection et reproduction génétiques.

5.3.1 Architecture fonctionnelle du système associée à l'AG

L'organigramme illustré sur la Figure (5.4) résume le niveau d'implémentation du système qui permet la résolution de la problématique traitée à travers cette étude en utilisant l'Algorithme Génétique.

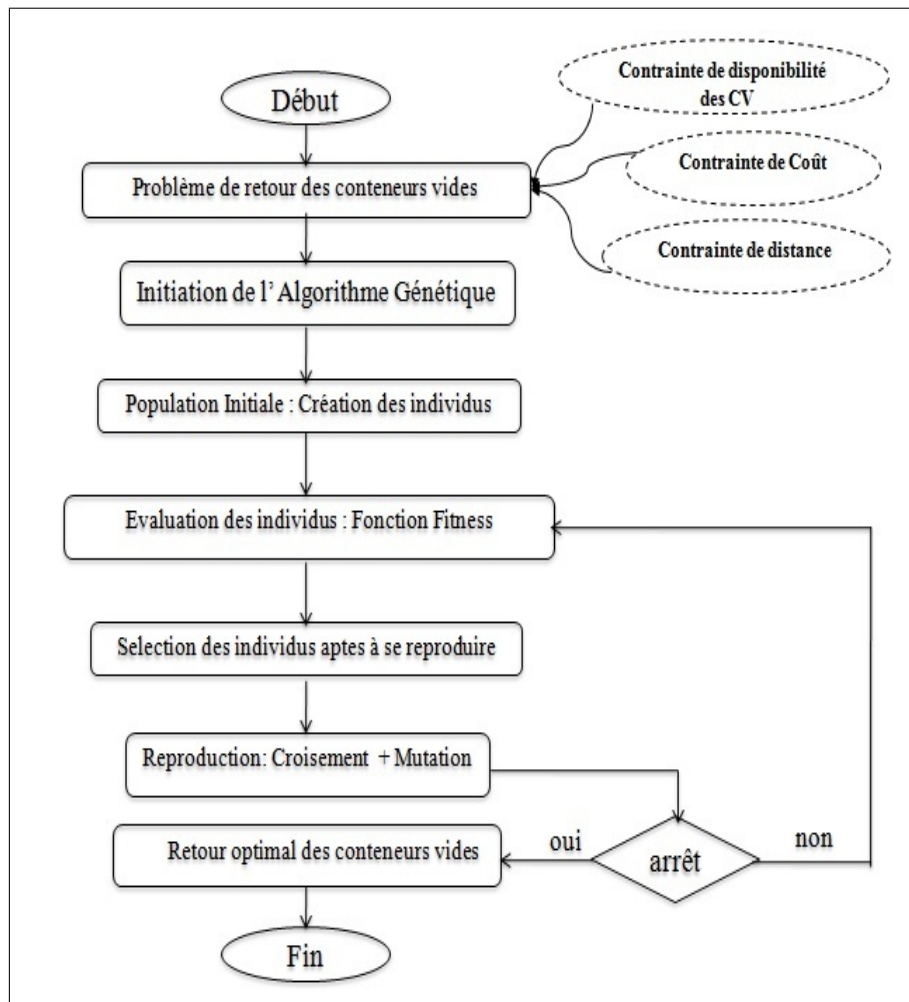


FIGURE 5.4 – Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant l'AG

Le résultat final obtenu après l'exécution de l'AG est un individu qui représente une solution de retour optimal des conteneurs vides vers un port du réseau de transport maritime pour satisfaire une demande client.

5.3.2 Scénario d'exécution de l'AG

Pour le scénario d'exécution avec l'AG, nous prenons les paramètres qui suivent comme un exemple de configuration de l'état initial du système étudié :

- Nombre de ports : 18 (voir Figure 4.5).
- Nombre total des conteneurs : 166.
- Nombre des demandes clients : 20.

Soit la configuration des paramètres génétiques comme suit :

- Nombre d'individus : 10
- Nombre d'itérations : 50
- Taux de sélection : 100 %
- Taux croisement : 80 %
- Taux de mutation : 10 %



Cette configuration des paramètres de l'algorithme génétique a été fixée après plusieurs séries d'expérimentations pour aboutir à une solution optimale.

Dans cette section, nous détaillons le traitement d'une demande client qui a nécessité le déclenchement du système d'aide proposé. L'exécution de l'AG pour assurer un retour des conteneurs vides à moindre coût vers un port où un manque de CV a été détecté par l'armateur (port source de la demande client) est comme suit :

La demande client nécessite 7 conteneurs vides sur le port de Tunis (P5) pour les envoyer vers le port d'Alicante (P6). Cependant, l'armateur ne dispose que de 5 conteneurs vides sur le port de Tunis, alors le système est lancé pour aider l'armateur à trouver un retour optimal de 2 conteneurs vides qui manquent afin de satisfaire son client.

Après l'exécution de l'AG selon la configuration précédente, nous avons illustré sur la Figure (5.5) un fragment de la population initiale (première étape de l'AG). En ligne, les individus sont représentés, et les colonnes représentent les chromosomes, où un chromosome signifie le nombre de conteneurs vides qui peuvent être retournés à partir du port i . L'évaluation (selon la fonction *Fitness*) de chaque individu est affichée juste en dessous de ce dernier.

L'étape qui suit, consiste à faire une sélection sur les individus. Ici, la sélection est faite avec un taux de 100 % après avoir classer les individus par ordre croissant selon l'évaluation avec la fonction *Fintess*. Les 80 % des premiers individus seront sélectionnés pour le l'opération de croisement. 10% des individus restants seront mutés. Une partie des résultats de l'exécution de chaque opération (croisement et mutation) est représentée sur les Figure (5.6) et (5.7) respectivement.

La population initiale est :

Génération n= 1

Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 1	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 1	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=3554
Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=9000
Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 1	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 1	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=3554
Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 1	p6 0	p7 0	p8 0	p9 1	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=1788
Générer	p1 0	p2 1	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 1	évaluation(coût)=1890
Générer	p1 0	p2 0	p3 2	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=602
Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 2	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=1800
Générer	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 2	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	évaluation(coût)=1700

FIGURE 5.5 – Un fragment de la population initiale

Croisement

Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 2	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 2	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 2	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 1	p6 0	p7 0	p8 0	p9 1	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 2	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 1	p6 0	p7 0	p8 0	p9 1	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 2	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 2	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 1	p6 0	p7 0	p8 0	p9 1	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu Croisé	p1 0	p2 0	p3 0	p4 1	p6 0	p7 0	p8 0	p9 1	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1

FIGURE 5.6 – Individus croisés

Mutation

Individu muté :	p1 0	p2 1	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
Individu muté :	p1 0	p2 0	p3 0	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 1	p13 0	p14 0	p15 1	p1

FIGURE 5.7 – Individus mutés

Après 50 itérations, nous obtenons une solution optimale qui est affichée sur la Figure (5.8). La solution optimale pour ce scénario d'exécution est de faire retourner 2 conteneurs

vides à partir du port de Annaba (P3) vers le port de Tunis (P5).

Solution finale	p1 0	p2 0	p3 2	p4 0	p6 0	p7 0	p8 0	p9 0	p10 0	p11 0	p12 0	p13 0	p14 0	p15 0	p1
évaluation(coût)=602															

FIGURE 5.8 – Solution optimale pour le retour des conteneurs vides en utilisant l'AG

5.4 Étude de cas : Branch & Bound

L'algorithme Branch & Bound est une méthode exacte pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire. Il s'agit de rechercher une solution optimale dans un ensemble combinatoire de solutions potentielles.

La méthode repose d'abord sur le principe de séparation qui revient à décrire comment construire l'arbre permettant d'énumérer toutes les solutions en divisant l'ensemble des solutions en sous-ensembles plus petits. Le deuxième principe est celui de l'évaluation des nœuds de l'arbre construit en utilisant une borne sur le coût optimal afin d'éviter d'explorer certaines parties de l'ensemble des solutions admissibles.

5.4.1 Architecture fonctionnelle du système associé à B&B

Le système développé permet l'identification des ports à partir desquels les conteneurs vides peuvent être retournés et transportés pour un minimum de coût vers un port dans de but d'assurer la disponibilité répondre favorablement à une demande client.

Le résultat de l'exécution de l'algorithme B&B est une solution optimale pour le problème de retour des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime, Figure (5.9).

5.4.2 Scénario d'exécution de B&B

Comme un exemple de scénario de recherche des conteneurs vides avec l'exécution de l'algorithme B&B, nous prenons en considération les paramètres suivants pour décrire l'état initial du système :

- Nombre de ports : 18 (voir Figure 4.5).
- Nombre total des conteneurs : 166.
- Nombre des demandes clients : 20.

La procédure de recherche des conteneurs vides par l'algorithme B&B à partir d'un port donné, se fait chez les ports voisins (du premier niveau : liaison directe entre les ports) de ce port en vérifiant le stock de chacun. Si une quantité suffisante est trouvée au niveau d'un voisin du premier niveau alors une évaluation de ce nœud (coût de transport de CV à partir

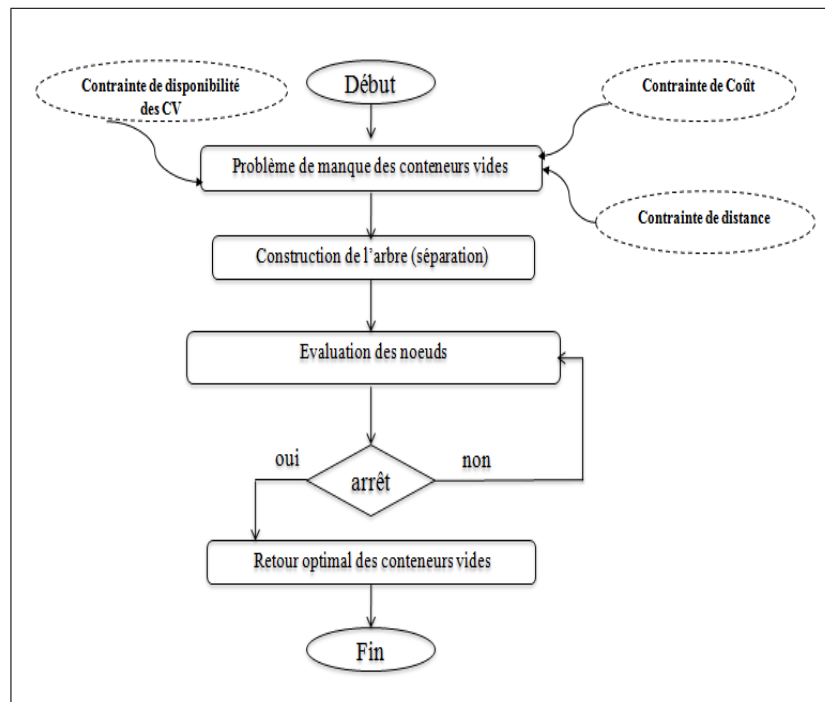


FIGURE 5.9 – Architecture fonctionnelle du système de retour des conteneurs vides en utilisant l’algorithme B&B

de ce nœud) est faite et on arrête là, sinon on continue la recherche des CV chez les ports voisins du deuxième niveau (division du nœud du premier niveau) et ainsi de suite.

Dans ce qui suit, nous déroulons le traitement d’une demande client qui a nécessité une recherche des conteneurs vides par l’armateur.

Nous traitons dans ce scénario, une demande client qui nécessite 17 conteneurs vides au niveau du port de Bejaia (P4) alors le stock de l’armateur est vide dans ce port. Pour cela, une procédure de recherche de 17 conteneurs vides est lancée à partir du port de Bejaia.

Dans cet exemple, la borne inférieure est la solution optimale qui permet de trouver le nombre total des conteneurs vides manquants à partir du premier meilleur voisin (plus proche) à coût minimal (meilleur prix).

La méthode commence par considérer le problème de départ avec son ensemble de solutions, appelé la racine (port de Bejaia).

Si un port dispose du nombre total des conteneurs vides voulu avec un coût qui coïncide avec la borne inférieure, alors la solution optimale est trouvée, et on arrête la recherche. Sinon, l’ensemble des solutions est divisé en deux ou plusieurs sous-arbres (sous-problèmes), devenant ainsi des enfants de la racine.

Ce processus est ensuite appliqué récursivement à ces sous-arbres, engendrant ainsi une arborescence. Si une solution optimale est trouvée pour un sous-problème, alors elle peut être

est réalisable, mais pas nécessairement optimale, pour le problème de départ. Puisque cette solution est réalisable, elle peut être utilisée pour éliminer toute sa descendance.

En effet, si l'évaluation de ce nœud dépasse la valeur d'une solution déjà trouvée, alors on peut constater que la solution optimale globale ne peut être contenue dans le sous-ensemble de solution représenté par ce nœud, par conséquent, cet sous-ensemble sera éliminé.

La recherche de la solution optimale continue jusqu'à ce que tous les nœuds soient explorés, avec une stratégie de parcours en profondeur, Figure (5.10).

La solution maintenue après l'exécution de B&B permet à l'armateur de retourner des conteneurs vides à partir des port de Barcelone et Castellon où 5 conteneurs vides vont être envoyés à partir de Castellon vers Barcelone avec un coût de 1400. Une fois arrivés, Barcelone va envoyer 12 CV (disponibles à son niveau) plus 5 CV vers Bejaia à un coût qui est égale à 9741. Le coût total minimal pour retourner les 17 conteneurs vides à Bejaia est égale à 11141.

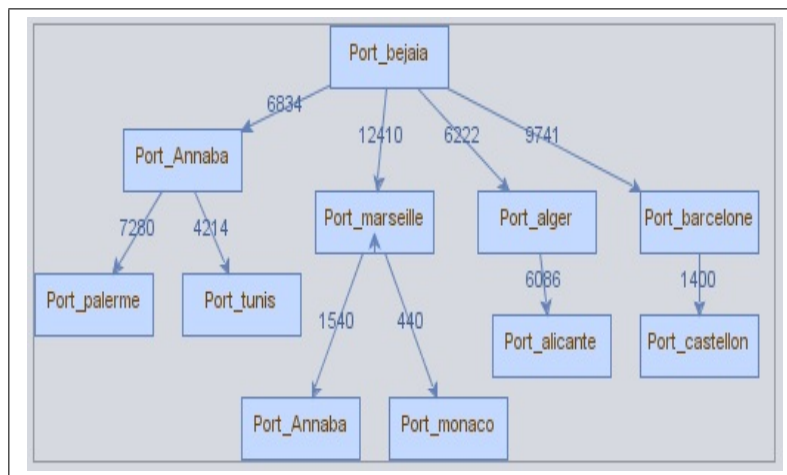


FIGURE 5.10 – Arbre généré par B&B pour l'obtention de la solution optimale

5.5 Étude comparative

Le système proposé dans cette étude comprend trois algorithmes d'optimisation pour aider l'armateur à trouver un retour des conteneurs vides à moindre coût. Dans ce qui suit, nous présentons une étude comparative entre les trois approches proposées pour la recherche des conteneurs vides, en prenant le coût comme étant un critère d'évaluation.

Sur le réseau illustré dans la Figure (4.5) avec 166 conteneurs vides distribués sur les différents ports, nous avons exécuté 6 scénarios en variant le nombre des demandes clients à chaque fois. Les résultats de chaque scénario sont notés sur le tableau (5.1).

La Figure (5.11) permet de visualiser la variation du coût de transport des conteneurs vides en fonction du nombre des conteneurs vides retournés dans chaque scénario selon les

	Nombre demandes clients	Nombre CV retournés	Coût aléatoire	Coût RT	Coût AG	Coût B&B
Scénario 1	10	37	11987	11887	14404	12761
Scénario 2	20	54	75550	38526	22160	18800
Scénario 3	30	96	104595	78006	46253	31415
Scénario 4	40	133	115140	88234	55353	40404
Scénario 5	50	213	154065	96161	107773	54108
Scénario 6	60	284	205486	169900	154029	60620

TABLE 5.1 – Résultats de l'étude comparative

trois approches de recherche des CV (noyau du système proposé) à savoir la RT, AG et B&B ainsi que la recherche des CV d'une manière aléatoire.

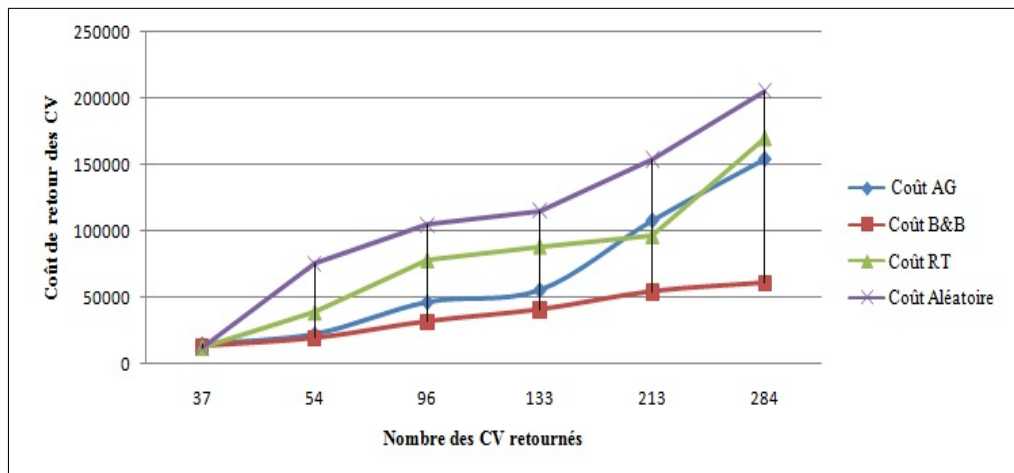


FIGURE 5.11 – Représentation des résultats de l'étude comparative

Dans la Figure (5.11), l'axe des X représente le nombre des conteneurs vides retournés dans chaque scénario et l'axe des Y représente le coût en unité suivant l'algorithme de la RT, AG, B&B ainsi que la recherche aléatoire.

À travers l'analyse de la Figure (5.11), nous pouvons dire qu'en prenant le coût de retour des CV comme un critère d'évaluation, les résultats d'expérimentation montrent que ce coût augmente en fonction du nombre des CV retournés.

Aussi, nous remarquons que la RT et l'AG donnent des solutions plus intéressantes par rapport à la recherche des CV d'une façon aléatoire, mais pas forcément la meilleure solution. La meilleure solution (le retour le moins cher) est toujours obtenue par l'algorithme B&B. Ceci peut être expliqué par la nature exacte de l'algorithme B&B et la nature approchée de la RT et l'AG.

D'un point de vu temps de réponse et même s'il est négligeable, sur tous les scénarios que nous avons essayé, la recherche aléatoire est la plus rapide suivie par la RT en deuxième lieu et

l'AG en troisième position. L'algorithme B&B est le dernier à donner la solution. Aussi, cette étude comparative nous a permis de constater que le temps de réponse des trois algorithmes augmente en fonction du nombre d'itérations pour converger vers la solution optimale. En revanche, ce temps de réponse devient important (spécialement pour la méthode exacte B&B) si le nombre des ports du réseau augmente. En effet, pour un espace de solution d'une taille faible, il peut être plus sûr de parcourir cet espace de manière exhaustive pour trouver la solution optimale en un temps raisonnable.

D'un point de vue complexité algorithmique par rapport au temps de calcul, nous pouvons dire que pour trouver une solution optimale dans un ensemble fini est un problème facile en théorie. Néanmoins, en pratique, l'énumération de toutes les solutions possibles peut prendre beaucoup de temps. En effet, le temps de parcours de l'espace de recherche pour trouver la solution optimale est un facteur très important, ce qui rend les problèmes d'optimisation combinatoire si difficiles.

La complexité de l'algorithme B&B (méthode exacte) utilisé pour la résolution des problèmes NP-difficiles¹ reste exponentielle, mais en moyenne, elle est bien plus faible que pour une énumération complète des solutions possibles [58].

Lorsque le problème à résoudre est de classe NP, le temps de calcul est important. Par conséquent, il vaut mieux se tourner vers des méthodes approchées (méta-heuristiques) qui ne garantissent pas l'optimalité de la solution trouvée mais permettent de réduire fortement les temps de calcul (compromis entre le temps de réponse et la qualité de la solution).

Chacun des trois algorithmes (RT, AG, B&B) peut être une bonne solution pour résoudre un problème d'optimisation. Néanmoins, leur utilisation doit être conditionnée par certaines caractéristiques de la nature du problème à résoudre.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des scénarios d'exécution pour le système de retour des conteneurs vides en utilisant la RT, l'AG et l'algorithme de B&B.

Le système considéré comme étant une boîte noire pour l'armateur peut être lancé par ce dernier à partir du port ayant exprimé un besoin en terme de conteneurs vides afin d'expédier une marchandise d'un client vers un port de destination sur le réseau.

Nous avons expliqué l'architecture fonctionnelle de chaque sous-système constituant cette boîte noire. Aussi nous avons détaillé le fonctionnement de chaque algorithme à travers le déroulement des exemples afin de pouvoir donner une solution de retour optimal des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime.

Trois solutions sont envisagées par le système d'aide à la décision proposé pour l'armateur. Une première solution optimale approchée a été obtenue avec la méthode RT en démarrant la

1. Cette classe contient des problèmes pour lesquels aucun algorithme polynomial n'est connu

recherche à partir d'une seule solution. La deuxième solution optimale approchée a été trouvée avec l'AG en démarrant la recherche à partir d'une population de solutions. Finalement la troisième solution optimale pour le retour des conteneurs vides a été obtenue par l'exécution de l'algorithme exacte B&B.

Nous avons présenté également une étude comparative entre les trois approches de recherche des conteneurs vides ainsi que la recherche aléatoire de ces derniers. Ceci nous a permis de montrer l'utilité du système proposé pour aider l'armateur à trouver un retour optimal des CV à chaque fois qu'un besoin est détecté.

Conclusion générale & perspectives

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le domaine de la logistique de transport maritime des conteneurs, spécialement la logistique inverse ou la logistique de retour. A travers cette étude, nous avons abordé l'un des problèmes rencontrés par les armateurs des conteneurs dans le transport maritime. Un problème décisionnel pour optimiser le coût de retour des conteneurs vides. Ce problème constitue un problème complexe et ouvert s'inscrivant dans le cadre des problèmes d'optimisation combinatoire. Il s'agit de minimiser le coût de retour des conteneurs vers un port du réseau de transport maritime qui est à la charge de l'armateur. Il nous a été alors nécessaire de proposer un système d'aide à la décision permettant de résoudre ce problème en proposant des solutions possibles pour aboutir à un retour des conteneurs vides à moindre coût.

Le modèle décisionnel proposé pour l'armateur comporte trois sous-système proposant chacun une solution optimale réalisable de retour des conteneurs vides.

La première partie de cette thèse est une synthèse de l'état de l'art qui comporte trois chapitres. Le premier chapitre a été consacré à la présentation du transport en général et plus précisément la présentation des différents concepts liés au transport maritime et la conteneurisation. Le deuxième chapitre a été l'occasion de présenter le cadre de notre travail à savoir la logistique inverse dans le transport maritime conteneurisé. Une étude bibliographique a été présentée dans ce chapitre. Le troisième chapitre a été dédié à la présentation détaillée des systèmes d'aide à la décision, leur évolution, le processus décisionnel ainsi qu'une classification de ces systèmes.

La deuxième partie de la thèse est articulée autour de deux chapitres représentant notre contribution. Le premier chapitre de cette partie présente, en détail, le système d'aide à la décision proposé pour l'armateur. Le deuxième chapitre de cette seconde partie illustre les expérimentations réalisées à travers quelques études de cas pour prouver les aspects théoriques du système proposé.

Le noyau du système d'aide à la décision à destination de l'armateur se compose de trois propositions pour la résolution du problème de retour des conteneurs vides :

- La première proposition est l'utilisation d'une méthode approchée à base d'une solution unique. Nous avons utilisé la méthode de la Recherche Tabou pour la recherche d'un retour optimal des conteneurs vides.
- La deuxième proposition est une méthode approchée à base d'une population de solution utilisée pour la recherche des conteneurs vides à moindre coût. Pour cela, nous avons exploité l'Algorithme Génétique que nous l'avons adapté à notre cas d'étude.
- La troisième proposition permet d'aboutir à une solution exacte concernant le retour optimal des conteneurs vides à travers l'utilisation de l'algorithme Branch & Bound.

Pour mettre en valeur les solutions données par le système proposé, nous avons pris le coût de retour des conteneurs vides comme étant un critère d'évaluation pour faire une comparaison entre les différentes approches de recherche des CV dans cette étude. Cette comparaison a montré que l'algorithme de B&B permet de trouver la solution réalisable avec le moindre coût par rapport à la RT et l'AG. Néanmoins, si on prend le temps de réponse des trois algorithmes, nous avons remarqué que la RT est la première à trouver une solution optimale réalisable suivie par l'AG en deuxième lieu et l'algorithme de B&B en dernier. Plus le nombre d'itérations augmente, plus le temps de réponse augmente pour trouver une solution optimale.

Finalement, nous pouvons dire que l'intérêt porté par notre équipe à savoir la recherche d'un retour optimal des conteneurs vides dans un réseau de transport maritime représente la préoccupation majeure des armateurs et fait l'objet de plusieurs pistes de recherche.

Perspectives

Le travail réalisé dans le cadre de la présente thèse est loin d'être terminé. Il ouvre plusieurs perspectives de projets de recherche et de travaux futurs.

Dans la continuité de ce travail, nous envisageons :

- L'implémentation d'agents dans notre modèle à travers une architecture distribuée vue la dynamicité du problème traité.
- La prise en considération de plusieurs critères et l'implémentation d'une méthode multi-critères d'aide à la décision sur une plateforme distribuée telle que la plateforme Jade.
- L'intégration d'autres méthodes d'optimisation et enrichissement de l'étude comparative.
- L'enrichissement de l'étude à travers la prise en considération des différents types de conteneurs (30 pieds et 40 pieds) à l'instar de ceux de 20 pieds, et le coût de stockage d'un conteneur vide dans une zone de stockage.
- Une étude des demandes clients afin de pouvoir faire des prévisions de la distribution des conteneurs sur le réseau maritime.

Bibliographie

- [1] A. Adla. *Aide à la Facilitation pour une prise de Décision Collective : Proposition d'un Modèle et d'un Outil*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2010.
- [2] S. Agrawal, R. K Singh, and Q. Murtaza. Disposition decisions in reverse logistics : Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137 :93–104, 2016.
- [3] A. Alshamsi and A. Diabat. A genetic algorithm for reverse logistics network design : A case study from the gcc. *Journal of Cleaner Production*, 2017.
- [4] S. A. Alumur, S. Nickel, F. Saldanha-da Gama, and V. Verter. Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220(1) :67–78, 2012.
- [5] C. H. Assongba. *Les contentieux en transport maritime de marchandises par conteneurs*. PhD thesis, Université Lille II, Droit et de la Santé-, 2014.
- [6] P. Balasubramanian, K. Nochur, J. C. Henderson, and M. Kwan. Managing process knowledge for decision support. *Decision Support Systems*, 27(1) :145–162, 1999.
- [7] C. Barnhart, C. Hane, and P. Vance. Using branch-and-price-and-cut to solve origin-destination integer multicommodity flow problems. *Operations Research*, 48(2) :318–326, 2000.
- [8] C. Barnhart, E. Johnson, G. Nemhauser, M. Savelsbergh, and P. Vance. Branch-and-price : Column generation for solving huge integer programs. *Operations research*, 46(3) :316–329, 1998.
- [9] N. Barnier and P. Brisset. Optimisation par algorithmes génétiques sous contraintes. *Technique et science informatiques*, 18(1) :1–29, 1999.
- [10] N. Belayachi, S. Gelareh, and K. Bouamrane. La logistique inverse dans l'industrie du transport maritime. In *16eme conférence ROADEF Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, Marseille, France, 25-27 Février 2015*.

- [11] N. Belayachi, S. Gelareh, and K. Bouamrane. Reverse logistics in the liner shipping industry. In *45th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Metz, France*, 28-30 October 2015.
- [12] N. Belayachi, S. Gelareh, K. Yachba, and K. Bouamrane. The logistic of empty containers return in the liner shipping network. *Transport and Telecommunication Journal*, 18(3) :207–219, 2017.
- [13] M. Bennekrouf, F. Belkaid, and A. Neki. Conception et pilotage d’une chaîne logistique inverse à plusieurs entités. In *Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées*, 2015.
- [14] H. G. Beyer and H. P. Schwefel. Evolution strategies—a comprehensive introduction. *Natural computing*, 1(1) :3–52, 2002.
- [15] D. Bhandari, C. Murthy, and S. K. Pal. Variance as a stopping criterion for genetic algorithms with elitist model. *Fundamenta Informaticae*, 120(2) :145–164, 2012.
- [16] J. M. Bloemhof-Ruwaard, M. Fleischmann, and J. A. Van Nunen. Reviewing distribution issues in reverse logistics. In *New trends in distribution logistics*, pages 23–44. Springer, 1999.
- [17] A. Bonnafous. Le système des transports urbains. *Economie et statistique*, 294(1) :99–108, 1996.
- [18] P. Bonnel. *Prévision de la demande de transport*. PhD thesis, Université Lumière-Lyon II, 2002.
- [19] K. Bouamrane. *Un système interactif d’aide à la décision pour la régulation d’un réseau de transport urbain bimodal : approche multi-agent et raisonnement à base de cas*. PhD thesis, Université d’Oran, Algérie, 2006.
- [20] T. Boudreau, J. Glick, S. Greene, V. Spurlin, and J. Woehr. *NetBeans : The Definitive Guide : Developing, Debugging, and Deploying Java Code*. ” O’Reilly Media, Inc.”, 2002.
- [21] T. Bui and A. Schenker-Wicki. Co-op : Un système d’aide à la décision de groupe pour les décisions stratégiques de l’entreprise. *Swiss Journal of Economics and Statistics (SJES)*, 124(3) :445–454, 1988.
- [22] H. Chang, H. Jula, A. Chassiakos, and P. Ioannou. A heuristic solution for the empty container substitution problem. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 44(2) :203–216, 2008.
- [23] I. Charon, A. Germa, and O. Hudry. *Méthodes d’optimisation combinatoire*. Masson Paris, 1996.
- [24] A. Checroun. *Comprendre, concevoir et utiliser les SIAD*. Masson, 1992.

- [25] F. Chihab-Bouzbouz. *Approche floue pour la régulation multimodale dans les réseaux de transports urbains en mode perturbé*. PhD thesis, Université Lille 1, France, 2002.
- [26] M. Christopher. *Logistics and supply chain management : creating value-adding networks*. Pearson education, 2005.
- [27] T. G. Crainic. Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122(2) :272–288, 2000.
- [28] Y. Crozet and J. C. Raoul. Le transport ferroviaire en france : avis de tempête organisationnelle? *Transports*, 2011(468) :213–220, 2011.
- [29] C. Darwin, M. J Adler, and R. M. Hutchins. *The origin of species by means of natural selection*. J. Murray, 1872.
- [30] J. Dewey. *How we think*. boston. MA : DC Heath, 1910.
- [31] M. Di Francesco, T. G. Crainic, and P. Zuddas. The effect of multi-scenario policies on empty container repositioning. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 45(5) :758–770, 2009.
- [32] M. Di Francesco, M. Lai, and P. Zuddas. Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Computers & Industrial Engineering*, 64(3) :827–837, 2013.
- [33] M. Dorigo and T. Stutzle. The ant colony optimization metaheuristic : Algorithms, applications, and advances. *International series in operations research and management science*, pages 251–286, 2003.
- [34] P. P. Dornier and M. Fender. *La logistique globale et le Supply Chain Management*. Edition d’organisation EYROLLES,, 2007.
- [35] J. Dubreuil. *La logistique des terminaux portuaires de conteneurs*. CIRRELT, 2008.
- [36] P. Eymery. *La Logistique de l’entreprise : supply chain management*. Hermès, 1997.
- [37] C. Feliot. *Modélisation de systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles*. PhD thesis, Université de Lille1, 1997.
- [38] M. Fleischmann, P. Beullens, J. M. Bloemhof-Ruwaard, and L. N. Wassenhove. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2) :156–173, 2001.
- [39] M. Fleischmann, R. Kuik, and R. Dekker. Controlling inventories with stochastic item returns : A basic model. *European journal of operational research*, 138(1) :63–75, 2002.
- [40] R. Fletcher. *Practical methods of optimization*. John Wiley & Sons, 2013.
- [41] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J Walsh. *Artificial intelligence through simulated evolution*. John Wiley, 1966.

- [42] G. Forgionne, M. Mora, F. Cervantes, and O. Gelman. I-dmss : A conceptual architecture for the next generation of decision making support systems in the internet age. In *Proceeding de la Conférence Internationale IFIP TC8/WG8, Irlande*, volume 3, pages 154–165, 2002.
- [43] A. Frémont and M. Soppé. Les stratégies des armateurs de lignes régulières en matière de dessertes maritimes. *Belgeo. Revue belge de géographie*, 2004(4) :391–406, 2004.
- [44] A. Frémont and M. Soppé. Transport maritime conteneurisé et mondialisation. *Annales de géographie*, 642(2) :187–200, 2005.
- [45] S. Gelareh, N. Maculan, P. Mahey, and R. N. Monemi. Hub-and-spoke network design and fleet deployment for string planning of liner shipping. *Applied Mathematical Modelling*, 37(5) :3307–3321, 2013.
- [46] S. Gelareh and Q. Meng. A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(1) :76–89, 2010.
- [47] S. Gelareh, S. Nickel, and D. Pisinger. Liner shipping hub network design in a competitive environment. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 46(6) :991–1004, 2010.
- [48] S. Gelareh and D. Pisinger. Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 47(6) :947–964, 2011.
- [49] M. Gendreau. *An introduction to tabu search, Handbook of metaheuristics, Chapitre 2*, volume 57. Springer, 2003.
- [50] S. Gentil. Intelligence artificielle appliquée à l'automatique. *Techniques de l'ingénieur. Informatique industrielle*, 12(R7215) :1–18, 1997.
- [51] A. Gherboudj. *Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques*. PhD thesis, Université de Biskra, 2013.
- [52] F. Glover. Tabu search—part i. *Operations Research Society of America journal on computing*, 1(3) :190–206, 1989.
- [53] F. Glover. Tabu search—part ii. *Operations Research Society of America journal on computing*, 2(1) :4–32, 1990.
- [54] G. A. Gorry and M. S. Morton. *A framework for management information systems*, volume 13. Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [55] S. M. Gupta and P. Veerakamolmal. A bi-directional supply chain optimization model for reverse logistics. In *Electronics and the Environment, 2000. ISEE 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on, San Francisco, USA*, pages 254–259. IEEE, 10 May 2000.

- [56] O. Hajji. *Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2003.
- [57] D. Hamdadou and K. Bouamrane. A multicriterion sdss for the space process control : towards a hybrid approach. *Proceeding of the 6th Mexican International Conference on Artificial Intelligence : Advances in Artificial Intelligence, Aguascalientes, Mexico, 4827* :139–149, November 4 -10, 2007.
- [58] J. K. Hao, P. Galinier, and M. Habib. Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes. *Revue d'intelligence artificielle*, 13(2) :283–324, 1999.
- [59] P. Hattenschwiler, M. Moresino, and A. Schroff. Rapid prototyping of decision support systems. *Engineering of Intelligent Systems EIS*, 98 :295–302, 1998.
- [60] N. Hilal. Effets pervers des déréglementations européennes : le cas du transport routier de marchandises. *Sociologie du travail*, 48(2) :175–187, 2006.
- [61] J. M. Hoc. *Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique*. Presses Universitaires de Grenoble, 1996.
- [62] J. Holland. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. *SIAM Journal on Computing*, 2(2) :88–105, 1973.
- [63] B. Houriez. *Acquisition de connaissances pour l'aide à la conduite et la supervision de procédés industriels*. PhD thesis, Université de Valenciennes, 1994.
- [64] T. L. Hu, J. B. Sheu, and K. H. Huang. A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 38(6) :457–473, 2002.
- [65] L. Jourdan. *Métaheuristiques Coopératives : du déterministe au stochastique*. PhD thesis, Université Lille I, 2010.
- [66] H. Jula, A. Chassiakos, and P. Ioannou. Port dynamic empty container reuse. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 42(1) :43–60, 2006.
- [67] P. Keen and M. S. Morton. *Decision support systems : an organizational perspective*, volume 35. Addison-Wesley Reading, MA, 1978.
- [68] M. Kefi. *Optimisation heuristique distribuée du problème de stockage de conteneurs dans un port*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2008.
- [69] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Journal of Science*, 220(4598) :671–680, 1983.
- [70] M. Klein. Capturing geometry rationale for collaborative design. In *Proceedings of 6th IEEE Workshops on Enabling Technologies : Infrastructure for Collaborative Enterprises*, pages 24–28. IEEE, 18-20 June 1997.

- [71] J. R. Koza. *Genetic programming : on the programming of computers by means of natural selection*, volume 1. MIT press, 1992.
- [72] S. Lambert and D. Riopel. *Logistique inverse : revue de littérature*. Groupe d'Études et de Recherche en Analyse des Décisions (GERAD), 2003.
- [73] S. Lambert, D. Riopel, and W. Abdul-Kader. A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3) :561–581, 2011.
- [74] A. Landrieu. *Logistique inverse et collecte des produits techniques en fin de vie. Tournées de véhicules avec contraintes*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2001.
- [75] J. L. Le Moigne. *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité, 1994.
- [76] J. E. Lee, M. Gen, and K. G. Rhee. Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3) :951–964, 2009.
- [77] T. L. Lei and R. L. Church. Locating short-term empty-container storage facilities to support port operations : A user optimal approach. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 47(5) :738–754, 2011.
- [78] P. Lévine and J. Pomerol. *Systèmes interactifs d" aide à la décision et systèmes experts*. Hermès, 1990.
- [79] P. Levine and J.C. Pomerol. *Systèmes Interactifs D'Aide à la décision et Systèmes Experts, Traité des nouvelles echnologies, série décision assistée par ordinateur*. Hermès, 1989.
- [80] M. Lind. *Representing Goals and Functions of Complex Systems-An Introduction to Multilevel Flow Modelling*. Institute of Automatic Control Systems, Technical University of Denmark, 1990.
- [81] S. Mammar. *Systèmes de Transport Intelligents, modélisation, information et contrôle*. Hermès, 2007.
- [82] A. Maniezzo, M. Colorni, and V. Dorigo. Distributed optimization by ant colonies. In *Toward a Practice of Autonomous Systems : Proceedings of the 1st European Conference on Artificial Life*, page 134. Mit Press, 1992.
- [83] G. M. Marakas. *Decision support systems in the 21st century*, volume 134. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [84] M. Massabie-François and E. Poulain. *Lexique du commerce international*. Editions Bréal, 2002.
- [85] Q. Meng and S. Wang. Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 47(5) :695–708, 2011.

- [86] P. Millot. Supervision et coopération homme-machine : approche système. *Guy Boy, Ingénierie Cognitive IHM et cognition*, pages 191–221, 2003.
- [87] P. Millot, V. Taborin, and A. Kamoun. Two approaches for man-computer cooperation in supervisory tasks. In *Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems 1989 : Selected Papers from the 4th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Conference, Xi'an, PRC, 12-14 September 1989*, page 39. Elsevier, 2014.
- [88] H. Min, H. J. Ko, and C. S. Ko. A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. *Omega*, 34(1) :56–69, 2006.
- [89] H. Mintzberg, D. Raisinghani, and A. Theoret. The structure of unstructured decision processes. *Administrative science quarterly*, pages 246–275, 1976.
- [90] N. Mittal, M. Boile, A. Baveja, and S. Theofanis. Determining optimal inland-empty-container depot locations under stochastic demand. *Research in Transportation Economics*, 42(1) :50–60, 2013.
- [91] L. G. Mitten. Branch-and-bound methods : General formulation and properties. *Operations Research*, 18(1) :24–34, 1970.
- [92] M. S. Morton. *Management decision systems, computer based support for decision making*. Harvard University, Boston, USA, 1971.
- [93] P. A. Muller and N. Gaertner. *Modélisation objet avec UML*, volume 514. Eyrolles Paris, 2000.
- [94] A. Mutha and S. Pokharel. Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1) :334–346, 2009.
- [95] M. Padberg and G. Rinaldi. A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems. *SIAM review*, 33(1) :60–100, 1991.
- [96] T. L. Pohlen and M. Theodore Farris. Reverse logistics in plastics recycling. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(7) :35–47, 1992.
- [97] D. J. Power. *Decision support systems : concepts and resources for managers*. Greenwood Publishing Group, 2002.
- [98] DJ Power. What is a dss? the on-line executive journal for data-intensive decision support. *The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support*, 1(3) :223–232, 1997.
- [99] D. Py, L. Auxepaules, and M. Alonso. Diagram, a learning environment for initiation to object-oriented modeling with uml class diagrams. *Journal of Interactive Learning Research*, 24(4) :425–446, 2013.

- [100] M. Ramezani, M. Bashiri, and R. Tavakkoli-Moghaddam. A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling*, 37(1) :328–344, 2013.
- [101] J. Rasmussen. Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 13(3) :257–266, 1983.
- [102] J. Rasmussen. Information processing and human-machine interaction. *An Approach to Cognitive Engineering*, Amsterdam, 1986.
- [103] M.C. Riff-Rojas. *Résolution de problèmes de satisfaction de contraintes avec des algorithmes évolutionnistes*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 1997.
- [104] J. P. Rodrigue, C. Comtois, and B. Slack. *The geography of transport systems*. Routledge, 2013.
- [105] D. S. Rogers, K. Banasiak, K Brokman, T. Johnson, and R. Tibben-Lembke. Reverse logistics challenges. In *2001 Annual Conference Proceedings*, 2002.
- [106] B Roy and D Bouyssou. *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Economica, 1993.
- [107] M. Sakarovitch. *Optimisation combinatoire.[2], Programmation discrète : méthodes mathématiques et algorithmiques*. Hermann, 1984.
- [108] R. Samna. *Stratégies d'entreprises de transport routier interurbain des voyageurs en Afrique de l'Ouest : cas du Niger*. PhD thesis, Université Lumière-Lyon II, 2010.
- [109] A. Schärli. *Pratiquer Electre et Prométhée : un complément à décider sur plusieurs critères*, volume 11. PPUR presses polytechniques, 1996.
- [110] L. H. Shih. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in taiwan. *Resources, conservation and recycling*, 32(1) :55–72, 2001.
- [111] K. Shintani, A. Imai, E. Nishimura, and S. Papadimitriou. The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 43(1) :39–59, 2007.
- [112] W. Shuaian, M. Qiang, and S. Zhuo. Container routing in liner shipping. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 49(1) :1–7, 2013.
- [113] H. A. Simon. Theories of bounded rationality. *Decision and organization*, 1(1) :161–176, 1972.
- [114] H. A. Simon. The new science of management decision. *Administrative Science Quarterly*, 22(2) :342–351, 1977.

- [115] D. P. Song and J. X. Dong. Long-haul liner service route design with ship deployment and empty container repositioning. *Transportation Research Part B : Methodological*, 55 :188–211, 2013.
- [116] D. P. Song and J.X. Dong. Cargo routing and empty container repositioning in multiple shipping service routes. *Transportation Research Part B : Methodological*, 46(10) :1556–1575, 2012.
- [117] P. Soriano and M. Gendreau. Fondements et applications des méthodes de recherche avec tabous. *RAIRO-Operations Research*, 31(2) :133–159, 1997.
- [118] A. Soulhi. *Contribution de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif*. PhD thesis, Université de Lille 1, 2000.
- [119] J. Sprague and E. Carlson. *Building effective decision support systems*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 1982.
- [120] S. K. Srivastava. Network design for reverse logistics. *Omega*, 36(4) :535–548, 2008.
- [121] M. Sun, J. E. Aronson, P. G McKeown, and D. Drinka. A tabu search heuristic procedure for the fixed charge transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 106(2-3) :441–456, 1998.
- [122] C. Tahon and D. Trentesaux. *Aide à la décision en gestion de production*. Hermès, 2001.
- [123] E. G. Talbi. *Metaheuristics : from design to implementation*, volume 74. John Wiley & Sons, 2009.
- [124] E. G. Talbi. *Metaheuristics for bi-level optimization*, volume 482. Springer, 2013.
- [125] R. Tibben-Lembke and D. S. Rogers. *Going backwards : reverse logistics trends and practices*. Reverse Logistics Executive Council, 1998.
- [126] P. Turret. La révolution du conteneur. note de synthèse N 49, ISEMAR, ISSN : 1282-3910.
- [127] E. Turban, J. E. Aronson, and T. Liang. *Decision support systems and intelligent systems*. Pearson Prentice-Hall, 2005.
- [128] B. Vermot Desroches. *Modèles d'interaction spatiale et théorie de l'interdépendance globale*. Communication au 14ime Colloque annuel (1982) de l'Institut de Mathématique Economique, Encyclopédie d'économie spatiale, Economica, 1994.
- [129] F. Viader. *Methodes de programmation dynamique et de recherche arborescente pour l'optimisation combinatoire : utilisation conjointe des deux approches et parallelisation d'algorithmes*. PhD thesis, Université de Toulouse 3, 1998.
- [130] V. Vincent. Etude sur les transports maritimes 2010. Technical report, Rapport du secrétariat du CNUCED, UNCTAD/RMT/ ISBN 978-92-1-212390-5 / ISSN 0252-5429, 2010.

- [131] M. Volle. *E-conomie, Chapitre X : Transport aérien*. Economica, 2000.
- [132] S. Wang, X. Qu, T. Wang, and W. Yi. Optimal container routing in liner shipping networks considering repacking 20 ft containers into 40 ft containers. *Journal of Advanced Transportation*, 2017(1), 2017.
- [133] M. Widmer, A. Hertz, and D Costa. *Les métaheuristiques*. Institut d’informatique Université de Fribourg, 1999.
- [134] K. Yachba, S. Gelareh, and K. Bouamrane. Storage management of hazardous containers using the genetic algorithm. *Transport and Telecommunication Journal*, 17(4) :371–383, 2016.
- [135] A. Zaoudi, A. Ihadiyan, and H. Zouiri. Contribution à l’évaluation de la performance du port et terminal à conteneur : cas tanger med. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 14(2) :303–315, 2015.
- [136] P. Zaraté. *Des Systèmes Interactifs d’Aide à la Décision aux Systèmes Coopératifs d’Aide à la Décision : Contributions conceptuelles et fonctionnelles*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [137] Y. Zhou and S. Wang. Generic model of reverse logistics network design. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3) :71–78, 2008.

Méthodes d'optimisation utilisées

Plan

A	Introduction	140
B	Présentation de la Recherche Tabou	140
B.1	Principe d'intensification et diversification	141
B.2	Sélection du meilleur voisin	141
B.3	Critères d'arrêt de la méthode RT	142
C	Présentation de l'Algorithme Génétique	142
C.1	Méthodes de sélection	142
C.2	Méthodes de croisement	143
C.3	Critères de convergence de l'AG	143
D	Présentation de Branch & Bound	143
D.1	Stratégies de parcours de l'arbre généré par B&B	143
D.2	Principe de séparation	144
D.3	Principe d'évaluation	144
E	Conclusion	144

A Introduction

Dans cette annexe, nous présentons quelques détails sur les méthodes d'optimisation utilisées dans cette thèse pour optimiser le coût de retour des conteneurs vides dans un RTM.

B Présentation de la Recherche Tabou

La recherche tabou est une métaheuristique pour la résolution des problèmes d'optimisation, proposée par Fred Glover en 1986 [52].

La meilleure analogie sans doute pour expliquer l'idée derrière l'algorithme RT est la fable des randonneurs.

Imaginons un randonneur malchanceux perdu dans la montagne, et qui voudrait rejoindre le point de la plus basse altitude puisqu'il sait qu'une équipe de secours passe régulièrement par ce point.

Il doit se rendre à ce point pour attendre les secours. Mais comment faire pour y arriver ? Il ne connaît pas l'altitude de son objectif et, à cause du brouillard, il ne voit pas loin. Donc, en arrivant à un croisement, il doit prendre une décision et s'engager dans une direction pour voir si le chemin monte ou descend. Face à un tel problème, la méthodologie de la recherche Tabou lui permettrait d'atteindre son objectif. Partant de n'importe quelle position du randonneur, la RT lui proposera de se déplacer vers le point qui le mènera à la plus basse altitude que le brouillard lui permet de voir. Une fois arrivé, il devra chercher de nouveau parmi toutes les positions qu'il peut apercevoir, la prochaine plus basse position pourvu qu'il ne l'ait pas déjà visitée.

Il arrive dans certains cas que la position choisie soit de plus haute altitude que la position actuelle du randonneur. Le fait de monter à cette nouvelle position, peut s'avérer une bonne décision puisque cette action peut mener le randonneur à de nouvelles positions encore plus basses que celle qu'il a trouvé depuis son départ. En poursuivant ainsi de suite, le randonneur se déplacera d'un point à un autre tout en mémorisant les T dernières positions qui lui seront taboues jusqu'à ce qu'il atteigne son objectif (le point de la plus basse altitude pour attendre les secours) [23].

L'idée de la RT consiste, à partir d'une position donnée, à explorer le voisinage et à choisir la position dans ce voisinage qui minimise ou maximise la fonction objectif. Cette opération peut conduire à augmenter la valeur de la fonction dans un problème de minimisation, c'est le cas lorsque les points du voisinage ont une valeur plus élevée. C'est à partir de ce mécanisme que l'on sort d'un minimum local.

Toutefois, on peut facilement retomber dans le minimum local auquel on vient de sortir (à l'étape précédente). C'est pourquoi il faut mémoriser les points déjà visités afin d'interdire (d'où le nom Tabou) de revenir sur les dernières positions explorées.

B.1 Principe d'intensification et diversification

Selon Soriano et Gendreau [117], le principe de l'intensification et diversification pour l'exploration de l'espace de recherche est comme suit :

Intensification : avec ce principe, la recherche est menée dans un voisinage V de S , dans l'ensemble des solutions N . Une haute priorité est donnée aux solutions $F(S')$ qui ressemblent à la solution actuelle $F(S)$, Figure (A.1(a)).

Autrement dit, intensifier l'exploration dans certaines régions du domaine qui ont été identifiées prometteuses selon une analyse de la procédure de recherche pour voir si les bonnes solutions rencontrées jusqu'à présent, n'auraient pas des caractéristiques communes. Dans l'affirmative, le processus de l'exploration est alors modifié afin de favoriser la présence de ces caractéristiques dans les nouvelles solutions.

L'idée est de mémoriser les meilleures solutions rencontrées (ou leur configuration), afin d'améliorer l'exploration du domaine des solutions. Le résultat est donc une intensification de la recherche dans un certain secteur du voisinage choisi [117], [49].



FIGURE A.1 – Intensification & Diversification.

Diversification : elle consiste à utiliser des mouvements encore jamais effectués pour explorer des nouvelles régions de l'espace de recherche en mémorisant les points (solutions) les plus visités. La diversification dirige la procédure de l'exploration vers des régions vers lesquelles elle n'est pas encore arrivée dont le but est d'éviter que la recherche soit localisée dans un secteur de l'espace des solutions en laissant de grandes régions totalement inexplorées.

La recherche est éloignée du voisinage V de la solution actuelle S dans l'ensemble des solutions N , Figure (A.1(b)). Une haute priorité est donnée aux solutions $F(S')$ d'une autre région que celle actuellement sous exploration [117].

B.2 Sélection du meilleur voisin

Pour la sélection du meilleur voisin durant la recherche, plusieurs stratégies ont été présentées dans la littérature [117] :

- *Best Fit* : avec cette politique, le voisinage est exploré en entier, et on choisit le meilleur voisin non tabou.

- *First Fit* : cette stratégie consiste à choisir le premier voisin rencontré, qui satisfait les contraintes. Elle est rapide, souvent réservée pour les problèmes où la taille du voisinage est grande, et ne permet pas d'effectuer une évaluation complète
- *Utilisation d'une table de calcul* : à chaque itération de l'algorithme, on mémorise dans une table, les modifications au coût de la solution courante associées à chacun des mouvements possibles afin d'éviter de calculer entièrement le coût de chaque voisin.

B.3 Critères d'arrêt de la méthode RT

En théorie, la RT pourrait ne pas s'arrêter (sauf si valeur optimale était connue a priori). Néanmoins, en pratique, il faut bien s'arrêter. Plusieurs critères d'arrêts peuvent être utilisés. Les plus courants visent à arrêter l'algorithme dans les cas suivants [117] :

- Après un nombre fixe d'itérations ou un temps de calcul déterminé ;
- Après un certain nombre d'itérations sans amélioration de l'objectif (la recherche semble stagner) ;
- Quand la recherche atteint une valeur déterminée (une solution prouvée optimale a été trouvée).

C Présentation de l'Algorithme Génétique

L'AG est une méthode d'optimisation approchée, qui utilise la notion de sélection naturelle et l'applique à une population de solutions potentielles pour arriver à une solution optimale après convergence de l'algorithme.

C.1 Méthodes de sélection

Plusieurs méthodes de sélection ont été proposées dans la littérature [15] :

1. La roulette : La sélection des individus par le système de la roulette s'inspire des roues de loterie. A chacun des individus de la population est associé un secteur d'une roue. L'angle du secteur étant proportionnel à la qualité de l'individu qu'il représente. On tourne la roue et quand elle s'arrête de tourner, l'individu correspondant au secteur désigné par une sorte de " curseur", sera sélectionné.
2. La sélection par rang : C'est une variante de la roulette. En effet, Les secteurs de la roue ne sont plus proportionnels à la qualité des individus dans la population, mais à leurs rangs triés selon la qualité des individus qui sont évalués avec la fonction Fitness.
3. La sélection par tournoi : C'est une rencontre entre plusieurs individus pris au hasard dans la population. Cette technique utilise la sélection proportionnelle sur des paires d'individus, ensuite on choisit parmi ces paires, l'individu qui a le meilleur score

d'adaptation (l'individu qui a la Fitness la plus élevée l'emporte) selon une probabilité comprise entre 0.5 et 1.

4. L'élitisme : Elle consiste à trier les individus de la population courante de manière décroissante selon la Fitness, ensuite, sélectionner les n individus dont on a besoin pour la nouvelle génération en prenant les n meilleurs individus de la population courante. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleurs individus.

C.2 Méthodes de croisement

Trois types de croisement sont présentés dans [15] :

- Le croisement à un point : il détermine aléatoirement un point de coupure et échange la deuxième partie des deux parents.
- Le croisement à deux points : il peut être étendu à plusieurs points, il possède 2 points (ou plus) de coupures qui sont déterminés aléatoirement.
- Le crossover uniforme : échange chaque champ avec une probabilité fixée à 1/2.

C.3 Critères de convergence de l'AG

D'après la littérature, certains auteurs proposent d'utiliser nombre maximal d'itérations comme critère d'arrêt de l'AG en se basant sur leurs expertises dans le domaine. Malheureusement, il n'existe pas de critères d'arrêt déterministe pour les méthodes approchées. Le critère de convergence peut être de nature diverse [15], par exemple :

- Un certain temps de calcul à ne pas dépasser.
- Le meilleur individu de la dernière génération atteint un seuil critique (meilleur).
- Un certain nombre d'itérations (stabilisation des solutions).

D Présentation de Branch & Bound

B&B est une méthode exacte d'optimisation qui retourne une solution optimale à une fonction objectif et pratique une énumération intelligente de l'espace des solutions. B&B divise l'espace des solutions en sous-ensembles de plus en plus petit selon un principe d'évaluation et de séparation.

D.1 Stratégies de parcours de l'arbre généré par B&B

Il existe plusieurs stratégies de parcours d'une arborescence qui sont discutés dans la littérature [129] :

En profondeur d'abord : Cette stratégie favorise les sommets ayant la profondeur la plus élevée (visiter les feuilles les plus profondes) en appliquant plus de séparations pour la résolution du problème initial. Cette procédure mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.

En largeur d'abord : Cette stratégie examine tous les nœuds d'un même niveau de l'arborescence avant de passer au niveau suivant. La largeur d'abord consiste à favoriser l'élargissement des possibilités par profondeur croissante.

Le meilleur d'abord : Cette stratégie consiste à explorer les nœuds possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les solutions qui possèdent une évaluation inférieure à la valeur optimale.

D.2 Principe de séparation

La séparation vise la division du problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cependant, pour ce faire, quelques règles doivent être respectées afin d'assurer l'optimalité de la solution obtenue [129] :

- Si F_i est séparé en $F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{im}$ alors $\bigcup_{j=1}^m F_{ij} = F_i$
- Le cardinal d'un sous-ensemble est inférieure à celui de son père.

D.3 Principe d'évaluation

L'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. L'algorithme du B&B repose sur deux bornes (inférieure et supérieure) pour stopper l'exploration d'un sous-ensemble de solutions ne pouvant pas contenir la solution optimale.

Concrètement, si pour un sous problème donné, la borne inférieure est plus grande que la borne supérieure, alors l'exploration du sous-ensemble correspondant est inutile.

Par exemple, la recherche d'une solution de coût minimal, consiste à mémoriser la solution de plus bas coût rencontré pendant l'exploration, et à comparer le coût de chaque noeud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du noeud considéré est supérieur au meilleur coût, l'exploration de cette branche va être arrêtée car toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée [129].

E Conclusion

À travers cette annexe, nous avons expliqué le principe de la Recherche Tabou et ses critères d'arrêt. Aussi, nous avons cité brièvement les méthodes de sélection et de croisement

concernant l'Algorithme Génétique utilisé comme une deuxième méthode d'optimisation dans ce travail. Finalement, nous avons parlé sur le principe du troisième algorithme d'optimisation (Branch & Bound) utilisé pour la résolution de problème de retour des conteneurs vides à moindre coût dans un réseau maritime.

Annexe **B**

Mise en œuvre du système proposé

Plan

A	Introduction	147
B	Outils de développement	147
C	Description de l'application	148
C.1	Retour des conteneurs vides en appliquant la Recherche Tabou	151
C.2	Retour des conteneurs vides en appliquant l'Algorithme Génétique	151
C.3	Retour des conteneurs vides en appliquant Branch & Bound	155
D	Conclusion	156

A Introduction

Dans cette annexe, nous présentons la partie mise en œuvre du système proposé via des captures d'écran.

Nous commençons par la présentation des outils de développement utilisés, ensuite, nous passons à la description de l'implémentation de chacun des trois algorithmes d'optimisation utilisés pour le problème de retour des conteneurs vides à moindre coût à travers des scénarios d'utilisation.

B Outils de développement

Le logiciel proposé pour l'armateur a été développé sous l'environnement NetBeans version 8.1, Figure (B.1). NetBeans est un environnement de développement intégré (EDI), placé en open source par Sun en juin 2000 sous licence CDDL. En plus de Java, NetBeans permet également de supporter différents autres langages, comme C, C++, JavaScript, XML, Groovy, PHP et HTML de façon native ainsi que bien d'autres comme Python ou Ruby par l'ajout des greffons¹. Il comprend toutes les caractéristiques d'un EDI moderne (éditeur en couleur, projets multi-langage, refactoring, éditeur graphique d'interfaces et de pages Web) [20].

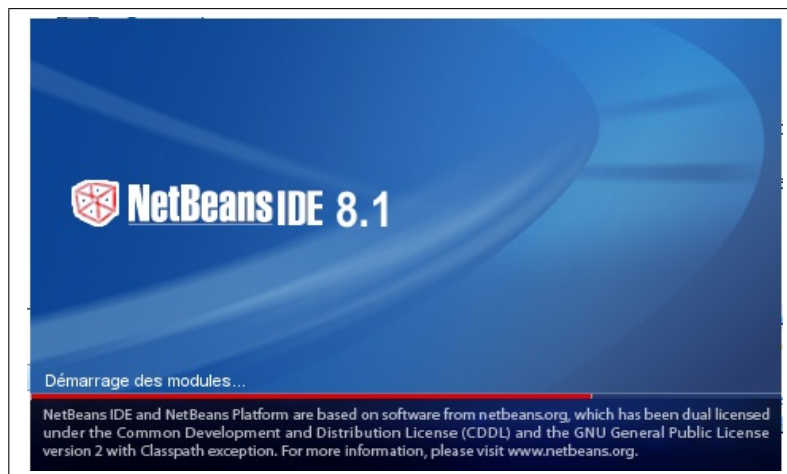


FIGURE B.1 – NetBeans 8.1

Le système proposé a été développé avec le langage de programmation orienté objet Java. Ce dernier a été créé par James Gosling et Patrick Naughton, employés de Sun Microsystems, avec le soutien de Bill Joy (cofondateur de Sun Microsystems en 1982), présenté officiellement le 23 mai 1995 au SunWorld. Un environnement Java Development Kit JDK est requis pour les développements en Java².

1. Greffon informatique est un mécanisme permettant d'ajouter une technologie à une application.
2. <https://www.oracle.com/java/technologies/index.html>

Pour créer la base de données contenant les différentes tables à savoir la table Conteneurs, Ports,... nous avons utilisé Mysql Workbench, Figure (B.2). Ce logiciel de gestion et d'administration de bases de données MySQL a été créé en 2004, doté d'une interface graphique intuitive, il permet, de créer, modifier ou supprimer des tables, des comptes utilisateurs, et d'effectuer toute sorte d'opérations en relation avec la gestion de base de données. Pour cela, il doit être connecté à un serveur MySQL³.

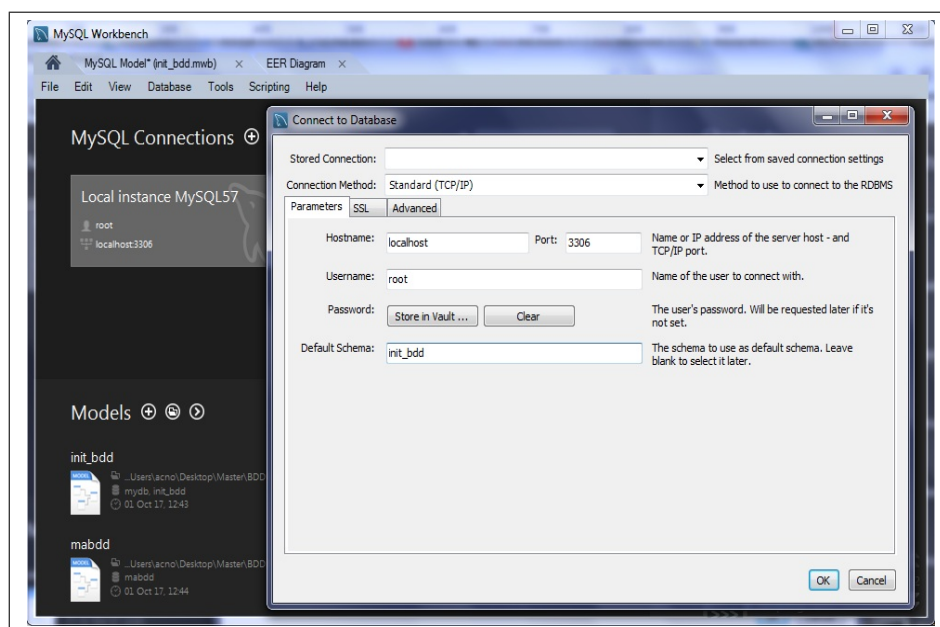


FIGURE B.2 – MySQL Workbench

C Description de l'application

Dans cette section nous décrivons le fonctionnement de notre application à travers le déroulement d'un scénario d'utilisation détaillé.

Avant d'accéder à l'application, une connexion avec la base de données est nécessaire. Pour cela, une identification de l'URL, Nom de la base de données, Nom d'utilisateur et Mot de passe doivent être fournis. Une fois la connexion avec la BDD est établie, l'utilisateur peut charger les données sur l'application en cliquant sur le bouton "Charger", Figure (B.3).

3. <https://www.mysql.com/fr/products/workbench/>

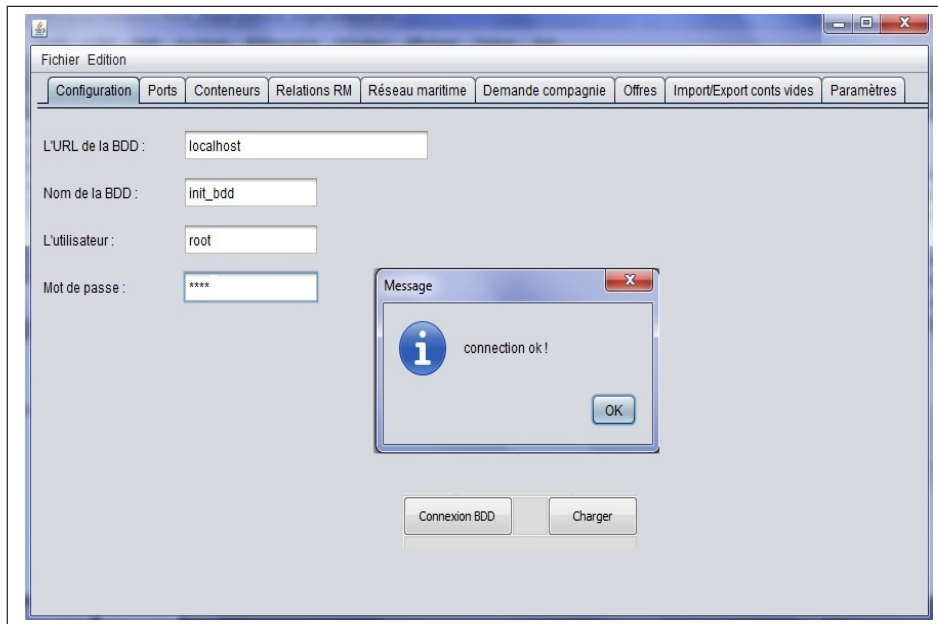


FIGURE B.3 – Connexion avec la base de données

Dès que les données sont chargées, l'utilisateur peut voir la liste des ports avec leurs paramètres à savoir la position géographique, le stock initial des conteneurs vides pour chaque port, Figure (B.4).

ID	Nom	Position Y	Position X	Stock initial
1	Port_Oran	35	0	10
2	Port_alger	36	3	10
3	Port_Annaba	36	7	13
4	Port_bejaia	36	5	12
5	Port_tunis	36	10	5
6	Port_alicante	38	0	7
7	Port_barcelone	41	2	7
8	Port_castellon	39	0	10
9	Port_vendres	42	3	12
10	Port_marseille	43	5	9
11	Port_tanger	35	-5	11
12	Port_agadir	30	9	14
13	Port_genes	44	8	6
14	Port_monaco	43	7	6
15	Port_palermo	38	13	8
16	Port_alexandrie	31	29	10
17	Port_beyrouth	33	35	11
18	Port_istanbul	41	28	5

FIGURE B.4 – Liste des ports du réseau

Le réseau de transport maritime peut être visualisé dans l'application comme le montre la Figure (B.5)

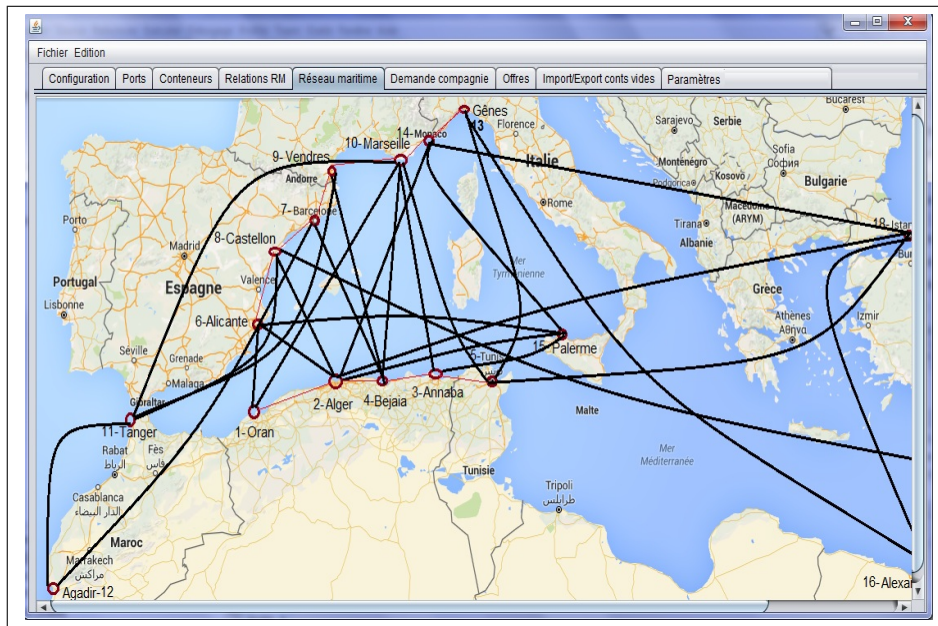


FIGURE B.5 – Réseau de Transport Maritime

Aussi, l'utilisateur peut avoir une vue sur la distribution des conteneurs sur le réseau à travers l'interface illustrée dans la Figure (B.6).

The screenshot shows the 'Conteneurs' tab in the software interface. The table below lists the container distribution data.

Matricule	Placement
125	port11
126	port11
127	port11
128	port11
129	port11
130	port11
131	port18
132	port18
133	port18
134	port18
135	port18
136	port6
137	port6
138	port6
139	port6
140	port6
141	port6
142	port6
143	port8
144	port8
145	port8
146	port8
147	port8
148	port8
149	port8
150	port8
151	port8
152	port8
153	port13
154	port13

FIGURE B.6 – Liste des conteneurs

La liste des demandes clients peut être aussi affichée selon la table illustrée sur la Figure (B.7). Chaque demande client est caractérisée par un identifiant, un port source, un port de

destination, un nombre des conteneurs nécessaires (demandés par le client) à envoyer, et un coût calculé selon le nombre des conteneurs pleins à envoyer et la distance entre les ports source et destination de ces derniers.

Id_demande	Port_Client	Port_Destination	Nombre conts manquants	Coût transport/cont plein(μ)
38	Port_monaco	Port_alger	13	
39	Port_vendres	Port_bejaia	11	
40	Port_palermo	Port_alger	8	
41	Port_palermo	Port_monaco	8	
42	Port_vendres	Port_bejaia	12	
43	Port_alicante	Port_Oran	13	
44	Port_alger	Port_castellon	6	
45	Port_tunis	Port_marseille	3	

FIGURE B.7 – Liste des demandes clients

Si un besoin de CV est détecté, alors une procédure de recherche des CV est lancée pour aider l'armateur à trouver ces dernier à moindre coût, sinon la demande client est traitée directement.

Après chaque transfert de conteneur, une mise à jour de la BDD est faite d'une façon centralisée au niveau du siège de l'armateur puis une copie est envoyée vers les différents ports du réseau.

Dans ce qui suit, nous présentons le résultat de chaque approche de recherche des CV dans le cas où l'armateur ne trouve pas des CV disponibles sur le stock du port source de la demande client.

C.1 Retour des conteneurs vides en appliquant la Recherche Tabou

La table illustrée sur la Figure (B.8) montre le résultat de recherche des conteneurs vides en utilisant la RT. Cette table contient les détails sur le traitement des demandes clients pour lesquelles une procédure de recherche des CV a été déclenchée. Pour chaque demande client, les informations suivantes sont affichées : le numéro de la demande, le port source et le port de destination, le nombre des CV demandés pas le client, le port voisin retenu par la RT pour transférer les CV à moindre coût, le nombre des CV manquants à transférer vers le port source, le coût de ce transfert en utilisant la RT, et dernièrement, le coût du transfert des CV en appliquant une recherche aléatoire.

C.2 Retour des conteneurs vides en appliquant l'Algorithme Génétique

Le résultat de l'exécution de l'AG pour trouver un retour des conteneurs vides à moindre coût est affiché sur la Figure (B.9). La table illustrée dans la partie gauche de la Figure (B.9) contient les différentes demandes clients pour lesquelles l'armateur n'a pas trouvé des CV disponibles. Dans ce cas, le système en utilisant les AG propose des solutions optimales pour

Affectation des conteneurs		Demandes					
Demandes	Ports Src.	Ports Dst.	Nbre. Conteneurs	port voisin retenu	Nbr Cont Vide m...	coût_tran avecRT	coût_tran sans RT
Demande 6	3	1	14	port 2	13	3224	5850
Demande 8	3	2	18	port 2	18	4464	8100
Demande 21	3	1	21	port 2	16	3968	7200
Demande 24	3	1	5	port 2	5	1240	2250
Demande 28	5	1	19	port 4	9	8100	8550

FIGURE B.8 – Résultats de retour des CV avec la RT

trouver des CV à moindre coût. En cliquant sur une demande de la table de gauche, la solution est affichée sur la table de droite de la Figure (B.9).

Recherche des CV				Solution proposée par l'Algorithme Génétique		
Id-demande	Nom du port	Besoin CV	Coût transport CV total...	Id_port	Nom_Port	Nombre de CV à transférer
50	Port_marseille	9	8546	3	Port_Annaba	1
52	Port_castellon	8	5476	2	Port_alger	1
54	Port_barcelone	5	2865	4	Port_bejaia	10
55	Port_castellon	7	3496			
56	Port_marseille	7	3860			
57	Port_marseille	12	9166			
58	Port_barcelone	3	1719			
60	Port_vendres	12	7984			

Déroulement Algorithme Génétique

FIGURE B.9 – Résultats de retour des CV avec l'AG

Par exemple : l'armateur au niveau du port Marseille a signalé un besoin de 12 CV pour satisfaire la demande client numéro 57. Le système propose la solution de retourner 1 CV à partir du P2 (port d'Alger), 1 CV à partir de P3 (port d'Annaba), et 10 CV à partir du P4 (port de Bejaia). Le coût total de ce transfert est affiché sur la table de droite de la Figure (B.9).

La Figure (B.10) permet de visualiser les paramètres de l'AG à savoir : le nombre d'individus dans une génération, le taux de sélection, le taux de croisement, le taux de mutation, le nombre de générations, ainsi que la fonction Fitness utilisée pour évaluer le coût de chaque individu (solution potentielle).

- Nombre d'individus : Il permet de fixer le nombre des individus dans chaque population générée pendant l'exécution de l'AG. Ce nombre ne doit pas être trop élevé car après une certaine limite la performance de l'algorithme commence à se dégrader (impact sur la rapidité de la résolution du problème). Dans notre exemple le nombre d'individus est fixé à 10 individus.
- Nombre de générations : Il permet de mettre un point d'arrêt pour l'exécution de l'AG en limitant le nombre d'évolutions de la population générée par l'algorithme. La

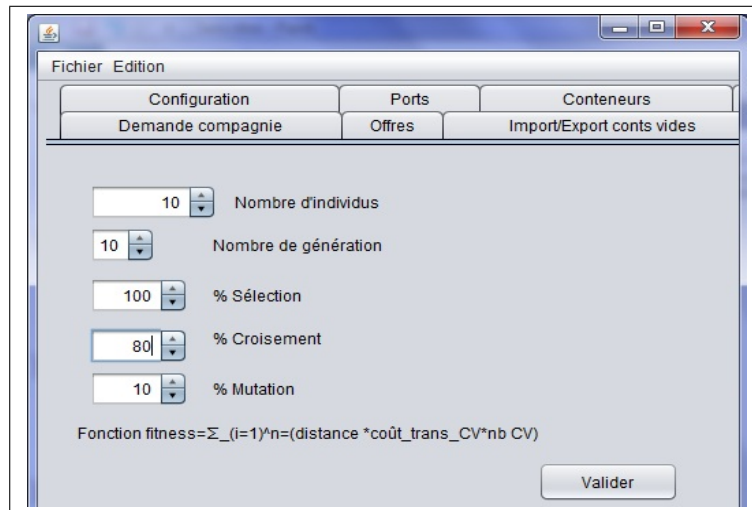


FIGURE B.10 – Paramètres de l'AG

recherche de la solution optimale est arrêtée après un certain nombre d'itérations. Dans notre cas, ce paramètre est fixé à 50 générations.

- Taux de sélection : Ce paramètre est basé sur une fonction d'évaluation (Fitness) qui correspond à une performance de l'individu. Il permet de désigner les individus aptes à se reproduire pour générer une nouvelle population. si le taux de sélection est de 100 % alors toute la population est sélectionnée, et si elle est de 0 % la nouvelle génération est une copie des individus de l'ancienne population (pas de reproduction). Dans cette étude, le taux de sélection est de 100 % (tous les individus de la population sont sélectionnés pour la reproduction).
- Taux de croisement : Ce taux indique le taux de participation à la reproduction de la nouvelle population par opérateur de croisement. Ce taux est fixé à 80% dans cette étude.
- Taux de mutation : Ce taux indique le nombre des individus qui vont subir une modification. La modification est faite sur chaque individu sélectionné en changeant l'un de ses chromosomes. Ce taux est fixé à 10% dans cette étude.
- Fonction Fitness : Cette fonction permet d'évaluer chaque individus d'une population et voir sa performance. À vrai dire, elle permet de calculer le coût de transfert des conteneurs vides selon chaque individu (solution potentielle) vers le port demandeur de ces derniers.

Le détail de déroulement de l'AG peut être affiché en cliquant sur le bouton "Déroulement Algorithme Génétique" de la Figure (B.9). Ceci permet d'afficher les différentes étapes d'exécution de l'AG. Un extrait de la population initiale est affiché sur la Figure (B.11). Une fois la population initiale est générée, une évaluation est faite sur chaque individu de cette population selon la fonction Fitness.

Configuration	Ports	Conteneurs	Relations RM	Réseau maritime	Demande compagnie	Offres	Import/Export conts vides	Déroulement Algorithme génétique	Paramètres
évaluation(coût) = 7420									
Génération finale	p13 0	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0				p8 0 p3 1 p5 0 p14 0
Génération finale	p13 0	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0				p8 0 p3 0 p5 0 p14 0
Solution finale	p13 0	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0				p3 0 p5 0 p14 0 p10 0
Demande Port_marseille avec id 10 quantité 12 La population initiale est:									
Génération	p13 0	p17 5	p18 2	p16 0	p15 0				p8 0 p3 0 p14 0 p10 0 p1 0
Génération	p13 0	p17 1	p18 2	p16 0	p15 0				p8 0 p3 0 p14 0 p10 0 p1 1
Génération	p13 4	p17 4	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p6 0 p9 0 p7 0		p8 0 p3 1 p14 0 p10 0 p1 0
Génération	p13 0	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p6 0 p9 0 p7 0		p8 0 p3 0 p14 0 p10 0 p1 0
Génération	p13 6	p17 1	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p6 0 p9 0 p7 0		p8 0 p3 0 p14 0 p10 0 p1 0
Génération	p13 0	p17 0	p18 0	p16 3	p15 0	p12 0	p6 0	p9 0 p7 0 p8 0 p3 0	p14 0 p10 0 p1 0
Génération	p13 4	p17 0	p18 3	p16 0	p15 0	p12 0	p6 0		p14 0 p10 0 p1 2
Génération	p13 0	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 2	p6 0 p9 0 p7 0		p8 0 p3 0 p14 0 p10 0 p1 0

FIGURE B.11 – Extrait de la population initiale générée par l’exécution de l’AG

Les individus sont ensuite classés selon l’évaluation faite par fonction Fitness (le meilleur individu est celui qui a le coût minimal) pour passer à une étape de sélection et déterminer les individus qui vont se reproduire par opération de croisement et de mutation. Un fragment de l’étape de croisement et de mutation est affiché sur la Figure (B.12).

Configuration	Ports	Conteneurs	Relations RM	Réseau maritime	Demande compagnie	Offres	Import/Export conts vides	Déroulement Algorithme génétique	Paramètres
évaluation(coût) =15403									
Génération	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 1	p13 0 p2 0 p1 4 p10 0
Génération	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 2	p13 0 p2 10 p1 0 p10 0
Génération	p17 0	p18 0	p16 2	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 0	p13 0 p2 0 p1 9 p10 0
Génération	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 1	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 3	p13 0 p2 1 p1 0 p10 0
Génération	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 3	p13 0 p2 0 p1 0 p10 0
Croisement									
Individu Croisé	p17 1	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 2	p13 0 p2 0 p1 0 p10 0
Individu Croisé	p17 1	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 0	p13 0 p2 1 p1 0 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 1	p13 0 p2 1 p1 10 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 1	p13 0 p2 10 p1 0 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 3	p13 0 p2 1 p1 0 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 3	p13 0 p2 2 p1 0 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 1	p13 0 p2 0 p1 4 p10 0
Individu Croisé	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 3	p13 0 p2 2 p1 0 p10 0
Mutation									
Individu muté	p17 2	p18 0	p16 0	p15 0	p12 0	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 0	p13 0 p2 0 p1 9 p10 0
Individu muté	p17 0	p18 0	p16 0	p15 0	p12 3	p9 0 p7 0	p6 0 p8 0	p3 0	p13 0 p2 0 p1 0 p10 0

FIGURE B.12 – Opération de croisement et de mutation de l’AG

Après 50 d’itérations, l’AG converge vers une solution optimale en proposant un retour de 1 CV à partir de P3 (port d’Annaba) et 1 CV à partir de P2 (Port d’Alger) et 10 CV à partir de P4 (port de Bejaia), Figure (B.13). Ce résultat est affiché pour l’armateur sous forme d’une table comme le montre la Figure (B.9).

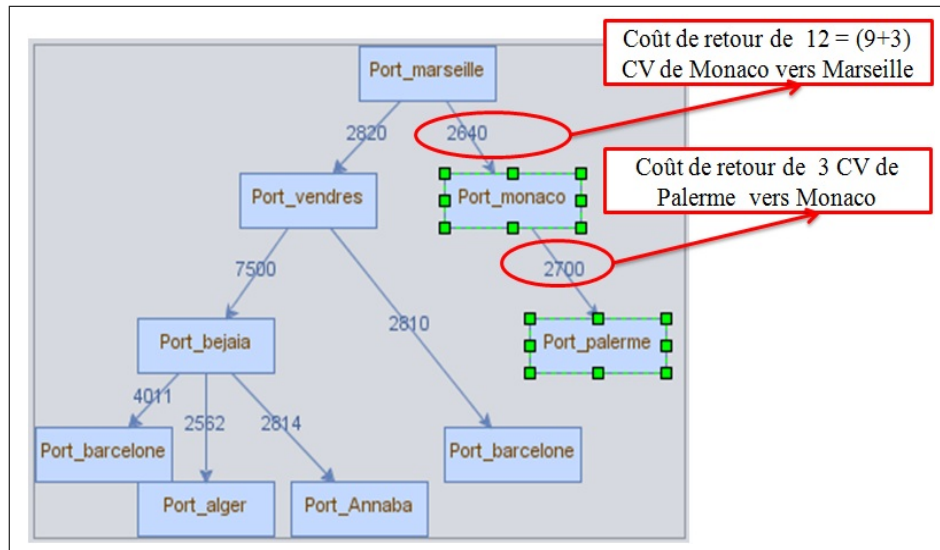


FIGURE B.15 – Arbre généré par B&B lors de la recherche des CV

D Conclusion

Dans cette annexe, nous avons présenté le fonctionnement du système proposé à travers le déroulement d'un scénario d'utilisation, en expliquant le fonctionnement de chaque algorithme d'optimisation utilisé pour le problème de retour des conteneurs vides. Le système propose trois solutions pour l'armateur qui va décider qu'elle solution prendre ou de carrément ignorer l'aide proposée.

Résumé : Le transport maritime conteneurisé représente l'opération de déplacement des marchandises d'un endroit à un autre par voie maritime. Comparativement à d'autres modes de transport de marchandises, le transport maritime reste un moyen de transport très important. Il traite l'acheminement des conteneurs pleins vers la destination (logistique directe) ainsi que le retour des conteneurs vides (logistique de retour ou inverse) vers certains ports où un besoin est signalé. Le retour des conteneurs vides représente une préoccupation majeure pour les armateurs. En effet, l'indisponibilité des conteneurs vides au niveau de certains ports du Réseau de Transport Maritime n'est autre qu'une conséquence du déséquilibre de la distribution de leurs conteneurs à travers le réseau à cause des conteneurs envoyés et qui ne sont pas retournés par la suite. Réellement, le retour des conteneurs vides à leurs origines n'est pas garanti, car le transport des conteneurs vides est facturé au nom de l'armateur. Cette situation peut provoquer la non satisfaction des demandes clients pour envoyer leurs biens si l'armateur ne trouve pas de conteneurs vides au niveau du port où le client s'est présenté.

L'objectif de ce travail est de résoudre ce problème en proposant un modèle décisionnel pour l'armateur afin de l'aider à trouver un retour des conteneurs vides à moindre coût.

Le système proposé est articulé autour de trois algorithmes pour optimiser les frais de retour. Autrement dit, notre contribution à travers la présente thèse offre une aide à la décision pour l'armateur quand un besoin pour des conteneurs vides est observé dans certains ports du réseau maritime, en lui proposant des solutions optimales pour trouver les ports à partir desquels les conteneurs vides peuvent être retournés avec un coût minimal.

Mots clés : Système d'Aide à la Décision, Processus décisionnel, Réseau de Transport Maritime, Conteneur Vide, Coût de retour, Logistique inverse, Méthode d'optimisation, Recherche Tabou, Algorithme Génétique, Branch & Bound.

Abstract: The container shipping represents merchandise moving operation from one place to another by sea. Compared to the other modes of transport of goods, maritime transport remains a very important means of transport. It handles the routing of full containers to the destination (direct logistics) as well as the return of empty containers (return or reverse logistics) to certain ports where a need is reported. The return of empty containers is a major preoccupation for ship-owners. In fact, the unavailability of empty containers at certain ports of the Maritime Transport Network is only a consequence of the imbalance of the distribution of their containers through the network because of the containers that are sent and which are not returned after. Really, the return of empty containers to their origins is not guaranteed, because the transport of empty containers is billed in the name of the ship-owner. This situation may cause unsatisfactory of the customers' requests to send their goods if the ship-owner cannot find empty containers at the port where the customer has presented.

The goal of this work is to solve this problem by proposing a decision-making model for the ship-owner in order to help him to find a return of empty containers at a lower cost.

The proposed system is based on three algorithms to optimize return costs. In other words, our contribution through this thesis offers a decision-making tool for the ship-owner when a need for empty containers is observed in some ports of the maritime network, by offering him optimal solutions to find the ports from which the empty containers can be returned at a minimal cost.

Keywords: Decision Support System, Decision Making Process, Maritime Transport Network, Empty Container, Return's cost, Reverse Logistics, Optimization Method, Taboo Research, Genetic Algorithm, Branch & Bound.

ملخص: يمثل النقل البحري باستخدام حاويات الشحن حركة نقل البضائع من مكان إلى آخر عن طريق البحر و بالمقارنة مع وسائل النقل الأخرى للبضائع، يظل النقل البحري وسيلة هامة جدا للنقل فإنه يعالج توجيه الحاويات المملوءة إلى المكان المقصود (الخدمات اللوجستكية المباشرة) وكذلك إعادة الحاويات الفارغة (الخدمات اللوجستكية العكسية) إلى بعض الموانئ أين يتم الإبلاغ عن الحاجة . إن عودة الحاويات الفارغة هي مصدر قلق كبير لمالكي الحاويات والواقع أن عدم توفر حاويات فارغة في موانئ معينة لشبكة النقل البحري هو فقط نتيجة لعدم التوازن في توزيع حاوياتها من خلال الشبكة بسبب الحاويات المرسله والتي لا تعاد . بعد ذلك . حقا، لا يتم ضمان عودة الحاويات الفارغة إلى مكانها، لأن فواتير نقل الحاويات الفارغة تكون باسم مالكيها . هذا الوضع يمكن أن يؤدي إلى طلبات العملاء غير مرضية لإرسال بضائعهم إذا كان مالك الحاويات لا يتمكن من العثور على حاويات فارغة في الميناء حيث وصل الزبون . والهدف من هذا العمل هو حل هذه المشكلة عن طريق اقتراح نموذج صنع القرار لمالك الحاويات و ذلك لمساعدته في العثور على حل لإعادة الحاويات الفارغة بتكلفة أقل . ويستند النظام المقترح إلى ثلاثة خوارزميات لتحسين تكاليف العودة . وبعبارة أخرى، مساهمتنا من خلال هذا البحث يوفر وسيلة لدعم اتخاذ القرار لصاحب الحاويات عندما يلاحظ وجود حاجة للحاويات فارغة في بعض الموانئ من الشبكة البحرية، من خلال تقديم الحلول المثلى للعثور على الموانئ التي من يمكن إرجاع الحاويات الفارغة منها بأقل تكلفة ممكنة . **الكلمات المفتاحية :** نظام دعم القرار، عملية صنع القرار، شبكة النقل البحري، حاوية فارغة ، تكلفة العودة ، عكس الخدمات اللوجستكية ، طريقة التحسين ، خوارزمية بحث تابو، الخوارزمية الجينية، خوارزمية التفرغ والتحديد

Transport and Telecommunication, 2017, volume 18, no. 3, 207–219
Transport and Telecommunication Institute, Lomonosova 1, Riga, LV-1019, Latvia
DOI 10.1515/tjt-2017-0018

THE LOGISTIC OF EMPTY CONTAINERS' RETURN IN THE LINER-SHIPING NETWORK

Naima Belayachi¹, Shahin Gelareh², Khadidja Yachba³, Karim Bouamrane⁴

^{1,3,4}*Department of computer science, University of Oran1 Ahmed Ben Bella,
BP 1524El M'nouer, Oran, Algeria,
Ph.: ¹+213773753114, ³+213778281905, ⁴+213666442474
E-mail: ¹bnaima2@hotmail.fr, ³yachbakhadidja@yahoo.fr, ⁴kbouamranedz@yahoo.fr*

²*University of Portsmouth, Portsmouth, Hampshire,
PO13DE, United Kingdom
E-mail: shahin.gelareh@gmail.com*

The Maritime Transport is a favoured tool regarding the universal exchanges because it has gone through several evolutions. Indeed, the containerization is considered as one of the most remarkable improvements in the shipping. The containers are rented by shipping companies. However, these companies meet an empty container availability problem at some ports of Maritime Transport Network (MTN) to satisfy the demands of clients. The objective of this work is to solve the problem of the imbalance of the distribution of containers and look for empty containers at less cost to meet the demands of clients. As a result, the authors propose an application to represent the MTN, and provide a balanced distribution of containers. The work presented in this article is based on a heuristic method by neighbourhood. It allows the process of the clients' demands and transfers of full containers as well as the research of empty containers by optimizing the cost of theirs return.

Keywords: Maritime Transport Network (MTN), empty container, client' demand, optimization, Taboo Search

1. Introduction

The contribution of the authors is a part of reverse logistics in the field of Maritime Transport. The Maritime Transport is a preferred mechanism for international trade, which is facing a strong competition from the railway and the road. This mode of transport has gone through many revolutions and it has undergone several changes and improvements in order to adapt to merchandise exchanges between nations.

More precisely, the researchers are interested in the problems related to the management of full containers as well as the repositioning of empty containers, which represents the return flow in the reverse logistics in this work.

The reverse logistics concerns the management of the flow of products that returned from the client to the manufacturer. Sometimes, the consumer is not satisfied with the delivered product, so he decides to return it to the producer. This represents the flow of reverse logistics, when the consumer returns the product to the distribution centre, then the distribution centre returns the product to the after-sales service for being reset in a new state, recycling. Otherwise, the product can be rejected.

In this study, the chain of reverse logistics is considered as the return of empty containers from one port to another to respond to a client demands.

The paper is organized as follows: Section 2, is dedicated to the presentation of a state of art. In Section 3, the authors outline the problem being addressed. Section 4, is dedicated to a detailed presentation of the contribution, and followed by a discussion of the results in Section 5. The researchers conclude this paper by a synthesis in section 6, and a conclusion with some perspectives in Section 7.

2. State of Art

In order to point out everything that is connected to the present work, a state of art was done to get closer to this axis of research, which has naturally led researchers to focus on and to propose adequate models.

A discrete-time linear analytical model was proposed in (Hu *et al.*, 2002) to solve a minimization problem of the costs of reverse logistics for the treatment of hazardous waste. Another model was

proposed by (Min *et al.*, 2006), who use genetic algorithms to study the problem of management of returned products. Also, (Yachba *et al.*, 2016) use the genetic algorithms to optimize the storage space of dangerous containers in the maritime sector and minimize unnecessary movements. For the design of a reverse logistics network, a mathematical model of linear programming was proposed in (Zhou and Wang, 2008), where the objective function of the model is to minimize the total cost of the system for the management of returned products. On another side, (Srivastava, 2008) provided a design of a reverse logistics network, and he offered a three-level design (products returned by clients, collection's centres, factories). He considered that the client is the source of the returned products. The proposed objective function is to maximize the profit, which is equal to revenues minus the sum of resales cost of reverse logistics and the price of resolution.

Besides, (Lee *et al.*, 2009) offered a work that addressed a problem of reverse logistics process for a remanufacturing of returned products. This problem is one of the most important problems in the environment of the recovery of the used products. The proposed model focused on minimizing the total cost of reverse logistics using genetic algorithms combined with a method based on priority and heuristics. Still in the context of reverse logistics, (Mutha and Pokharel, 2009) presented a strategy for the design of a reverse logistics network and re-manufacturing using new or old product modules. The returned products must be consolidated in the warehouse before being sent to recycling centres for inspection and removal another important part. The disassembled parts are sent to re-manufacture or to the secondary market as spare parts. The objective function consists of minimizing the cost of transportation, inventory, disposal of unused parts and assembly cost. In 2012, (Alumur *et al.*, 2012) proposed a linear programming for a reverse logistics network design. The objective function maximizes the gain that is equal to the sum of profit from recycling centres, manufacturing plants, and the secondary market minus the fixed costs of establishing of operating and transportation facilities, storage, and purchasing components. The model is applied to washing and dryers machines that are collected from 40 collection's centres in the 40 most populated cities in Germany. Ramezani *et al.* in (2013), presented a multi-objective stochastic model for direct / reverse logistics network design in an uncertain environment, with three steps in the forward direction (suppliers, factories, distribution centres) and two levels in the backward direction (the collection centres and storage ones).

Reverse logistics is a domain that has a magnitude in recent years. It is a system of management of the returned products by the client and recovered by the company, which includes shares of recycling, dismantling, and remanufacturing, for the recovery of client products. In the domain of Maritime Transport, this discipline does not attract the attention of researchers. Several works can be found but they concerned the direct logistics that is easy to manage compared to the uncertainty of reverse logistics. Furthermore, the authors of this paper will also overfly some studies that address the optimization problem in the Maritime Transport sector. Crainic in (2000) proposed a model of a shipping network as a graph containing nodes connected by links, which are directed and represented as arcs in the network. Some nodes are the origins of the transport demand for one or more products, and others represent the destinations of this traffic. The links can have various characteristics, such as length, capacity, and cost. The objective is to select links in a network with capacity to meet transport demand at the lowest cost possible. A mixed integer programming was proposed by Gelareh *et al.* (2010) for the design of hub-and-spoke networks in a competitive environment. This work treats the competition between a new provider lines and a dominant existing operator, working both of them on the hub-and-spoke networks. The new company maximizes its market share, which depends on the length of service and transport costs by locating a predetermined number of hubs in the candidate ports and established the design of its network. A method of Lagrange accelerated combined with a primal heuristic has been proposed. Another work of (Gelareh and Qiang, 2010) focused on the development of model for the problem of the fleet deployment for short-term Maritime Transport operations. The work proposes a mixed linear programming model to determine the optimal frequency of the service line and takes into account the time constraints of shipping services. More recently, Shuaian *et al.* (2013) proposed a mathematical model to generate paths containers while taking into account operational constraints. At first, they gave a representation of the Marine Transportation Network then; they proposed a linear programming model based on the operational network whose goal is to get all the paths of the containers for each pair origin-destination with a minimum cost. Finally, they added constraints to the linear programming model, excluding the paths already obtained to find all container paths. Additionally, the authors cite the work of (Gelareh *et al.*, 2013) which offered a mixed linear programming model for the design of Marine Transportation Network, and an allocation of ships depending on the size of the chain (all the shipping companies divide

their service regions into several chains composed of an ordered set of ports) in order to ensure a good adjustment of the operating frequency at each chain. They proposed a Lagrangian decomposition approach that uses a heuristic procedure, which can achieve practical solutions and high quality in a reasonable time. Similarly, the problem of the empty containers repositioning in the maritime networks under possible disturbances is found in the work of (Francesco *et al.*, 2013). They consider data uncertainty related to this problem by a stochastic programming approach, where different scenarios are included in a multi-scenario optimization model. The work of (Song and Dong, 2013) proposed a design for a maritime service line of long distance taking into account the road structure, deployment of ships, and the repositioning of empty containers. The objective is to minimize the total cost of the charges of a shipping service line of long distance, including costs related to the ship, fuel consumption costs, port costs, transfer cost and the storage of full and empty containers. Regarding the problem of empty containers repositioning, they proposed an algorithm to minimize the loading and unloading movements of these latter.

Table 1. Comparative study

Proposed solution	Reference	Representation of the network	Perturbations	Client demand	Direct the supply chain (transfer of full containers)	Optimization unnecessary movement / fleet deployment	Selection of port for the return of empty containers	indirect supply chain (return of empty containers)	Cost optimization of the return of empty containers (returned goods)
Mathematic model	(Hu <i>et al.</i> , 2002)							X	X
	(Zhou and Wang, 2008)	X						X	X
	(Srivastava, 2008)	X						X	X
	(Mutha and Pokharel, 2009)	X						X	
	(Alumur <i>et al.</i> , 2012)	X				X		X	X
	(Gelareh and Qiang, 2010)	X			X	X			
	(Gelareh <i>et al.</i> , 2010)	X				X			
	(Shuaian <i>et al.</i> , 2013)	X			X				
	(Gelareh <i>et al.</i> , 2013)	X			X	X			
Stochastic model	(Ramezani <i>et al.</i> , 2013)	X	X		X			X	X
	(Francesco <i>et al.</i> , 2013)	X	X					X	X
Genetic Algorithm	(Min <i>et al.</i> , 2006)							X	X
	(Lee <i>et al.</i> , 2009)	X						X	X
	(Yachba <i>et al.</i> , 2016)					X			
Algorithm to minimize unnecessary movement of empty containers	(Song and Dong, 2013)	X				X			X
Graph of vertices	(Crainic, 2000)	X		X	X				

Maritime Transport represents crucial preoccupation. In addition, different companies provide great efforts in order to identify opportunities to reduce costs associated with this transport. However, to be competitive, Maritime Transport must improve its services and reduce the costs. Therefore, several questions are required: How to do in order to: ensure a better tracking of goods? minimize delays? increase the storage capacity?, optimize the return's cost of empty containers, which represent the interest of this work. All these questions arise in the different activities carried in each port. This has encouraged the authors to propose a model based on a heuristic method to search for empty containers with a minimal cost while ensuring a balanced distribution of containers in RTM.

The authors are interested in works that are related to reverse logistics and empty containers. For this reason, a comparative study between the works presented above was made, where different criteria have been taken into account as shown in the Table 1.

3. Positioning of the Problem

The objective of this work is to propose a tool to represent the Marine Transportation Network and to ensure a balanced distribution of the containers between the ports to satisfy the clients and maximize the efficiency and profitability of the MTN's lines by optimising the cost of empty containers' return, which is on the charge of the owners of these containers. Container ship owners seek above all to ensure the filling of ships with full containers, regardless of the type of goods. They try to balance the number of containers transported in forward and the return between ports. However, unfortunately, the imbalance of trade balances of countries affects the containerized trade. Some countries produce more than others, and some countries import more goods they export. This affects the flow of containers transported by seaway, which will be imbalanced. For this purpose, the containers' owners are confronted with two major problems: a difficulty achieving a balanced flow of containers and a profitability of the lines, which degrades. In other words, the number of containers exported from the port p to another port p' is greater than the number of imported containers in the port p . This does not respect the conservation of the container's flows between the ports of the Marine Transportation Network. Therefore, an imbalance occurs in container's distribution. In this situation, when a client's demand comes at a port that has not enough empty containers in its stock, then this demand will not be treated or the owner will try to find empty containers in an arbitrary manner. However, sometimes at a high cost that the owner must pay causes a lowering of the efficiency of the MTN's lines.

In this paper, a resolution of the problem described above is proposed. The model allows to visualize the treatment of the clients' demands from the origin to the destination, and the research for empty containers at lower cost if a port does not find empty containers available at its stock to take charge the demand, in such a way to keep the balance in the distribution of the containers on the Marine Transportation Network.

4. Contribution

The contribution presented in this paper, is responsible for the management of the clients' demands regarding the arrivals and departures of containers in the port, also it allows the optimization of the return's cost of the empty containers at the moment of searching of these later. The research of the empty containers is based on a heuristic method by neighbourhood.

Specifically, in this work, the authors study the return of the empty containers transported on a shipping line, to keep a balance in terms of import and export containers at ports. To remedy this problem, the authors have used a heuristic method by neighbourhood. Additionally, the principle of this method is to go through all the possible solutions from an initial solution (The port that does not find available empty containers will choose a port in its neighbourhood as an initial solution to look for empty containers) and moving to other neighbours step by step.

This study takes place as a part of reverse logistics, where the containers returned from a port p_1 to a port p_2 represent the products that are returned from the client to the manufacturer in the chain of reverse logistics (Belayachi *et al.*, 2015). The present contribution is a help for the containers' owner. It represents the reverse logistics chain regarding the return of the empty containers in the MTN in order to ensure their availability and satisfy the client's demands and send the goods. Figure 1 allows to schematize the general operating process of this proposal.

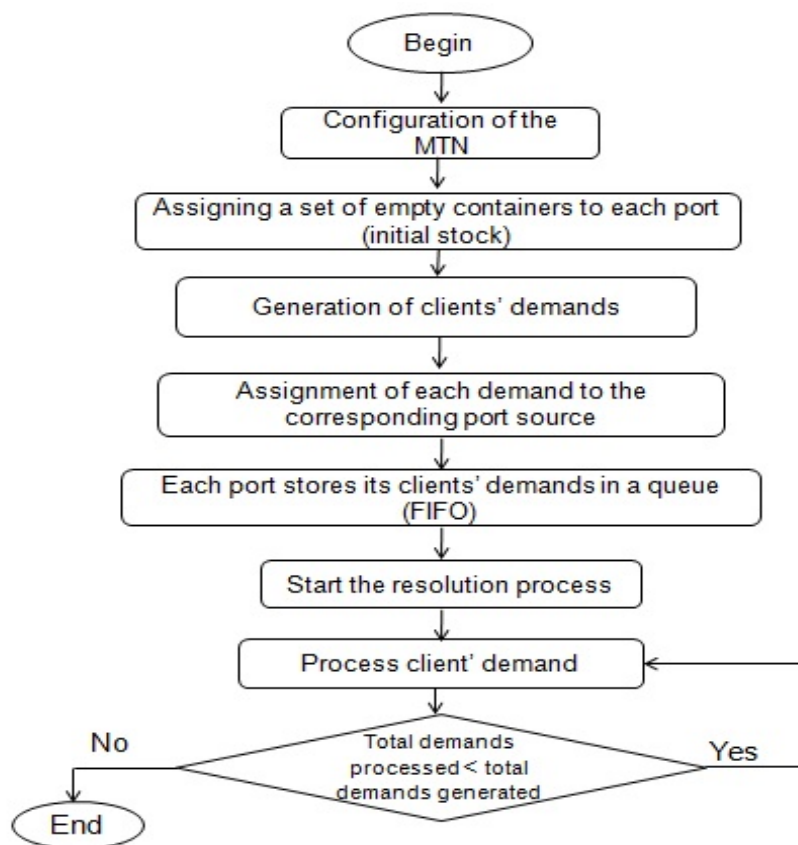


Figure 1. Functional architecture of the proposed application

4.1. Representation of the Marine Transportation Network (MTN)

By inspiring from the works of (Francesco *et al.*, 2013) and (Meng *et al.*, 2012) that have modelled the Marine Transportation System by a graph of vertices, the authors of this paper propose a representation of the MTN by a graph composed of a set of nodes symbolizing the ports of the network, which are connected by edges according to the network lines. The ports belong to the same line form a neighbourhood (Fig. 2), where:

- The network is composed of a set of ports.
- Ports are connected via lines.
- Each port knows its neighbours.
- Each port has a queue to store client demands. The queue is managed in a FIFO (First In First Out) manner.
- A certain number of empty containers is assigned to each port (initially).
- A container transfer cost is attributed to both cases (empty / full) between each pair of ports (origin, destination).

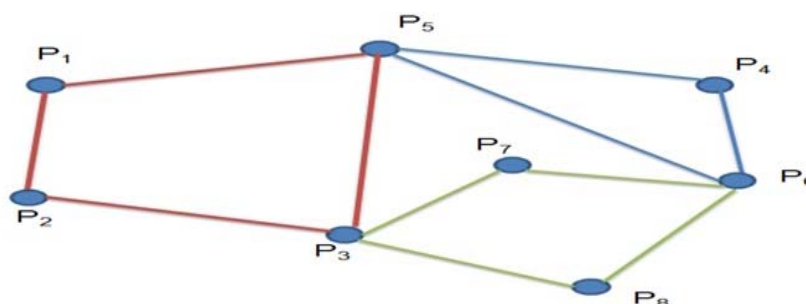


Figure 2. Maritime Transportation Network representation

The representation of the RTM is the support used by Taboo Search for any solution of the neighbourhood (ports in the same neighbourhood).

After introducing the representation of the RTM, the authors move to the generation of the clients' demands. Each demand is characterized by a source port, destination port, a number n_{exp} of empty containers, which are needed to transport the goods, and a state to know if the demand is placed on hold in the source port queue, or it is processed with or without Taboo Search. In addition, a cost is calculated for each client demand to transport the goods through the containers.

Once the generation of demands is completed, the authors launch the processing of the clients' demands that it ends when all the generated demands will be processed. Accordingly, an explanation of the management of the clients' demands, and the transfer of containers will be given.

4.2. Clients' demands treatment process

When a port receives a client demand that needs empty containers to send merchandise, this will export a number n_{exp} of containers. In this situation, two cases are possible (Fig. 3):

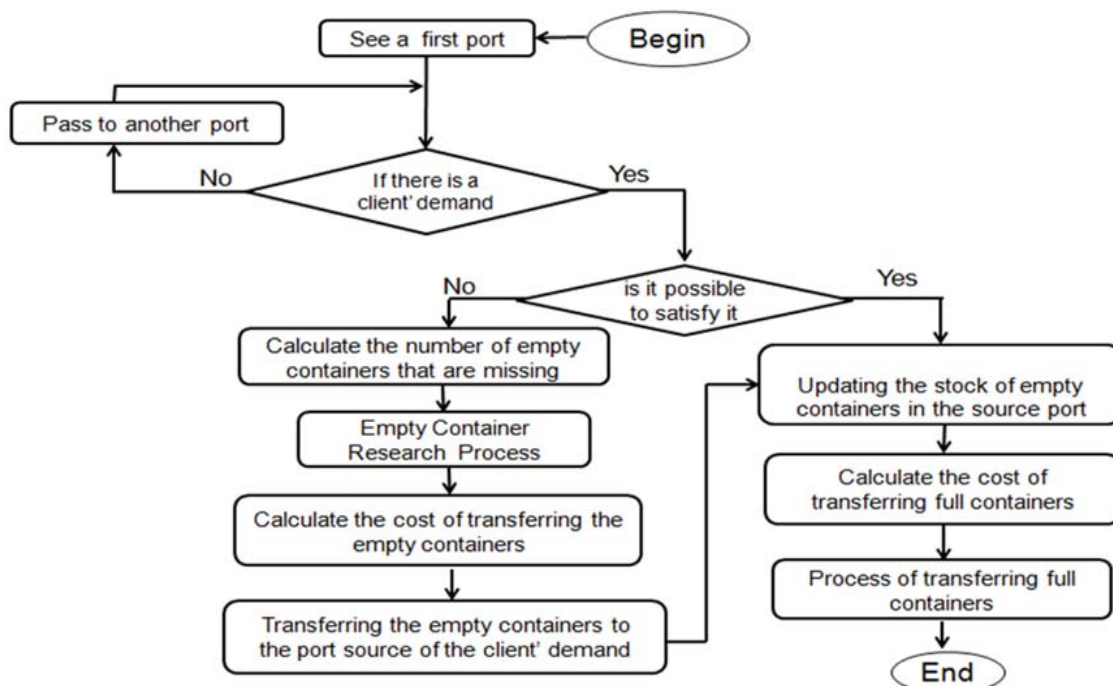


Figure 3. Treatment process of a client demand

Case 1: stock of port $p \geq n_{exp}$, so there is no problem in this case. The containers will be filled and sent to the destination by updating the stock of source port and destination port once the containers arrive at destination of the demand.

Case 2: stock of port $p < n_{exp}$, in this second case, the number of containers to export, which are greater than the number of empty containers available at the stock of port p (source port of the client's demand). This implies that the port cannot meet the demand and send all containers demanded by its client. In this case, the authors apply the Taboo Search's method to allow the port to look for nb_{cont} empty containers that are available at the ports of their neighbourhood at a minimum cost to respond positively to the client's demand ($nb_{cont} = n_{exp} - Stock\ of\ port\ p$).

The authors recall that a neighbourhood of a port belonging to a line l is composed of all ports that belong to the same line of the MTN. Figure 4 illustrates the principle of Taboo Search which is applied to the situation described before.

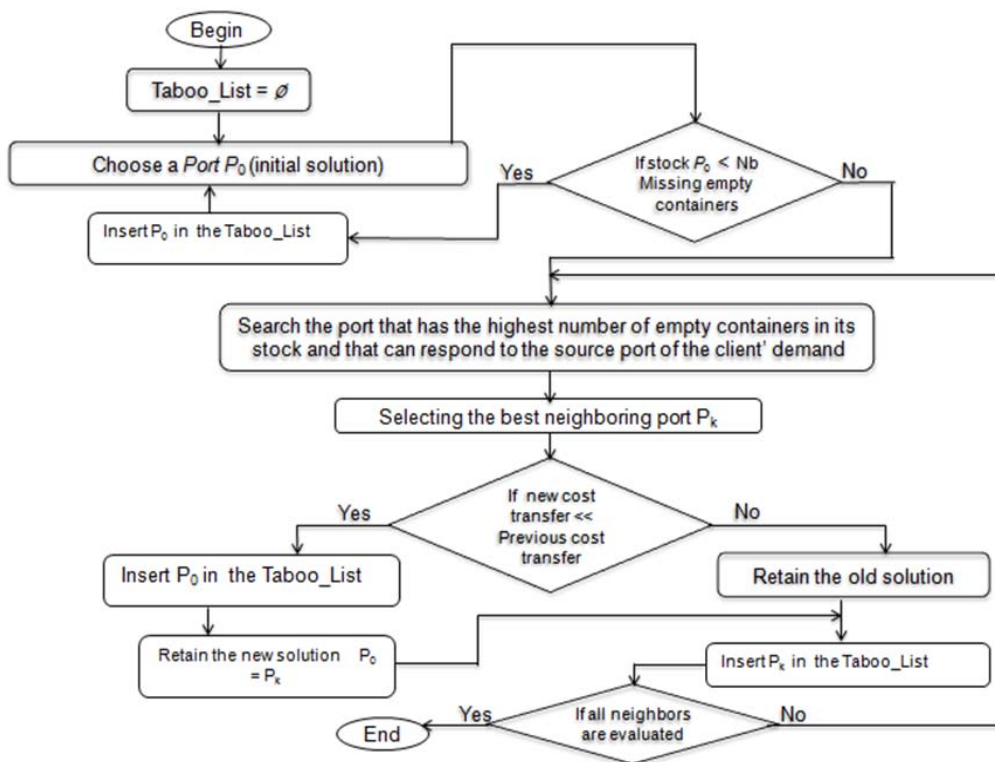


Figure 4. Principle of the applied research method

The following algorithm (Fig. 5) helps to explain the search of empty containers when a client demand comes at a source port p_s and requires a number of empty containers nb_cont that are not available in p_s .

```

Begin
Create Taboo_list;
Taboo_list = ∅;
Choose a initial solution p; /*p neighborhood of p_s*/
/* p_s is the source port of the client demand*/
p_0 ← Initial solution;
While (Stock p_0 < nb_cont) /* nb_cont is the number of missing empty containers*/
{Taboo_list ← p_0;
Choose a another initial solution p; /*p neighborhood of p_s*/
p_0 ← Initial solution;}
int j=1;
Repeat
{ for (int k=2; k nb_neighbors; k++)
{
if (stock p_k ≥ nb_cont and stock p_k > stock p_j and p_k ≠ p_0)
p_j ← p_k;
}
if (cost p_0 < cost p_k)
Taboo_list ← p_k; /* maintain the old solution p_0 */
else
{ Taboo_list ← p_0; /* maintain the new solution p_k */
p_0 ← p_k; }
} until (all neighbors are evaluated)
end
    
```

Figure 5. Algorithm of empty containers' search

Once the Taboo Search is over, the neighbour port which is selected to send empty containers at a lower cost, will send the required number of empty containers to the source port of the client's demand at a cost (cost with TS, which represents the objective function) calculated according to the distance between each port pair for transferring the missing empty containers (1). The containers' owner in the source port P_s must pay this amount and satisfy its client's demand.

In other words, a mathematical formulation can be given, in order to optimize the cost of empty containers' return, as follows:

$$C_{ks} = Pu * dist_{ks} * nb_cont_s, \tag{1}$$

- C_{ks} : The cost of transportation of empty containers, that are returned from a port P_k to the requesting port P_s .
- Pu : The unit price for transportation of one empty container.
- $dist_{ks}$: The distance between the requesting port P_s and the sender port P_k .
- nb_cont_s : The number of missing empty containers, to be transported to the port P_s .

The cost of transporting the empty containers returned to a requesting port must be as minimal as possible because this cost is on the charge the owner of those containers, unlike to the "client cost" that the client must pay to transport the full containers in order to send his goods.

In the present study, the researchers suppose that a transaction of empty containers' research cannot be made without a demand from a client to meet a shipment of his goods from a source port to a destination port, and by admitting that these containers are of the same type, they followed some constraints:

- Availability constraint: When searching for a neighbouring port, the proposed work look for the port that has the most empty containers available in order to keep a balanced distribution on the network but with the controlling of the return's cost if it is not fairly high compared to the return's cost from another port that has less empty containers in its stock. If a quantity of empty containers requested is not found on all ports of the MTN, the method cannot guarantee a total, but a partial solution.
- Constraint of empty container transportation' costs: each empty container has to be transported with a cost calculated unit " μ " compared to the distance between the ports. This cost must be as minimal as possible for the owners of these containers.
- Distance constraint for a shipment of empty containers: The distance between each pair of ports should be the most optimal for ensuring a maximum gain to the company (the cost is proportional to the distance).

4.3. Transfer process of full containers

To arrive at a destination, full containers can pass through one or more ports of call if the source port of the client' demand is not directly connected to the destination (Fig. 6).

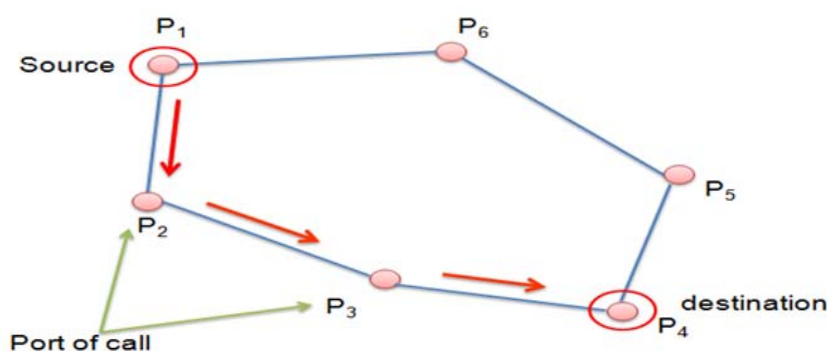


Figure 6. Transfer of full containers (source / destination)

Once the full containers arrive at the port of destination, they will be unloaded. The stock of empty containers at this port will be updated, and the processing of another client's demands in another port will be continued (Fig. 7).

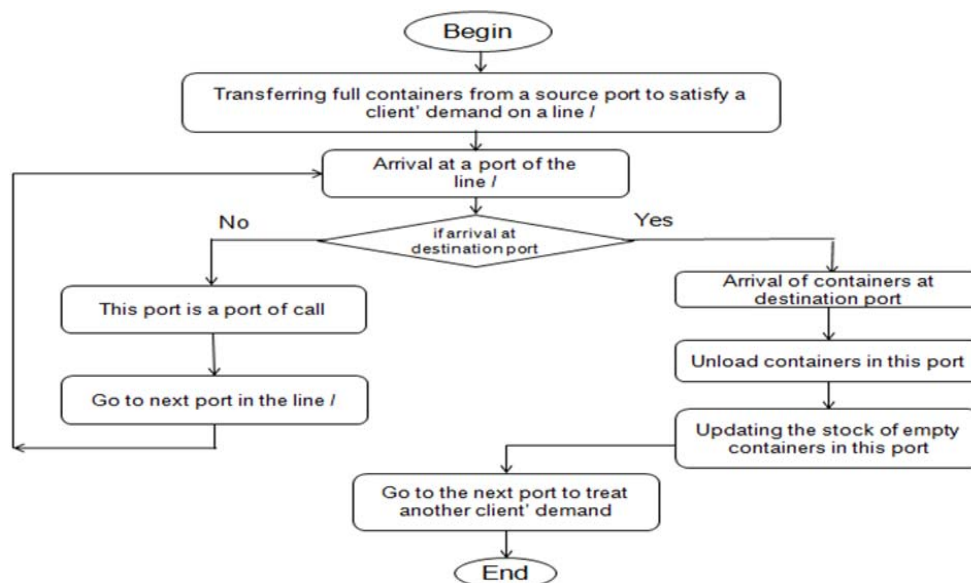


Figure 7. Transfer Process of full containers (source / destination)

5. Illustrative Example

In this section, the authors present an experiment that they have achieved on an example of MTN, which consists of six ports (Fig. 8) interconnected by 3 lines as follows:

- Line 1={P1, P2), (P2, P3), (P3, P1)}
- Line 2={P1, P4), (P4, P5), (P5, P1)}
- Line 3={P5, P6), (P6, P2), (P2, P3), (P3, P5)}

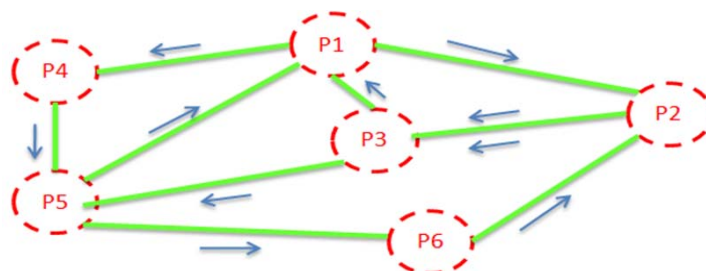


Figure 8. Maritime Transportation Network

On this network, the authors have achieved a number of scenarios by varying the number of client's demands and the total number of empty containers initially assigned to all the ports, as follows:

- Scenario 1:** Total number of empty containers 100, total number of client demands 20
- Scenario 2:** Total number of empty containers 200, total number of client demands 40
- Scenario 3:** Total number of empty containers 300, total number of client demands 60
- Scenario 4:** Total number of empty containers 400, total number of client demands 80
- Scenario 5:** Total number of empty containers 500, total number of client demands 100
- Scenario 6:** Total number of empty containers 700, total number of client demands 120

A set of empty containers is assigned to each port initially in the stock. After, the researchers start the clients' demands affectation. Each demand is indicated by a N° of demand, a source port, destination port, a number of necessary empty containers, the line on which is assigned the demand, and an initial state "untreated".

Once treatment is started, each port processes its demands. The state of the demand, which is placed in the queue, is equal to "unprocessed". Once the demand will be processed, its status can take one of the two values "treated without TS" or "treated with TS".

If status = "treated without TS" in this case, the source port was able to meet demand with the number of empty containers that were available in its stock.

If status = "treated with TS" in this situation, the source port could not process the demand because the number of containers available in the stock is less than the demand. Therefore, the port has issued a

demand for aid to ports in its neighbourhood in order to look for empty containers by applying the Taboo Search. To see the effectiveness of the present work in this case, the authors compared the TS method of searching empty containers with the random search method (without TS) in regards to the return' price of empty containers (cost with TS and cost without TS respectively, see Table 2).

Table 2. Extract of clients' demands processing (Scenario 6)

Clients' demand	Source Port	Destination Port	n_exp	Line n°	Stat	retained port with TS	nb_cont	Cost with TS (μ)	Cost without TS (μ)	Client Cost (μ)
Demand n° 1	1	5	19	2	Processed without TS	/	0	0	0	167694
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Demand n° 82	5	2	11	3	Processed with TS	port 2	5	34850	45915	67683
Demand n° 83	3	2	5	3	Processed without TS	/	0	0	0	59370
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Demand n° 94	5	3	11	3	Processed with TS	port 2	11	76670	101013	134640
Demand n° 95	3	2	19	3	Processed without TS	/	0	0	0	225606
Demand n° 96	3	2	22	1	Processed without TS	/	0	0	0	197736
Demand n° 97	5	6	19	3	Processed with TS	port 2	19	132430	174477	520098
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Demand n° 111	1	5	14	2	Processed with TS	port 4	3	11991	11991	123564
Demand n° 112	2	1	8	1	Processed without TS	/	0	0	0	92360
Demand n° 113	2	5	17	3	Processed without TS	/	0	0	0	200736
Demand n° 114	5	3	8	3	Processed with TS	port 2	8	55760	73464	97920
Demand n° 115	1	4	23	2	Processed with TS	port 4	23	91931	91931	105225
Demand n° 116	2	5	10	3	Processed without TS	/	0	0	0	118080
Demand n° 117	5	2	11	3	Processed with TS	port 2	11	76670	101013	67683
Demand n° 118	6	2	24	3	Processed without TS	/	0	0	0	81864
Demand n° 119	1	4	16	2	Processed with TS	port 4	16	63952	63952	73200
Demand n° 120	4	1	13	2	Processed without TS	/	0	0	0	139464

For example, in Scenario 6, the demand N° 82 was presented at the source port P5. This demand needs 11 empty containers ($n_exp = 11$) in order to transport merchandise to the port P2 (destination) on the line N° 3.

The authors of this article remark that the demand was treated with Taboo Search because the source port P5 needed 5 empty containers ($nb_cont = 5$), which were not available in its stock to meet this

demand. They also note that Taboo Search allows to find the 5 missing empty containers at a less cost 34850 μ (cost with TS) instead of 45915 μ (cost without TS) if the source port chooses a neighbouring port in a random manner to look for the 5 empty containers. The researchers remark that the tool presented in this paper provides a gain for the owner of the containers concerning the cost of the empty containers' return on the MTN comparing the cost with TS (34850 μ) and cost without TS (45915 μ).

Finally, they have the cost 67683 μ which represents the (client cost) that the client must pay to send his goods transported by 11 full containers from P5 to P2 on line 3.

Figure 9 allows to visualize the variation in the cost of transporting of empty containers. When a port cannot satisfy the demand, it is clear to see that the transport of empty containers with the application of the Taboo Search method is less expensive than the transport which is done without TS.

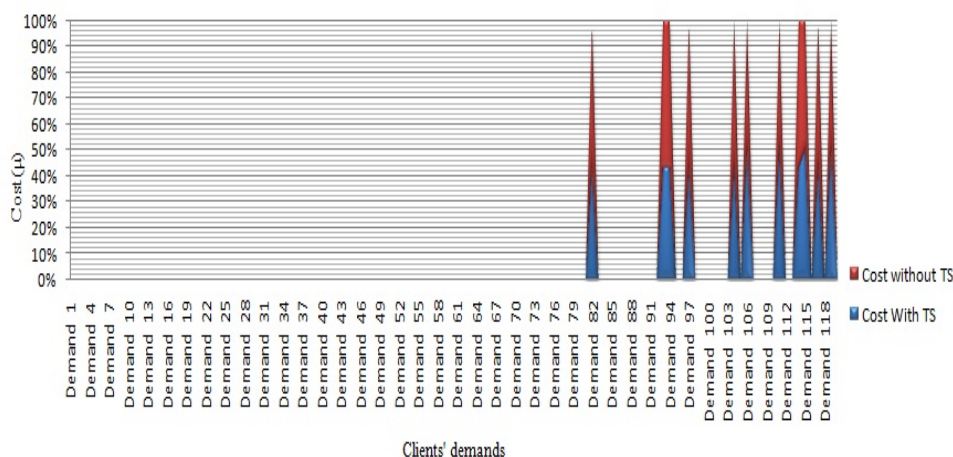


Figure 9. Cost variation of empty containers' transportation with and without TS (Scenario 6)

Figure 10 shows the statistics obtained on the average cost of transporting empty containers on the network with and without Taboo Search for all scenarios studied by this proposal. These statistics are shown on a graph as curves (Fig. 11).

Scenario	Nb clients' demands	Average cost with TS (μ)	Average cost without TS (μ)
1	20	7534,45	13432,2
2	40	3890,22	7152,4
3	60	10346,3	14390,35
4	80	2525,07	6969,25
5	100	902,91	1424,98
6	120	6633,11	8255,98

Figure 10. Average cost of empty containers' transportation with and without TS (all scenarios)

The authors notice that the cost of transporting empty containers through the Taboo Search is clearly much less expensive than the cost of transporting empty containers without it for all scenarios.

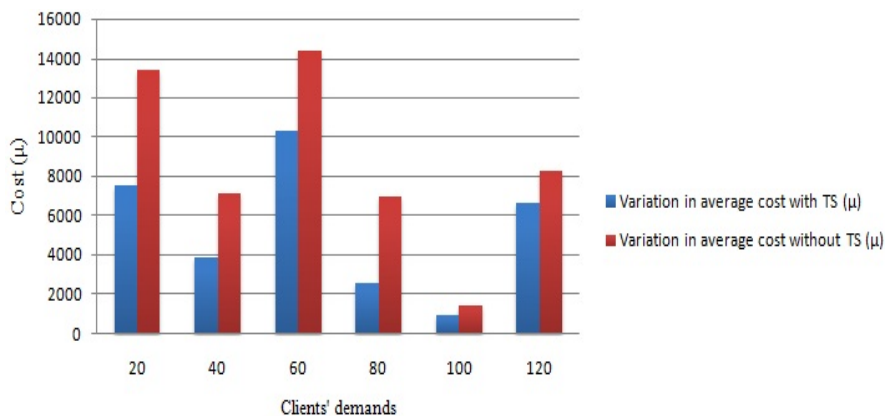


Figure 11. Variation in the average cost of empty containers' transportation with and without TS (all scenarios)

6. Synthesis

Maritime Transport is the most useful mode of transport for international trade. Its expansion is very marked due to the flexibility of containerized transport, which keeps growing day after day within the globalised world. However, because of the imbalance in international trade activities, the container owners meet a problem of empty containers that are unnecessarily accumulated in the import ports, despite the demand of a large number of these containers in export ports. This imbalance of the containers distribution is a result of the economic needs that differ from one country to another. The concern of the owners of the containers is how to manage and control the containers throughout the Maritime Transport Network and how ensure the return of empty containers cheaply.

For this purpose, the authors have proposed a comparative study (see Table 1) to see the participations and the solutions provided by other works of literature in the field of reverse logistics and the return of empty containers. The position of this contribution is related to what already existed. After the analysis of the Table 1, the authors noticed that the works cited in this paper, are interested in reverse logistics or the returns of empty containers in the MTN, but do not take into consideration the clients' demands and the return of containers (returned products) simultaneously. They target the problem of the return flow or the problem of direct logistical chain independently.

To better assist owners of containers in a MTN, this work allows to consider both: the client's demands and the return of the empty containers at a lower cost, because, if the transfer of full containers is on the charge of the client that sends his goods, the return of the empty containers is on the charge of the owner, that he must ensure the availability of the empty containers in each port of export.

7. Conclusion and Future Prospects

To conclude, the researchers can say that the Maritime Transport is becoming increasingly important and it represents a credible and attractive alternative to both land and air transport. Indeed, the different container transport companies provide great efforts in order to identify opportunities to reduce costs associated with this transport and improve the quality of service. However, a major problem of container distribution imbalance is encountered by the container owners. As a result, this work's objective is to solve this problem.

The interest of the authors through this study is to satisfy the clients' demands to send their merchandises and assist the owners by facilitating the search for empty containers at lower costs. The contribution presented in this paper is used to represent the functioning of a MTN by optimizing the costs of the return of empty containers to meet the demands of the clients.

The proposed work is based on a heuristic method by neighbourhood. This latter is based on a representation of the MTN by a graph, which has enabled us to offer a help to the owners across an experimental study in the context of reverse logistics to identify and recover the empty containers. Subsequently, to achieve this goal, the authors have used Taboo Search method.

Encouraging results have been obtained that demonstrate the interest of the proposal. This work is far from over; why the researchers envision a consideration of several types of client's demands that differ from one season to another in order to make predictions about the distribution of containers. Besides, the authors propose to extend this contribution and take into consideration other parameters such as the costs of handling, storage, as well as an optimization of storage containers in ships and quays.

References

1. Alumur, S.A., Saldanha-da-Gama, F., Nickel, S. and Vedat, V. (2012) Multi-period reverse logistics network design. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 67–78. DOI:10.1016/j.ejor.2011.12.045.
2. Belayachi, N., Gelareh, S. and Bouamrane K. (2015) Reverse logistics in the liner shipping industry. In: *the 45th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE45)*, October 2015, Metz, France, ISBN: 978-1-5108-1745-6.
3. Crainic, T.G. (2000) Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122 (2), 272–288. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00233-7.
4. Francesco, M.D., Lai, M. and Zuddas, P. (2013) Maritime repositioning of empty containers under uncertain port disruptions. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 64(3), 827–837. DOI:10.1016/j.cie.2012.12.014.

5. Gelareh, S., Nickel, S. and Pisinger, D. (2010) Liner shipping hub network design in a competitive environment. *Transportation Research Part E*, 46 (6), 991–1004. DOI: 10.1016/j.tre.2010.05.005.
6. Gelareh, S., Maculan, N., Mahey, P. and Monemi, R.N. (2013) Hub-and-spoke network design and fleet deployment for string planning of liner shipping. *Applied Mathematical Modelling*, 37(5), 3307–3321. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.017.
7. Gelareh, S. and Qiang, M. (2010) A novel modelling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46 (1), 76–89. DOI: 10.1016/j.tre.2009.06.004.
8. Hu, T.L., Sheu, J.B. and Huang K.H. (2002) A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes. *International Journal of Transportation Research Part E*, 38(6), 457–473, DOI: 10.1016/S1366-5545(02)00020-0.
9. Lee, J.E., Gen, M. and Rhee, K.G. (2009) Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 951–964. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.021.
10. Meng, Q., Wang, S. and Liu, Z. (2012) Network design for shipping service of large-scale intermodal liners. *Transportation Research Record*, 2269(1), 42–50. DOI: 10.3141/2269-05.
11. Min, H., Ko, H.J. and Ko, C.S. (2006) A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. *International Journal of Management Science*, 34 (1), 56 – 69. DOI: 10.1016/j.omega.2004.07.025.
12. Mutha, A. and Pokharel, S. (2009) Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Journal of Computers & Industrial Engineering*, 56 (1), 334–346. DOI:10.1016/j.cie.2008.06.006.
13. Ramezani, M., Bashiri, M. and Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013) A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, 37 (2), 328–344. DOI:10.1016/j.apm.2012.02.032
14. Shuaian, W., Meng, Q. and Sun, Z. (2013) Container routing in liner shipping. *Transportation Research Part E*, 49 (1), 1–7. DOI: 10.1016/j.tre.2012.06.009.
15. Song, D.P. and Dong, J.X. (2013) Long-haul liner service route design with ship deployment and empty container repositioning. *Transportation Research Part B*, 55(2013), 188–211. DOI:10.1016/j.trb.2013.06.012.
16. Srivastava, S.K. (2008) Network design for reverse logistics. *The International Journal of Management Science*, 36(4), 535–548. DOI:10.1016/j.omega.2006.11.012.
17. Zhou, Y. and Wang, S. (2008) Generic model of reverse logistics network design. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 71–78. DOI: 10.1016/S1570-6672(08)60025-2.
18. Yachba, K., Gelareh, S. and Bouamrane, K. (2016) Storage management of hazardous containers using the genetic algorithm. *Transport and Telecommunication*, 17(4), 371-383. DOI: 10.1515/ttj-2016-0033.

Résumé

Le transport maritime conteneurisé représente l'opération de déplacement des marchandises d'un endroit à un autre par voie maritime. Comparativement à d'autres modes de transport de marchandises, le transport maritime reste un moyen de transport très important. Il traite l'acheminement des conteneurs pleins vers la destination (logistique directe) ainsi que le retour des conteneurs vides (logistique de retour ou inverse) vers certains ports où un besoin est signalé. Le retour des conteneurs vides représente une préoccupation majeure pour les armateurs. En effet, l'indisponibilité des conteneurs vides au niveau de certains ports du Réseau de Transport Maritime n'est autre qu'une conséquence du déséquilibre de la distribution de leurs conteneurs à travers le réseau à cause des conteneurs envoyés et qui ne sont pas retournés par la suite. Réellement, le retour des conteneurs vides à leurs origines n'est pas garanti, car le transport des conteneurs vides est facturé au nom de l'armateur. Cette situation peut provoquer la non satisfaction des demandes clients pour envoyer leurs biens si l'armateur ne trouve pas de conteneurs vides au niveau du port où le client s'est présenté. L'objectif de ce travail est de résoudre ce problème en proposant un modèle décisionnel pour l'armateur afin de l'aider à trouver un retour des conteneurs vides à moindre coût. Le système proposé est articulé autour de trois algorithmes pour optimiser les frais de retour. Autrement dit, notre contribution à travers la présente thèse offre une aide à la décision pour l'armateur quand un besoin pour des conteneurs vides est observé dans certains ports du réseau maritime, en lui proposant des solutions optimales pour trouver les ports à partir desquels les conteneurs vides peuvent être retournés avec un coût minimal.

Mots clés :

Système d'Aide à la Décision; Processus décisionnel; Réseau de Transport Maritime; Conteneur Vide; Coût de retour; Logistique inverse; Méthode d'optimisation; Recherche Tabou; Algorithme Génétique; Branch & Bound.