

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie industriel
Spécialité : Management et logistique

Présenté par :
Ikram KOUIDER

Thème

**Optimisation de l'espace de stockage des
terminaux à conteneurs : Etude de cas de
l'Entreprise Portuaire de Ghazaouet**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Mme.I.KOULOUGHLI MCB
M. M. A. BRAHAMI MCA
Mme. A. OUHOUD MCB
M. F. BELOUFA MCB
M. M. A. CHERIER MAB

ESSA. Tlemcen Président
ESSA. Tlemcen Directeur de mémoire
ESSA. Tlemcen Co-Directeur de mémoire
ESSA. Tlemcen Examineur 1
ESSA. Tlemcen Examineur 2

Année universitaire : 2023 /2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous débutons en exprimant notre reconnaissance envers Dieu, le Tout-Puissant, pour la force, la volonté et la patience qu'il nous a accordées durant nos années d'études, ainsi que pour la bénédiction de mener à bien ce travail avec succès.

Mes encadrants, Monsieur Mustapha Anwar BRAHAMI et Madame Amina OUHOUD, méritent notre profonde gratitude. Leur expertise, patience et engagement ont été essentiels à notre réussite. Leurs conseils avisés, leur soutien constant, ainsi que leur disponibilité et leur écoute attentive ont été précieux. Merci infiniment pour votre temps, votre énergie et votre dévouement inspirants. Nous espérons mettre en pratique les connaissances acquises grâce à vous.

Nous adressons également notre reconnaissance à tous les professeurs de notre établissement pour leurs connaissances approfondies, leurs cours inspirants et leur soutien continu. Leur dévouement à l'enseignement et leur engagement envers notre réussite académique sont une source constante de motivation.

Chaque membre de l'équipe ayant contribué à la rédaction de notre mémoire mérite nos remerciements pour son soutien précieux et indéfectible, qui a été un moteur dans la réalisation de ce travail de recherche.

Nous remercions chaleureusement la famille de l'entreprise portuaire de Ghazaouet pour leur accueil chaleureux et leur précieuse assistance. Leur générosité et leur soutien ont été inestimables tout au long de notre travail. Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Abdessamad DJEZIRI pour ses conseils précieux et son soutien constant, des atouts précieux pour la réussite de notre projet.

Enfin, nos sincères remerciements vont à nos chères parentes pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements inconditionnels, une source inépuisable de force et de motivation. Leur présence et leur compréhension ont rendu ce parcours académique moins ardu.

Que Dieu accorde ses plus belles bénédictions à tous ceux qui nous ont accompagnés et ont contribué à notre succès.

Dédicaces

Avec une profonde reconnaissance, je dédie ce travail à ceux envers qui, peu importe les mots choisis, je ne pourrais jamais véritablement exprimer l'étendue de mon amour sincère.

À moi-même,

Je commence cette dédicace en prenant un moment pour exprimer ma gratitude envers moi-même. Pour avoir été courageuse, persévérante et déterminée tout au long de ce parcours académique, je me félicite. Chaque obstacle surmonté, chaque effort consenti, je me rends compte que j'ai été ma propre source d'inspiration.

À mon père,

Mohammed KOUIDER, vous m'avez enseigné la valeur du travail acharné, de la persévérance et de l'intégrité. Votre sagesse, vos conseils et votre soutien sans faille ont été mes guides tout au long de ce voyage académique. Cette réussite est aussi la vôtre

À ma mère,

Messaouda BOUTAMANI, À celle qui a été mon roc, ma lumière dans les moments sombres, je dédie ce travail. Maman, ton amour inconditionnel, tes encouragements constants et ton soutien indéfectible ont été le moteur de ma réussite. Merci pour ta présence inestimable.

À mes sœurs,

Souhaya, Noussaiba, Rihab et Chourouk, vous êtes mes complices, mes confidentes et mes meilleures amies. Votre soutien, vos encouragements et votre amour m'ont portée à travers les moments difficiles. Merci d'avoir été à mes côtés.

À mon petit frère,

Chouaib Baraa, même si tu es mon petit frère, tu as été mon grand soutien. Ta présence joyeuse et ta confiance en moi m'ont donné la force de continuer, même lorsque les défis semblaient insurmontables. Merci d'être ma source de joie constante.

À mes amies,

Vous êtes mes étoiles brillantes dans le ciel sombre des défis académiques. Votre soutien inconditionnel, vos encouragements sincères et vos rires contagieux ont rendu ce voyage plus léger et plus joyeux. Merci pour votre précieuse amitié.

À mes camarades,

Nous avons parcouru ce chemin ensemble, main dans la main, surmontant les obstacles et célébrant les victoires. Votre collaboration, votre partage de connaissances et votre esprit d'équipe ont enrichi cette expérience. Merci d'avoir été mes compagnons de route.

À ma grande famille, tantes et oncles,

Votre soutien, vos encouragements et vos précieux conseils ont été une source de force et d'inspiration pour moi. Votre présence bienveillante a enrichi ma vie et a contribué à ma réussite. Merci d'avoir été là pour moi.

À tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin,

À chaque personne qui a croisé mon chemin et m'a apporté son soutien, son encouragement ou sa bienveillance, je vous adresse ma plus profonde reconnaissance. Votre présence, vos conseils et votre soutien ont été la lumière qui a illuminé mon chemin. Vous êtes le bonheur et l'espoir de ma vie.

Ikrām KOUIDER

Résumé

Ce mémoire explore en profondeur l'optimisation de l'espace de stockage des conteneurs dans le contexte du transport conteneurisé. Le premier chapitre introduit l'impact révolutionnaire du transport conteneurisé sur la logistique mondiale, en mettant en lumière le transport maritime et l'importance cruciale des ports et des terminaux à conteneurs. Le deuxième chapitre examine les stratégies de gestion des conteneurs, telles que la ségrégation et le groupage, ainsi que les méthodes de résolution comme les métaheuristiques et les approches exactes. Enfin, le troisième chapitre propose une modélisation mathématique détaillée et une application pratique de l'algorithme du recuit simulé pour résoudre le problème de stockage des conteneurs, illustrant ainsi des solutions efficaces au port de Ghazaouet.

Mots clés: Transport conteneurisé, Transport maritime, Ports et terminaux à conteneurs, Conteneurisation, Métaheuristiques, Algorithme du recuit simulé, Optimisation de l'espace de stockage, Efficacité opérationnelle.

Abstract

This thesis delves deeply into container storage space optimization within the context of containerized transport. The first chapter introduces the revolutionary impact of containerized transport on global logistics, focusing on maritime transport and the critical importance of ports and container terminals. The second chapter explores container management strategies such as segregation and grouping, along with solution methods including metaheuristics and exact approaches. Lastly, the third chapter presents detailed mathematical modeling and practical application of the simulated annealing algorithm to address container storage challenges, showcasing effective solutions at the Port of Ghazaouet.

Keywords: Containerized transport, Maritime transport, Ports and container terminals, Containerization, Metaheuristics, Simulated annealing algorithm, Storage space optimization, Operational efficiency.

ملخص

يتناول هذا الأطروحة بعمق تحسين مساحة تخزين الحاويات في سياق النقل الحاويات. يقدم الفصل الأول تأثير النقل الحاويات على اللوجستيات العالمية بشكل ثوري، مع التركيز على النقل البحري وأهمية الموانئ ومحطات الحاويات. يستكشف الفصل الثاني استراتيجيات إدارة الحاويات مثل التفصيل والتجميع، إلى جانب أساليب الحل مثل الميتاهيرستيات والنهج الدقيق. وأخيراً، يقدم الفصل الثالث نمذجة رياضية مفصلة وتطبيقاً عملياً لخوارزمية التقنية المحاكاة لمعالجة تحديات تخزين الحاويات، مع إظهار حلول فعالة في ميناء غزوات.

الكلمات المفتاحية: النقل الحاويات بالنقل البحري، الموانئ والمحطات الحاويات، التحاويل الحاويات، الميتاهيرستيات، خوارزمية التقنية المحاكاة، تحسين مساحة التخزين، الكفاءة التشغيلية.

Table des matières

liste de figures	IX
liste de tableaux	X
Abréviations	XI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre N°01 : Transport Conteneurisé	2
I.1 Introduction	3
I.2 Le transport	3
I.2.1 Le transport maritime	4
I.2.1.1 Le transport de marchandise	4
I.2.2 La multimodalité de transport	6
I.3 Le port	7
I.3.1 Structure et développement des ports	7
I.3.2 Types des ports maritimes	8
I.3.3 Les terminaux à conteneurs	10
I.4 La conteneurisation	11
I.4.1 Définition de conteneur	11
I.4.2 Naissance de concept du conteneur et son évolution	12
I.4.3 Types de conteneurs	13
I.4.4 Avantages et inconvénients de la conteneurisation	16
I.4.5 Les opérations dans un terminal à conteneurs	17
I.4.6 Equipements de manutention	18
I.5 Présentation de l'entreprise portuaire de Ghazaouet	22
I.6 Conclusion	24
Chapitre N°02 : Probleme de stockage des conteneurs dans la littérature	25
II.1 Introduction	26
II.2 Définition du Problème de Stockage des Conteneurs (PSC)	26
II.3 Les différentes stratégies de stockage	28
II.3.1 Ségrégation et non ségrégation	29
II.3.2 Groupage et dispersion	29

II.3.3	Stockage direct et stockage indirect	30
II.3.4	Priorité aux chargement et priorité aux déchargement	31
II.4	Étude bibliographique	32
II.4.1	Classification des travaux selon les ports conteneurisés dans le monde	32
II.4.2	Revue de la littérature sur les méthodes de résolution des PSC	32
II.5	Méthode de résolution de PSC	39
II.5.1	Les méthodes exactes	40
II.5.1.1	Branch and Bound	40
II.5.1.2	Branch and cut	40
II.5.1.3	Programmation dynamique	41
II.5.2	Les métaheuristiques	41
II.5.2.1	Les métaheuristiques de recherche locale	41
II.5.2.2	Les métaheuristiques évolutionnaires	43
II.6	Conclusion	44
Chapitre N°03 : Etude et résolution du cas statique		45
III.1	Introduction	46
III.2	Définition du problème	46
III.2.1	Hypothèses	48
III.3	Explication de la démarche entamée	49
III.4	Modélisation Mathématique	51
III.4.1	Explication du modèle à travers un exemple	54
III.5	Méthodes de résolution	55
III.5.1	Algorithme du recuit simulé (RS) proposé	56
III.6	Résultats numériques	59
III.6.1	Cas générale	59
III.6.2	Etude de cas : Port de Ghazaouet	65
III.7	Conclusion	69
Conclusion Generale		71
Perspectives		72
Bibliographie		74

Table des figures

I.1	Transport de marchandise	5
I.2	Multimodalité de transport[1]	7
I.3	Port de commerce[2]	9
I.4	Port de pêche [3]	9
I.5	Port de plaisance [4]	10
I.6	Port militaire [4]	10
I.7	Terminal à conteneurs [5]	11
I.8	Conteneur dry	13
I.9	Conteneur Open Top	14
I.10	Conteneur plate-forme	14
I.11	Conteneur ventilé	15
I.12	Conteneur réfrigéré	15
I.13	Conteneur citerne	16
I.14	Quay Crane (QC)[6]	18
I.15	Rail Mounted Gantry Crane (RMGC)[7]	19
I.16	Rubber-Tired Gantry Crane (RTGCs)[8]	19
I.17	Reach Stackers (RS)[9]	20
I.18	Véhicule autoguidé (AGV)[10]	21
I.19	Cavalier gerbeur (CG) [11]	21
I.20	Représentation schématique d'un terminal à conteneurs [12]	22
I.21	Infrastructure de port de ghazaouet [13]	23
II.1	L'extraction du conteneur B nécessite un remaniement du conteneur C	28
II.2	Algorithme Recuit Simulé	42
III.1	Conteneurs existants dans la zone de stockage avec dates de départ	55
III.2	Codage des solutions (Xs)	57
III.3	Algorithme Recuit Simulé	58
III.4	Temps d'exécution de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Nc	64
III.5	Temps d'exécution de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Ns	64
III.6	Résultats graphiques de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Nc	69
III.7	Résultats graphiques de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Ns	69

Liste des tableaux

I.1	Dimensions des conteneurs	12
II.1	Principaux travaux dans les plus grands ports du monde	32
II.2	Comparatif des travaux connexes sur le stockage des conteneurs	36
III.1	Dimension des piles existants dans la zone de stockage	55
III.2	Description des instances	60
III.3	Tableau des paramètres du recuit simulé	60
III.4	Comparaison entre les resultats de Recuit simulé et Cplex	61
III.5	Description des instances	66
III.6	Comparaison entre les resultats de Recuit simulé et Cplex cas de port de Ghazaouet	67

Abréviations

AG Algorithme génétique

AGV Automated Guided Vehicle

ISPS stands for International Ship and Port Facility Security Code

LP Programmation linéaire

MIQP Programmation quadratique en nombres entiers mixtes

MIQCP Programmation à contraintes quadratiques en nombres entiers mixte

PSC Probleme de Stockage de Conteneurs

PLMNE programme linéaire mixte en nombres entiers

QC Quay Cranes

QCP programmation à contraintes quadratiques

QP Programmation quadratique

RMGC Rail Mounted Gantry Crane

RTGCs Rubber-Tired Gantry Crane

SMA Les systémes multi-agents

YC Yard Crane

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un contexte économique mondial en constante évolution, le transport maritime s'affirme comme une composante indispensable des échanges internationaux, facilitant la circulation de plus de 80% des marchandises mondiales. Le présent mémoire se consacre à l'étude approfondie du transport conteneurisé, un secteur clé qui soutient la fluidité des flux de marchandises à l'échelle mondiale. À travers une analyse détaillée des différents aspects du transport conteneurisé, des problématiques liées au stockage des conteneurs, et des solutions pratiques adaptées, notamment au port de Ghazaouet, ce travail vise à apporter des éclairages nouveaux et des recommandations opérationnelles pour améliorer l'efficacité logistique et la compétitivité des infrastructures portuaires.

Le premier chapitre établit les fondations du transport maritime et de la multimodalité, offrant une perspective globale sur les structures portuaires et le concept de conteneurisation. En explorant les avantages, les inconvénients, et les opérations associées, il fournit une compréhension exhaustive des dynamiques en jeu dans les terminaux à conteneurs. Une attention particulière est portée à l'entreprise portuaire de Ghazaouet, mettant en lumière ses spécificités et ses enjeux.

Le deuxième chapitre aborde le problème complexe du stockage des conteneurs, un défi logistique majeur dans les ports. Il présente une définition claire du problème, explore diverses stratégies de stockage et analyse les méthodes de résolution proposées dans la littérature existante. Cette analyse théorique est cruciale pour comprendre les approches actuelles et identifier des pistes d'amélioration.

Le dernier chapitre se consacre à une étude de cas pratique, en utilisant le port de Ghazaouet comme modèle. Il détaille les méthodes de résolution du problème de stockage des conteneurs, avec une modélisation mathématique et des résultats numériques basés sur des métaheuristiques. En clarifiant les hypothèses et les contraintes spécifiques, ce chapitre vise à démontrer l'applicabilité et l'efficacité des solutions proposées dans un contexte réel.

En conclusion, ce mémoire vise à offrir des solutions pragmatiques et théoriques aux défis du transport conteneurisé, en s'appuyant sur une analyse rigoureuse et une approche multidisciplinaire. L'objectif est de fournir aux décideurs et aux opérateurs portuaires des outils et des stratégies pour optimiser la gestion des flux de conteneurs, améliorer la compétitivité des ports et contribuer au développement durable du transport maritime.

Chapitre N°01 :
Transport Conteneurisé

I.1 Introduction

Le transport conteneurisé est devenu l'un des piliers essentiels du commerce mondial, offrant une efficacité et une flexibilité inégalées dans le déplacement des marchandises à travers les océans et les continents. Ce chapitre explore les différentes dimensions du transport conteneurisé, en mettant l'accent sur le rôle crucial des ports et des terminaux à conteneurs dans cette chaîne logistique complexe. Nous examinerons également l'évolution du concept de conteneurisation, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette approche révolutionnaire pour le commerce international.

Dans la première section, nous plongerons dans les profondeurs du transport maritime, explorant son rôle fondamental dans le mouvement des marchandises à travers les océans du monde. Nous analyserons également la multimodalité de transport, soulignant l'importance croissante des systèmes de transport intermodal pour garantir une circulation fluide des conteneurs de leur origine à leur destination finale. Ensuite, nous nous concentrerons sur l'anatomie des ports, examinant leur structure et leur développement au fil du temps. Nous explorerons également les différents types de ports maritimes et mettrons en lumière le rôle central des terminaux à conteneurs dans l'activité portuaire contemporaine. Dans la troisième section, nous plongerons au cœur de la conteneurisation, en définissant ce concept révolutionnaire et en retraçant son évolution au fil des décennies. Nous discuterons également des divers types de conteneurs utilisés dans le transport maritime et des avantages significatifs qu'ils offrent en termes d'efficacité, de sécurité et de durabilité. Enfin, nous présenterons l'entreprise portuaire de Ghazaouet en tant qu'étude de cas, mettant en lumière son rôle crucial dans la logistique portuaire régionale et son engagement envers l'efficacité opérationnelle et environnementale.

Ce chapitre jettera les bases nécessaires pour une compréhension approfondie du transport conteneurisé et du rôle essentiel des terminaux à conteneurs dans la chaîne logistique mondiale.

I.2 Le transport

Le transport est 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 (linéaire pour les transports terrestres et ponctuelle pour les transports maritimes et aériens), de véhicules (individuels ou regroupés en rames) ou de flux continus (pour les transports par conduites : gazoducs, oléoducs) et de techniques d'exploitation particulières. De nos jours, le transport de personnes (voyageurs) et le transport de marchandises (fret), plus ou moins confondus jusqu'à

une époque récente, constituent deux systèmes de plus en plus indépendants, même s'ils utilisent parfois les mêmes infrastructures et plus rarement les mêmes véhicules.

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. [14]

I.2.1 Le transport maritime

Le transport maritime, comme indiqué par son nom, est un mode de transport qui permet de faire déplacer de marchandises ou des personnes, par la voie maritime.

Ainsi, le transport maritime couvre tout d'abord le déplacement des matières premières, notamment le pétrole, le charbon, les céréales et autres. Hormis ce transport en vrac, le transport maritime couvre également le transport des produits conditionnés par conteneur, par palettes, ou par caisses, et qui sont appelés marchandises diverses.

Dans certains cas, ce mode de transport peut inclure des opérations de pré et de post-acheminement des marchandises, du lieu de production jusqu'au navire ou du navire jusqu'à la destination finale de chargement.

Les routes maritimes utilisées durant un transport de marchandises dépendent directement des échanges commerciaux et selon la marchandise transportée. Par exemple, dans le cas d'un transport de pétrole, les bateaux suivent un axe Nord Sud.[15] Le transport maritime est un mode de transport qui a réussi à séduire ses utilisateurs grâce à ses spécificités. La première est sa grande capacité de transport. En effet, ce mode de transport permet de transporter plusieurs centaines de tonnes de marchandises sur un seul navire. La deuxième spécificité du transport maritime est la continuité de son activité, vu que le trafic des navires n'est pas interrompu. Par ailleurs, le transport maritime existe sous deux offres principales : le transport à demande et le transport avec lignes régulières. Le transport à demande, également appelé *tramping*, indique qu'une demande a déclenché la recherche d'un navire pour effectuer le transport d'une marchandise quelconque. En revanche, dans le cas du transport avec lignes régulières, l'exportateur choisit une ligne régulière ayant un itinéraire fixe ainsi que des escales fréquentes. De même, dans ce cas, le navire sera souvent partagé avec d'autres exportateurs.[16]

I.2.1.1 Le transport de marchandise

Le transport de marchandises est un élément clé de l'économie. Il constitue une composante indispensable du processus de production et de distribution des biens matériels. Il assure leur mobilité spatiale.

Marchandise est utilisé pour désigner les objets transportés, l'usage de ce terme assigné au transport une fonction essentielle: assurer la liaison entre le monde de la production et celui de l'échange. Bien (goods transport) utilisé par les anglo-saxons, dans la mesure où tous les biens transportés ne sont pas destinés à la vente. Frets il est plus riche, il désigne à la fois le transport et l'objet transporté. Il a d'autres significations: la cargaison, le prix de la location ou le louage du véhicule lui-même.[17]

Les navires appartiennent généralement à des armateurs. Ceux-ci peuvent exploiter directement leurs navires sur des lignes régulières ou au contraire les louer 20 Transport Conteneurisé à l'affrètement sous la forme du tramping. Afin de réduire les coûts, les navires sont de plus en plus spécialisés dans un type de cargaison (pétrolier, méthanier, bananier, minéralier, vraquier, porte-conteneurs, etc.). Ils sont aussi de plus en plus grands, de manière à transporter des quantités de plus en plus importantes, ce qui pose le problème du changement d'échelle des volumes transportés sur terre et sur mer :

3 000 tonnes au plus par train ou convoi fluvial, 100 à 200 fois plus sur mer. Les plus récents porte-conteneurs peuvent emporter quelque 6 000 conteneurs qui, une fois à terre, nécessitent 6 000 camions ou 30 trains complets ! Ce problème ne peut être résolu que par la capacité de stockage des installations portuaires ou bien par la transformation des matières importées sur place dans les zones industrialo-portuaires. Un navire est improductif lorsqu'il est immobilisé dans un port. La réduction de ces temps morts a d'abord été obtenue par l'accélération des opérations de manutention grâce à l'unification des charges qui permet l'automatisation du chargement et du déchargement.

D'autre part, dans le transport maritime, une large partie des coûts est affectée aux échanges dans les ports. On a donc cherché à les réduire au minimum en supprimant les ruptures de charge de la marchandise entre les différents modes de transport. [14]



Figure I.1 *Transport de marchandise .*

[18]

I.2.2 La multimodalité de transport

Les transporteurs maritimes ont développé des chaînes de transport à l'intérieur des continents. Le caractère d'interchangeabilité du conteneur est à l'origine de l'essor des réseaux de transport mondiaux et des chaînes de transport qui associent le rail, la route et le fleuve au transport maritime pour concevoir un transport de bout en bout et de porte à porte. Les conteneurs peuvent être acheminés indifféremment par camions, barges, wagons ou navires.

L'accroissement du trafic conteneurisé induit un formidable développement des transports de pré et post-acheminement, c'est-à-dire apportant les marchandises du continent jusqu'au navire de chargement et l'emmenant du navire déchargé à sa destination finale sur le continent. Le parcours terrestre est fondamental car il est le premier et le dernier maillon de la chaîne logistique multimodale. La route est un élément stratégique qui présente des avantages certains : souplesse, limitation des transferts de charge, assurance du suivi, etc. Mais les camions ne peuvent pas transporter plus de deux EVP ou un 40 pieds en même temps : il en résulte une augmentation du trafic routier et une saturation de certaines voies. Les dessertes ferroviaires et fluviales offrent les solutions les plus adaptées pour faire face à la massification et à la congestion du trafic routier. La commission européenne vise à établir sur le territoire communautaire des corridors de fret ferroviaires freeways pour faciliter la desserte des continents : ce sont des voies dédiées aux transports de marchandises en liaison avec l'utilisation des trains blocs et des convois de trains de conteneurs qui sillonnent l'Europe. Aux Etats Unis, les trains-blocs double stacks (conteneurs sur deux étages) peuvent atteindre une longueur de cinq kilomètres et reliant la côte est à la côte ouest constituant un véritable " pont terrestre " ou " pont ferroviaire ". Aujourd'hui, le souci d'un développement durable élargit considérablement, quand cela est possible, la place du fluvio-maritime dans la circulation des conteneurs à l'intérieur des continents. Les conteneurs sont empilés sur plusieurs niveaux sur des barges qui assurent des liaisons entre les ports maritimes et les ports fluviaux, voire entre les ports et les usines et dépôts quand ils sont localisés le long de la voie d'eau.

Le cabotage (transport côtier) repose sur les navires nourriciers feeders, qui relient les ports moyens aux ports principaux et aux hubs où les navires-mères font escale. Les feeders alimentent ainsi les navires transocéaniques en conteneurs et redistribuent les cargaisons dans les plus petits les ports de ces mêmes grands navires. Cette organisation de collecte et de redistribution des marchandises crée un véritable réseau mondial de transport et de distribution, complété par les corridors de fret ferroviaires et les autoroutes continentales. [14]



Figure I.2 *Multimodalité de transport*[1].

I.3 Le port

Un port est un endroit géographique par lequel transitent des marchandises et/ou des passagers. Un port maritime est un port qui accueille des navires de mer, qui est un lieu de rendez-vous entre ces navires de mer et l'ensemble des divers modes de transport terrestre. C'est également nécessairement un téléport par lequel transitent toutes les données informatisées indispensables à la facilitation du transit, aussi bien des navires que des marchandises.[19]

I.3.1 Structure et développement des ports

D'où le phénomène de spécialisation des navires (porte-conteneurs, vraquiers solides ou liquides, développement de la manutention directe roulante...). Les ports ont dû adapter leur conception et leurs équipements en conséquence et ont engagé des dépenses importantes pour construire de vastes infrastructures et des équipements spécialisés de haute performance.

En plus de cela, les armateurs exploitant de grands navires hautement spécialisés ont cherché à limiter le nombre de ports touchés par ces unités importantes sur lesquels ils ont concentré leur trafic maritime, et ensuite desservir les ports où la quantité de cargaison à embarquer ou à débarquer ne justifie pas l'arrêt d'un grand navire, avec des unités plus petites, le coût de construction et d'exploitation est beaucoup plus faible. Dans [20], Edward Branch décrit le processus de privatisation des ports, par lequel les gouvernements externalisent la gestion de certains ports pour les rendre plus attractifs. Les objectifs de ce processus sont les suivants : accroître l'investissement en capital étranger, augmenter la productivité et stimuler le commerce. Dans Stopford [21]

Quatre niveaux de développement sont décrits et sont constitués de: Les petits ports locaux (niveau 1), les grands ports locaux (niveau 2), les grands ports régionaux (niveau 3), et les centres de distribution régionaux (niveau 4) qui sont basés sur les niveaux d'infrastructure.

Petits ports locaux (niveau 1) : Ces ports disposent d'un terminal à usage général avec un quai et des grues pour chaque opération dans la zone de stockage, se trouvent principalement dans les pays en développement et les zones rurales des pays développés. Ils reçoivent et expédient de petites quantités de marchandises locales c.à.d. à l'intérieur de la région. Des navires de transport maritime à courtes distances sont utilisés pour différents types de marchandises telles que des conteneurs, des palettes et des marchandises emballées.

Grands ports locaux (niveau 2) : Ces ports sont plus développés que les petits ports locaux. Ils disposent de terminaux à usage général et peuvent accueillir une variété de marchandises et amarrer de gros vraquiers. En plus, ils se caractérisent par une infrastructure pour de grandes exploitations.

Grands ports régionaux (niveau 3) : Ces ports ont la possibilité de gérer les envois trop volumineux qui ne peuvent pas être traités par les ports de niveau 1 ou 2. Ils disposent d'équipements spécialisés qui leur permettent d'effectuer des opérations plus importantes que celles qui peuvent être effectuées dans les ports de niveau 2. De plus, ils ont de vastes capacités de stockage, de multiples terminaux, d'avantage d'équipements de manutention et sont souvent connectés à de grands réseaux de transport (routes pour camions, chemins de fer, etc.).

Centres de distribution régionaux : selon Mangan [22], les cinq modes de distribution sont : agir comme des plates-formes dans leurs régions, permettre la distribution des expéditions aux niveaux intra et interrégional, opérer spécifiquement dans le marché européen, recevoir des marchandises d'autres horizons, puis les redistribuer vers différentes destinations par différents modes de transport (maritime, fluvial, routier, ferroviaire, ou par canalisation). Ces types de ports disposent de terminaux spécialisés pour différents types de cargaisons, ils ont également d'équipements de manutention avancés et peuvent amarrer les plus gros navires existants. Ils ont de grands réseaux de transport pour transborder les marchandises [21] On mentionne le plus grand centre de distribution de l'Europe qui est le port de Rotterdam, suivi du port d'Anvers. On peut dire que le rôle des ports s'est développé avec le temps et qu'ils occupent désormais une place centrale dans le commerce international. [23]

I.3.2 Types des ports maritimes

Il existe plusieurs types de ports maritimes, chacun ayant une fonction spécifique

1. Ports de commerce

Ce sont les ports les plus importants et les plus fréquentés. Ils servent de plaque tournante pour le commerce international de marchandises. Les ports de commerce disposent d'installations

spécialisées pour le chargement et le déchargement de conteneurs, de vrac sec (comme les céréales) et de vrac liquide (comme le pétrole).



Figure I.3 *Port de commerce*[2].

2. Ports de pêche

Ces ports sont utilisés par les bateaux de pêche commerciale pour débarquer leurs prises. Ils disposent généralement d'installations pour la vente du poisson aux grossistes et aux transformateurs.



Figure I.4 *Port de pêche* [3].

3. Ports de plaisance

Ces ports accueillent les bateaux de loisirs, des yachts et des navires de croisière. Ils offrent des installations pour l'amarrage, l'entretien et l'avitaillement des bateaux.



Figure I.5 *Port de plaisance* [4].

4. Ports militaires

Ces ports sont utilisés par les navires de guerre d'un pays. Ils abritent généralement des installations de réparation et de réarmement des navires.



Figure I.6 *Port militaire* [4].

Il est fréquent qu'un même port combine plusieurs activités, mais elles sont souvent séparées géographiquement, par exemple avec différents bassins.[24]

I.3.3 Les terminaux à conteneurs

Pour répondre à la croissance du trafic conteneurisé et aux exigences imposées par les armateurs et le gigantisme des navires porte conteneurs, les ports maritimes ont adopté une nouvelle infrastructure nommée " terminal à conteneurs ". Un terminal à conteneurs est un endroit où les conteneurs arrivant sur des navires sont déchargés par des grues à quai et transférés aux

zones de stockage par des véhicules de levage dits cavaliers. Il forme ainsi le maillon essentiel dans la chaîne de transport maritime ; il remplit deux fonctions: le transfert et le stockage temporaire des conteneurs. [25]



Figure I.7 *Terminal à conteneurs* [5].

I.4 La conteneurisation

I.4.1 Définition de conteneur

La Convention Internationale pour la Sécurité des Conteneurs (CSC) a normalisé en décembre 1972, la définition du conteneur : Le conteneur est un engin de transport de caractère permanent, et de ce fait assez résistant pour permettre un usage répété, spécialement conçu pour faciliter le transport ”des marchandises sans rupture de charge par un ou plusieurs modes de transport, conçu pour être assujetti et/ou manipulé facilement, des accessoires ayant été prévus à cet effet.” Les conteneurs sont des boîtes généralement métalliques, leurs dimensions sont définies par la norme ISO (Organisation internationale de normalisation) de 20 pieds (6,058 m) ou 40 pieds (12,19m) de longueur, ils ont une hauteur de 8,6 pieds (2,591m) et une largeur de 8 pieds (2,438m). Ils sont destinés à contenir des marchandises et permettre leurs acheminements par différents modes de transport (route, rail, voies aérienne, fluviale et maritime). [25]

Tableau I.1 *Dimensions des conteneurs.*

	Conteneur de 20 pieds	Conteneur de 40 pieds	Cube de 45 pieds de haut
Dimensions extérieures (longueur x largeur x hauteur)	6.06 m x 2.44 m x 2.59 m (20 x 8 x 8.6 pieds)	12.19 m x 2.44 m x 2.59 m	13.72 m x 2.44 m x 2.90 m
Dimensions intérieures	5.90 m x 2.35 m x 2.39 m	12.03 m x 2.35 m x 2.39 m	13.56 m x 2.35 m x 2.70 m
Volume (m³)	33.1	67.5	86.1
Poids (tonnes)	2.3	4	4.8
Poids de charge (tonnes)	21.7	26.5	25.7
Poids total (tonnes)	24	30.5	30.5

I.4.2 Naissance de concept du conteneur et son évolution

1956, naissance d'un concept Le transport maritime conteneurisé est né sous l'impulsion d'un entrepreneur américain Malcolm Mac Lean qui, en 1956, adapta 4 navires pour transporter des remorques de camions par voie maritime. En 1956, l'Ideal X reliait New York à Houston avec 58 remorques à son bord. L'expérience se révélant positive, Mac Lean franchit véritablement le pas en conteneurs manutentionnés qui sont identiques dans leur conception.

En moins de 50 ans, ce dernier s'est imposé comme le premier moyen d'échange de biens de consommation à l'échelle mondiale entraînant une véritable révolution dans les transports mondiaux. En 1960, la rotation d'un cargo de ligne de 10 000 tonnes de capacité, déployée sur le trajet Europe-Japon-Europe prenait cinq mois. Près de la moitié du temps était passée au port, avec des escales atteignant parfois quatre ou cinq jours. En 2000, un grand porte-conteneurs offre une capacité de 60 000 tonnes et boucle le même trajet en deux mois avec des escales qui durent d'une dizaine à 36 heures. En même temps, l'automatisation a fait son

chemin : le cargo fonctionnait avec un équipage de 35 hommes alors qu'aujourd'hui les porte-conteneurs n'ont plus besoin que d'une quinzaine de marins pour naviguer. Plus rapides, plus sûrs, plus performants, les transports maritimes sont aussi moins coûteux : l'acheminement d'un conteneur chargé de 400 téléviseurs entre Taiwan et le Havre coûte 3000 EUR environ. Le prix de ce transport aurait coûté au moins trois fois plus cher dans les années 1960. [14]

I.4.3 Types de conteneurs

a. Les conteneurs d'usage général : appelés aussi conteneurs dry. Ils sont équipés de portes aux extrémités et destinés à des marchandises générales et sèches.



Figure I.8 *Conteneur dry.*

b. Les conteneurs pour usage spécifique : Conteneur à toit ouvert (Open top) : la structure de ce type de conteneur est identique à celle du dry, mais, le toit est mobile et est généralement bâché pour empotage vertical (pièces volumineuses ou/et indivisibles).



Figure I.9 *Conteneur Open Top* .

Conteneur plate-forme (Flats) : Ils sont à parois latérales ouvertes. Il existe deux types de Flats ; des conteneurs à parois d'extrémités fixes et d'autres à parois d'extrémités mobiles. Les Flats sont les seuls à admettre, sous certaines conditions, des marchandises en dépassement de hauteur et/ou de largeur.



Figure I.10 *Conteneur plate-forme* .

c. **Les conteneurs pour marchandises spécifiques** : Ils sont utilisés pour les marchandises ayant une caractéristique thermique spéciale. On peut citer :

Conteneur ventilé : la surface de ventilation de ce type de conteneur est augmentée par l'ouverture d'orifices de ventilation dans les longerons. Il est utilisé pour le stockage de certains fruits et légumes, café en sacs nécessitant la circulation de l'air.

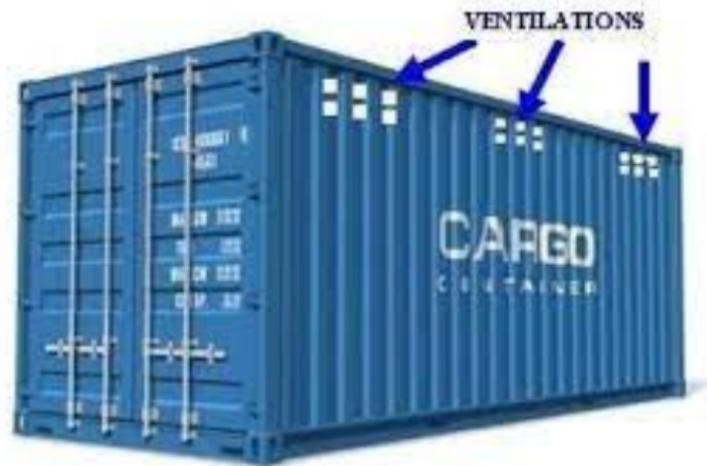


Figure I.11 *Conteneur ventilé* .

Conteneur à température contrôlée muni d'un groupe générateur pouvant être branché sur le système électrique du porteur. On y distingue :

- Chauffé, maintient une température minimum.
- Réfrigéré (reefer ou refrigerated), pour la conservation des produits alimentaires.



Figure I.12 *Conteneur réfrigéré* .

Conteneur à atmosphère contrôlée, pour ralentir ou accélérer le mûrissement des fruits ou légumes.

Conteneurs citernes : Ces conteneurs sont répartis en 2 grandes familles :

- Les citernes chimiques
- Les citernes alimentaires.

Les conteneurs citernes sont utilisés pour des produits liquides, pulvérulents ou gazeux. Une citerne chimique ne peut pas contenir de produits alimentaires, alors qu'il est possible de transformer une citerne alimentaire pour la rendre chimique.



Figure I.13 *Conteneur citerne* .

Conteneurs pour vrac : Ils ont une structure adoptée aux marchandises qui ne sont pas emballées ou arrimées (vrac) à savoir farine, grains. Ils sont équipés de trappes de chargement sur le toit, et de trappes de déchargement au bas d'une extrémité [25]

I.4.4 Avantages et inconvénients de la conteneurisation

Le déplacement des marchandises par conteneurs a plusieurs avantages par rapport au transport de marchandises non groupées. Le conteneur favorise l'automatisation de plusieurs opérations de manutention, ce qui accélère le chargement et le déchargement et autorise un transfert plus rapide d'un mode de transport à un autre. En outre, le conteneur protège les marchandises des intempéries et du chapardage et la manutention, devenant plus simple, se traduit par une quantité moindre de dommages. Les avantages inhérents aux conteneurs ont pu être réalisés grâce aux capitaux considérables que les exploitants ont investis en navires, terminaux, grues, wagons à deux niveaux de chargement et autres installations ou équipements de manutention spécialisés. Toutefois, les opérateurs, les ports et les autorités de tutelle faisant en sorte de

s'adapter aux contraintes de la logistique moderne, se heurtent à un certain nombre de limites de la conteneurisation.

Les contraintes physiques aussi bien dans les transports courts que sur longues distances nécessitent un minimum de protection préventive. En effet, les températures élevées ainsi que la ventilation réduite dans le conteneur entraînent très souvent de lourds dommages si l'on n'y prend pas garde. La température provoque la dessiccation des marchandises (cacao) ou des emballages (carton, bois d'arrimage ou de calage, bois de palette, etc.). La vapeur d'eau, une fois libérée, se condense dans les zones les plus froides du conteneur et en général lors de l'alternance jour-nuit. C'est alors une pluie qui semble retomber sur les marchandises, avec des dégâts irrémédiables faciles à imaginer.[25]

I.4.5 Les opérations dans un terminal à conteneurs

Les opérations de manutention se réalisent au terminal à conteneurs (ensemble de quais et parcs de stockage spécialisés par type de marchandises). Les navires se placent à quai au regard des portiques (grues de quai pour soulever les conteneurs). A bord du navire, les dockers désarriment les conteneurs qui sont liés les uns aux autres par les pièces de coin durant la traversée. Le portiqueur peut alors placer le spreader (structure où sont fixés les verrous permettant d'accrocher et de soulever le conteneur) à l'aplomb du conteneur et commencer le déchargement. Au pied de chaque portique un homme ou un système vidéo veille pour repérer l'immatriculation du conteneur et préciser sa position (rangement dans le parc de stockage ou placement sur remorque ou wagon) à un autre docker présent dans un cavalier gerbeur straddle carrier qui va se charger de la manœuvre. Une fois le déchargement réalisé, les manœuvres s'inversent pour les opérations de chargement. A peine quelques heures suffisent.

L'évolution technologique liée à la conteneurisation a profondément modifié les conditions de travail des dockers : ils sont moins nombreux, mais plus spécialisés et qualifiés. Les dockers préparent le matériel, participent à l'ouverture des panneaux de cale, guident les conducteurs de portiques et pilotent les chariots élévateurs à terre. Le pointeur est responsable de la gestion du parc à conteneurs.

Depuis son terminal informatique, il affecte les marchandises à des emplacements précis en fonction de leurs destinations. Il est également chargé d'identifier et de contrôler les conteneurs qui quittent le terminal.

Le planificateur de navire ship planner est chargé d'organiser le plan de chargement sur un navire : il doit attribuer à chaque conteneur un emplacement précis à bord du navire. Il veille

à ce que la stabilité du navire soit respectée. En effet, le placement des conteneurs est effectué de façon à faciliter leur déchargement dans la chronologie de leurs destinations c'est-à-dire les ports de débarquement.[25]

I.4.6 Equipements de manutention

Au sein d'un terminal, différents types d'équipements de manutention sont utilisés pour transborder les conteneurs des navires vers les barges, les camions et les trains et vice versa. Pour effectuer des opérations rapides et efficaces, ces terminaux disposent d'équipements de manutention et de transfert. Les équipements de manutention typique comprennent des Quay Cranes (QC), Yard Cranes (YC) qui peuvent être single Rubber-Tired Gantry Crane (RTGCs), et single Rail Mounted Gantry Crane (RMGC) et/ou Reach Stacker. Les Quay Cranes sont utilisées pour le chargement et le déchargement des porte-conteneurs. Ces types de grues fonctionnent sur des rails Figure I.14 .

Généralement, le déchargement se fait avant le chargement. Plusieurs grues à quai peuvent s'occuper du bateau simultanément, mais il faut suivre un plan de travail bien défini qui assurera l'équilibre du navire.

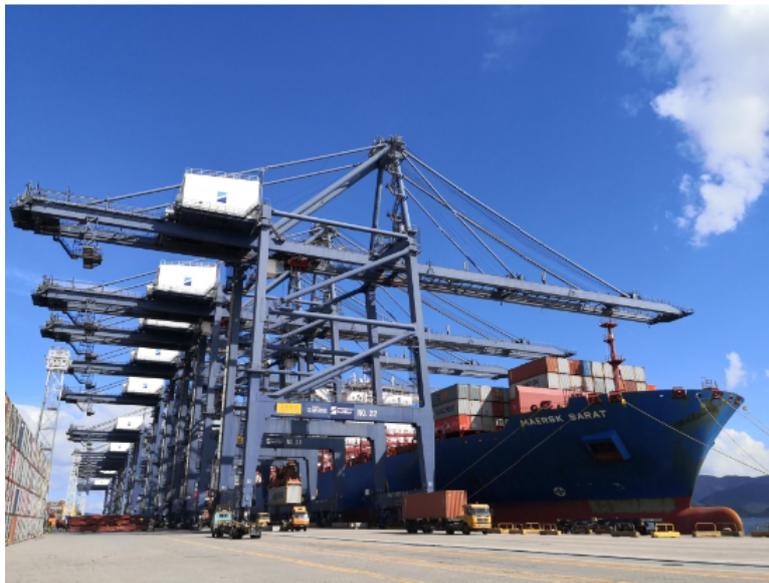


Figure I.14 *Quay Crane (QC)*[6].

Les RMGC sont automatisés, généralement plus rapides que les RTGCs, elles peuvent parcourir 300 mètres en 1 minute 15 secondes, Saanen et al. [26] et fonctionnent sur des rails comme le montre la Figure I.15 RMGC



Figure I.15 *Rail Mounted Gantry Crane (RMGC)*[7].

Les RTGC Figure I.16 sont utilisées pour empiler et retirer des conteneurs dans la zone de stockage, il s'agit d'un équipement de manutention non automatique et nécessite le contrôle du conducteur et elles sont couramment utilisées sur de très grands terminaux en raison de leur grande flexibilité et de leur très haute densité d'empilement. Elles peuvent rouler sur des roues en caoutchouc, se déplacent entre la cour et l'arrière-pays et peuvent être utilisées pour la manutention de conteneurs des deux côtés. Elles sont capables de faire une rotation de 90 degré pour effectuer un mouvement orthogonal; Mais ce type de mouvement prend du temps qui dure 15 minutes, Carlo et al. [27] . Les RTGC peuvent empiler les conteneurs par blocs de six conteneurs maximum, plus une voie pour véhicule et un conteneur sur six en hauteur.



Figure I.16 *Rubber-Tired Gantry Crane (RTGCs)*[8].

Les Reach Stackers Figure I.17 déplacent les conteneurs au moyen d'une flèche avec des entretoises qui s'ouvrent en fonction de la taille du conteneur, ils peuvent empiler des conteneurs à haute densité (jusqu'à 8 hauteurs et 3 rangées de profondeur). Ils peuvent être facilement transportés entre les terminaux et peuvent être utilisés pour gérer de nombreux types de marchandises. Ces équipements sont bien adaptés aux terminaux de petite à moyenne taille et polyvalents.



Figure I.17 *Reach Stackers (RS)*[9].

Les véhicules internes, y compris les camions de triage, les chariots gerbeurs et les véhicules à guidage automatique (AGV). Un véhicule autoguidé (AGV) est un robot en mouvement qui suit des marqueurs ou des fils dans le sol, ou utilise un aimant ou un laser pour le guider. Il est contrôlé par ordinateur et dispose de pare-chocs automatiques. Chaque AGV est capable de transporter un conteneur et d'interagir avec des grues. L'utilisation d'AGV permet principalement d'économiser du travail. La Figure I.18 est un exemple d'AGV.



Figure I.18 Véhicule autoguidé (AGV)[10].

Les cavaliers gerbeurs Figure I.19 sont des véhicules de transport et des équipements de manutention qui nécessitent un chauffeur. L'avantage du cavalier gerbeur réside dans le fait qu'il est capable de soulever, déplacer et placer un conteneur sans aucune interférence. De plus, elle a la possibilité d'empiler jusqu'à quatre conteneurs, et ne nécessite donc pas l'intervention de grues.



Figure I.19 Cavalier gerbeur (CG) [11] .

La Figure I.20 présente l'agencement typique d'un terminal à conteneurs avec les trois sections principales d'un terminal à conteneurs : 1. Le côté mer comprenant le navire (sea side), le quai et les zones de transport interne ; 2. La zone de stockage (the Storage yard) ;

et 3. Le côté ville (Landside), y compris les zones de transport externes et la porte. Chaque équipement fonctionne dans une ou plusieurs sections d'un terminal à conteneurs .

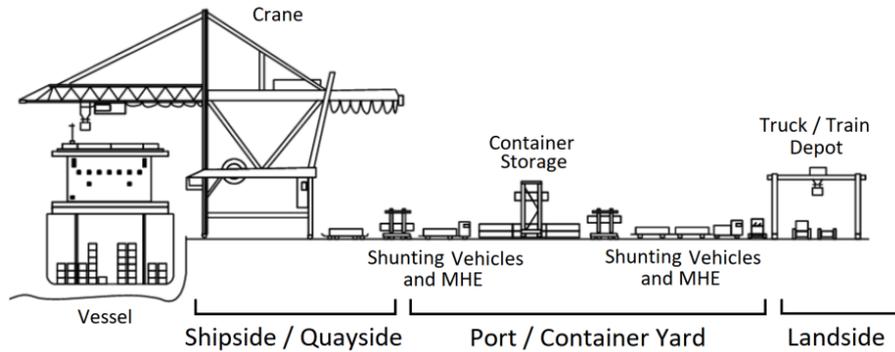


Figure I.20 Représentation schématique d'un terminal à conteneurs [12].

I.5 Présentation de l'entreprise portuaire de Ghazaouet

L'entreprise portuaire de Ghazaouet, créée par le décret n° 82-290 du 14/08/1982, est entrée effectivement en fonctionnement le 02/11/1982. L'entreprise portuaire de Ghazaouet a à sa charge :

- Le port de commerce de Ghazaouet. C'est une prestataire de service qui a deux types d'activités :
Activité de service public : Gestion de domaine, préservation et développement des infrastructures et superstructures portuaires, mise en place et exécution des plans de sûreté et de sécurité en application du code ISPS, pilotage des navires à l'entrée et à la sortie du port de Ghazaouet
Activité commerciales : Acconage et manutention Remorquage passagers et auto passagères

1. La situation géographique

Le port de Ghazaouet est situé dans une région à fort potentiel économique. Il constitue une façade maritime pour plusieurs wilayas de l'Ouest et du sud-ouest. Son activité peut s'étendre même au-delà des frontières Ouest du pays, vues les facilités d'accès dont il dispose et la qualité de service qu'il propose.

2. Les Surfaces du port

Le port de Ghazaouet s'étend sur 23 hectares de terre-pleins et 25 hectares de plans d'eau réparti en 4 bassins, il dispose :

- Une darse de pêcheurs de 1ha.
- 05 môles.
- 10 quais totalisant une longueur de 1679 ML.

- Des postes à quais spécialisés.
- D'une gare maritime : Hall de transit auto-passager : 1 960 M² ; Hall de transits passagers : 1 080 M².
- D'un hangar modulaire de 960 M² pour le transit des marchandises diverses ;
- De deux (02) magasins d'une surface totale de 6 000 M² sur la première zone d'activité ;
- De deux ponts bascules d'une capacité de 60 et 100 tonnes.

3. Zone extra-portuaire

Le port dispose de deux (02) hangars de 3000 m² chacun, situés dans la zone d'activité de la ville de Ghazaouet.

- La première zone d'activité s'étale sur une surface de 40 ha et elle est distante de 2.5 Km au Sud-Est du port.
- La deuxième zone d'activité située à l'ouest de la ville (commune de Souahlia) s'étale sur une surface de 3.8 ha et distante de 10 Km du port.[13]

Môles	Quais	Postes	Longueur quai (m)	Longueur navire admissible (m)	Tirant d'eau (m)	
					Théorique	Pratique
Alger	1	1-2-3	300	150	7.50	6.00
Batna	2	4-5	151	140	7.50	7.20
	03 Ro/Ro	6	90	-	7.50	7.00
Constantine	4	7	93	//		
	5	8	105	Réservé aux engins de servitudes		
	6	9	125	125	7.80	7.20
	7	10	101	-	7.80	7.20
Djanet	8	11-12-13	300	180	9.00	7.50
Tlemcen	9	14	120	107	12.00	9.00
	10	15-16-17	289	187	12.00	9.70

Figure I.21 Infrastructure de port de ghazaouet [13].

I.6 Conclusion

Ce chapitre a posé les fondations pour une compréhension approfondie du transport conteneurisé et de l'importance cruciale des ports et des terminaux à conteneurs dans cette chaîne logistique vitale. En examinant le rôle central des ports, des types de terminaux et de la conteneurisation, nous avons identifié les éléments clés de la logistique maritime moderne. Les chapitres suivants se concentreront sur un aspect critique de cette logistique : le stockage des conteneurs. Nous explorerons les défis complexes auxquels sont confrontés les terminaux à conteneurs en termes de gestion de l'espace, d'efficacité opérationnelle et de minimisation des retards. En étudiant les meilleures pratiques, les technologies émergentes et les stratégies innovantes, nous chercherons à identifier des solutions efficaces pour optimiser le stockage des conteneurs et améliorer les performances globales des terminaux à conteneurs.

Chapitre N°02 :
Probleme de stockage des conteneurs dans la
littérature

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous plongeons dans l'univers complexe de la gestion des conteneurs dans les ports, en examinant de près les différentes méthodes de résolution du Problème de Stockage de Conteneurs (PSC). Nous allons procéder étape par étape pour explorer les diverses approches proposées par les chercheurs pour résoudre ce défi logistique . Tout d'abord, nous présenterons un aperçu du contexte général et de l'importance du PSC dans la gestion portuaire moderne. Ensuite, nous passerons en revue les différents travaux proposés dans ce contexte dans la littérature, en analysant leurs fondements théoriques, leurs applications pratiques et leurs avantages respectifs.

À chaque étape, nous examinerons les contributions spécifiques des chercheurs, les techniques utilisées et les résultats obtenus. Nous examinerons les méthodes de résolutions, telles que les méthodes exactes, les algorithmes de programmation linéaire et les techniques de branchement et de découpage, qui garantissent des solutions optimales mais peuvent être limitées par la taille des problèmes. En parallèle, nous analyserons les métaheuristiques avec ces deux types , comme les algorithmes génétiques, la recherche tabou, et les colonies de fourmis, qui offrent des solutions approximatives mais efficaces pour les problèmes de grande envergure.

Enfin, nous concluons par une évaluation comparative des différentes approches, mettant en évidence leurs forces, leurs faiblesses et les perspectives d'amélioration pour l'avenir de la logistique portuaire.

Ce chapitre offre ainsi une plongée détaillée dans les défis et les solutions liés à la gestion des conteneurs dans les ports, fournissant un cadre complet pour comprendre et aborder efficacement le PSC.

II.2 Définition du Problème de Stockage des Conteneurs (PSC)

Après avoir parcouru plusieurs travaux consacrés au PSC, nous adoptons la définition suivante du PSC , donnée dans Kim et al. (2000) : à l'arrivée d'un conteneur en import ou en export, il s'agit de décider presque en temps réel, de son emplacement exact parmi les emplacements vides de manière à rendre efficace son chargement sur un navire, camion ou train. En général, la détermination d'un emplacement doit s'effectuer de manière à minimiser le nombre des mouvements parasites ou improductifs pouvant avoir lieu lorsqu'on veut rapprocher un conteneur éloigné ou extraire un conteneur se trouvant en dessous d'autres au moment de son départ pour être chargé sur le navire, train ou camion associé. [28]

L'opération du stockage est la partie la plus compliquée dans un terminal puisque les con-

teneurs en import et en export sont empilés simultanément dans un même espace de stockage. Après l'arrivée d'un navire, les conteneurs importés sont déchargés et sont déplacés de la zone de rassemblement aux emplacements de stockage. Les conteneurs de la même longueur sont normalement empilés les uns sur les autres, et sont autorisés à y rester pendant quelques jours gratuitement. Le processus d'exportation est l'inverse du celui d'importation. Avant l'arrivée prévue du navire, le port accepte des conteneurs destinés à l'export. Généralement, leur arrivée est aléatoire. Ils sont stockés temporairement, dans une période qui dépend de la date de départ du navire. Avant le chargement des conteneurs dans le bateau, un plan de chargement est préparé en tenant compte de la destination finale, du type, du poids de chaque conteneur et du poids maximum autorisé pour chaque pile, ainsi que de la stabilité du navire. On distingue deux manières de stockage de conteneurs; le stockage sur châssis ou l'empilage sur terrain.

Avec le premier système (système de châssis), chaque conteneur est accessible de façon directe et individuelle. Alors qu'en cas d'empilage sur terrain, pour pouvoir accéder à un conteneur, il faut décharger tous ceux qui se trouvent sur lui. Vu la limite de l'espace alloué au stockage, l'utilisation du deuxième système est la plus courante. La zone d'entreposage ou de stockage est un grand espace divisé en blocs (piles). Chaque bloc est composé de plusieurs baies, chacune comprend aussi un ensemble de colonnes. La position d'un conteneur dans un bloc est identifiée par la baie, la colonne et l'étage.

Il existe une distribution préliminaire des conteneurs dans les zones de stockage. Elle est basée sur divers critères afin de simplifier les opérations de transfert des conteneurs aux autres zones. Les conteneurs destinés à l'export se retrouvent généralement près de la zone d'opérations portuaires (près des grues de quai) afin de minimiser la distance parcourue par les véhicules de transport interne lors des opérations de chargement du navire. Les conteneurs déchargés du navire et qui quitteront le terminal par transport ferroviaire, seront entreposés près des voies ferrées pour diminuer la distance à parcourir lors du chargement des trains. L'espace restant de la zone est utilisé pour le stockage des conteneurs vides et des conteneurs en import et qui quitteront le terminal par transport routier. [29]

La superposition des conteneurs selon des critères et des stratégies étudiés assure une meilleure gestion de l'espace alloué au stockage mais ne peut pas éliminer toutes les opérations de remaniements. Les mouvements de remaniements appelés aussi mouvements parasites (re-handling) consistent à déplacer un ou plusieurs conteneurs pour retirer le conteneur dont nous avons besoin lors du déchargement. Dans l'exemple illustré dans la figure II.1, l'extraction du conteneur B nécessite un remaniement du conteneur C.

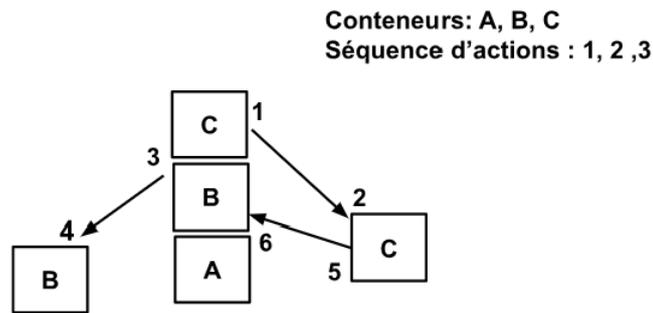


Figure II.1 *L'extraction du conteneur B nécessite un remaniement du conteneur C .*

Le stockage des conteneurs est parmi les décisions les plus importantes et les plus compliquées dans un terminal à conteneurs. Ainsi, l'affectation des tous les conteneurs arrivant au port aux emplacements les plus adéquats favorise la minimisation des opérations de déplacements inutiles des conteneurs lors de leur transfert au navire, au camion ou au train. Ce qui minimise le temps de fonctionnement des grues de quai et le temps qu'un camion passe dans le terminal. La complexité du problème de stockage des conteneurs réside au niveau de l'incertitude dans l'ordre de récupération des conteneurs. Le temps de départ des conteneurs en import est souvent incertain puisque les véhicules (les camions) assurant leurs transports arrivent plus ou moins aléatoirement. Pour les conteneurs en exportation, leur date de départ est habituellement connue puisqu'elle est reliée à celui du navire. Néanmoins, le plan d'arrimage n'est prêt que peu de temps avant le chargement et parfois la date de départ du navire est retardée pour des raisons météorologiques. Malgré la difficulté rencontrée dans la résolution du problème de stockage des conteneurs, plusieurs travaux l'ont traité et diverses approches ont été développées à savoir des systèmes d'aide à la décision, des modèles mathématiques et des méthodes heuristiques,[25]

II.3 Les différentes stratégies de stockage

[28] Un des avantages de l'utilisation de conteneurs est le fait qu'il soit possible de les superposer les uns sur les autres. Cependant, cet atout a des limites, dans la mesure où il peut causer des remaniements. En effet, ce genre de manœuvre est surtout effectué lors de l'extraction des conteneurs qui sont aux fonds des piles. Par conséquent, il est capital, pour chaque terminal à conteneurs, d'adopter une stratégie de stockage adéquate. Les différentes méthodes de stockage qui existent dans la littérature peuvent être divisées en quatre catégories, qui sont détaillées ci-dessous.

II.3.1 Ségrégation et non ségrégation

Le stockage avec ségrégation suppose une séparation entre les conteneurs qui sont en exportation (c'est-à-dire les conteneurs sortants) et ceux qui sont en importation (c'est-à-dire les conteneurs entrants). Les conteneurs destinés à l'exportation sont ceux qui arrivent au port étant chargés sur des camions ou bien sur des wagons, et qui vont quitter le port étant chargés sur des navires. Alors que les conteneurs importés sont amenés au port par des navires, et seront chargés sur des camions ou bien sur des wagons pour être acheminés vers leurs destinations finales. Avec le stockage par ségrégation, les zones de stockage sont préalablement réparties pour déterminer les emplacements qui sont réservés aux conteneurs importés et ceux qui sont destinés aux conteneurs en exportation. Cette répartition peut être faite de trois manières, [30]

- La première méthode consiste à réserver chaque bloc, soit aux conteneurs importés, soit aux conteneurs exportés.
- La deuxième divise en deux parties les rangées de chaque bloc, de ce fait, chaque moitié est réservée à l'une des deux catégories de conteneurs.
- La troisième méthode est presque semblable à la deuxième. La seule différence est le fait que les divisions se font en considérant les travées.

La ségrégation peut même aller jusqu'à subdiviser l'espace réservé à une catégorie de conteneur, par exemple en prédéfinissant la partie réservée à chaque navire. Cette stratégie est surtout utilisée pour le stockage des conteneurs qui vont être chargés sur des navires,[31] Quant à la méthode de non-ségrégation, elle ne fait pas de distinction entre les catégories des conteneurs. Par conséquent, les conteneurs peuvent être superposés indépendamment de leurs destinations.

II.3.2 Groupage et dispersion

Avec la méthode de stockage par groupe, des emplacements (à ne pas confondre avec des piles qui, par définition, en contiennent plusieurs) adjacents sont attribués à chaque ensemble de conteneurs qui ont les mêmes spécificités (exemple : destination, dimension, contenu, frigorifié, vides, ... etc). Les conteneurs qui appartiennent à un même groupe sont supposés être interchangeables, et par conséquent, ils peuvent être superposés d'une manière quelconque sans se soucier de leurs dates de départ,[32] La méthode de stockage par groupe est surtout utilisée dans les terminaux à conteneurs qui utilisent des RTGCs (Real Time Gross Settlement) ; car, pour

économiser de la main d'œuvre, les conteneurs sont regroupés autant que possible afin de minimiser le nombre de grues de cour utilisées, [30] Deux méthodes de réservation d'emplacements de stockage existent pour cette stratégie.

- La première méthode appelée "unité pile", commence par réserver une pile vide pour chaque groupe de conteneurs, ensuite elle désigne une nouvelle pile vide à chaque fois que celle d'un groupe devient pleine.
- La deuxième méthode est nommée "unité travée"; elle réserve, dès le début, toute une travée vide à chaque catégorie de conteneur. Et si la travée d'une catégorie devient pleine, elle réserve automatiquement une autre travée vide pour cette catégorie de conteneur.

Contrairement à cette technique, la méthode du stockage dispersé n'essaie pas de regrouper les conteneurs. Ces derniers sont stockés indépendamment les uns des autres. Une illustration de cette méthode est le stockage aléatoire, qui suppose une équiprobabilité de choix entre les places qui sont compatibles à chaque conteneur, [32]. Il peut être résumé comme suit.

- Choisir aléatoirement une rangée.
- Choisir un emplacement quelconque dans cette rangée.
- Tester s'il est possible d'y placer le conteneur.
- Si oui, alors effectuer le stockage.
- Si non, alors recommencer avec la rangée suivante

II.3.3 Stockage direct et stockage indirect

Dans la plupart des terminaux portuaires, les conteneurs sont directement placés dans la cour de stockage, où ils vont rester jusqu'à leurs départs. Par contre, dans le cas du stockage indirect, les conteneurs sont d'abord placés dans une zone d'agencement avant d'être transférés dans la cour de stockage. L'objectif de ce procédé est de diminuer les temps d'attente des camions externes qui apportent des conteneurs, et aussi d'accélérer les activités des grues de cour en séparant les périodes de stockage et les périodes de retrait. Ainsi, les transferts de conteneurs de la zone d'agencement vers la cour de stockage se font pendant les temps libres des grues de cour. Ce type de procédé est surtout utile pour les ports qui ne disposent pas de toutes les informations concernant les conteneurs à leurs arrivées. De ce fait, les conteneurs sont temporairement mis dans la zone d'agencement, en attendant de récolter toutes les informations qui sont nécessaires

pour désigner leurs emplacements dans la zone de stockage finale. Ces informations peuvent être : des dates de départ, des modes de transport (routier ou ferroviaire, dans le cas d'un terminal à conteneurs multimodal), etc.

II.3.4 Priorité aux chargement et priorité aux déchargement

Les méthodes de stockage qui priorisent les déchargements de conteneurs cherchent à maximiser les performances de toutes les activités liées aux opérations de stockage. La méthode de stockage par niveau en est une illustration. Elle stocke les conteneurs par couche, de telle sorte que tous les emplacements au sol soient occupés, avant de superposer les conteneurs,[33] . Elle est intuitive mais n'utilise pas la plupart des informations disponibles. Elle contient principalement quatre étapes, qui se succèdent comme suit :

- Prendre une rangée quelconque qui a au moins un emplacement libre.
- Chercher, dans cette rangée, un emplacement libre et adéquat qui est au contact du sol.
- S'il est trouvé : y stocker le conteneur.
- S'il n'est pas trouvé : chercher, dans la rangée, un emplacement libre et adéquat qui appartient au niveau le plus bas possible.

Avec le stockage par niveau, le risque de remaniement est moins important qu'avec la méthode aléatoire. Le nivellement ne se fait donc pas par rapport au sol mais plutôt par rapport aux dates de départ. Avec cette méthode, la recherche d'un emplacement de stockage pour un conteneur se fait en trois étapes qui se succèdent comme suit :

- D'abord on cherche parmi les piles qui ne sont ni pleines, ni vides, celles qui ont, à leurs sommets, des conteneurs qui ont des dates de départ supérieures à celle du conteneur que l'on veut stocker. Si on en trouve, on calcule, pour chacune d'elles, la différence entre la date de départ du conteneur qui est à son sommet et celle du conteneur que l'on cherche à stocker. Ensuite on sélectionne la pile qui conduit à la plus petite différence.
- Si de telles piles n'existent pas, alors on choisit parmi les piles vides, celle qui est plus proche de la sortie par laquelle le conteneur sera livré.
- Si on n'a pas trouvé de pile qui appartient aux deux premiers cas, alors on stocke le conteneur dans la pile la plus haute parmi celles qui ne sont pas pleines ; afin de minimiser les futurs remaniements.

Cette méthode est plus efficace que le stockage aléatoire et le stockage par niveau, car le risque d’avoir des remaniements est nettement moins élevé.

II.4 Étude bibliographique

II.4.1 Classification des travaux selon les ports conteneurisés dans le monde

[14] Dans cette section, nous donnons un tableau II.1 qui résume les recherches récentes consacrées aux problèmes de décision rencontrés dans quelques-uns des plus grands ports conteneurisés dans le monde en se référant à [34].

Tableau II.1 *Principaux travaux dans les plus grands ports du monde.*

Ports	Problème de décision et Méthodes de résolution	Références
Hamburg, Allemagne Bremen, Allemagne	Allocation de l’espace de stockage (MILP) Génération de scénarios (simulation) Ordonnancement de véhicules (algorithmes génétiques)	[35] [36] [37]
La Spezia, Italie Gênes, Italie	Allocation de l’espace de stockage (Simulation) Gestion de la zone de stockage (Integer Programming)	[38] [39]
Pusan, Corée	Allocation de postes à quais (MILP) Allocation de postes à quais et affectation de portiques (Relaxation lagrangienne, Programmation dynamique)	[40] [41]
Rotterdam, Pays-Bas	Ordonnancement de véhicules et de grues (B&B, Beam Search) Prédiction et évitement de congestion (Wait and Proceed Strategy)	[42] [43] [44]
Singapour	Le système global (Simulation) Distribution d’AGVs (Network Flow Model)	[45] [46]
Hong Kong, Chine	Déploiement de RTGs (Vogel Solution) Affectation de l’espace de stockage et tournées de véhicules (PL) Allocation de l’espace de stockage (Integer Programming) Déploiement de grues et de RTGs	[47] [48] [49]
Terminal réel Terminal virtuel	Ordonnancement de véhicules (Heuristique/Relaxation lagrangienne) Re-Ordonnancement de portiques et de véhicules (Système multi-agent)	[50] [51]
Port réel (non mentionné)	Le système global (Système multi-agent, non implémenté)	[52] [51]

La première et troisième colonnes de ce tableau montrent le nom du port conteneurisé et les références des travaux dédiés qui sont extraits de la littérature. La deuxième colonne présente les problèmes de décision discutés dans chaque port ainsi que les méthodes de résolution adoptées. Nous constatons que le problème le plus étudié dans ces ports est le problèmes de tournées de véhicules.

II.4.2 Revue de la littérature sur les méthodes de résolution des PSC

Le défi de gestion des conteneurs que nous examinons représente une décision cruciale dans la gestion portuaire, étant donné son impact majeur sur l’ensemble du processus de gestion portuaire. En conséquence, nous proposons les travaux réalisés et recensés dans ce domaine.

- Une méthode a été présentée par Kim et Kim (1997) [53] une planification des séquences du chargement des conteneurs à exporter dans un port maritime a été faite en utilisant un algorithme optimal de routage.
- Dubreuil (2008) [29] utilise un système de transport intelligent pour traiter le problème de transition des conteneurs dans un port.
- Dans la thèse de Meriam KEFI GAZDAR (2008)[14], une approche de résolution distribuée est examinée à travers la présentation d'un modèle d'optimisation heuristique distribuée nommé COSAH (COntainer Stacking via multi-Agent approach and Heuristic method), développé dans le cadre de ce travail. Ce modèle permet de simuler, de résoudre et d'optimiser l'espace de stockage disponible pour gérer les départs et les arrivées des conteneurs dans un port fluvial ou maritime. L'objectif de COSAH est de minimiser le nombre total de mouvements parasites tout en respectant des contraintes dynamiques d'espace et de temps.
- Khaoula CHEBLI (2011) [54] a étudié le problème d'optimisation des mouvements de conteneurs dans le contexte de l'exportation. Elle a formulé initialement le problème de planification des opérations de chargement des conteneurs sous forme de programme linéaire mixte. Pour résoudre cette problématique, elle a développé une approche heuristique de type Recherche Adaptative à Large Voisinage (ALNS). Cette méthode démontre une capacité efficace à résoudre les problèmes d'optimisation rencontrés dans un terminal à conteneurs.
- Imen AYACHI HAJJEM (2012) [55] s'est fixé pour objectif de résoudre le problème de stockage des conteneurs (PSC) à la fois dans un contexte statique et dynamique, pour un seul et plusieurs types de conteneurs, en utilisant deux métaheuristiques : l'algorithme génétique et la recherche harmonique. Afin d'évaluer la performance de chacune des approches proposées, une étude comparative des résultats produits par chaque méthode ainsi que par l'algorithme LIFO a été réalisée.
- Yu et al.[56] ont examiné un terminal à conteneurs automatisé moderne où l'objectif était d'optimiser le nombre de remaniements pour améliorer l'efficacité des processus de récupération des conteneurs entrants grâce à deux approches interdépendantes. Tout d'abord, développer des schémas de solution pour améliorer le problème d'allocation d'espace pour le stockage de conteneurs entrants, puis ensuite, faire des plans de réorganisation pour récupérer l'allocation d'espace de bloc après avoir récupéré certains conteneurs. Ils ont proposé trois modèles d'amélioration pour le problème de l'allocation d'espace de bloc aux conteneurs entrants ; La non-ségrégation, la ségrégation à période unique et la ségrégation à périodes multiples, et leur comparaison, utilisent ensuite des simulations pour valider les modèles et les solutions optimales pour chacun.

- Ndiaye et al.[33] ont proposé un algorithme Branch-and-Cut pour résoudre le problème de stockage de conteneurs et en prenant en considération des contraintes supplémentaires afin d'éviter les remaniements aux quais et en respectant l'ordre dans lequel les conteneurs sont déchargés par les navires.

- Ndèye Fatma NDIAYE (2015) [57] aborde dans sa thèse le problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire, en distinguant deux cas : Le cas statique, qui vise à déterminer un plan de stockage optimal.

Le cas dynamique, qui prend en compte les variations de l'état de la cour de stockage. Elle propose un algorithme de Branch-and-Cut, une méthode de résolution exacte qui repousse les limites de "ILOG CPLEX". Cependant, cet algorithme présente des limites en termes d'utilisation de la mémoire et de temps d'exécution, surtout lorsque le nombre de conteneurs à stocker est élevé. Pour pallier ces limitations, elle propose des algorithmes méta-heuristiques, tels qu'un algorithme de colonie d'abeilles, un algorithme génétique, un algorithme de colonie de fourmis et un algorithme de recuit simulé. Bien que ces algorithmes ne garantissent pas l'optimalité des solutions, des comparaisons avec les résultats obtenus par "ILOG CPLEX" ont démontré la qualité satisfaisante des solutions qu'ils fournissent, notamment sur des instances de tailles raisonnables.

- Ndiaye et al.[58] concernant la localisation de tous les conteneurs entrants, s'appuie sur l'outil principal du Staddle Carrier en termes de limitation du nombre de remaniements et de la distance entre le quai et les parcs de stockage en mettant en œuvre l'algorithme de la colonie de fourmis. Les simulations numériques prouvent que tous les algorithmes utilisés sont efficaces pour résoudre le problème du stockage des conteneurs.

- Arthanari [59] a proposé un modèle de programmation dynamique stochastique pour les conteneurs entrants, pour calculer le nombre minimum attendu de remaniements, obtenu par le système de planification des camions. Pour surmonter la limitation de calcul des méthodes exactes, il a développé une heuristique appelée l'indice de remaniement attendu (ERI) et évalué ses performances.

- Galle, V. et al.[60] ont étudié le problème stochastique de relocalisation des conteneurs (CRP) qui consiste à déterminer une séquence de relocalisation des conteneurs qui minimise le nombre de relocalisations nécessaires pour récupérer tous les conteneurs tout en maintenant un certain ordre de récupération. Le modèle batch, un nouveau modèle stochastique à plusieurs étapes, est introduit, justifié et comparé à un modèle existant (le modèle en ligne). Dans les modèles par lots et en ligne, deux principaux algorithmes optimaux appelés Pruning-Best-First-Search (PBFS) et une technique d'approximation aléatoire appelée PBFS-Approximate avec une er-

reur moyenne bornée sont applicables. De plus, ils fournissent deux nouvelles heuristiques qui dépassent les meilleures heuristiques connues. Enfin, sur la base de preuves informatiques solides, ils ont émis l'hypothèse que l'heuristique de "nivellement" est la meilleure dans une situation particulière "sans information", dans laquelle l'un des conteneurs restants est également susceptible d'être récupéré ensuite à n'importe quelle étape de récupération.

- Khadidja YACHBA (2017) [61] présente dans son travail principalement deux approches pour résoudre le problème de placement de conteneurs. Ces approches sont basées sur la description d'un modèle décisionnel permettant d'optimiser l'espace de stockage disponible pour gérer les départs et les arrivées des conteneurs pleins dans un port maritime. En d'autres termes, ce modèle vise à minimiser le nombre total de mouvements inutiles tout en respectant des contraintes dynamiques d'espace et de temps.

- Zhu, H. et al. [62] se sont concentrés sur le problème du déchargement et de l'empilage des conteneurs entrant dans les terminaux à conteneurs et ont obtenu une séquence de déchargement équitable ainsi qu'une répartition optimale de l'empilement dans la zone de stockage. Un modèle de programmation en nombres entiers est créé sur la base d'une formulation proposée pour identifier la distribution d'empilement optimale et la séquence de déchargement, ainsi que pour essayer de réduire le nombre estimé de remaniements. Le modèle pour les petites instances est résolu par un solveur commercial. Comme pour les grandes instances du monde réel, un algorithme de recherche en deux étapes est conçu, qui comprend une étape initiale pour générer la solution réalisable et une étape de recherche de voisinage pour trouver la solution optimale.

- Yu, M. et al [63] ont utilisé l'optimisation intégrée à la simulation pour étudier un problème d'allocation d'espace pour les conteneurs entrant dans les terminaux à conteneurs automatisés. Ils ont proposé de minimiser le temps d'attente global des AGV (véhicules à guidage automatique) dans le processus d'attribution de l'espace et le temps d'attente des camions externes dans le futur processus de récupération des conteneurs en allouant l'espace de la cour du terminal à conteneurs pour un lot de conteneurs entrants.

Un modèle de programmation en nombres entiers pour caractériser le problème est proposé. Un module de simulation est utilisé pour estimer le nombre de remaniements de conteneurs qui se sont produits tout au long du processus de récupération. Les résultats des expériences numériques montrent que l'algorithme génétique affecte les performances de la décision d'allocation et réalise un compromis entre un calcul rapide et une solution de haute qualité.

Nobar Antoine KASSABIAN (2022) [23] a pour objectif de concevoir un plan de stockage optimal qui attribue à chaque conteneur un emplacement idéal, tout en prenant en compte les contraintes effectives de la zone de stockage. Ce problème se décline en deux cas distincts:

Le cas statique, visant à déterminer la meilleure stratégie de stockage pour les conteneurs importés, en optimisant leur placement dans la zone de stockage sans considérer les mouvements futurs.

Le cas critique, qui consiste à élaborer un plan de stockage optimal spécifiquement pour les conteneurs dangereux, en accordant une attention particulière à leur emplacement sécurisé et à l'isolement adéquat pour minimiser les risques potentiels.

Le tableau II.2, présente une étude comparative de l'ensemble des travaux cités afin de positionner nos contributions dans la suite du document.

Tableau II.2 *Comparatif des travaux connexes sur le stockage des conteneurs.*

Auteurs	Problème traité	Méthode de résolution	Contributions
Kim et Kim (1997)	Planification de la séquence de chargement des conteneurs à exporter dans un port maritime	Algorithme optimal de routage	Réduire le temps total de manutention des conteneurs par les portiques de cour. Déterminer combien de conteneurs doivent être collectés dans chaque baie et de la route optimale des portiques de cour.
Dubreuil (2008)	Faciliter la transition des conteneurs dans les terminaux	Système de transport intelligent (STI)	Effectuer plusieurs simulations en utilisant un STI.
Kefi (2008)	Approche distribuée de résolution de problème de stockage de conteneurs	Algorithmes heuristiques gloutons	Utilisation d'une architecture multi-agents pour la résolution du problème.
Suite sur la page suivante			

Tableau II.2 – Suite sur la page suivante

Auteurs	Problème traité	Méthode de résolution	Contributions
Chebli (2011)	Mouvements non productifs et interférences entre portiques	Approche heuristique de recherche adaptative à large voisinage (ALNS)	Formulation en programme linéaire mixte pour minimiser le temps de manutention par les portiques.
Ayachi et al. (2013)	Stockage de différents types de conteneurs, respect des délais de livraison	Algorithme génétique	Comparaison avec l'algorithme FIFO, optimisation du stockage de différents types de conteneurs.
Yu et al. (2013)	Optimisation des processus de récupération des conteneurs entrants dans un terminal automatisé	Modèles d'allocation d'espace (non-ségrégation, ségrégation à période unique, ségrégation à périodes multiples)	Développement de schémas de solution pour améliorer l'allocation d'espace.
Ndiaye et al. (2014)	Stockage de conteneurs évitant les remaniements	Modèle d'affectation à coût minimal	Réduction du temps de transport des conteneurs entre la zone de stockage et les navires en évitant les remaniements.
Ndiaye et al. (2015)	Stockage de conteneurs dans un terminal portuaire	Hybridation entre algorithme génétique et recuit simulé	Amélioration de l'efficacité de la résolution du problème de stockage.
Suite sur la page suivante			

Tableau II.2 – Suite sur la page suivante

Auteurs	Problème traité	Méthode de résolution	Contributions
Ndiaye et al. (2016)	Localisation des conteneurs entrants dans un terminal portuaire	Algorithme de colonie de fourmis	Réduction du nombre de remaniements et de la distance entre le quai et les zones de stockage.
Arthanari (2016)	Programmation dynamique stochastique pour conteneurs entrants	Heuristique de l'indice de remaniement attendu (ERI)	Calcul du nombre minimum attendu de remaniements.
Yachba et al. (2017)	Stockage des conteneurs dangereux	Algorithme génétique	Optimisation de la méthode de stockage des conteneurs dangereux.
Galle, V. et al (2018)	Relocalisation des conteneurs dans un terminal	Algorithme Pruning-Best-First-Search (PBFS)	Introduit un modèle batch pour minimiser le nombre de relocalisations nécessaires.
H Zhu et al. (2020)	Déchargement et empilage des conteneurs entrants	Solveur commercial pour les instances de petite taille, algorithme de recherche en deux étapes pour les grandes tailles	Formulation pour réduire le nombre attendu de remaniements en utilisant la programmation en nombres entiers.
Yu, M. et al (2021)	Allocation d'espace pour les conteneurs entrants dans les terminaux automatisés	Algorithme génétique	Minimisation du temps d'attente global des AGV et des camions externes.

II.5 Méthode de résolution de PSC

Pour aborder les problèmes d'optimisation, deux grandes catégories de méthodes peuvent être employées : les méthodes exactes et les métaheuristiques. Les méthodes exactes ont l'avantage de fournir une solution optimale au problème. Parmi ces techniques, on trouve la séparation et évaluation (branch-and-bound), les algorithmes de retour arrière (backtracking), et d'autres.

Cependant, pour les problèmes de grande taille, notamment ceux classés NP-complets et NP-difficiles, obtenir la solution optimale en un temps raisonnable est souvent irréaliste. Ces méthodes sont lentes et nécessitent un temps de calcul considérable. Face à ces limitations, la majorité des recherches se tournent vers les métaheuristiques, qui permettent de produire des solutions satisfaisantes en un temps raisonnable, sans garantir leur optimalité.

Les métaheuristiques reposent sur des simulations pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Leur point commun est la combinaison de règles déterministes et d'éléments aléatoires pour imiter des phénomènes naturels, tels que l'évolution biologique. Par exemple, les algorithmes génétiques (AG) s'inspirent des principes de la génétique naturelle darwinienne. La recherche tabou, introduite par Glover en 1977 [64], imite le comportement des animaux, tandis que le recuit simulé, proposé par Kirkpatrick et ses collègues en 1983, s'inspire du processus de recuit physique.

Au cours des dernières décennies, ces métaheuristiques ont permis de pallier les insuffisances de nombreuses méthodes numériques classiques. Néanmoins, il est nécessaire d'explorer de nouvelles heuristiques plus performantes basées sur des analogies avec des phénomènes naturels ou artificiels. À titre d'exemple, on peut citer les algorithmes de colonie d'abeilles simulée, la méthode de l'essaim particulaire, et la recherche harmonique, qui imite le comportement d'un musicien improvisant pour trouver la meilleure harmonie.

Dans ce chapitre, nous commencerons par présenter les méthodes de résolution appliquées au problème de stockage des conteneurs.

Nous détaillerons ensuite les algorithmes génétiques et la recherche harmonique, deux métaheuristiques choisies pour résoudre les problèmes étudiés.

Ce choix s'explique par plusieurs raisons. Les méthodes basées sur les AG ont connu un succès croissant depuis leur introduction, notamment en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle, surtout pour les problèmes d'ordonnancement.

Quant à la recherche harmonique, elle a été adoptée pour divers problèmes, comme le problème de routage de véhicules, avec des résultats probants.

Le problème de stockage de conteneurs consiste en la détermination d'un arrangement d'un

ensemble de conteneurs dans les différents blocs de stockage disponibles dans un port.

Ce problème, qui est NP-difficile et NP-complet, est largement étudié dans la littérature et plusieurs approches ont été proposées pour résoudre ces différentes variantes. Parmi lesquelles il y a des méthodes exactes et d'autres sont des heuristiques. Dans cette section, un nombre de ces techniques va être décrit et leur adaptation au PSC sera présentée.

II.5.1 Les méthodes exactes

Une méthode exacte est une approche qui permet de générer la solution optimale d'un problème. Son principe consiste généralement en une énumération exhaustive de l'ensemble de solutions possibles. De ce fait, il sera difficile, voir impossible, de trouver la solution optimale si la taille du problème devient grande. En plus, ces techniques sont très lentes et nécessitent une durée d'exécution très grande.

Toutefois, il existe certaines méthodes plus intelligentes qui permettent de résoudre des problèmes de tailles plus ou moins larges, en minimisant le nombre de ces solutions réalisables. Parmi elles, on peut citer l'algorithme de branch and bound, branch and cut ou la programmation dynamique.

II.5.1.1 Branch and Bound

C'est une méthode de la recherche arborescente ou de la procédure de séparation et d'évaluation, cette méthode consiste en la construction d'un arbre de recherche qui sera exploré de manière à éviter les branches inutiles qui sont des branches contenant des solutions non intéressantes ou carrément non réalisables. L'exploration se fait avec des évaluations des branches et des comparaisons avec une valeur seuil du critère à optimiser.

Cette technique donne de bons résultats pour les problèmes d'ordonnement de petites tailles, mais dans le cas contraire, elle risque de générer des branches très étendues. Cette méthode a été utilisée dans [Gendron et Crainic, 1995] [65] pour la résolution du problème de planification du transport terrestre de conteneurs.

II.5.1.2 Branch and cut

Elle est aussi appelée méthode de programmation en nombres entiers. Comme toute méthode énumérative implicite, l'algorithme construit une arborescence nommée l'arbre du "Branch and Cut", les sous-problèmes qui forment l'arbre sont appelés des nœuds. Il existe trois types de nœuds dans l'arbre du "Branch and Cut", le nœud courant qui est en train d'être traité, les nœuds actifs qui sont dans la liste d'attente des problèmes et les nœuds inactifs qui ont

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

II.5.1.3 Programmation dynamique

Cette méthode se base sur le principe de Bellman : "Si C est un point qui appartient au chemin optimal entre A et B, alors la portion de ce même chemin allant de A à C est le chemin optimal entre A et C." [Borne et al 1990] [66]. Pour obtenir le chemin optimal du problème, il suffit donc de construire les différents sous chemins optimaux en partant de l'objectif et en remontant vers l'origine. Beaucoup de chercheurs ont utilisé la programmation dynamique pour résoudre le PSC. [Kim et Bae, 1998][67] et [Korbaa et Yim, 2004] [68]

II.5.2 Les métaheuristiques

Une méta-heuristique est une approche efficace qui permet de traiter une large variété de problèmes. Elle permet de générer de bonnes solutions en une durée raisonnable sans garantir leur optimalité ou même leur réalisabilité [69]. Ces approches peuvent être classées en deux familles, les méta-heuristiques de recherche locale et les méta-heuristiques évolutionnaires.

II.5.2.1 Les métaheuristiques de recherche locale

Le processus d'optimisation pour ces approches commence par une solution initiale. Par la suite, la procédure effectue des recherches de nouvelles solutions dans le voisinage de la solution courante, selon une fonction $v(x)$, appelée généralement fonction de voisinage. Dans le PSC, la fonction de voisinage peut être la permutation des positions de deux ou de plusieurs conteneurs dans l'espace de stockage. Parmi les méta-heuristiques de recherche locale ou de voisinage, on peut citer la méthode de descente, la recherche Tabou, le recuit simulé, etc.

a. La recherche Tabou

La recherche tabou est une approche exploratoire dans le domaine de la recherche scientifique qui consiste à aborder des sujets généralement évités ou interdits en raison de leurs implications éthiques, morales, sociales ou culturelles.

Cette méthode implique l'exploration systématique de domaines controversés tout en tenant compte des considérations éthiques et des sensibilités sociales pour éviter les conséquences négatives.

L'objectif est de surmonter les barrières imposées par les tabous pour découvrir des connaissances inédites et provoquer des avancées significatives. Bien que cette approche puisse révéler

des aspects cachés ou ignorés de certains phénomènes, elle nécessite une grande prudence et un encadrement strict pour éviter des répercussions indésirables et respecter les normes éthiques en vigueur.

b. Le recuit simulé

Le recuit simulé est un algorithme modélisé en analogie avec le phénomène du recuit qui peut être décrit par le chauffage d'un produit métallurgique à une température suffisante pour assurer son équilibre physico-chimique et structural, et que l'on fait suivre d'un refroidissement lent. De façon analogue, pour les algorithmes SA, une solution initiale est sélectionnée. Par la suite, une exploration de son voisinage sera établie et une nouvelle solution sera choisie.

Si elle est meilleure que la solution courante, elle prendra sa place, sinon elle sera sélectionnée avec une probabilité p qui dépend d'un paramètre, appelé température, qui sera réduite à son tour. Cette probabilité diminue de façon exponentielle, soit avec le temps soit suite à la dégradation de la solution courante. L'algorithme de recuit simulé peut être décrit par la figure suivante :

```
Algorithme Recuit simulé
Etape 1 : initialisation F(x) Génère solution initiale Sélectionner une température initiale
T > 0 x* = x xmin = x Etape
2 : Répéter
    x ← une solution du voisinage de F(x*)
    Δ = F(x) - F(xmin)
    Si Δ ≤ 0 Alors
        xmin ← x
        x* ← x
    Sinon
        x* ← x avec une probabilité P = e - Δ/T
    Fin si
    Mettre à jour la température
Jusqu'à condition d'arrêt
```

Figure II.2 *Algorithme Recuit Simulé.*

Dans cet algorithme, la solution à sélectionner du voisinage de la solution courante peut se faire de façon aléatoire, selon l'approche Best fit (meilleure solution dans son voisinage) ou First fit (la première solution meilleure que la solution courante, si elle existe). De plus, le recuit simulé permet la diversification vu qu'il accepte une solution de qualité inférieure avec une probabilité P qui dépend du degré de dégradation de la solution ainsi que du facteur température, T . Concernant la valeur de la température T , elle sera initialement élevée ce qui augmentera la probabilité d'acceptation des solutions de qualité inférieure et augmentera le degré de diversification.

Par la suite, T diminue, selon un facteur à définir, lentement au fur et à mesure du déroulement

de l'algorithme pour simuler le processus de refroidissement des matériaux. Sa diminution est suffisamment lente pour que l'équilibre thermodynamique soit maintenu.

Enfin, le critère d'arrêt de l'algorithme peut être un nombre maximal d'itération, une valeur minimale de la température finale ou un nombre d'itérations sans amélioration de la meilleure solution [Kang et col., 2006] [70] [Chen et col., 2004] [71] .

II.5.2.2 Les métaheuristiques évolutionnaires

Contrairement aux méthodes de recherche locale où une solution est considérée, dans les méta-heuristiques évolutionnaires toute une population de solutions contribue au processus d'optimisation.

De ce fait, une telle méthode peut générer plusieurs solutions efficaces en parallèle via une auto-adaptation de chacune des solutions, d'une part, et la coopération des différentes solutions de la population, d'autre part [72].

Parmi les méta-heuristiques évolutionnaires, on peut citer principalement, l'algorithme génétique, les colonies de fourmis, la recherche harmonique, etc.

a. Les colonies de fourmis

La recherche sur les colonies de fourmis est une méthode inspirée des comportements sociaux des fourmis pour résoudre des problèmes complexes d'optimisation. Cette méthode consiste à modéliser le processus par lequel les fourmis trouvent le chemin le plus court vers une source de nourriture, en utilisant des phéromones pour marquer les chemins explorés et guider les autres fourmis.

L'algorithme simule cette exploration collective, évitant les chemins non prometteurs et renforçant les plus efficaces à chaque itération. Bien qu'elle soit particulièrement efficace pour les problèmes de routage et de graphes, cette technique peut devenir moins performante lorsque les espaces de recherche sont vastes. Utilisée pour la première fois par Dorigo et al. En 1996 [73], cette méthode a prouvé son efficacité dans divers domaines, tels que l'optimisation combinatoire et la gestion de réseaux.

b. Les algorithmes génétiques

L'algorithme génétique (AG) fait partis des algorithmes évolutionnistes, c'est un puissant algorithme de recherche stochastique basé sur les mécanismes de la génétique naturelle et de la sélection. Ils commencent par une population initiale de solutions potentielles générées aléatoirement. Chaque solution est évaluée à l'aide d'une fonction de fitness, mesurant sa

qualité. Les meilleures solutions sont sélectionnées pour se reproduire via des techniques de croisement et de mutation, produisant une nouvelle génération de solutions. Ce processus se répète jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, comme un nombre fixe de générations ou une solution satisfaisante. Les AG sont flexibles et robustes, capables de résoudre divers problèmes d'optimisation, mais peuvent être gourmands en ressources computationnelles et nécessitent un réglage minutieux des paramètres pour de meilleures performances.

II.6 Conclusion

La gestion efficace des conteneurs dans les ports est un élément vital de la chaîne logistique mondiale, et le problème de stockage de conteneurs (PSC) constitue un défi majeur dans ce domaine. À travers ce chapitre, nous avons exploré une multitude de méthodes de résolution proposées par les chercheurs pour aborder ce problème complexe. En examinant ces approches, nous avons constaté une diversité remarquable de techniques, allant des algorithmes heuristiques aux modèles mathématiques sophistiqués. Chaque méthode présente ses propres avantages et limitations, mais toutes visent à améliorer l'efficacité opérationnelle des ports en minimisant les temps d'attente, en optimisant l'utilisation de l'espace de stockage et en réduisant les coûts logistiques. Cependant, malgré les progrès réalisés, des défis subsistent. Certains modèles souffrent de limitations en termes de temps de calcul et de capacité à gérer des volumes de conteneurs massifs. D'autres rencontrent des difficultés à prendre en compte les contraintes dynamiques et les variations de la demande dans les ports.

Pour l'avenir, il est crucial de poursuivre la recherche dans ce domaine en intégrant des approches innovantes telles que l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'optimisation multi-objectifs. En outre, une collaboration étroite entre les chercheurs, les professionnels de la logistique et les décideurs politiques est nécessaire pour mettre en œuvre efficacement ces solutions et relever les défis futurs de la gestion des conteneurs dans les ports. En conclusion, ce chapitre souligne l'importance cruciale du PSC dans la logistique portuaire et met en lumière les progrès réalisés ainsi que les opportunités et les défis à venir.

En combinant l'innovation technologique avec une approche collaborative, nous pouvons créer des systèmes logistiques plus efficaces, durables et résilients pour répondre aux besoins croissants du commerce mondial.

Chapitre N°03 :
Etude et résolution du cas statique

III.1 Introduction

L'un des principaux défis dans les terminaux portuaires est la gestion du stockage des conteneurs. Actuellement, ce problème est considéré comme prioritaire et est au centre de nombreux travaux de recherche.

Dans ce chapitre, nous nous penchons d'abord sur la résolution du problème de stockage des conteneurs (PSC) dans un contexte général, puis nous examinons un cas pratique : le port de Ghazaouet. Nous avons étudié, analysé et traité le problème PSC pour le port de Ghazaouet après avoir visité le port, interrogé les responsables et recueilli toutes les informations nécessaires.

Dans cette étude, nous supposons que tous les conteneurs sont arrivés au port à travers des portes-conteneurs avant le début des opérations de stockage. Pour cela, nous utilisons une approche analytique en formulant un modèle mathématique et en étudiant la complexité du problème. En parallèle, nous adoptons une approche de résolution basée sur la métaheuristique du recuit simulé.

La structure de ce chapitre est la suivante : la section 1 présente la définition du problème. La section 2 décrit les hypothèses retenues. La section 3 explique la démarche entamée. La section 4 propose une modélisation mathématique du problème de stockage des conteneurs (PSC). La section 5 décrit l'algorithme de résolution du recuit simulé utilisé pour notre problème. La section 6 expose les résultats numériques, d'abord dans un cas général, puis dans un cas pratique: Port de Ghazaouet. Cette section rapporte les résultats des simulations numériques et évalue l'efficacité des algorithmes à travers une étude comparative.

III.2 Définition du problème

Les difficultés et les obstacles sont courants dans de nombreux aspects de notre vie, ce qui rend indispensable leur recherche, évaluation et amélioration scientifique pour obtenir les meilleurs résultats. Les méthodes non scientifiques doivent être améliorées pour être plus efficaces. Le scénario de ce travail illustre comment fonctionnent les ports maritimes à travers le monde et comment nous devons aborder les problèmes actuels.

Les installations portuaires, y compris les ports maritimes, sont confrontées à divers problèmes liés à leurs infrastructures. La nature et la complexité de ces problèmes varient en fonction de la taille du port. Certains ports sont très vastes et surpeuplés, tandis que d'autres sont plus petits et ont des activités quotidiennes moins intensives. Au cours des dernières années, le nombre de conteneurs maritimes a considérablement augmenté à l'échelle mondiale, établissant

le transport maritime comme un moyen de transport fiable entre les pays expéditeurs. Cela souligne l'importance de réduire les coûts par rapport au transport routier.

L'un des indicateurs d'efficacité du port est la bonne gestion de l'espace de stockage. Ainsi, nous comptons certains des problèmes de base dans lesquels les ports maritimes ont souffert et qui ont un impact négatif sur la zone de stockage ; les navires arrivent à quai, bien évidemment l'espace de stockage ne sera pas vide, par conséquent les nouveaux conteneurs sont empilés sur les anciens, d'où le terme de " remaniement " est apparu. Les remaniements consistent à déplacer certains conteneurs qui se trouvent au-dessus pour atteindre ceux souhaités.

Ainsi, placer le conteneur dans la bonne position en respectant certaines contraintes (date de départ des conteneurs) permet de réduire le nombre de remaniements, afin d'améliorer la gestion de la zone de stockage. La dispersion aléatoire des conteneurs est interdite, des règles doivent être respectées et appliquées.

Les conteneurs sont stockés en piles, et un ensemble de piles dans une même rangée forme une baie. Un espace d'un mètre entre ces baies est nécessaire pour faciliter le déplacement des humains et l'utilisation de l'équipement dans la zone de stockage. Cette configuration permet non seulement d'optimiser l'espace de stockage, mais aussi d'assurer des conditions de travail sécurisées et efficaces.

Notre contribution est double. Dans un premier temps, nous proposons un modèle MILP (Mixed Integer Linear Program) "Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers" (PLMNE)) pour minimiser le nombre des remaniements (les mouvements improductifs). Notre approche est basée sur l'interaction avec les agents portuaires et sur la visualisation de l'activité réelle qui se déroule dans le port. Deuxièmement, nous proposons une résolution exacte de notre modèle à travers le solveur CPLEX ILOG pour les petites instances, ensuite nous développons une métaheuristique basée sur l'algorithme du recuit simulé pour produire des solutions de haute qualité pour les grandes instances du problème.

Ainsi, l'utilisation d'outils de recherche opérationnelle et de méthodes scientifiques est devenue cruciale dans un port maritime. Les métaheuristicques sont des méthodes génériques qui ont été appliquées avec succès pour résoudre de nombreux problèmes combinatoires complexes, obtenant souvent de très bons résultats, notamment dans le cadre de compétitions, telles que le problème du stockage de conteneurs (PSC), un problème NP-difficile [58] [14]. L'utilisation d'outils de recherche opérationnelle et de méthodes scientifiques est devenue cruciale dans les ports maritimes pour aborder ces défis.

Le problème de stockage de conteneurs (PSC) est un défi majeur dans la gestion des terminaux portuaires en raison de sa complexité. Il est classé comme un problème NP-difficile [58] [14], ce

qui signifie qu'il est au moins aussi difficile que les problèmes les plus complexes dans la classe NP. La difficulté réside dans la nécessité de trouver la disposition optimale des conteneurs pour minimiser les mouvements improductifs, appelés "remaniements", tout en respectant diverses contraintes telles que les dates de départ. En raison de cette complexité, les solutions exactes sont souvent impraticables pour les grandes instances, ce qui conduit à l'application réussie de métaheuristiques.

Ces méthodes d'approximation, comme le recuit simulé, permettent d'obtenir des solutions de haute qualité en un temps raisonnable [69]. Des études ont démontré l'efficacité de ces approches pour le PSC, confirmant leur pertinence dans la résolution de problèmes combinatoires difficiles [74] [75]

III.2.1 Hypothèses

Dans une zone de stockage, notamment au sein d'une seule pile, seuls des conteneurs de mêmes dimensions sont entreposés afin d'éviter d'éventuels dommages. Dans notre étude, les conteneurs entrants se classent en trois catégories : 20, 40 et 45 pieds (sachant que 1 pied équivaut à 0.3048 mètre). Un conteneur de 20 pieds occupe 1 EVP dans la zone de stockage, tandis qu'un conteneur de 40 pieds occupe 2 EVP. Pour aborder le problème de stockage de conteneurs (PSC), nous proposons un programme linéaire mixte en nombres entiers (PLMNE). Les hypothèses suivantes sont prises en compte avant de détailler le modèle mathématique :

- Dans chaque pile, les conteneurs sont stockés par ordre décroissant de leur date de départ
- Avant chaque période de stockage, l'état de la zone de stockage est connu. Pour chaque pile, on connaît le nombre de conteneurs présents et leurs dates de départ, ce qui permet de déterminer l'espace libre disponible.
- Les conteneurs sont entreposés en respectant la contrainte de compatibilité dimensionnelle, c'est-à-dire que tous les conteneurs d'une même pile ont les mêmes dimensions.
- Dans une pile, les conteneurs sont numérotés par ordre décroissant de leur niveau. Exemple : Si la pile contient au maximum 4 conteneurs, alors le conteneur du premier niveau (sommet de la pile) aura le numéro 4, du deuxième niveau aura le numéro 3, du troisième niveau aura le numéro 2 et le conteneur du dernier niveau (conteneur de sol) aura le numéro 1.
- Une baie de stockage peut contenir plusieurs piles, assurant ainsi que le dernier numéro de pile dans une baie et le premier dans la suivante sont consécutifs.

- Les deux premiers niveaux supérieurs d'une pile sont pris en compte pour le remaniement afin de minimiser les mouvements improductifs.

III.3 Explication de la démarche entamée

Ce travail s'inspire principalement des recherches de Nobar KASSABIAN [23] et Fatma Ndiaye [57], ainsi que des nombreuses visites effectuées au port de Ghazaouet. Les échanges avec les responsables, notamment ceux du service exploitation du port, ont été essentiels pour saisir les enjeux de la gestion de l'espace de stockage des conteneurs importés. Notre objectif principal a été d'identifier la meilleure manière d'empiler les conteneurs pour faciliter leur récupération sans difficultés (notamment en minimisant le nombre de remaniements) et d'optimiser le fonctionnement opérationnel de la zone de stockage. En conséquence, les travaux présentés ici ont été développés et mis en œuvre en réponse aux besoins et aux défis spécifiques du port de Ghazaouet. Notre approche se divise en deux parties : théorique et pratique.

La plupart des auteurs dans la littérature se sont concentrés sur la minimisation du nombre de remaniements attendus du conteneur qui existe en haut de la pile. Notre travail se concentre sur la réduction du nombre de remaniements dans la gestion des conteneurs au sein du port, en s'inspirant des travaux antérieurs tout en adaptant notre approche aux contraintes spécifiques de ce port. Contrairement aux études de Fatma [57] et Nobar KASSABIAN [23], qui disposent des informations sur les dates de départ des conteneurs, nous avons dû générer ces dates de manière aléatoire, car ces informations ne sont pas disponibles au port de Ghazaouet. Les travaux de Fatma [57] suggèrent que, après un remaniement, les conteneurs déplacés sont réorganisés selon des critères précis :

- Si une pile est vide, les nouveaux conteneurs y sont stockés par ordre décroissant de leurs date de départ.
- Si une pile n'est pas vide et que les dates de départ des conteneurs présents sont supérieures à celles des nouveaux conteneurs, les nouveaux conteneurs sont également stockés par ordre décroissant de leurs dates de départ.
- Dans le cas contraire, les nouveaux conteneurs sont stockés par ordre croissant de leurs dates de départ.

Dans ce cadre, les conteneurs déplacés après extraction sont rangés par ordre décroissant de leurs heures de départ dans une autre pile.

Nobar KASSABIAN [23], quant à lui, propose de positionner les nouveaux conteneurs à l'emplacement idéal en tenant compte du deuxième niveau de la pile, ce qui n'est pas le cas dans l'approche de Fatma [76], où seule la position idéale sans considération du deuxième niveau est envisagée. Pour répondre aux exigences spécifiques de cette étude, nous avons développé une méthode visant à réduire le nombre de remaniements prévus pour le premier et le deuxième niveau des piles d'une manière similaire à Nobar KASSABIAN [23]. En l'absence d'informations précises sur les dates de départ des conteneurs, notre solution repose sur la génération aléatoire de ces dates.

Cette approche permet de simuler les conditions réelles du port tout en optimisant la gestion des conteneurs pour minimiser les remaniements et améliorer l'efficacité opérationnelle.

III.4 Modélisation Mathématique

Dans notre travail, nous proposons un nouveau modèle mathématique basé sur le modèle No-bar KASSABIAN [23]. Le modèle proposé vise à déterminer le meilleur emplacement pour un conteneur importé, en tenant compte de toutes les contraintes physiques et opérationnelles du port maritime.

1. Indices

- c : conteneur
- s : pile
- i : emplacement dans une pile

2. Paramètres concernant les piles

- N_s : Nombre de piles tel que $S = \{1, \dots, N_s\}$
- f_s : Nombre d'espaces libres dans une pile s tels que $F = \{1, \dots, f_s\}$
- d_s : Dimension de la pile s (20 EVP, 40 EVP ou 45 EVP)
- dd_s : Date de départ du conteneur existant au sommet de la pile (premier niveau) s au début des opérations de stockage
- dd_{2s} : Date de départ du conteneur existant en deuxième niveau de la pile s au début des opérations de stockage

3. Paramètres concernant les conteneurs

- N_c : Nombre de conteneurs tels que $C = \{1, \dots, N_c\}$
- d_c : Dimension du conteneur c (20 EVP, 40 EVP ou 45 EVP)
- dd_c : Date de départ du conteneur c
- M : est un grand nombre entier

4. Variables de décision suivantes 2

$$x_{s,ic} = \begin{cases} 1, & \text{Si le conteneur } c \text{ est affecté à l'emplacement } i \text{ de la pile } s \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$y_{sc} = \begin{cases} 1, & \text{Si le conteneur } c \text{ est affecté à la pile } s \text{ et que sa date de départ} \\ & \text{est supérieure à un conteneur du premier niveau déjà dans } s \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$y_{2sc} = \begin{cases} 1, & \text{Si le conteneur } c \text{ est affecté à la pile } s \text{ et que sa date de départ} \\ & \text{est supérieure à un conteneur du deuxième niveau déjà dans } s \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

La fonction objectif :

$$\text{Minimiser } \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{s=1}^{N_s} (y_{sc} + y_{2sc})$$

La fonction objectif de ce modèle minimise le nombre de remaniements attendus pour les deux niveaux supérieurs.

Contrainte

$$\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} = 1, \quad \forall c \in C \quad (1)$$

La contrainte (1) garantit que chaque conteneur est stocké dans un seul emplacement.

$$\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} \leq 1, \quad \forall s \in S, \forall i \in F \quad (2)$$

La contrainte (2) vérifie que plusieurs conteneurs ne sont pas stockés simultanément à un même emplacement.

$$\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} = 0, \quad \forall c \in C; \quad dd_c > dd_s \quad (3)$$

La contrainte (3) tient compte des différences entre les dimensions des conteneurs, ce qui impose que les conteneurs ayant les mêmes dimensions soient affectés à une même pile.

$$\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} - \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,i+1,c} \leq 0, \quad \forall s \in S, \forall i \in F - 1 \quad (4)$$

La contrainte (4) garantit qu'une position intermédiaire vide est interdite entre les conteneurs stockés dans une même pile.

$$\sum_{c=1}^{N_c} y_{sc} = \sum_{c=1}^{N_c} f_s x_{s,ic}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5)$$

La contrainte (5) garantit que, si le conteneur c n'est pas affecté à une pile s , alors $y_{sc} = 0$. En d'autres termes, si un conteneur n'est pas affecté à une pile, alors il ne peut pas causer de mouvements improductifs dans cette pile.

$$(dd_c - dd_s) \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} M y_{sc}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (6)$$

La contrainte (6) impose que $y_{sc} = 1$, si le conteneur c est affecté à une pile s et provoque un remaniement attendu pour le premier niveau supérieur de la pile.

$$(dd_c - dd_{2s}) \sum_{i=1}^{f_s} x_{s,ic} M y_{2sc}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (7)$$

La contrainte (7) impose que $y_{2sc} = 1$, si le conteneur c est affecté à une pile s et provoque un remaniement attendu pour le deuxième niveau supérieur de cette pile.

$$\sum_{c=1}^{N_c} x_{s,ic} dd_c \leq \sum_{c=1}^{N_c} x_{s,i+1,c} dd_c, \quad \forall s \in S, \forall i \in F - 1 \quad (8)$$

La contrainte (8) vérifie que, dans chaque pile, les nouveaux conteneurs sont stockés par ordre décroissant de leurs dates de départ, ce qui permet de minimiser le nombre de remaniements.

$$\text{Pour } x_{s,ic}, y_{sc}, y_{2sc} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C; \quad \forall s \in S; \quad \forall i \in F \quad (9)$$

La contrainte (9) précise la nature de chaque variable de décision.

III.4.1 Explication du modèle à travers un exemple

Supposons que nous avons trois nouveaux conteneurs mesurant respectivement 45, 20 et 40 EVP, qui doivent être stockés dans une zone comprenant quatre piles différentes, comme illustré dans la figure III.1. Ces piles contiennent déjà des conteneurs, et nous devons prendre en compte la date d'arrivée des nouveaux conteneurs pour déterminer leur position.

Les positions disponibles pour les nouveaux conteneurs sont les suivantes : deux places dans la première pile, une dans la deuxième, une dans la troisième et trois dans la quatrième. Deux piles de dimensions 40 EVP sont disponibles, donc le conteneur de 40 EVP sera stocké dans l'une d'elles après comparaison des dates d'arrivée.

Les dates des niveaux 1 et 2 dans la deuxième pile sont 6 et 11, tandis que celles des niveaux 1 et 2 dans la troisième pile sont 5 et 7.

Dans notre modèle, les dates de départ des conteneurs sont générées aléatoirement car nous ne disposons pas de cette information à l'avance. Cependant, elles respectent la contrainte de classement des conteneurs dans l'ordre croissant de leurs dates d'arrivée. Prenons l'exemple d'un nouveau conteneur de 40 EVP avec une date de départ de 9. Ce conteneur peut être placé au-dessus des niveaux actuels de 6 dans la deuxième pile ou de 5 dans la troisième pile. Cela entraînerait un mouvement improductif dans les deux cas, mais si le conteneur est placé dans la troisième pile, il y aurait deux mouvements improductifs.

Notre modèle prend en compte les deux niveaux supérieurs de la pile pour minimiser les remaniements.

Dans la deuxième pile, le deuxième niveau a une date de départ de 11 et le premier niveau de 6. Pour le conteneur ayant une date de départ de 9, nous voyons que 9 est supérieur à 6 mais inférieur à 11, ce qui signifie qu'il n'y aurait qu'un seul mouvement improductif s'il est stocké dans la deuxième pile.

Dans la troisième pile, avec des dates de départ de 5 et 7, un conteneur avec une date de 9 entraînerait deux mouvements improductifs, car 9 est supérieur à 5 et 7.

Ainsi, la deuxième pile est le meilleur choix pour placer le nouveau conteneur, car elle ne génère qu'un seul mouvement improductif, contrairement à la troisième pile qui en générerait deux.

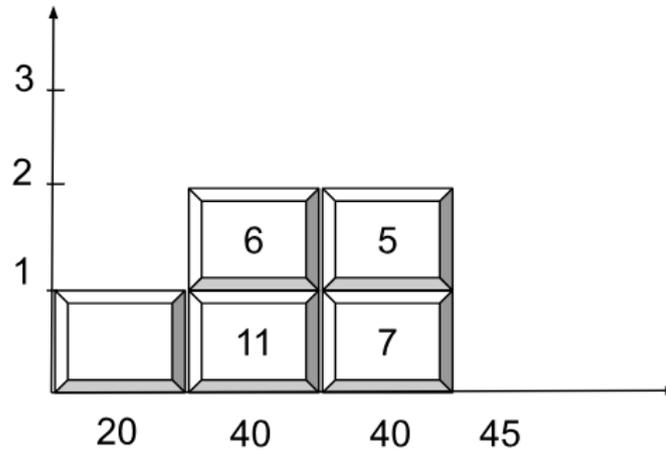


Figure III.1 Conteneurs existants dans la zone de stockage avec dates de départ .

Tableau III.1 Dimension des piles existants dans la zone de stockage.

Pile	1	2	3	4
Dimension	20	40	40	45

III.5 Méthodes de résolution

Dans cette section, nous détaillons les méthodes de résolution appliquées au problème de stockage de conteneurs, en commençant par l’optimiseur CPLEX ILOG. Développé par IBM, CPLEX est un solveur d’optimisation commercial réputé pour sa puissance et sa flexibilité.

Il est couramment utilisé pour résoudre divers types de problèmes d’optimisation mathématique, tels que la programmation linéaire (LP), la programmation quadratique (QP), la programmation à contraintes quadratiques (QCP), la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), la programmation quadratique en nombres entiers mixtes (MIQP) et la programmation à contraintes quadratiques en nombres entiers mixtes (MIQCP). CPLEX est reconnu pour son efficacité et sa robustesse pour des instances de taille modérée.

Nous proposons également l’utilisation de l’algorithme de recuit simulé (SA), une méthode métaheuristique connue pour sa capacité à éviter les minima locaux en acceptant temporairement des solutions moins bonnes afin d’explorer de nouveaux espaces de solution.

Il existe de nombreuses méthodes d’optimisation, incluant les méthodes exactes et approchées. Les méthodes exactes sont souvent limitées aux petites instances en raison de leur consommation élevée de mémoire et de capacité de calcul, donnant lieu à des temps d’exécution importants et non raisonnables [77].

Sachant que le problème de stockage de conteneurs, crucial en logistique portuaire, est un problème NP-Difficile, il est donc nécessaire d'employer des méthodes métaheuristiques pour obtenir des solutions approximatives en un temps restreint, surtout pour des instances réelles de grandes tailles où il est souvent difficile, voire impossible, de trouver la solution optimale par des méthodes exactes.

Ces méthodes sont choisies car elles offrent des solutions de qualité satisfaisante pour des problèmes de grande taille en un temps raisonnable. Les simulations numériques effectuées ont démontré l'efficacité et l'efficacité de ces algorithmes.

Il est toujours possible de trouver de meilleures solutions, mais cela augmenterait les coûts de l'approche utilisée.

Ces algorithmes ont ainsi permis d'accélérer le processus de stockage de nombreux conteneurs importés, entraînant des économies significatives de temps et de coûts, augmentant la productivité des ports, réduisant les erreurs humaines et améliorant la compétitivité face aux ports voisins.

La métaheuristique du recuit simulé proposée est exécutée à travers un programme codé en langage Python 3.10.11.

La résolution exacte du modèle est effectuée sous CPLEX Studio IDE 22.1.0. Un PC doté d'un processeur Intel(R) Core(TM) i5-8350U CPU @ 1.70GHz 1.90 GHz avec 8 GB de RAM est utilisé pour l'exécution du recuit simulé et le solveur CPLEX.

III.5.1 Algorithme du recuit simulé (RS) proposé

Dans un terminal à conteneurs avec une vaste cour de stockage dédiée aux opérations de gestion des conteneurs importés, nous présentons un algorithme de recuit simulé visant à minimiser le nombre de remaniements attendus pour les deux niveaux supérieurs des piles de conteneurs.

Cet algorithme de recuit simulé pour résoudre le problème de stockage de conteneurs se compose en quatre étapes principales : la représentation des solutions, la génération d'une solution initiale, la génération de solutions voisines, la fonction d'évaluation (fitness), et les paramètres de recuit simulé. Cet algorithme a démontré une grande efficacité en termes de temps d'exécution, produisant des solutions très proches de l'optimum.

Ainsi, nous avons appliqué cette méthode pour traiter notre problème spécifique de gestion des conteneurs.

a. Représentation des solutions (codage)

La méthode de codage proposée repose sur une approche algorithmique visant à optimiser

l'affectation des conteneurs dans un ensemble de piles préalablement défini. Pour le problème étudié, nous avons utilisé un codage binaire pour la variable de décision X_s (Figure III.2). Les deux autres variables de décision du modèle Y et Y_1 ne seront pas codées, car il s'agit de variables calculées à partir de l'état de l'affectation des conteneurs (l'état de la variable X_s).

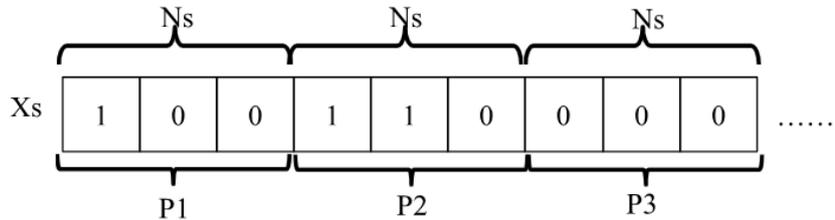


Figure III.2 Codage des solutions (X_s) .

Dans l'exemple de codage de la figure, nous avons 3 piles et chaque pile peut contenir 3 conteneurs au maximum. La pile 1 contient un conteneur, la pile 2 contient 2 conteneurs et la pile 3 est vide.

c. Création d'une Solution Initiale

La méthode de génération initiale est cruciale car elle fournit une base de départ pour l'algorithme de recuit simulé. Une solution initiale bien formée garantit que le processus d'optimisation commence à partir d'une configuration valide, respectant les contraintes de taille et de disponibilité des emplacements. En s'assurant que chaque conteneur est correctement placé dès le début, l'algorithme peut ensuite se concentrer sur l'amélioration de cette configuration initiale pour minimiser le nombre de remaniements. Dans notre étude, nous avons généré aléatoirement la solution initiale.

d. Génération des Solutions Voisines

La technique de génération de solutions voisines utilisée consiste à perturber d'une manière très simple la solution actuelle de l'algorithme du recuit simulé. En effet, nous obtenons la solution voisine en permutant entre deux éléments du vecteur de la solution. Notons que la permutation doit respecter les contraintes du modèle.

e. Fonction Fitness Fonctionnement de la Fonction fitness La fonction fitness est utilisée pour évaluer les solutions générées lors de l'optimisation. La fonction vérifie deux conditions temporelles pour chaque pile :

- Si la date de départ du conteneur du premier niveau de la pile s ($dds[s]$) est inférieure à la date de départ du conteneur c ($ddc[c]$) alors $Y_s[c]$ est mis à 1.

- Si la date de départ du conteneur du deuxième niveau de la pile s ($dd2s[s]$) est inférieure à la date de départ du conteneur c ($ddc[c]$) alors $Y2s[c]$ est mis à 1.

La somme des valeurs de Ys et $Y2s$ est calculée. Ces sommes représentent le nombre de violations des contraintes temporelles et qui représente le nombre total de remaniements.

Les étapes de l'algorithme du recuit simulé

Les étapes de l'algorithme du recuit simulé sont présentées comme suit [III.3](#) :

```
Algorithme Recuit simulé
Etape 1 : initialisation F(x) Génère solution initiale Sélectionner une température initiale T
> 0 x* = x xmin = x Etape
2 : Répéter
    x ← une solution du voisinage de F(x*)
    Δ = F(x) - F(xmin)
    Si Δ ≤ 0 Alors
        xmin ← x
        x* ← x
    Sinon
        x* ← x avec une probabilité P = e - Δ/T
    Fin si
    Mettre à jour la température
Jusqu'à condition d'arrêt
```

Figure III.3 *Algorithme Recuit Simulé* .

Les principales étapes de l'algorithme sont expliquées ci-dessous :

Initialisation des Variables :

- La solution courante (`current_solution`) et la meilleure solution trouvée (`best_solution`) sont initialisées à la solution initiale.
- Les coûts associés (`current_fitness` et `best_fitness`) sont également initialisés.

Boucle Principale de Recuit :

- Pour un nombre prédéfini d'itérations (`max_iterations`), la fonction génère une nouvelle solution voisine (`new_solution`) en modifiant légèrement la solution courante à l'aide de `generate_neighbour`.
- La nouvelle solution est évaluée et comparée à la solution courante. Si elle est meilleure (coût plus faible), elle est acceptée comme nouvelle solution courante et éventuellement comme nouvelle meilleure solution.

- Si elle est moins bonne, elle peut toujours être acceptée avec une certaine probabilité qui diminue avec la température, permettant au processus d'éviter de se coincer dans des minima locaux.

Refroidissement :

- Après chaque itération, la température est réduite en la multipliant par le taux de refroidissement (`cooling_rate`).

Retour de la Meilleure Solution :

- À la fin des itérations, la fonction retourne la meilleure solution trouvée et son coût associé.

III.6 Résultats numériques

III.6.1 Cas générale

Afin d'analyser les résultats fournis par le modèle proposé ainsi que les performances du recuit simulé, plusieurs expériences numériques ont été menées. Ces expériences ont été réalisées avec l'optimiseur CPLEX ILOG pour les petites instances et exécutées avec l'algorithme du recuit simulé pour les moyennes/grandes instances. Nous avons généré plusieurs instances pour les différentes expériences. Les piles peuvent contenir 6 conteneurs au maximum. En respectant les contraintes des paramètres, nous avons fixé le nombre de piles et de conteneurs entre 7 et 160. Nous avons généré aléatoirement les dates de départ des nouveaux conteneurs à stocker et des conteneurs déjà stockés dans les piles. Notons que les trois tailles de conteneurs utilisées sont 20, 40, et 45 EVP.

Les instances utilisées dans cette phase de simulation sont divisées en deux groupes : les instance [III.2](#).

Tableau III.2 Description des instances.

Description	Instances de petite taille	Instances de moyenne taille	Instances de grande taille
Dimension d'un conteneur ou d'une pile	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$
Capacité Maximale d'une pile	6 conteneurs	6 conteneurs	6 conteneurs
Date de départ d'un nouveau conteneur à stocker en jour	$1 \leq d_{dc} \leq 30$	$1 \leq d_{dc} \leq 30$	$1 \leq d_{dc} \leq 30$
Date de départ d'un conteneur qui est déjà au sommet de la pile en jour	$1 \leq d_{ds} \leq 30$	$1 \leq d_{ds} \leq 30$	$1 \leq d_{ds} \leq 30$
Nombre de conteneurs	$10 \leq N_c \leq 45$	$50 \leq N_c \leq 180$	$180 \leq N_c \leq 6000$
Nombre de piles	$7 \leq N_s \leq 20$	$30 \leq N_s \leq 100$	$100 \leq N_s \leq 3000$

Paramètres du recuit simulé

Les paramètres du recuit simulé ont été fixés après avoir exécuté plusieurs expériences. Ces paramètres sont listés dans le tableau III.3 .

Tableau III.3 Tableau des paramètres du recuit simulé .

Paramètre	Valeur
Température initiale (T0)	1000
Facteur de refroidissement	0.95
Nombre maximal d'itérations	2000

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4 . Les deux premières colonnes représentent N_s et N_c , où N_s indique le nombre de piles et N_c le nombre de conteneurs. La première partie du tableau est consacrée aux résultats du recuit simulé, tandis que la deuxième

partie est consacrée aux résultats du solveur CPLEX. Les cinq colonnes qui suivent désignent les résultats obtenus pour les cinq réplifications pour la même instance. Nous avons exécuté cinq réplifications à cause du caractère aléatoire des paramètres. La colonne AVG représente la moyenne des cinq réplifications. Enfin, la colonne temps indique le temps d'exécution moyen des cinq réplifications. Notons que les cases avec "ND" signifient que le CPLEX n'a pas été en mesure de trouver des résultats pour ces instances.

Tableau III.4 *Comparaison entre les resultats de Recuit simulé et Cplex.*

	Ns	Nc	Recuit simulé							Cplex						
			1	2	3	4	5	AVG	tps	1	2	3	4	5	AVG	tps
1	7	10	4	5	2	4	2	3,4	<1S	4	5	2	4	2	3,4	<1S
2	7	14	7	1	5	1	6	4	<1S	7	1	5	1	6	4	<1S
3	7	22	1	4	3	3	6	3,4	<1S	1	4	3	3	6	3,4	<1S
4	10	15	2	0	5	2	2	2,2	<1S	2	0	5	2	2	2,2	<1S
5	10	20	5	2	8	1	9	5	<1S	5	2	8	1	9	5	<1S
6	10	30	9	7	1	0	4	4,2	<1S	9	7	1	0	4	4,2	<1S
7	20	38	9	7	2	3	8	5,8	<1S	9	7	2	3	8	5,8	2S
8	20	40	5	3	1	3	6	3,6	<1S	5	3	1	3	6	3,6	3S
9	20	45	6	0	2	2	5	3	<1S	6	0	2	2	5	3	3S
10	30	50	6	3	3	2	9	4,6	<1S	6	3	3	2	9	4,6	4S
10	30	50	6	3	3	2	9	4,6	<1S	6	3	3	2	9	4,6	4S
11	30	60	6	4	5	4	2	4,2	<1S	6	4	5	4	2	4,2	4.5S
12	30	70	4	11	3	8	10	7,2	<1S	4	11	3	8	12	7,6	5S
13	40	75	3	0	2	6	6	3,4	<1S	3	0	2	6	6	3,4	7S
14	40	80	0	3	5	7	5	4	<1S	0	3	5	4	5	3,4	7S
15	40	90	0	4	1	2	1	1,6	<1S	0	2	1	1	0	0,8	7.5S
16	50	95	0	0	0	0	1	0,2	<1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.5S
17	50	100	0	7	0	4	4	3	<1S	0	7	0	4	4	3	12S
18	50	110	0	0	2	1	2	1	<1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10
19	60	100	0	0	0	0	0	0	<1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10
20	60	120	1	1	0	7	1	2	<1S	0	0	0	4	0	0,8	16S

21	60	130	11	0	0	0	0	2,2	<1S	11	0	0	0	0	2,2	16S
22	100	180	3	2	3	2	0	2	1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
23	100	200	3	2	12	3	1	4,2	1.5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
24	100	220	7	13	15	6	5	9,2	1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	150	280	4	11	8	5	15	8,6	2.5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	150	300	9	7	8	9	19	10,4	1.5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27	150	350	41	30	17	20	38	29,2	3S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
28	200	380	20	11	28	11	21	18,2	4S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	200	400	14	28	27	29	23	24,2	4.5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30	200	420	35	33	41	44	29	36,4	5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31	250	450	40	54	36	27	34	38,2	6S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
32	250	500	59	36	48	45	50	47,6	7S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
33	250	550	76	67	49	50	69	62,2	7S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
34	300	580	89	62	69	54	67	68,2	8S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
35	300	600	72	75	77	73	64	72,2	9S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
36	300	620	68	72	75	64	80	71,8	9S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
37	500	900	156	137	169	176	170	161,6	20S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
38	500	1000	165	165	216	186	181	182,6	19S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
39	500	1200	280	280	246	262	273	268,2	22S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
40	1000	2000	560	ND	ND	ND	ND	ND	167S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
41	2000	4000	1406	ND	ND	ND	ND	ND	360S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
42	3000	6000	2211	ND	ND	ND	ND	ND	1320S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Interprétation des résultats

Il est clair que le temps d'exécution de CPLEX et du recuit simulé augmente avec la taille des instances.

- **Petites instances :** Les instances de petite taille se situent entre $(N_s = 7, N_c = 10)$ et $(N_s = 20, N_c = 45)$.
- **Moyennes instances :** Les instances de taille moyenne se situent entre $(N_s = 30, N_c =$

50) et ($N_s = 60, N_c = 130$).

- **Grandes instances :** Les instances de grande taille commencent à partir de ($N_s = 100, N_c = 180$).

Nous constatons que pour les petites et moyennes instances, le recuit simulé parvient généralement à égaler les performances des solutions exactes obtenues par CPLEX, à quelques exceptions près (par exemple, les instances 14 et 15). Cela confirme l'efficacité de l'algorithme de recuit simulé proposé pour ces tailles d'instances.

Pour les petites et moyennes instances, nous remarquons également que le recuit simulé surpasse largement CPLEX en termes de temps d'exécution. En effet, le recuit simulé parvient à obtenir des résultats en moins d'une seconde, tandis que CPLEX prend entre 3 et 12 secondes pour produire des résultats similaires.

Comme prévu, CPLEX rencontre des difficultés à trouver des solutions pour les grandes instances, car celles-ci nécessitent des capacités de mémoire et de calculs très importants. En revanche, le recuit simulé, grâce à sa nature heuristique, parvient à obtenir des solutions acceptables en un temps raisonnable, même pour des instances de grande taille.

En conclusion, nous pouvons affirmer que le recuit simulé et les méthodes heuristiques en général sont nécessaires pour résoudre le problème de sélection de couverture (PSC), qui est de nature NP-difficile. Ces méthodes offrent un bon compromis entre qualité des solutions et temps de calcul, surtout pour les instances de grande taille où les méthodes exactes comme CPLEX deviennent impraticables.

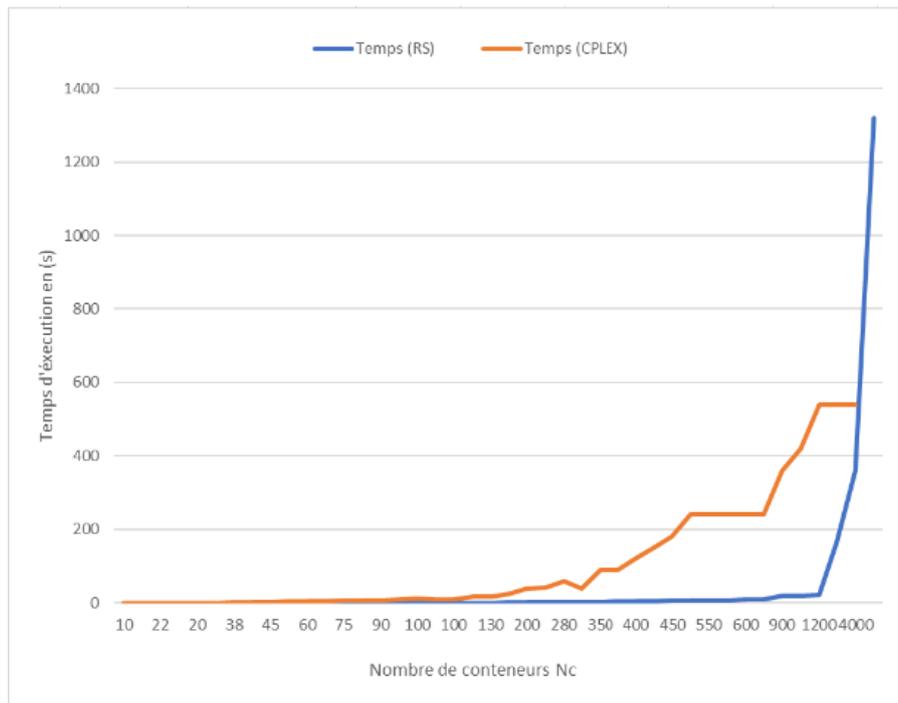


Figure III.4 Temps d'exécution de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Nc.

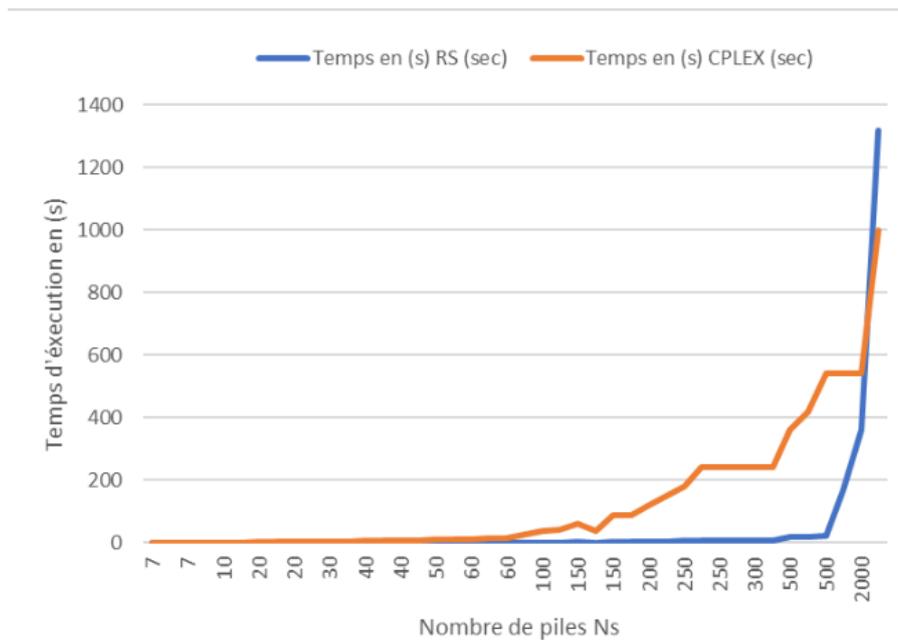


Figure III.5 Temps d'exécution de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de Ns.

Les courbes des figures illustrent clairement les performances du recuit simulé en termes de temps d'exécution. En effet, pour les résultats obtenus par CPLEX, le temps d'exécution augmente de manière exponentielle avec l'accroissement de Ns et Nc.

En revanche, le temps d'exécution obtenu par le recuit simulé reste inférieur à une seconde pour les petites et moyennes valeurs de ces paramètres. Ces résultats démontrent l'efficacité du recuit simulé, en offrant un temps de calcul nettement inférieur à celui de CPLEX.

III.6.2 Etude de cas : Port de Ghazaouet

Compte tenu de l'importance de la problématique de l'organisation des conteneurs dans les ports maritimes, notre étude se concentre sur le port de Ghazaouet au nord du Tlemcen, où l'objectif de s'attaquer au problème de stockage de conteneurs entrants notamment en minimisant le nombre de mouvements improductifs.

En raison de son emplacement stratégique, de l'investissement soutenu et d'une gestion efficace, le port de Ghazaouet est l'un des principaux ports d'Algérie. Situé à l'extrémité ouest de l'Algérie, ce port joue un rôle crucial dans le commerce maritime de la région. Ghazaouet se trouve sur la côte méditerranéenne, ce qui facilite les échanges commerciaux avec l'Europe et d'autres régions méditerranéennes.

Selon Vis et al.[78], un terminal à conteneurs peut être divisé en deux zones : la zone de quai et la zone de stockage. La zone de quai comprend la section d'arrimage des navires et des grues de quai (QC) qui chargent et déchargent les conteneurs, tandis que la zone de stockage est une surface utilisée pour le chargement, le déchargement et le transbordement temporaires des conteneurs. Notez que la zone de quai du port de Ghazaouet ne dispose que de deux grues à quai (QC) utilisées pour soulever les conteneurs du navire au camion et vice versa.

Quant à la zone de stockage du port de Ghazaouet, elle est divisée en trois zones parallèles au poste à quai appelées blocs : importation, exportation, conteneurs vides et cela pour deux types des conteneurs : Dry (normal) et reefer (frigorifique).

Ces zones sont équipées par des Reach stacker et des spreader qui sont utilisées pour empiler et retirer les conteneurs dans la zone de stockage. Chaque pile peut contenir jusqu'à trois conteneurs pleins (3 niveaux de gerbage) de même taille pour le Dry et au maximum deux conteneurs pour le Reefer (2 niveaux de gerbage) ainsi qu'un maximum de quatre conteneurs vides (4 niveaux de gerbage) pour les deux types Dry et Reefer .

Environ 48 navires accostent chaque année au port de Ghazaouet, soit une moyenne de 4 navires par mois. En 2023, le port a traité environ 12 487 conteneurs. L'import dans le port de Ghazaouet gère un flux de marchandises relativement important comparé à l'export.

Le port traite trois types de conteneurs de 20, 40 et 45 EVP. Les plus fréquents sont les conteneurs de 20 et 40 EVP. Le processus de stockage dans le port de Ghazaouet se déroule en plusieurs étapes. Au départ, les porte-conteneurs arrivent au quai du port, la manutention des conteneurs par les grues à plate-forme commence, les Quay Cranes (QCs) gèrent l'élévation des conteneurs par un opérateur du navire pour soulever la cargaison, une fois le palonnier verrouillé sur le conteneur, le conteneur est levé et placé sur un châssis de camion (remorque)

pour être emmené à l'endroit approprié de la zone de stockage selon le pointeur principale pour être stocké.

Le stockage des conteneurs entrants se fait par 1 seul dispositif, RS (Reach Stacker).

Les Reach Stackers déplacent les conteneurs au moyen d'une flèche avec des entretoises qui s'ouvrent en fonction de la taille du conteneur, ils peuvent empiler des conteneurs à haute densité.

Il peut être facilement transporté entre les terminaux et peut être utilisé pour gérer de nombreux types de marchandises. Cet équipement est bien adapté aux terminaux de petite à moyenne taille et polyvalents. Les instances utilisées dans cette phase de simulation sont divisées en deux groupes : les instance III.5.

Tableau III.5 *Description des instances.*

Description	Instances de petite taille	Instances de moyenne taille	Instances de grande taille
Dimension d'un conteneur ou d'une pile	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$	$d_c, d_s \in \{20, 40, 45 \text{ pieds}\}$
Capacité Maximale d'une pile	3 conteneurs	3 conteneurs	3 conteneurs
Date de départ d'un nouveau conteneur à stocker en jour	$1 \leq d_{dc} \leq 21$	$1 \leq d_{dc} \leq 21$	$1 \leq d_{dc} \leq 21$
Date de départ d'un conteneur qui est déjà au sommet de la pile en jour	$1 \leq d_{ds} \leq 21$	$1 \leq d_{ds} \leq 21$	$1 \leq d_{ds} \leq 21$
Nombre de conteneurs	$10 \leq N_c \leq 45$	$50 \leq N_c \leq 180$	$180 \leq N_c \leq 1000$
Nombre de piles	$7 \leq N_s \leq 20$	$30 \leq N_s \leq 100$	$100 \leq N_s \leq 500$

Tableau III.6 *Comparaison entre les resultats de Recuit simulé et Cplex cas de port de Ghazouet.*

	Ns	Nc	Recuit simulé							Cplex						
			1	2	3	4	5	AVG	tps	1	2	3	4	5	AVG	tps
1	7	10	1	0	2	0	1	0,8	<1S	1	0	2	0	1	0,8	<1S
2	7	14	0	3	1	2	1	1,4	<1S	0	3	1	2	1	1,4	<1S
3	7	22	2	0	2	1	0	1	<1S	2	0	2	1	0	1	<1S
4	10	15	0	1	0	1	1	0,6	<1S	0	1	0	1	1	0,6	<1S
5	10	20	0	2	0	1	8	2,2	<1S	0	2	0	1	8	2,2	1S
6	10	25	0	2	1	1	0	0,8	<1S	0	2	1	1	0	0,8	1S
7	20	38	3	1	0	7	3	2,8	<1S	3	1	0	7	3	2,8	1S
8	20	40	0	1	6	1	2	2	<1S	0	1	6	1	2	2	1S
9	20	45	1	1	2	0	2	1,2	<1S	1	1	2	0	2	1,2	1S
10	30	50	3	6	3	1	1	2,8	<1S	3	6	3	1	1	2,8	2S
11	30	60	3	1	0	3	1	1,6	<1S	3	1	0	3	1	1,6	2S
12	30	70	0	2	2	1	7	2,4	<1S	0	2	2	1	7	2,4	2S
13	40	75	1	0	4	0	2	1,4	<1S	1	0	4	0	2	1,4	3.5S
14	40	80	1	1	0	3	1	1,2	<1S	1	1	0	3	1	1,2	3.5S
15	40	90	0	9	1	0	6	3,2	<1S	0	9	1	0	6	3,2	3.5S
16	50	95	1	2	3	1	2	1,8	<1S	1	2	3	1	2	1,8	4S
17	50	100	0	0	0	0	1	0,2	<1S	0	0	0	0	1	0,2	4S
18	50	110	0	0	1	1	1	0,6	<1S	0	0	0	1	1	0,4	5S
19	60	100	4	2	1	4	2	2,6	<1S	2	2	1	2	2	1,8	5.5S
20	60	120	4	1	1	1	3	2	<1S	3	0	1	0	0	0,8	6.5S

21	60	130	1	0	0	5	1	1,4	<1S	0	0	0	0	1	0,2	7S
22	100	180	3	2	5	5	1	3,2	1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
23	100	200	3	0	7	2	3	3	1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
24	150	300	10	8	3	9	7	7,4	1S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
25	200	400	31	14	15	13	31	26	1.30S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
26	250	500	49	27	40	30	33	26	3.5S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
27	300	600	43	62	53	55	49	26	4S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
28	350	700	55	37	38	71	57	26	6S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
29	400	800	90	97	91	79	53	26	9S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
30	450	900	111	66	101	87	93	26	10S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
31	500	1000	137	135	126	105	135	26	12S	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Interprétation des résultats

Pour les petites et moyennes instances, le recuit simulé égalise généralement les performances de CPLEX, avec quelques exceptions (par exemple, les instances de 18 à 22). Il surpasse CPLEX en termes de temps d'exécution, obtenant des résultats en moins d'une seconde, contre 3 à 14 secondes pour CPLEX.

Pour les grandes instances, CPLEX rencontre des difficultés en raison de ses exigences en mémoire et calcul, tandis que le recuit simulé fournit des solutions acceptables en un temps raisonnable.

En conclusion, le recuit simulé est une méthode efficace et rapide pour le problème de sélection de couverture, surtout pour les grandes instances où CPLEX est impraticable.

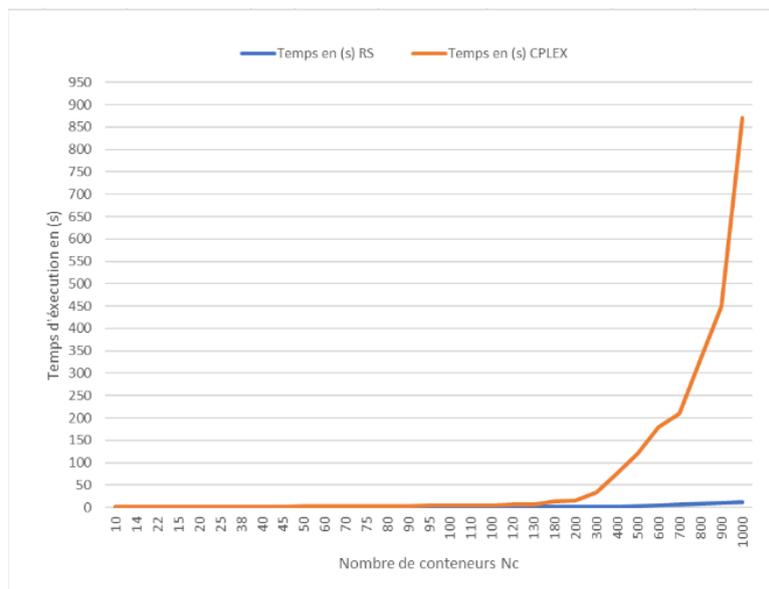


Figure III.6 Résultats graphiques de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de N_c .

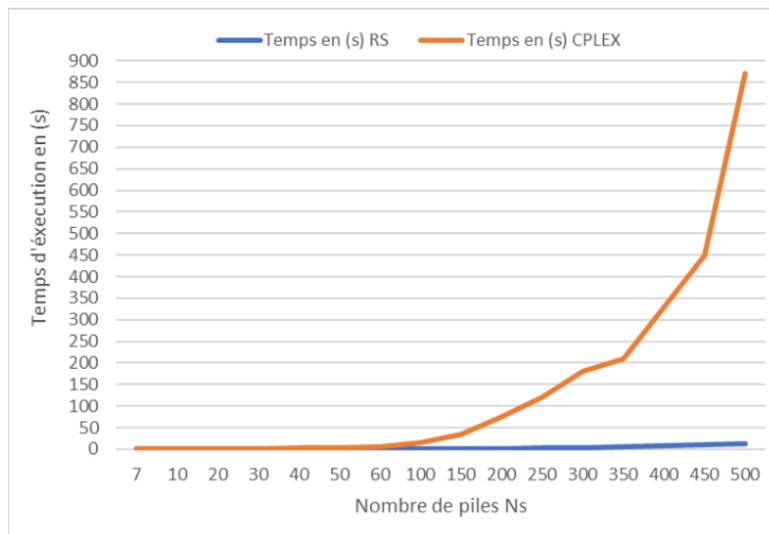


Figure III.7 Résultats graphiques de l'algorithme recuit simulé vs CPLEX en fonction de N_s .

Les courbes présentées dans les figures III.7 et III.6 montrent clairement les performances du recuit simulé en termes de temps d'exécution. En effet, avec CPLEX, le temps d'exécution augmente de façon exponentielle avec l'augmentation des valeurs de N_s et N_c . En revanche, le recuit simulé maintient un temps d'exécution inférieur à une seconde pour les petites et moyennes valeurs de ces paramètres. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité du recuit simulé, qui offre un temps de calcul considérablement plus faible que celui de CPLEX.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'examiner en profondeur l'étude et la résolution du cas statique en utilisant deux méthodes : CPLEX et le recuit simulé. Nos résultats montrent une distinction

claire dans les performances de ces algorithmes en fonction de la taille des instances.

Pour les petites et moyennes instances, le recuit simulé parvient généralement à égaler les performances des solutions exactes obtenues par CPLEX. De plus, le recuit simulé se distingue par un temps d'exécution nettement inférieur, obtenant des résultats en moins d'une seconde contre plusieurs secondes pour CPLEX. Cette efficacité en termes de temps de calcul confirme l'adéquation de l'algorithme de recuit simulé pour ces tailles d'instances.

En revanche, pour les grandes instances, CPLEX rencontre des difficultés considérables dues à ses exigences en mémoire et en calcul, rendant impraticable son utilisation. Le recuit simulé, grâce à sa nature heuristique, parvient à obtenir des solutions acceptables en un temps raisonnable, même pour des instances de grande taille.

L'étude de cas sur le port de Ghazaouet a renforcé ces conclusions, illustrant l'efficacité du recuit simulé dans un contexte réel de gestion des conteneurs. Les résultats comparatifs entre les deux méthodes confirment que le recuit simulé est non seulement plus rapide mais aussi capable de fournir des solutions de qualité équivalente à celles de CPLEX pour les petites et moyennes instances.

En conclusion, le recuit simulé et les méthodes heuristiques en général se révèlent indispensables pour résoudre des problèmes NP-difficiles comme la sélection de couverture. Elles offrent un excellent compromis entre la qualité des solutions et le temps de calcul, particulièrement pour les grandes instances où les méthodes exactes comme CPLEX deviennent impraticables. Ces méthodes heuristiques sont donc essentielles pour aborder efficacement des problèmes complexes et de grande envergure.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire approfondi sur le transport conteneurisé et la gestion du stockage des conteneurs offre une vue panoramique sur un domaine essentiel de la logistique moderne. À travers une exploration rigoureuse des aspects clés tels que le transport maritime, la conteneurisation, et les stratégies de gestion portuaire, il met en lumière l'importance critique des ports et des terminaux à conteneurs dans la chaîne d'approvisionnement globale.

En analysant les différents types de ports maritimes et les opérations spécifiques dans les terminaux, ce travail met en évidence les défis opérationnels et logistiques rencontrés dans la gestion efficace des conteneurs. La revue approfondie de la littérature sur les méthodes de résolution du problème de stockage des conteneurs apporte un éclairage précieux sur les avancées théoriques et les applications pratiques disponibles pour optimiser les processus portuaires.

Le cas d'étude statique du Port de Ghazaouet illustre concrètement comment les modèles mathématiques, tels que l'algorithme de recuit simulé, peuvent être appliqués pour améliorer la planification et l'efficacité opérationnelle. Cette approche démontre non seulement l'application des concepts théoriques dans des contextes réels, mais aussi leur potentiel à résoudre des problèmes complexes et à optimiser les ressources.

En conclusion, ce mémoire offre des perspectives précieuses pour les professionnels du secteur maritime et logistique en fournissant des outils et des méthodes pour améliorer la gestion des conteneurs et optimiser les performances des infrastructures portuaires. Il souligne l'importance continue de l'innovation et de la recherche dans le domaine pour répondre aux défis croissants de la mondialisation et de la complexité logistique.

Perspectives

Pour avancer dans la résolution du Problème de Stockage des Conteneurs (PSC) et répondre aux défis croissants de la logistique maritime, plusieurs avenues prometteuses peuvent être explorées :

- **Exploration de Métaheuristiques Hybrides :**

En plus des méthodes comme la recherche tabou et le recuit simulé, d'autres métaheuristiques comme les algorithmes génétiques et les algorithmes de colonies de fourmis peuvent être étudiées. Ces approches offrent des possibilités d'optimisation supplémentaires en permettant une exploration plus large de l'espace de solution.

- **Adaptation au Cas Dynamique :**

Bien que ce mémoire se soit concentré sur le cas statique du PSC, la transition vers une étude dynamique est essentielle. Cela implique de modéliser les variations temporelles dans les flux de conteneurs et d'ajuster les stratégies de stockage en temps réel. Cette évolution permettrait une gestion plus flexible et réactive des opérations logistiques.

- **Intégration de la Technologie Émergente :**

L'adoption de nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle (IA) et l'Internet des Objets (IoT) peut transformer la gestion des terminaux à conteneurs. Par exemple, l'utilisation de capteurs IoT pour surveiller en temps réel l'utilisation de l'espace de stockage et l'optimisation prédictive grâce à des algorithmes d'IA pourrait améliorer considérablement l'efficacité opérationnelle.

- **Collaboration Industrielle et Académique :**

Pour rester à la pointe de l'innovation, il est crucial de renforcer les partenariats entre les entreprises du secteur maritime, les instituts de recherche et les universités. Cela facilitera l'échange de connaissances, la validation des solutions proposées et la mise en œuvre de pratiques exemplaires à l'échelle mondiale.

- **Durabilité et Responsabilité Sociale :**

Avec une attention croissante portée à la durabilité environnementale et à la responsabilité sociale, l'optimisation des opérations logistiques doit également prendre en compte les pratiques respectueuses de l'environnement. L'intégration de critères de durabilité dans les stratégies de stockage des conteneurs peut conduire à une logistique plus verte et plus responsable.

En explorant ces perspectives, nous pouvons non seulement relever les défis actuels du PSC mais également anticiper et préparer le secteur maritime aux défis futurs, tout en contribuant à son développement durable et à son efficacité opérationnelle continue.

Bibliographie

- [1] Supply Chain. Transport multimodal, 2024.
- [2] Algérie-Eco. Commerce : des instructions pour faciliter la sortie des marchandises au niveau des ports, 2023.
- [3] FYKmag. Boulogne-sur-mer : le plus important port de pêche en france, 2023.
- [4] Bateaux.com. Dunkerque grand large, 2024.
- [5] Togo Port. Organisation des terminaux portuaires, 2023.
- [6] YICT. Article title, 2024.
- [7] UDN. Rmgc image, 2024.
- [8] Koinjaya. Business article, 2024.
- [9] Sany Europe. Reach stacker, 2024.
- [10] Continental Tires. Un véhicule autoguidé (agv) portuaire, 2024.
- [11] Wikimedia Commons. Chariot cavalier, 2024.
- [12] Logistique Mondiale des Clusters. Opérations portuaires, 2024.
- [13] Port de Ghazaouet. Port de ghazaouet, 2024.
- [14] Meriam Kefi. *Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un port*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille, 2008.
- [15] Swiver. Transport maritime : quels sont ses avantages et ses limitations?, 2022.
- [16] Swiver. Les spécificités relatives au transport maritime, 2023.
- [17] Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. Chapitre 01: Transport et logistique, 2024.
- [18] Balguerrie. Transport maritime: les types d'emballages, 2024.
- [19] Techniques de l'Ingénieur. Principes d'implantation et d'aménagement des ports maritimes: Définition et rôle des ports maritimes, 2024.

- [20] Alan Edward Branch. *Elements of shipping*. Routledge, 2007.
- [21] Martin Stopford. *Maritime economics* routledge. *New York, USA*, 2009.
- [22] Mihai Felea and Irina Albastroiu. Supply chain strategies. *Valahian Journal of Economic Studies*, 3(3):45, 2012.
- [23] Nobar Kassabian. *Optimisation du stockage des conteneurs dans un terminal portuaire*. PhD thesis, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2022.
- [24] Wikipedia. Port, 2024.
- [25] Imen Ayachi Hajjem. *Techniques avancées d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un port*. Theses, Ecole Centrale de Lille ; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), March 2012.
- [26] YA Saanen and R Dekker. Intelligent stacking as way out of congested yards? part 1. *Port Technology International*, 31:87–92, 2007.
- [27] H. J. V. I. F. and R. K. J. Carlo. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research*, 235(2):412–430, 2014.
- [28] Yachba Khadidja. *Vers une contribution dans le transport maritime de marchandises: Optimisation de placement des conteneurs dans un port maritime*. PhD thesis, Université d'Oran, 2017.
- [29] Samira Elazzouzi-Hafraoui, Yoshiharu Nishiyama, Jean-Luc Putaux, Laurent Heux, Frédéric Dubreuil, and Cyrille Rochas. The shape and size distribution of crystalline nanoparticles prepared by acid hydrolysis of native cellulose. *Biomacromolecules*, 9(1):57–65, 2008.
- [30] Yaowen Ma and Kap-Hwan Kim. A comparative analysis: various storage rules in container yards and their performances. *Industrial Engineering and Management Systems*, 11(3):276–287, 2012.
- [31] Mounira Taleb-Ibrahimi, Bernardo de Castilho, and Carlos F Daganzo. Storage space vs handling work in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(1):13–32, 1993.

- [32] Rommert Dekker, Patrick Voogd, and Eelco Van Asperen. Advanced methods for container stacking. *Container Terminals and Cargo Systems: Design, Operations Management, and Logistics Control Issues*, pages 131–154, 2007.
- [33] Ndèye Fatma Ndiaye, A DiarrassoubaI Yassine, and Ibrahima Diarrassouba. A branch-and-cut algorithm to solve the container storage problem. In *Proceedings of the ninth international conference on systems (ICONS)*, pages 38–40, 2014.
- [34] Hassan Rashidi and Edward PK Tsang. Container terminals: Scheduling decisions, their formulation and solutions. *Submitted to the Journal of Scheduling*, 2006.
- [35] D. Steenken, T. Winter, and U. T. Zimmermann. Online optimization of large scale systems. chapter Stowage and transport optimization in ship planning, pages 731–745. Springer, Berlin, 2001.
- [36] S. Hartmann. Generating scenarios for simulation and optimization of container terminal logistics. Working Paper 564, University of Kiel, 2002.
- [37] J. Böse, T. Reiners, D. Steenken, and S. Voss. Vehicle dispatching at seaport container terminals using evolutionary algorithms. In *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on Systems Sciences*, 2000.
- [38] L. M. Gambardella, A. E. Rizzoli, and M. Zaffalon. Simulation and planning of an inter-modal container terminal. *Simulation*, 7(2):107–116, 1998.
- [39] D. Ambrosino, M. E. Marina, and A. Sciomachen. Decision rules for the yard storage management. Technical report, University of Genova, 2002.
- [40] K. C. Moon. A mathematical model and a heuristic algorithm for berth planning. *Telecommunication Grooming*, 2(3), May/June 2001.
- [41] Y. M. Park and K. H. Kim. A scheduling method for berth and quay cranes. *OR Spectrum*, 25:1–23, 2003.
- [42] P. J. M. Meersmans and A. P. M. Wagelmans. Effective algorithms for integrated scheduling of handling equipment at automated container terminals. Technical Report 19, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, 2001.
- [43] P. J. M. Meersmans and A. P. M. Wagelmans. Dynamic scheduling of handling equipment at automated container terminals. Technical Report 33, Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, 2001.

- [44] R. L. Moorthy, W. Hock-Guan, N. Wig-Cheong, and T. Chung-Piaw. Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone controlled agv system. *International Journal of Production Economics*, 83:309–324, 2003.
- [45] C. I. Liu, H. Jula, and P. A. Ioannou. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(1):12–26, 2002.
- [46] Y. Cheng, H. Sen, K. Natarajan, C. Teo, and K. Tan. Dispatching automated guided vehicles in a container terminal. Technical report, National University of Singapore, 2003.
- [47] K. G. Murty, J. Liu, Y.-W. Wan, and R. Linn. A decision support system for operations in a container shipping terminal. *Decision Support Systems*, 39:309–332, 2005.
- [48] C. Zhang, J. Liu, Y. W. Wan, K. G. Murty, and R. J. Linn. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B*, 37, 2001.
- [49] C. Zhang, Y. Wan, J. Liu, and R. J. Linn. Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation Research Part B*, 36:537–555, 2002.
- [50] C. Zhang, R. Ye, S. Y. Huang, and W. J. Hsu. Two equivalent integer programming models for dispatching vehicles at a container terminal. Technical report, School of Computer Engineering, Nanyang Technological University, 2002.
- [51] T. Thurston and H. Hu. Distributed agent architecture for port automation. In *Proceedings of the 26th Annual International Computer Software and Applications Conference*, August 2002.
- [52] M. Rebollo, V. Julian, C. Carrascosa, and V. Botti. A multiagent system for the automation of a port container terminal. In *Autonomous Agents workshop on Agents in Industry*, Barcelona, Spain, 2000.
- [53] Kap Hwan Kim and Hong Bae Kim. Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *International Journal of Production Economics*, 59(1-3):415–423, 1999.
- [54] Khaoula Chebli. *Optimisation des mouvements des conteneurs dans un terminal maritime*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada), 2012.

- [55] Imen Ayachi Hajjem. *Techniques avancées d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un port*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2012.
- [56] Mingzhu Yu and Xiangtong Qi. Storage space allocation models for inbound containers in an automatic container terminal. *European journal of operational research*, 226(1):32–45, 2013.
- [57] Ndèye Fatma Ndiaye. *Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire*. PhD thesis, Université du havre, 2015.
- [58] Ndèye Fatma Ndiaye, Adnan Yassine, and Ibrahima Diarrassouba. An ant colony algorithm to solve the container storage problem. In *Forging Connections between Computational Mathematics and Computational Geometry: Papers from the 3rd International Conference on Computational Mathematics and Computational Geometry*, pages 63–73. Springer, 2016.
- [59] Dusan Ku and Tiru S Arthanari. Container relocation problem with time windows for container departure. *European Journal of Operational Research*, 252(3):1031–1039, 2016.
- [60] Virgile Galle, Vahideh H Manshadi, S Borjian Boroujeni, Cynthia Barnhart, and Patrick Jaillet. The stochastic container relocation problem. *Transportation Science*, 52(5):1035–1058, 2018.
- [61] Khadidja Yachba, Shahin Gelareh, and Karim Bouamrane. Storage management of hazardous containers using the genetic algorithm. *Transport and Telecommunication Journal*, 17(4):371–383, 2016.
- [62] Huiling Zhu, Mingjun Ji, and Wenwen Guo. Two-stage search algorithm for the inbound container unloading and stacking problem. *Applied Mathematical Modelling*, 77:1000–1024, 2020.
- [63] Mingzhu Yu, Zhuobin Liang, Yi Teng, Zizhen Zhang, and Xuwen Cong. The inbound container space allocation in the automated container terminals. *Expert Systems with Applications*, 179:115014, 2021.
- [64] Fred Glover. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences*, 8(1):156–166, 1977.
- [65] Bernard Gendron and Teodor Gabriel Crainic. A branch-and-bound algorithm for depot location and container fleet management. *Location Science*, 3(1):39–53, 1995.

- [66] François Ollivier. *Le problème de l'identifiabilité structurelle globale: approche théorique, méthodes effectives et bornes de complexité*. PhD thesis, Palaiseau, Ecole polytechnique, 1990.
- [67] Young-Ok Kim, Hyung-Kwoun Kim, Kyung-Sook Bae, Ju-Hyun Yu, and Tae-Kwang Oh. Purification and properties of a thermostable phytase from bacillus sp. ds11. *Enzyme and microbial technology*, 22(1):2–7, 1998.
- [68] Q Korbaa and Pascal Yim. Container assignment to stock in a fluvial port. In *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583)*, volume 7, pages 6180–6185. IEEE, 2004.
- [69] MA Brahami. *Contributions à la conception des réseaux logistiques: Résolution des problèmes intégrés de localisation et de conception des réseaux de transport sous contraintes environnementales et de capacités*. PhD thesis, PhD thesis, Université de Tlemcen, 2020.
- [70] J. Kang, K.R. Ryu, and K.H. Kim. Determination of storage locations for incoming containers of uncertain weight. In M. Ali and R. Dapoigny, editors, *Advances in applied artificial intelligence. Proceedings of the 19th International Conference on Industrial, Engineering and other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2006*, volume 4031 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1159–1168. Springer.
- [71] Ping Chen, Zhaohui Fu, A. Lim, and B. Rodrigues. Port yard storage optimization. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 1:26–37, 2004.
- [72] Mustapha Anwar Brahami, Mohammed Dahane, Mehdi Souier, and M'hammed Sahnoun. Sustainable capacitated facility location/network design problem: a non-dominated sorting genetic algorithm based multiobjective approach. *Annals of Operations Research*, 311(2):821–852, 2022.
- [73] Marco Dorigo and Luca Maria Gambardella. A study of some properties of ant-q. In *International conference on parallel problem solving from nature*, pages 656–665. Springer, 1996.
- [74] M. Caserta and S. Voß. A survey on multi-agent systems for container terminal management. In *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*. 2009.

- [75] H. J. Carlo, I. F. A. Vis, and K. J. Roodbergen. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. In *La complexité du problème*. 2014.
- [76] N. F. Ndiaye. *Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire*. PhD thesis, La complexité du problème, 2016.
- [77] Mustapha Anwar Brahami, Belgacem Bettayeb, and M'Hammed Sahnoun. Sustainable and flexible hub location problem. In *2023 International Conference On Cyber Management And Engineering (CyMaEn)*, pages 544–549. IEEE, 2023.
- [78] Iris FA Vis and Rene De Koster. Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European journal of operational research*, 147(1):1–16, 2003.

Résumé

Ce mémoire explore en profondeur l'optimisation de l'espace de stockage des conteneurs dans le contexte du transport conteneurisé. Le premier chapitre introduit l'impact révolutionnaire du transport conteneurisé sur la logistique mondiale, en mettant en lumière le transport maritime et l'importance cruciale des ports et des terminaux à conteneurs. Le deuxième chapitre examine les stratégies de gestion des conteneurs, telles que la ségrégation et le groupage, ainsi que les méthodes de résolution comme les métaheuristiques et les approches exactes. Enfin, le troisième chapitre propose une modélisation mathématique détaillée et une application pratique de l'algorithme du recuit simulé pour résoudre le problème de stockage des conteneurs, illustrant ainsi des solutions efficaces au port de Ghazaouet.

Mots clés: Transport conteneurisé, Transport maritime, Ports et terminaux à conteneurs, Conteneurisation, Métaheuristiques, Algorithme du recuit simulé, Optimisation de l'espace de stockage, Efficacité opérationnelle.

Abstract

This thesis delves deeply into container storage space optimization within the context of containerized transport. The first chapter introduces the revolutionary impact of containerized transport on global logistics, focusing on maritime transport and the critical importance of ports and container terminals. The second chapter explores container management strategies such as segregation and grouping, along with solution methods including metaheuristics and exact approaches. Lastly, the third chapter presents detailed mathematical modeling and practical application of the simulated annealing algorithm to address container storage challenges, showcasing effective solutions at the Port of Ghazaouet.

Keywords: Containerized transport, Maritime transport, Ports and container terminals, Containerization, Metaheuristics, Simulated annealing algorithm, Storage space optimization, Operational efficiency.

ملخص

يتناول هذا الأطروحة بعمق تحسين مساحة تخزين الحاويات في سياق النقل الحاويات. يقدم الفصل الأول تأثير النقل الحاويات على اللوجستيات العالمية بشكل ثوري، مع التركيز على النقل البحري وأهمية الموانئ ومحطات الحاويات. يستكشف الفصل الثاني استراتيجيات إدارة الحاويات مثل التفصيل والتجميع، إلى جانب أساليب الحل مثل الميتاهيرستيات والنهج الدقيق. وأخيراً، يقدم الفصل الثالث نمذجة رياضية مفصلة وتطبيقاً عملياً لخوارزمية التقنية المحاكاة لمعالجة تحديات تخزين الحاويات، مع إظهار حلول فعالة في ميناء غزوات.

الكلمات المفتاحية: النقل الحاويات بالنقل البحري، الموانئ والمحطات الحاويات، التحاويل الحاويات، الميتاهيرستيات، خوارزمية التقنية المحاكاة، تحسين مساحة التخزين، الكفاءة التشغيلية.