



École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes

Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

THÈSE DE DOCTORAT

OPTIMISATION ET SIMULATION DES OPERATIONS PORTUAIRES DANS UN TERMINAL A CONTENEURS

Présentée par

CHAFIK RAZOUK

Le 18/07/2019

Formation doctorale : Informatique

Structure de recherche : Smart Systems Laboratory

JURY

Professeur Ilham BERRADA

PES, ENSIAS, Université Mohammed V de Rabat

Président

Professeur Youssef BENADADA

PES, ENSIAS, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse

Professeur Jaouad BOUKACHOUR

Maître de conférences, HDR, Université du Havre, France

Co-Encadrant de thèse

Professeur Abdelhamid BENAINI

PES, UFR Science et Techniques, Université du Havre

Rapporteur

Professeur Mohamed EL MEROUANI

PES, FS Tétouan, Université Abdelmalik Saadi, Tétouan

Rapporteur

Professeur Ahmed ALAOUI ELHILALI

PES, FST Fès, Université Sidi Med Ben Abdellah, Fès

Rapporteur

Professeur Fatima Zahra MHADA

PH, ENSIAS, Université Mohammed V de Rabat

Examineur

Professeur Abdesalam KADRANI

PH, INSEA, Rabat

Examineur



Ecole Nationale Supérieure d'Informatique
et d'Analyse des Systèmes



جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat

Mémoire de Thèse

Pour l'obtention du titre :

Docteur en Informatique

Option :

Science des Technologies de l'Information

et de l'Ingénierie (ST2I)

Sujet :

Optimisation et Simulation des opérations portuaires dans un terminal à
conteneurs

Réalisé par :

Chafik RAZOUK

Encadré par :

Pr. Youssef BENADADA (ENSIAS)

Pr. Jaouad Boukachour (Université le Havre)

Année Universitaire 2018-2019

*“ Life is like riding a bicycle. In order to keep your balance,
you must keep moving ”*

Albert Einstein

À mes très chers parents

*À ma chère épouse Nezha, que je tiens à saluer fortement
ses efforts, ses encouragements ainsi que ses conseils qui m'ont
été le vrai support, ainsi que pour l'aide qu'elle m'avait
apporté tout au long de cette thèse*

À ma petite Aroua

À toutes mes sœurs et mon frère

*À toutes les personnes que ma réussite leur tient à cœur
Et à tous ceux et celles qui ont cru en moi, aidés et encouragés*

Remerciements

Ma thèse était une aventure unique et spéciale dans ma vie, elle m'a apporté plusieurs choses sur tous les plans. J'ai vécu des moments de joie et des moments difficiles tout au long de sa réalisation. Il m'est agréable de m'acquitter d'une dette de reconnaissance auprès de toutes les personnes, dont l'intervention au cours de ce projet, a favorisé son aboutissement.

Mes remerciements les plus sincères vont à M. Youssef BENADADA Mon encadrant au sein de l'ENSIAS – Université Mohamed V de Rabat, pour m'avoir encadré et encouragé tout au long de cette thèse, et prodigués ses directives précieuses et ses conseils pertinents qui m'ont été d'un appui considérable dans ma démarche. Je tiens également à remercier M. Jaouad BOUKACHOUR mon co-encadrant de l'université du Havre, pour avoir accepté de m'encadrer durant cette thèse, et aussi pour ses conseils qui m'ont été le meilleur support. Je souhaite que le fruit de ses efforts soit à la hauteur de ses attentes.

D'autre part, Je tiens à remercier vivement M. Mustafa Touzani et M. Anouar Baghdad au sein de l'autorité portuaire du port de Tanger pour leurs directives, qui m'ont aidé pour mener à bien un tel projet afin qu'il soit fructueux et profitable.

Je tiens à remercier tout le personnel de l'autorité portuaire de Tanger, pour leur soutien et pour leur générosité considérable quant à l'offre de l'information.

Je tiens également à adresser mes plus sincères remerciements à l'ensemble du corps enseignant de l'ENSIAS, pour avoir porté un vif intérêt durant notre formation, et pour nous avoir accordé le plus clair de leur temps, leur attention et leur énergie et ce dans un cadre agréable de complicité et de respect.

Enfin, que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail trouvent l'expression de mes remerciements et de ma considération.

Résumé

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur les problèmes de gestion portuaire qui impactent légèrement la productivité d'un terminal à conteneurs. L'étude que nous avons menée se base sur l'historique des travaux existants dans la littérature, soit en utilisant les données réelles de notre port d'étude, ou encore en utilisant une base de données qui contient l'historique des arrivés/départs des navires, ce qui nous a conduit à sélectionner trois problèmes majeurs dans un terminal à conteneurs : le problème de transfert des conteneurs par les véhicules de transfert interne des conteneurs, le problème d'allocation d'espace de stockage et le problème de la gestion de la cour de stockage, pour lequel nous avons fait appel aux deux premiers problèmes étudiés. Pour les trois problèmes traités, nous avons profité des mesures faites sur le terrain, aussi bien que des données issues de la base de données de notre port d'étude. Par ailleurs, l'utilisation des nouvelles plateformes existantes s'avère aussi intéressante pour la validation du modèle mathématique proposé (Système de gestion Maritime, Marin Traffic...). Nous avons réalisé une étude approfondie de la littérature afin de proposer une nouvelle modélisation mathématique, et des approches de résolution. Enfin les solutions ont été validées grâce au couplage de l'optimisation et de la simulation. Les objectifs de cette thèse consistent à offrir un plan de stockage optimisé pour aider les planificateurs de zones de stockage dans leurs tâches, et ensuite améliorer la productivité d'un terminal maritime, en rationalisant l'utilisation des équipements que ça soit les véhicules de transport interne ou les grues de cour, et finalement définir des itinéraires optimaux pour chaque véhicule pour la réussite des missions qui lui sont affectées. Les modèles mathématiques développés ont été validés et résolus premièrement par une méthode exacte (méthode de séparation et évaluation : Branch & Bound) et puis par des méthodes heuristiques (Bin Packing, Savings...) et enfin par des méta-heuristiques (Algorithme génétique, l'algorithme de colonie de fourmis, et une hybridation entre l'Algorithme Génétique et le Recuit Simulé). Les valeurs des variables de décisions, sont les entrées de notre modèle de simulation, pour montrer l'efficacité des approches proposées. Un cas pratique a été présenté dans le dernier chapitre pour le transfert et le stockage des conteneurs vides dans une aire de stockage appropriée.

Mots clés : Optimisation, Allocation d'espace de stockage, problème de transfert des conteneurs, Méta-heuristiques, historique des données, couplage simulation et optimisation.

Abstract

Throughout this thesis, we focus our work on port management issues that slightly affect the productivity of a container terminal. Either our study was based on the history of existing work in the literature, by using actual data from our port of study, or by using a database, that contains the history of arrivals / departures of vessels. Which led us to select three major problems in a container terminal : the problem of container transfer by internal container transfer vehicles, the problem of allocation of storage space and the problem of management of the Yard. For this last one, we were making reference to the first two problems studied. For the three problems treated, we used the data from theoretical field measurements, so we took advantage of existing data histories as well as existing new platforms to validate our proposed mathematical model (Marine management system, Marine Traffic ...). We realized a detailed state of the art of literature in order to propose a new mathematical modeling, and resolution approaches. Finally, the solutions have been validated thanks to the coupling of optimization and simulation. The main objectives of this thesis are : provide an optimized storage plan to assist storage area planners in their tasks; then, improve the productivity of a container terminal, by rationalizing the use of equipment whether it be transport vehicles internal or yard cranes, and ultimately define optimal routes for each vehicle for the successful completion of the containers assignment to the storage area. The mathematical models developed have been validated and solved firstly using an exact method (separation and evaluation method : Branch & Bound) and thus by heuristic methods (Bin Packing, Savings ...) and other meta-heuristic methods (Genetic Algorithm, ant colony algorithm, and hybridization between GA and RS). The numerical results of the decision variables, input from our simulation model, are presented to show the effectiveness of our approaches. A practical case has been presented in the last chapter for the transfer and storage of empty containers in an appropriate storage positions.

Key Words : Optimization, Storage Space Allocation, Containers Transfer Problem, Metaheuristics, Data History, Coupling simulation and optimization.

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
ACF	Algorithme de colonie de fourmis (Ant Colony Algorithm : ACA)
AG	Algorithme génétique
AGV	Véhicules guidé automatiquement (Automated Guided Vehicles)
ALV	Véhicules de chargement automatique (Automated Lifting Vehicle)
AP	Port Automatique (Automated Port)
ATT	Remorque de terminal automatique (Automated Terminal Trailer)
BAP	Problème d'allocation des postes d'amarrage (Berth Allocation Problem)
BAPC	Problème d'allocation des postes d'amarrage continue (Continuous Berth Allocation Problem)
BAPD	Problème d'allocation des postes d'amarrage discret (Discrete Berth Allocation Problem)
BP	Planificateur d'amarrage (Berth Planner)
BPA	Problème de Bin Packing (Bin Packing Problem)
CSP	Problème de stockage des conteneurs (Container Stacking Problem)
CTS	Ordonnancement des porte-conteneurs (Container Truck Scheduling)
DGAS	Stratégie développée de l'algorithme génétique (Developped Gynetic Algorithm Strategy)
DSP	L'assignataire des tâches (Dispatcher)
EDT	Temps prévu de départ (Expected Departure time)
ESSAP	Problème d'allocation de l'espace de stockage étendue (Extended Storage Space Allocation Problem)
EVP	équivalent vingt pied
FCFS	Premier-arrivé/Premier-servi (First come first served)
GMPH	Le nombre de mouvement par heure (Gross Moves Per Hour)
INCOTERM	un compromis contractuel entre l'acheteur et le vendeur qui spécifie le mode de livraison, la responsabilité de chacun d'eux ainsi que le mode paiement
ISO	Organisation international des standards (International Standards Organisation)
ITCTP	Problème de transfert des conteneurs par les camions interne (Internal Trucks Containers Transfert Problem)
MDPVRP	Problème de tournées de véhicules multi-dépôts (Multiple Depot Periodic Vehicle Routing Problem)
MIP	Modèle de programmation entier (Integer Programming Model)
NAP	Port non automatisé (Non Automated Port)
OEE	Mesure de l'efficacité de l'équipement (Overall Equipment Effectiveness)
QC	Grue de quai (Quay Crane)
QCAP	Problème d'allocation des grues de quai (Quay Crane Allocation Problem)
RC	Coordinateur de ressources (Resources Coordinator)
SC	Cavalier gerbeur (straddle carriers)
SSAP	Problème d'allocation de l'espace de stockage (Storage Space Allocation Problem)
TC	Terminal à Conteneurs
TDI	Projet de diagnostic et d'amélioration de tanger Med (Tanger Diagnostic and Improvment)
TRG	Taux de Rendement Global
TSC	Recherche Tabu avec l'opérateur de croisement (Tabu Search Crossover)
TSM	Recherche Tabu avec l'opérateur de mutation (Tabu Search Mutation)
TSP	Problème de voyageur de commerce (Traveling Salesman Problem)

TT	Remorque de terminal (Terminal Trailer)
TU	Taux d'utilisation
UNCTAD	Conférence des nations unies pour le commerce et le développement (United Nations Conference on Trade and Development)
UTS	Recherche Tabu unifiée (Unified Tabu Search)
VND	Variable Neighborhood Descent
VP	Planificateur de navire (Vessel Planner)
VRP	Problème de tournée de véhicules (Vehicle Routing Problem)
XT	Les camions de transfert externe (eXternal trucks)
YC	Grue de cour (Yard Crane)
YCAP	Problème d'affectation des grues de cour (Yard Crane Assignment Problem)
YOP	Problème d'optimisation de cour (Yard Optimization Problem)
YP	Planificateur de cour (Yard Planner)
YS	Stratège de cour (Yard Strategist)

Listes des figures

Figure 1 : Structure de base d'un conteneur [con 11].....	25
Figure 2 : Les 10 premiers ports à conteneurs du monde en 2016 (Trafic en millions d'EVP.....	27
Figure 3 : Les ports les plus intéressants en Afrique en 2016 (en Million EVP).....	27
Figure 4 : Composition d'un terminal à conteneurs [Razouk 15].....	28
Figure 5 : Vue globale d'un terminal à conteneurs.....	29
Figure 6 : Vue générale du port Tanger Med.....	31
Figure 7 : Cartographie de Tanger Med I et II.....	32
Figure 8 : évolution des conteneurs échangés en 2016 et 2017.....	34
Figure 9 : Ordonnancement des postes d'amarrage [Kim 08].....	37
Figure 9b : Etat de l'art détaillé des problèmes liés à la zone de quai.....	40
Figure 9c : Etat de l'art détaillé des problèmes liés à la zone de cour.....	47
Figure 9d : Etat de l'art détaillé des problèmes liés au YOP.....	56
Figure 9e : Méthodes de résolution d'un problème d'optimisation.....	60
Figure 10: Exemple d'une mutation.....	69
Figure 11: Exemple de croisement.....	69
Figure 12 : Processus de l'Algorithme génétique.....	70
Figure 13 : Etapes de conduite d'une approche de simulation.....	73
Figure 14 : Exemple d'une RMGC.....	78
Figure 15 : Exemple d'une YCC.....	78
Figure 16 : Exemple d'un AGV.....	79
Figure 17 : Cavalier gerbeur.....	79
Figure 18 : Exemple d'un camion de transfert interne.....	79
Figure 19 : Exemple de configuration d'un port qui utilise des YCCs.....	80
Figure 20 : configuration d'un port qui utilise des RMGCs.....	80
Figure 21 : configuration d'un port qui utilise des cavaliers gerbeurs.....	80
Figure 22 : une maquette qui présente la configuration de notre port d'étude.....	81
Figure 23 : Illustrations des contraintes du SSAP.....	91
Figure 24 : Exemple des instances réelles utilisées pour la validation du modèle proposé.....	95

Figure 25 : Exemple simplifié des instances du modèle pour quinze conteneurs.....	96
Figure 26 : Étapes d'exécution de l'algorithme de Recuit Simulé.....	99
Figure 27 : Configuration de la zone de stockage.....	100
Figure 28 : Affectation des conteneurs à la zone de stockage.....	100
Figure 30 : Organigramme de l'algorithme DGAS.....	104
Figure 31 : Répartition des taux de gaspillage par rapport au temps total de mesure.....	113
Figure 32 : Représentation du chemin parcouru par un camion pour transporter.....	115
Figure 33 : Représentation du flux des camions dans le terminal.....	119
Figure 34 : Illustration du principe de la méthode des économies (Savings).....	122
Figure 35 : Architecture d'insertion dans les nouvelles routes.....	125
Figure 36 : Horizon de planification actuel.....	127
Figure 37 : Configuration de la zone de Stockage.....	128
Figure 38 : Déplacement horizontal des YCs.....	131
Figure 39 : Numérotation d'une zone du yard en baies.....	133
Figure 40: La distance de séparation entre deux YCs.....	136
Figure 41: Première et dernière distance de Séparation.....	137
Figure 42 : les paramètres du modèle.....	139
Figure 43 : Méthodologie de résolution.....	142
Figure 44 : Solution initiale pour le RS.....	142
Figure 45 : Exemple d'application de PRS1.....	143
Figure 46 : Exemple de fonctionnement de PRS2.....	143
Figure 47 : Exemple de Croisement1.....	145
Figure 48 : Exemple de deux enfants après Croisement1.....	145
Figure 49 : Enfant avant correction.....	145
Figure 50 : Enfant après correction par Poids Min.....	145
Figure 51 : Ajout des conteneur absent 3,5 avec la méthode Poids Min.....	146
Figure 52 : Structure de pattern.....	147
Figure 53 : Représentation des baies de la cour de stockage.....	147
Figure 54 : Affectation des QCs aux navires.....	149
Figure 55 : Stratégie d'affectation des Bins aux baies de stockage	150
Figure 56 : Deuxième Stratégie d'affectation des conteneurs au pattern de visite	151

Figure 57 : Statistiques relatives au choix d'une position d'amarrage d'un navire.....	156
Figure 58 : Menu principal.....	156
Figure 59 : tableau de Bord (pour un seul navire).....	157
Figure 60 : Structure of the new ATT.....	158
Figure 61: Unloading process for the empty containers.....	159
Figure 62: Efficacité générale de l'ATT.....	159
Figure 63 : Stratégie de la cour de stockage de notre port d'étude.....	160
Figure 64. Screenshot from container terminal from Arena: Actual Model.....	162
Figure 65 : Modélisation du terminal à conteneur par Arena.....	162
Figure 66 : Comparaison entre Le GMPH du modèle 1 et celui du modèle 2.....	163
Figure 67. Temps d'opération ancien et nouveau modèle.....	163
Figure 68 : Vision transversale d'un navire à conteneurs.....	178
Figure 69 : Vision détaillée de yard.....	179

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats numériques des petites et moyennes instances générés par CPLEX.....	96
Tableau 2 : Résultats d'exécution de l'algorithme du recuit simulé.....	101
Tableau 3 : Résultats numériques de DGAS et CPLEX pour les petites instances.....	105
Tableau 4 : Résultats numériques de BPSSAP.....	110
Tableau 5 : Distances horizontales relatives aux blocs du Terminal.....	115
Tableau 6 : La matrice A_{ij} relative au terminal d'étude.....	115
Tableau 7 : Distances parcourus pour toutes les positions possibles d'un navire.....	116
Tableau 8 : Positions optimales d'amarrage d'un navire.....	116
Tableau 9 : récapitulation des distances parcourues pour toutes les positions d'amarrages pour chacun des deux navires.....	116
Tableau 10 : exemple de deux navires.....	117
Tableau 11 : Positions optimales d'amarrages pour deux navires.....	117
Tableau 12 : Notations du problème.....	119
Tableau 13 : Temps de manutention des conteneurs par les YCs.....	130
Tableau 14 : les mouvements manipulés, leurs temps prévus, leurs locations et leurs types.....	137
Tableau 15 : les précocités de charge, les délais de charge et les délais de décharge.....	138
Tableau 16 : la matrice des mouvements manipulés durant chaque intervalle du temps.....	139
Tableau 17 : Résultat de notre approche de résolution.....	151
Tableau 18 : Résultat d'exécution de l'AG.....	151
Tableau 19 : Résultat des variantes de notre approche NAMYOP.....	152
Tableau 20 : Résolution des instances avec NAMYOP	153
Tableau 21 : Synthèse des résultats.....	154
Tableau 22: Container Terminal Actual Operation Vs Operation with the proposed model.....	160

Table des matières

Introduction générale.....	17
Partie I : Contexte général et état de l'art	22
CHAPITRE 1 : Contexte général	23
1 Introduction	23
1.1 Les aspects du transport maritime et de la conteneurisation :.....	23
1.1.1 Préambule	23
1.1.2 Transport Maritime.....	23
1.1.3 Les étapes d'évolution du transport maritime.....	24
1.2 Les Terminaux portuaires	27
1.2.1 État des lieux.....	27
1.2.2 Zone d'opérations portuaires	28
1.3 Transport multimodal.....	31
1.3.1 Transport Routier.....	31
1.3.2 Transport Maritime.....	31
1.3.3 Transport ferroviaire.....	31
1.4 Contexte et terrain d'étude	32
1.4.1 Terminal à conteneurs : Tanger Med.....	32
1.4.2 Les Projets de l'amélioration continue	35
1.5 Problèmes des terminaux portuaires	36
1.5.1 Problèmes liés à la zone à quai	37
1.5.2 Problème liés à la zone stockage	41
1.6 Conclusion	49
Chapitre 2 : Etat de l'art des problèmes portuaires	50
2.1 Historique des méthodes de résolution des problèmes traités dans notre thèse	50
2.2 CONCLUSION.....	60
Chapitre 3 : Méthodes de résolution et Approche adoptée	61
3.1 Préambule	61

3.2 Méthodes de résolution Exactes.....	62
3.2.1 Méthodes des plans sécants (Cutting planes)	62
3.2.2 Méthodes énumératives	63
3.3 Méthodes de résolution approchées	64
3.3.1 Heuristiques	65
3.3.2 Les variantes des méta-heuristiques	66
3.3.2.1 Le Recuit Simulé	66
3.3.2.2 Recherche Tabou Unifié (Unified Tabu Search : UTS).....	68
3.3.2.3 Les Algorithmes Génétiques (AG)	68
3.3.2.4 Les algorithmes de colonies de fourmis (ACF)	71
3.4 Simulation	73
<u>3.5</u> Choix de l'approche de résolution.....	74
3.6 CONCLUSION	75
Partie II : Problèmes portuaires et approches de résolution.....	78
CHAPITRE 4 : Problème d'allocation de l'espace de stockage (SSAP).....	79
4.1 Préambule	79
4.1 Les stratégies de stockage	83
4.2 Formulation Mathématique.....	85
4.3 Méthodes de résolution	93
4.4 Conclusion	113
CHAPITRE 5 : Problème de Transfert des Conteneurs par les remorques du terminal (Terminals Trailers : TT)	114
5.1 Préambule	114
5.2 Problème de transfert des conteneurs par les camions de transfert :.....	116
5.3 Modélisation du problème	119
5.4 Méthodes de résolution	123
5.5 Conclusion	126
Chapitre 6 : Problèmes d'optimisation de la zone de Cour (Yard Optimization Problem)	127
6.1 Préambule	127
6.2 Contexte général du problème : YOP	128
6.3 Modèle mathématique.....	130

6.4	Approche de résolution	142
6.5	Récapitulatifs de résultats	152
6.6	Interprétation :.....	156
6.7	Interface d'utilisation	157
6.8	Cas d'application pratique	159
6.9	Conclusion	165
	Conclusion générale.....	166
	Bibliographie.....	173
	Annexe A	178
	Annexe B	179
	Annexe C	180
	Annexe D	183

Introduction générale

L'une des principales préoccupations des entreprises industrielles est d'améliorer l'efficacité de leur chaîne logistique, pour pouvoir organiser aux moindres coûts et au meilleur service rendu la continuité et la fluidité de l'écoulement de leurs marchandises. Pour faire face à la concurrence qui ne cesse d'augmenter surtout avec la mondialisation, les sociétés doivent optimiser les coûts de leur processus logistique. Effectivement, les coûts de transport effectués à travers la chaîne logistique et durant le processus de vente représentent généralement 10 à 25% du coût total de production. Cela peut représenter jusqu'à 57% des coûts logistiques, surpassant ainsi les coûts de stockage (31%) et d'entreposage (8%) (UNTCAD 2008). Ainsi l'acquisition des outils de planification plus efficaces est devenue une nécessité majeure.

Le Transport Maritime s'inscrit ainsi dans cette approche puisqu'il est classé premier moyen de transport préféré pour le commerce international. Il est considéré ainsi comme le maillon le plus important de la chaîne logistique maritime, qui contient différents acteurs qui interagissent entre eux. Le transport maritime a connu trois évolutions majeures :

- Notion de la conteneurisation : introduction de la notion des « containers » par Mc Lean depuis les années 1950
- Transport multimodal : interaction entre les différents modes de transport (maritime, routier, fluviale et rail)
- Informatisation et l'automatisation : qui a permis au transport maritime d'accompagner les exigences clients pour minimiser les coûts associés et le délai de traitement des navires

De nos jours, le transport maritime qui est par nature international, devient de plus en plus important et intéressant face au transport terrestre et ferroviaire. Ces évolutions ont principalement réduit le temps de voyage et les délais prévus de livraisons, sauf parfois face à des conditions climatiques difficiles où les délais réels peuvent dépasser légèrement les délais prévus. Les terminaux à conteneurs sont ainsi considérés comme un lieu d'échange entre différents acteurs maritimes : armateur, transitaire, consignataire, terminal à conteneurs et autorité portuaire.

Naturellement, durant les opérations de manutention, différentes problématiques peuvent être soulevées par les terminaux à conteneurs. Dans la littérature, [Steenken et al \[Steenken 04\]](#), [Stahlbock et Vob \[Stahlbock 08\]](#), les différentes activités de base d'un terminal à conteneurs sont menées dans deux zones principales :

- La zone à quai (quay zone)
- La zone de cour (yard zone)

Dans la zone à quai, différents problèmes d'optimisation sont traités dans la littérature:

- Allocation des postes d'amarrage (Berth Allocation Problem (BAP)) : Dans un terminal à conteneurs les postes d'amarrage disponibles sont connus à l'avance. Les travaux qui s'intéressent à ce type de problème étudient beaucoup plus l'optimisation des performances d'un terminal à conteneurs en diminuant les coûts liés au temps d'attente et les risques liés à cette opération
- Arrimage de conteneurs (Container Stowage) : une fois le navire est amarré, vient ensuite l'opération d'aconage qui vise à empiler/dépiler les conteneurs cibles depuis/vers le navire, en spécifiant leur ordre de chargement/déchargement et en gardant l'équilibre du navire
- Planification des grues à quai (Quay Crane Scheduling) : pour assurer l'opération d'aconage on fait appel aux grues à quai (Quay crane : QC), qui sont installées au bout de la zone à quais et qui prennent en charge les opérations de chargement/déchargement des conteneurs depuis le navire suivant le plan d'arrimage. La question qui se pose est le nombre de QC à affecter par navire et l'optimisation du nombre de mouvements par heure pour éviter les mouvements improductifs

La zone de cour d'un terminal à conteneurs est considérée comme une zone buffer « tampon » de stockage des conteneurs entrants et sortants, et ceux de transbordement. Les travaux existants dans la littérature peuvent se diviser en trois sous classes :

- Ordonnancement des grues de cour (Yard Crane Scheduling) : contrairement aux QC, les grues de cour (Yard Crane (YC)) sont installées dans la zone de stockage qui se composent d'un ensemble de : blocs, chaque bloc contient un ensemble de colonnes et lignes qui se croisent pour former des piles afin d'assurer les opérations de chargement, de déchargement et le stockage des conteneurs dans la zone de cour. Les YCs sont considérés comme la partie plus cruciale dans les opérations maritimes, en ce qui concerne leurs affectations aux blocs ou encore les interférences entre blocs, d'où la nécessité de rationaliser l'affectation de chaque conteneur au bon endroit pour éviter les coûts supplémentaires
- Planification du stockage des conteneurs (Yard Storage Planning) : le Problème d'allocation d'espace de stockage (Storage Space Allocation Problem : SSAP) a pour objectif de rationaliser les différents ressources matérielles et humaines dans un bloc de stockage, pour enfin déterminer les positions optimales de stockage en minimisant les mouvements et les opérations de manutention. L'objectif du SSAP est d'optimiser les coûts de manutention et de remaniement des conteneurs
- Ordonnancement des véhicules de transport interne (Container Truck Scheduling) : son objectif est l'acheminement des conteneurs depuis la zone à quai vers la zone de stockage. Cet acheminement doit être effectué suivant une très bonne définition du trajet à effectuer qui peut

optimiser le processus de manutention de conteneurs, et ensuite contribuer à l'augmentation de la productivité du terminal

Le traitement des sujets ci-dessus peut, sans aucun doute, réduire les coûts des opérations portuaires ainsi que leurs temps d'exécution, ce qui peut engendrer la réduction du coût total d'acheminement des marchandises.

La notion de conteneurisation se présente comme étant une solution qui peut permettre de réaliser des économies à travers ses dimensions standards (équivalent vingt pied : EVP), l'aspect de la sécurité est fortement présent, ainsi que l'optimisation des différentes opérations maritimes liées à la manutention, le chargement et le déchargement des conteneurs par type d'activité : import, export ou transbordement. Les coûts fixes liés à l'investissement dans un port à savoir : l'implémentation des zones à quai et la construction des zones de cour, l'aménagement de l'espace d'amarrage ainsi que l'acquisition et l'approvisionnement des équipements induit souvent des coûts relativement élevés. Le coût d'aménagement des espaces de stockage et celui de l'entretien des équipements ne sont pas négligeables. Un autre facteur qui influence les coûts variables, sont les délais de traitement et les mouvements improductives ou mouvements parasites qui impactent le processus de chargement/déchargement, ou le stockage des conteneurs dans la zone de cour.

Pour rester compétitif et efficace, les terminaux à conteneurs sont inscrits dans une approche d'amélioration continue. L'idée c'est de pouvoir optimiser les coûts et les délais d'attente en augmentant le nombre de mouvements par heure, le nombre annuel de conteneurs traités, ainsi que la sécurité au port des conteneurs.

Cette approche d'amélioration continue commence à utiliser de plus en plus les nouveaux concepts d'optimisation qui permettent aux différents acteurs de vérifier l'impact des décisions stratégiques, tactiques ou opérationnelles sur la productivité du port.

...Contributions

Prenons l'exemple du Maroc, le port de Tanger Med (TC1, TC2) compte traiter 8,2 Millions EVP en 2021 contre 3,4 Millions EVP en 2018 (croissance de 16% par rapport à 2017). L'accompagnement de cette augmentation exponentielle du nombre de conteneurs, devra se faire à travers une des deux perspectives suivantes :

- Augmentation de la taille du port : ce qui est le cas, par exemple, de Tanger Med 2, cela ce traduira par l'augmentation du nombre de conteneurs pour l'année 2019 à travers le lancement de la deuxième tranche de Tanger Med 2 (TC3, TC4) encore plus importante que la première (TC1, TC2) grâce à l'augmentation de la surface de stockage totale. D'une part, les coûts d'investissement sont assez importants, et d'autre part il reste un investissement relativement risqué surtout avec la concurrence des ports voisins

- Augmentation de la productivité : utiliser les ressources actuelles et rationaliser leurs utilisations, à travers des nouvelles stratégies d'optimisation et d'élimination des coûts supplémentaires. Solution adoptée par la plupart des ports qui sont inscrits dans l'approche de l'amélioration continue, qui peut optimiser clairement les coûts de traitement mais qui demande quand même un effort intellectuel et un background technique et fonctionnel

Vu l'avantage de la deuxième perspective, notre travail porte sur les problèmes liés à la zone de cour : stockage et transfert des conteneurs, et l'ordonnement des grues de cour.

L'objectif de ce travail est d'étudier dans un premier lieu, le problème de l'allocation d'espace de stockage aux conteneurs et l'ordonnement des grues de cour en définissant une nouvelle formulation mathématique et en utilisant des méthodes efficaces afin d'atteindre les objectifs fixés : l'optimisation des coûts d'affectation des conteneurs aux positions de stockage, en minimisant le coût des distances parcourues entre les positions des conteneurs déchargés depuis le navire et les positions dans la cour de stockage en tenant compte des différentes caractéristiques physiques et géographiques des conteneurs, ainsi qu'aux différentes contraintes du terminal à conteneurs, et en assurant une affectation optimale des grues de cour aux différentes zones de stockage.

Dans les terminaux portuaires, une grande partie de la manutention des conteneurs est consacrée aux opérations de chargement, déchargement et de transfert. Ces opérations sont effectuées à l'aide des différents équipements de manutention.

Une partie très importante du temps de transfert des conteneurs est effectuée par les véhicules internes « porte-conteneur » qui assurent l'acheminement des conteneurs entre la position d'accostage des navires et les zones de stockage, ainsi que vers le « gate ». Parmi les types de véhicules internes qu'on peut trouver dans les terminaux à conteneurs :

- Les tracteurs porte-conteneurs (Terminal Trailer (TT))
- Les cavaliers gerbeurs (straddle carriers (SC))

Deux possibilités pour le transfert d'un conteneur depuis la zone à quai vers la zone de cour :

- Un transfert par les véhicules portes conteneurs jusqu'à la zone de stockage, où la grue de cours récupère les conteneurs depuis le véhicule et les positionne dans leurs emplacements dédiés dans la pile, et inversement pour les conteneurs qui quittent la zone de stockage, qui sont récupérés par les grues et ensuite acheminés vers la guérite ou chargés sur un autre navire dans le cas de transbordement
- Les cavaliers gerbeurs (SCs) assurent la double fonction : transfert et stockage des conteneurs. On fait plus appel aux YCs pour stocker le conteneur dans la zone de stockage, après avoir récupéré le conteneur par un QC depuis la zone à quai

Notre deuxième objectif est d'étudier le problème du transfert des conteneurs par les tracteurs porte-conteneurs (TT), de définir une affectation optimale des grues de cour et en optimisant l'itinéraire des véhicules entre le lieu d'accostage et la position de stockage.

...**Organisation de la thèse**

Cette thèse a été répartie en deux parties qui englobent six chapitres afin de répondre aux objectifs ci-dessus. Dans la première partie, le premier chapitre est dédié à la présentation du contexte général : Transport Maritime, aspects de la conteneurisation, tandis que le deuxième chapitre traite l'état de l'art des problèmes portuaires. Le troisième chapitre introduit les méthodes de résolution existantes pour ce type de problèmes ainsi que l'approche de résolution adoptée.

Dans la deuxième partie, nous traitons nos contributions sur les trois problèmes étudiés. Le quatrième chapitre est ainsi dédié à l'étude du problème d'allocation de l'espace de stockage (Storage Space Allocation Problem : SSAP), le cinquième portera sur l'étude et la résolution du problème du transfert des conteneurs par les remorques du terminal (Terminals Trailers : TT), et le sixième portera sur les problèmes de la zone de cour (Yard optimization Problem : YOP) avec une fonction multi objectifs. Dans chaque chapitre une nouvelle modélisation mathématique est proposée ainsi qu'une approche de résolution pour chaque modèle étudié, avec une simulation d'un cas pratique dans le dernier chapitre.

La démarche de recherche que nous avons adoptée pour atteindre l'ensemble de nos objectifs, consiste essentiellement à :

- Étudier différents articles qui correspondent aux problèmes traités (focus sur les quinze dernières années 2003-2018)
- Utiliser les données issues du terrain suite aux différentes mesures quantitatives effectuées dans le port (projet d'amélioration continue). Utiliser aussi les instances de littérature pour pouvoir comparer notre approche de résolution avec celles de la littérature
- Utiliser la base de données des trois dernières années, pour analyser les temps d'arrivée et de départ des navires, ainsi que le nombre de conteneurs traités dans chaque opération
- Construire un modèle mathématique pour chacun des trois problèmes traités
- Proposer des heuristiques ou des méta-heuristiques pour les trois problèmes étudiés
- Évaluer la performance des algorithmes proposés sur des instances réelles
- Développer une plate-forme de simulation pour chaque problème étudié
- Proposer des pistes d'amélioration possibles pour les futures recherches

Partie I : Contexte général et état de l'art

Dans cette partie nous présentons le contexte général de notre thèse, en présentant les aspects généraux ainsi que le terrain de notre étude. Ensuite nous présentons l'état de l'art des problèmes portuaires avec les méthodes de résolution proposées, avec un focus sur les méthodes traitées dans cette thèse. Finalement nous passons à la présentation des méthodes de résolution, que ça soit les méthodes exactes ou les méta-heuristiques adaptées pour les problèmes portuaires.

CHAPITRE 1 : Contexte général

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous définissons les différentes composantes liées au transport maritime ainsi que les faits marquants de la littérature. Ensuite nous décrivons le concept de la conteneurisation, ses avantages et ses inconvénients. Nous abordons par la suite différents problèmes qui sont étudiés dans la littérature et qui sont liés aux trois composantes de la chaîne maritime.

1.1 Les aspects du transport maritime et de la conteneurisation :

1.1.1 Préambule

Étant donné que le transport se conçoit comme une composante fondamentale du cycle de production-consommation, la question du choix du mode de transport de personnes ou des frets se pose. Les entreprises et les industriels doivent prendre une décision par rapport à la nature des trajets à choisir pour acheminer des marchandises ou des personnes au bon endroit avec le meilleur coût possible, avec si possible, le respect de délai optimum et en veillant à garantir toutes les mesures de sécurité possibles. L'évolution des techniques de la production et la diversité des produits en import/export, compliquent le choix du mode de transport à choisir pour acheminer le fret d'un pays source à un pays destinataire, d'où la nécessité de poser les mêmes questions sur les mesures d'optimisation possible en évitant les surcoûts et les pénalités de retard de traitement. Ces choix dépendent d'un ensemble de facteurs relatifs à la nature des infrastructures des ports, à la nature des marchandises transportées, aux trajets, aux ports d'embarquement, au coût relatif à chaque opération et finalement au délai de livraison.

Pour rester compétitif, les autorités portuaires sont inscrites dans une approche d'amélioration continue qui vise à faire évoluer les techniques de gestion grâce à la standardisation des conteneurs. Cette standardisation nécessite une maîtrise de la chaîne de transport à travers des techniques normalisées de gestion, ce qui invite les différents acteurs de la chaîne logistique maritime à s'inscrire dans une approche de modernisation et d'optimisation pour répondre aux différentes exigences.

La notion de la conteneurisation a permis de standardiser et unifier le langage de communication des différents acteurs du transport maritime, d'optimiser les opérations maritimes sur les terminaux à conteneurs, ce qui s'introduit par l'augmentation du nombre de conteneurs échangés ainsi que la quantité de marchandises transportées.

1.1.2 Transport Maritime

De nos jours, le transport maritime qui est par nature international, devient de plus en plus important par rapport au transport terrestre et ferroviaire. Ceci s'explique par les différentes évolutions qu'a connu ce mode de transport. Ces évolutions ont principalement réduit le temps de voyage et les délais prévus de livraisons, sauf

parfois, face par exemple, à des conditions climatiques difficiles où les délais réels peuvent dépasser légèrement les délais prévus.

Au Maroc par exemple, le transport maritime représente plus de 85% des échanges de marchandises, le reste est réparti entre les autres modes de transport.

En 2016, à peu près 40000 milliards de Tonnes-Km de fret parcourent les océans annuellement par rapport à 10000 milliards pour le transport ferroviaire et 5000 milliards pour le transport routier, soit 75% de tout le fret mondial transporté (UNTCAD 2016). Ceci justifie les grands efforts des entreprises pour détecter des possibilités de réduction des coûts associés à l'utilisation de ce mode de transport.

A nos jours, le transport maritime continue son évolution à travers l'augmentation de la taille des navires, leur capacité, l'utilisation des nouvelles notions de gestion de trafic maritime, et les échanges de données informatiques entre les différents acteurs.

1.1.3 Les étapes d'évolution du transport maritime

L'historique des travaux effectués dans la littérature ont permis d'identifier trois étapes intéressantes dans l'évolution du transport maritime, ces étapes se caractérisent par une corrélation avec le principe de la standardisation de la conteneurisation.

1.1.3.1 Conteneurisation

La première évolution dans le transport maritime a été conduite par l'entrepreneur américain Mc Lean dans les années 1950 [Gazdar 08]. McLean reprend une pratique qui existait déjà dans le transport ferroviaire au début du XX^e siècle, où les compagnies de chemin de fer avaient mis au point des conteneurs en bois. L'idée qui a été utilisée par la suite par des militaires américains pour transporter en urgence du matériel militaire pendant la deuxième guerre mondiale. Il a fait plusieurs tentatives pour relier les camions aux navires suite aux différentes difficultés connues à l'époque. L'idée était d'utiliser la notion des boîtes « containers » pour acheminer les marchandises depuis le port américain Newark. Ensuite le développement de la notion de conteneurisation a eu lieu vers l'année 1965 sur l'Atlantique Nord, sa standardisation par la suite a eu lieu vers l'année 1974 pour devenir une boîte normée dont les standards internationaux ISO (International Standards Organisation).

1.1.3.2 Transport multimodal

En parallèle avec la première évolution, la notion du transport multimodal est la deuxième évolution, où plusieurs moyens de transport sont interfacés : navire, route, rail, barge. Les grandes multinationales ont tendance à décentraliser et internationaliser leur production dans les pays à main d'œuvre minimale, pour réaliser des économies d'échelle et des avantages structurels locaux. Plusieurs multinationales sont lancées dans cette approche pour pouvoir réduire le coût de production en réduisant le coût de la main d'œuvre locale. Ces multinationales s'appuient beaucoup sur l'utilisation du transport combiné navire-route-rail pour pouvoir organiser leurs opérations de cross-docking et d'import/export à moindre coût. Or, le fait d'éloigner la production du consommateur a augmenté ce rôle de transport maritime dans les flux commerciaux Midoro et

al. [Midoro 05]. Les autorités se sont alors lancées dans des nouvelles stratégies de transport porte à porte « door to door » qui proposent des services de transport intégrés en assurant l'acheminement de la marchandise de la porte de l'usine de fabrication jusqu'au navire et du navire à la porte du client final ceci dépendamment de l'INCOTERM (un compromis contractuel entre l'acheteur et le vendeur qui spécifie le mode de livraison, la responsabilité de chacun d'eux ainsi que le mode paiement).

1.1.3.3 Informatisation et automatisation

La troisième évolution est celle de l'informatisation et de l'automatisation. L'automatisation permet aux ports d'accélérer le processus de traitement et de minimiser le risque des erreurs humains. Quant à l'informatisation, elle a permis l'accélération de la circulation des marchandises en utilisant les échanges de données informatisées, ainsi que le suivi de la marchandise en temps réel. Elle a permis aussi de développer des nouveaux outils pour le traitement des arrivés/départs des navires. Les deux dernières évolutions se considèrent comme une extension du principe de la conteneurisation.

Les exigences des clients, la concurrence et l'évolution technologique (l'utilisation du digital et du Big-Data) ont incité les ports maritimes à consacrer un budget d'investissement en termes de ressources matériels et humains, ainsi qu'en terme de recherche et développement pour améliorer la qualité de leurs activités portuaires en tirant profit de la standardisation des conteneurs.

1.1.4 La standardisation des conteneurs

La notion de la conteneurisation a permis de standardiser et unifier le langage de communication des différents acteurs du transport maritime, d'optimiser les opérations maritimes sur les terminaux à conteneurs. Elle permet de mieux transporter les différents types de marchandises (vrac, frigorifiques, dangereuses, etc..).

1.1.4.1 Historique

La conteneurisation est un concept qui relie l'armateur, la compagnie maritime et le terminal à conteneurs, ce lien nécessite une exploitation radicalisée pour organiser tous les enchaînements à moindre coût. Les terminaux à conteneurs offrent différentes activités qui permettent de gérer les flux de conteneurs entre les navires, et les autres modes de transport.

Mc Lean, étant donné que c'était un transporteur routier à la base, a créé l'histoire des conteneurs grâce à son invention où il a pensé à embarquer directement des remorques sur les bateaux suite à la saturation des autoroutes reliant les différents ports de la côte ouest dans les années 1950. En 1956 sa compagnie transportait 58 remorques entre New York et Houston en un seul voyage. C'était le point de départ de Mc Lean, qui a continué ses inventions dans le but d'optimiser l'espace utilisé, en enlevant les châssis pour embarquer seulement les boîtes. Les trouvailles de Mc Lean ont introduit par la suite la généralisation de la conteneurisation et la standardisation en 1967.

1.1.4.2 Structure d'un conteneur

Plusieurs types de conteneurs sont échangés entre les ports, et ceci dépendamment des marchandises transportées : les conteneurs DRY « conteneurs tous usages », les conteneurs High Cube Pallet Wide utilisés

pour transférer des palettes de 120 cm, les conteneurs citernes, les conteneurs Open-Top « plein-ciel » spécialement conçus pour le transport de produits manufacturés lourds et / ou volumineux, les conteneurs Reefer « frigorifiques », les conteneurs Flat-Rack (avec ou sans parois rigides aux deux extrémités) et les conteneurs citernes qui se composent de deux éléments, la citerne et le cadre, ils sont utilisés pour le transport de liquide dangereux ou non, y compris les produits alimentaires. Les points communs entre les différents types de conteneurs sont illustrés dans la figure ci-dessous :

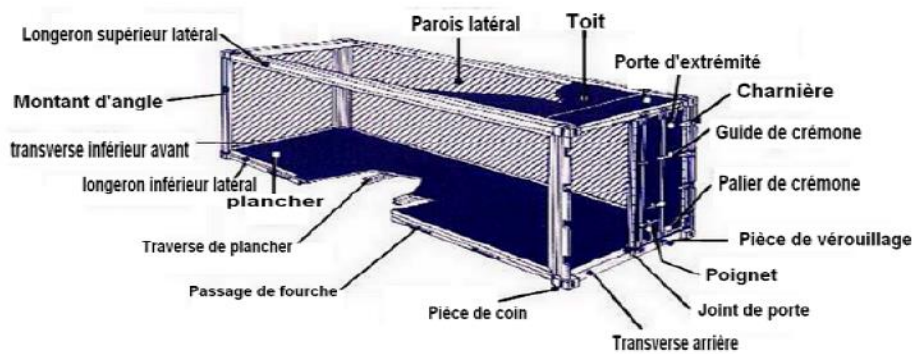


Figure 1 : Structure de base d'un conteneur [con 11]

1.1.4.3 Norme de conteneurs

La standardisation des conteneurs a exigé de chaque constructeur de conteneurs le respect des normes ISO (Organisation internationale de normalisation).

Le container DRY à usage multiple et compatible avec plusieurs types de marchandises, et c'est le type de conteneur le plus utilisé dans le monde entier.

D'après la norme ISO établie en 1967, on distingue trois types de conteneurs 20 pieds, 40 pieds.

- Le conteneur 20 pieds : les dimensions de ce type de conteneur sont respectivement Longueur x Largeur x Hauteur : L 6,096 m x l 2,438 m x H 2,591 m et un poids à vide de 2,2 tonnes à vide. Les études statistiques des ports conteneurisés sont souvent établies en unités équivalentes EVP « Equivalent Vingt Pieds ».
- Le conteneur 40 pieds : Même largeur et hauteur que le conteneur 20 pieds, la seule différence est au niveau de la longueur qui est égale à 12 mètres et du poids qui vaut 3,5 tonnes à vide.

1.1.4.4 Faiblesses liées de la conteneurisation

Les points forts de la conteneurisation peuvent se résumer en trois axes : les dimensions standards des conteneurs qui leur permettent de s'adapter aux équipements maritimes, la sécurité des marchandises transportées soit au niveau du navire ou au niveau du port et finalement l'adaptation au transport multimodal. En contre parti, la conteneurisation présente plusieurs limitations en termes d'adaptation des équipements dans les pays émergents, et aussi le transport des conteneurs vides pour garder l'équilibre du navire suite au déséquilibre du flux des marchandises.

Le côté inspection s'impose aussi pour garantir la sécurité des marchandises transportées aussi bien dans la mer que dans le territoire portuaire. Ainsi le choix du mode d'inspection est considéré aussi comme un facteur important et qui fait partie des contraintes physiques portuaires qui influencent l'acheminement des conteneurs à leurs destinations finales.

...**Inspection des conteneurs**

La question de la durée d'inspection se présente fortement comme un facteur qui impact directement le délai de livraison des conteneurs. Plusieurs recherches ont essayé de minimiser le temps d'inspection en proposant des systèmes de contrôle plus adéquat qui facilitent la sélection et l'inspection d'un échantillon de conteneurs en un temps masqué.

Cependant, d'après Longo et al. [Longo 10], il faut réduire les risques liés aux conteneurs suspects. Comment peut-on choisir un échantillon cible et représentatif des conteneurs à inspecter ? Lewis et al. [Lewis 13] ont proposé une méthode pour l'évaluation de la relation entre le délai de traitement des navires et l'échantillon des conteneurs à inspecter, l'heuristique "best first" était la base de leur travail, elle permet de simuler l'impact de ce type d'échantillonnage sur l'efficacité d'un terminal à conteneurs.

Les lieux d'inspection peuvent être soit sur place ou encore hors site, et ceci dépend des aspects de sécurité et d'organisation de chaque port. Ensuite, la sélection des conteneurs à inspecter et aussi l'un des préoccupations des autorités portuaires, de ce fait ils doivent se baser sur des critères prédéfinis pour sélectionner un échantillon des conteneurs soit en fonction du pays expéditeur, l'origine du conteneur, la nature de marchandises, etc. Après cette sélection, l'autorité portuaire sera amenée à utiliser les nouvelles technologies pour détecter les différentes violations et infractions au niveau du port en utilisant : des appareils de rayons X et de rayons Gamma ou encore un examen manuel, ou finalement une combinaison de différentes technologies.

Plusieurs travaux portent sur les modes d'inspection des conteneurs pour proposer et étudier les améliorations possibles. Brown et al. [Brown. 14] ont exposé une synthèse sur différentes technologies d'inspection de conteneurs en utilisant les rayon-X et les rayon-gamma.

1.2 Les Terminaux portuaires

Un terminal à conteneurs est un lieu de connexion entre la voie maritime, la voie routière, la voie ferroviaire et la voie fluviale. Avec sa structure gigantesque, il permet l'accueil et l'accostage des navires de différentes tailles, pour ensuite les servir en un temps raisonnable grâce aux nouvelles technologies de traitement et ses ressources matérielles modernes et ses ressources humaines qualifiées.

1.2.1 État des lieux

En Europe, la fin des années 1990 a connu la fin de la période de construction des zones industrialo-portuaires, du coup l'aménagement et la construction des terminaux à conteneurs ont été considérées comme les projets les plus intéressants dans la région. Grâce à la standardisation de la conteneurisation, le port de Rotterdam a été le premier terminal à conteneurs automatisé en 1993. Il est considéré donc comme une révolution dans le

domaine industrialo-portuaires, d'après les statistiques de 2016, les ports asiatiques sont les premiers au monde en termes de trafic de conteneurs :

	2016	Évol. %
1 - Shanghai	37,1	+1,6%
2 - Singapour	30,9	-0,1%
3 - Shenzhen	24,0	+0,9%
4 - Ningbo / Zhoushan	21,6	+4,6%
5 - Hong Kong	19,8	-1,3%
6 - Busan	19,4	-0,2%
7 - Guangzhou	18,8	+6,8%
8 - Qingdao	18,0	+3,3%
9 - Los Angeles / Long Beach	15,6	+1,8%
10 - Dubai Ports	14,8	-5,2%

Figure 2 : Les 10 premiers ports à conteneurs du monde en 2016 (*Trafic en millions d'EVP*)

Au Maroc par exemple, le port de Tanger Med est classé quarante seizième à l'échelle mondiale d'après la même étude ci-dessus, le challenge des autorités portuaires locales c'est de devenir un des 20 premiers ports à l'échelles internationale avec plus de 9M EVP à l'horizon 2019 (TMSA 2017).

Tanger Med est classé cinquième port méditerranéen et troisième port africain.

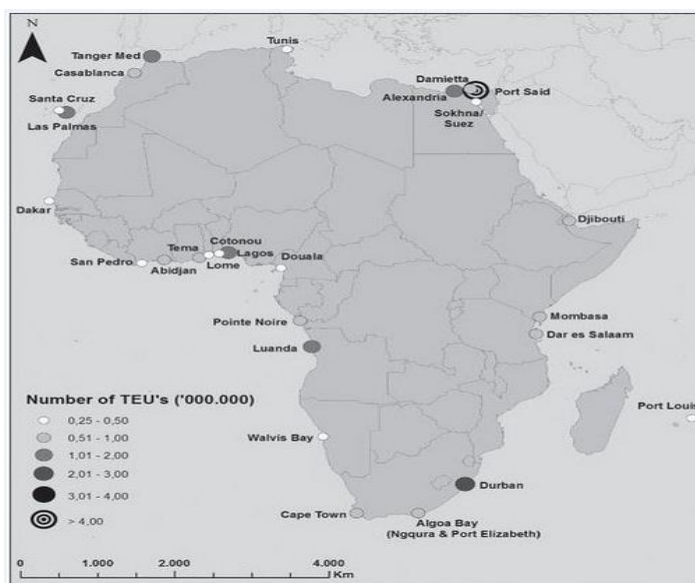


Figure 3 : Les ports les plus intéressants en Afrique en 2016 (en Million EVP)

1.2.2 Zone d'opérations portuaires

Dans un terminal à conteneurs, l'enchaînement des opérations de manutention est décrit par la figure ci-dessous :

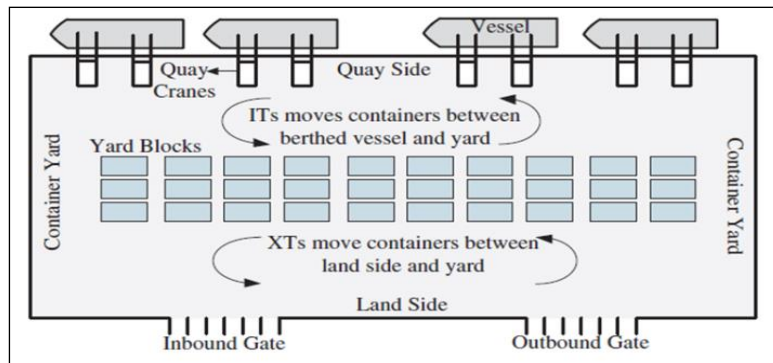


Figure 4 : Composition d'un terminal à conteneurs [Razouk 15]

Les opérations dans un terminal à conteneurs peuvent se diviser en 3 catégories. La première catégorie liée à la zone à quai qui concerne le chargement/ déchargement des conteneurs depuis/vers le navire par les grues à quai. La deuxième catégorie est le transfert, le stockage et la manutention des conteneurs dans la cour de stockage. Ces opérations sont effectuées par les grues de cour et des véhicules de transfert interne. La troisième catégorie concerne le transfert des conteneurs vers les modes de transport terrestres.

Pour l'opération d'import ou de transbordement, lorsqu'un navire accoste au bord des quais, des grues à quais (QC) commencent à décharger les conteneurs suivant un plan de déchargement (Stowage Plan), qui montre la position de chaque conteneur à décharger tout en gardant la stabilité du navire. Ils sont ensuite transférés par des véhicules de transfert interne (TT) entre la zone de quai et la zone de stockage. Les types d'équipements utilisés dépend de la nature du type des terminaux : automatisés ou semi-automatisés. Pour les terminaux semi-automatisés, on distingue plusieurs types de véhicules internes : le cavalier gerbeur (straddle carriers) qui peut alterner à la fois les deux opérations de transport et de stockage, le chariot élévateur qui est utilisé beaucoup plus dans la zone de stockage pour la manutention de la cour de stockage. Pour les terminaux automatisés, on distingue deux types de véhicules automatiques qui sont utilisés pour acheminer les conteneurs entre la zone de quai et la cour de stockage. Des véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicles : AGV) sur lesquels la grue de quai dépose le conteneur déchargé et qui être acheminé automatiquement vers la cour de stockage pour être récupéré par la grue de cour, et des véhicules élévateurs automatiques (Automated Lifting Vehicles : ALV) qui sont à l'inverse des AGV capables de récupérer et d'élever un conteneur automatiquement et de le déposer à disponibilité de la grue de cour. Une comparaison entre les AGVs et les ALVs dans un terminal automatisé a été élaboré par Hyo et al. [Hyo 11], dans ce travail ils comparent la productivité des AGV et des ALV en combinaison avec les grues à quais.

La décomposition de la zone de stockage est formée par un certain nombre de blocs. Chaque bloc est divisé en plusieurs baies, ces baies sont formées dans la plupart des cas par des lignes et des colonnes qui se croisent pour former des piles (Stack). La hauteur des piles comprend entre 3 et 5 niveaux, elle est définie par les autorités portuaire lors de la construction du terminal, et cela dépend des types des équipements utilisés. Les grues de cour sont affectées par bloc et peuvent se déplacer horizontalement d'un bloc à un autre en fonction

de la charge du travail. La figure ci-dessous donne une vue globale du terminal portuaire, sa décomposition et les différentes opérations qu'on peut y trouver :

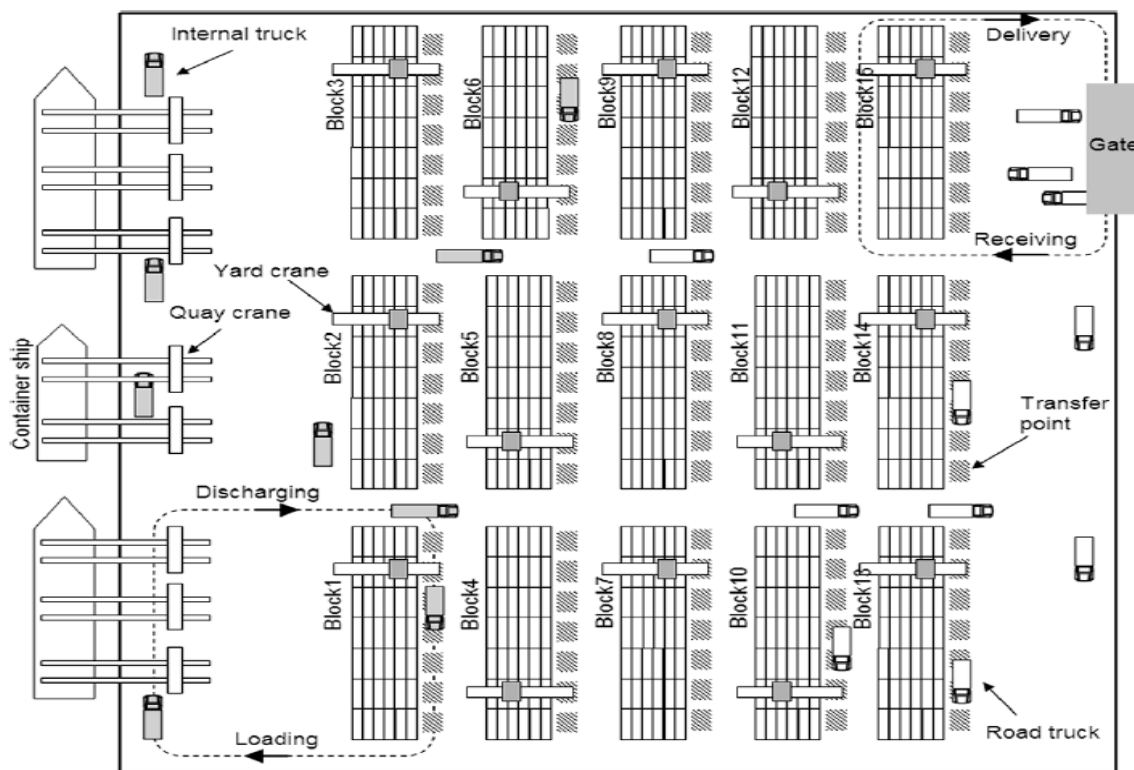


Figure 5 : Vue globale d'un terminal à conteneurs

Les conteneurs sont transportés et ainsi stockés temporairement dans une zone d'empilement « Stacking Yard ». Ceux qui sont destinés à l'exportation sont stockés dans la zone d'empilement jusqu'à ce qu'ils soient chargés sur des navires. Quant à ceux qui sont destinés à l'importation, ils sont déchargés du navire et ils seront stockés dans la zone d'empilement jusqu'à ce qu'ils soient réclamés pour être destinés vers le transport routier ou ferroviaire. Les conteneurs de transbordement sont déchargés d'un navire pour être chargés sur d'autres navires, en attendant ce chargement, ils peuvent transiter par la zone d'empilement. Une mauvaise gestion des différentes opérations depuis le terminal à conteneurs jusqu'au stockage dans la zone d'empilement peut causer des retards très importants qui peuvent affecter directement le flux des autres navires arrivant dans le port. Par conséquent, afin de maximiser la productivité d'un terminal à conteneurs, il est très important d'optimiser le traitement des conteneurs dans la zone stockage. Donc, une manutention efficace des conteneurs dans les terminaux est d'une importance cruciale pour la réduction des coûts de transport et la détermination des plans d'embarquement.

Notre travail concerne la zone de transport interne et le stockage des conteneurs. L'objectif est l'optimisation des coûts de transfert et de stockage des conteneurs. Pour se faire, nous avons utilisé les ressources qui sont actuellement disponibles dans le port de Tanger Med qui est semi-automatisé.

D'après Gazdar et al. [Gazdar 08], il existe trois méthodes de gestion des conteneurs dans un terminal à conteneurs :

- La première méthode d'ordre classique, se base sur les YCs qui peuvent se déplacer en transversale et parcourir les différents blocs et baies. Cas de l'export, le conteneur est chargé par le YC sur le véhicule de transport interne qui va le transporter vers le QC, et inversement dans le cas d'import
- La deuxième méthode d'ordre alternatif, se base sur l'utilisation des SCs. Deux inconvénients à relever pour l'utilisation des SCs : le coût d'investissement et l'espace de stockage requis (espace vide entre les rangées pour permettre aux SCs de maintenir la zone de stockage). Les SCs remplacent désormais le travail du YC et récupèrent/mettent les conteneurs à la disponibilité des QCs
- La troisième méthode qui n'est plus appliquée, cas de l'export par exemple, elle consiste à stocker les conteneurs sur des châssis pour les transférer vers les QCs. Cette méthode nécessite un grand espace de stockage

Dans notre thèse, nous avons utilisé la première méthode d'ordre classique, qui fait appel donc aux équipements qui sont actuellement utilisés dans le Port de Tanger Med : Véhicules de Transport interne, QCs et YCs.

1.3 Transport multimodal

Le transport multimodal est défini comme l'interconnexion de plusieurs types de transport. Pour le transport de marchandises par exemple, on fait appel à quatre types de transport : maritime, routier, ferroviaire et fluvial.

1.3.1 Transport Routier

Le transport routier se caractérise par sa grande adaptabilité et accessibilité. Le défi majeur de ce type de transport est le risque élevé des accidents. En cas d'accident, il faudra reprendre tout le cycle d'approvisionnement depuis le début, ce qui génère des pertes relatives pour les transporteurs et l'entreprise en termes de temps et de coûts ainsi que la confiance de ses clients. Les inconvénients de ce mode de transport sont divers : l'embouteillage, la pollution, la congestion et les interactions avec la circulation des personnes.

1.3.2 Transport Maritime

Plusieurs entreprises font recours à ce type de transport vu ses avantages et ses coûts qui sont relativement moins chers par rapport aux autres modes de transport (rapport volume/coût). La raison principale est que ce mode de transport permet d'acheminer des marchandises de pays lointains et permet la massification. Pour répondre aux besoins des industriels qui ne cessent d'augmenter de plus en plus, il y a des navires gigantesques qui peuvent transporter jusqu'à 17 000 conteneurs EVP [Normandie 15], ce qui est équivalent à 20 000 camions ou plus de 200 trains complets. Ceci nécessite donc une bonne gestion afin d'éviter les problèmes de stockages et de réduire les temps de service des navires à bord des quais.

1.3.3 Transport ferroviaire

Le transport ferroviaire est plus économique que le transport routier, en effet, c'est un mode de transport massifié des conteneurs. Son infrastructure qui dépend légèrement du transport routier pour acheminer la marchandise d'un point à un autre en post et pré-acheminement, est considéré parmi les points de faiblesse de

ce mode de transport. Les autres moyens de transport doivent s'adapter aux horaires fixes de départ et d'arrivée des trains, ce qui complique l'intermodalité par rapport aux autres modes de transport.

1.4 Contexte et terrain d'étude



Figure 6 : Vue générale du port Tanger Med

Le port de Tanger Med est situé à Oued Rmel dans le nord du Maroc à 22 km à l'est de Tanger et 46 km au nord de Tétouan sur le détroit de Gibraltar en Méditerranée. Il jouxte l'enclave espagnole de Ceuta, il est situé à 14 km à peine des côtes espagnoles, et se trouve sur la voie de passage du commerce maritime mondial Est-Ouest entre l'Asie, l'Europe et l'Amérique du Nord. Grâce à cette position stratégique, Tanger Med est devenu une plateforme logistique aux portes de l'Europe. En moins de 24 heures, une commande peut quitter le nord du Maroc et arriver au port de Barcelone ou celui de Marseille. Alors que de Shanghai, par exemple, il faut 22 jours par bateau (en plus de la traversée de zone dangereuse tel que le détroit de Malacca et le Puntland).

1.4.1 Terminal à conteneurs : Tanger Med

Le port est situé sur la seconde voie maritime la plus fréquentée au monde, le Déroit de Gibraltar avec plus de 120 000 bateaux par an. Son activité principale est le transbordement de conteneurs. Les porte-conteneurs géants débarquent leurs marchandises sans dévier de leur route et repartent aussitôt, à charge, ensuite, à de plus petits navires, ou feeders ships de desservir des ports de second ordre.

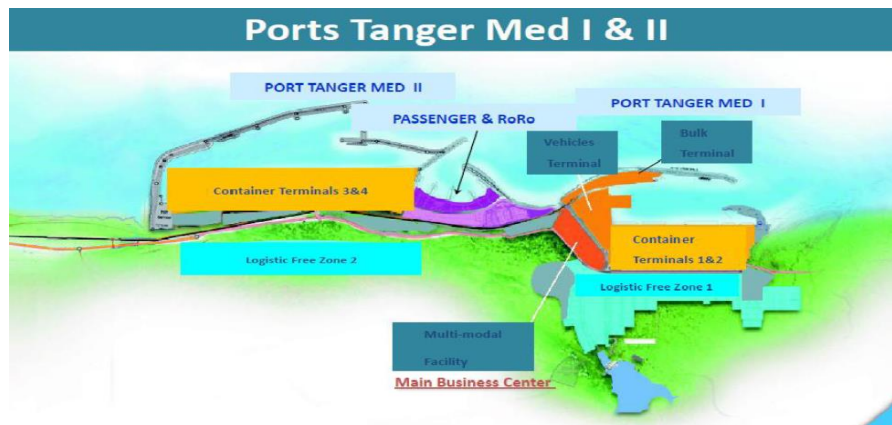


Figure 7 : Cartographie de Tanger Med I et II

La vision du port Tanger Med est d'être un port Leader en Méditerranée et Atlantique. Pour cela, la construction de Tanger Med 2, avec une capacité de 5,2 millions de conteneurs, va s'ajouter à celle de Tanger Med 1, pour devenir d'une capacité de 8,2 millions de conteneurs à l'horizon 2019.

Le complexe portuaire Tanger Med est un investissement global de 3 milliards d'euros, comprenant les ports Tanger Med 1 et 2, l'infrastructure, les superstructures et les équipements de l'ensemble des terminaux. Seul Tanger Med 1 est d'un investissement privé de 450 millions d'euros et un montant global d'investissement public de 500 millions d'euros. Concernant les infrastructures portuaires, le port Tanger Med contient, parmi d'autres, des terminaux à conteneurs, Terminal 1 et Terminal 2, d'une capacité totale de 3 millions d'EVP. Ils sont dotés d'un linéaire de quai de 1600 mètres avec 16 mètres de profondeurs à quai, couvrant une superficie totale de 80 hectares.

Le consortium formé entre A. P. Moller-Maersk et le Groupe AKWA s'est vu attribuer en date du 23 Novembre 2004 la concession relative à la conception, la réalisation et l'exploitation du Terminal à Conteneurs 1 du port Tanger Med.

APM Terminals Tangier S.A., établie le 17 mars 2005, œuvre à la réalisation et au développement d'un Terminal à Conteneurs de classe mondiale en apportant au projet la garantie d'un savoir-faire tant technologique que commercial, des valeurs précieuses et des hauts standards en termes de productivité, compétitivité, sûreté et sécurité. Le Terminal d'APM Terminals Tangier, leader sur le Bassin Méditerranéen, est en parfaite complémentarité avec APM Terminals Algeciras afin de consolider la position du Déroit de Gibraltar comme centre névralgique du commerce mondial. Le début des travaux de construction du Terminal à Conteneur 1, date du 2 Mai 2006, pour qu'il soit mis en service partiellement le 30 Juin 2007, et complètement le 30 Septembre 2007 de la même année, formant ainsi un investissement de 160 millions d'Euros.

APM Terminals Tangier compte aujourd'hui un effectif total de près de 1 000 personnes, constitué essentiellement de jeunes marocaines et marocains ayant bénéficié d'un important effort de formation, tant localement qu'à l'international grâce au levier que constitue le réseau de Terminaux du Groupe. Cet effort de formation porte également sur le déploiement par les dirigeants et cadres de la Société, de la méthodologie

“Lean Six Sigma” qui permet de s’imprégner de la culture “PEX” (Process Excellence) et de concrétiser des projets ayant des retombées significatives sur l’amélioration des coûts, des revenus et des performances.

Données Clefs

- Mise en service commerciale en Octobre 2007
- Capacité de 3.000.000 EVP
- Concession sur 30 ans
- EUR 140 M d’investissement initial
- Effectif de +/- 1000 personnes à l’horizon 2017
- Participation de 90% de APM Terminals International (Groupe Akwa : 10%)

Périmètre du Terminal

- 800 mètres de linéaire de quai
- 40 hectares de terre-pleins
- Voies ferrées de 1.600 mètres
- Accès direct par Autoroute le connectant au marché marocain

Equipment

- 8 portiques de grue Super-Post Panamax
- 26 portiques à roue (ECO-YC)
- 55 Tracteurs

Infrastructure portuaire

- Profondeur de 18 mètres sur 450 mètres de quai et de 16 mètres sur les 350 mètres restants
- Port en eau profonde, à moins de 90’ de temps d’approche c.-à-d. 2 miles nautiques de la route maritime principale

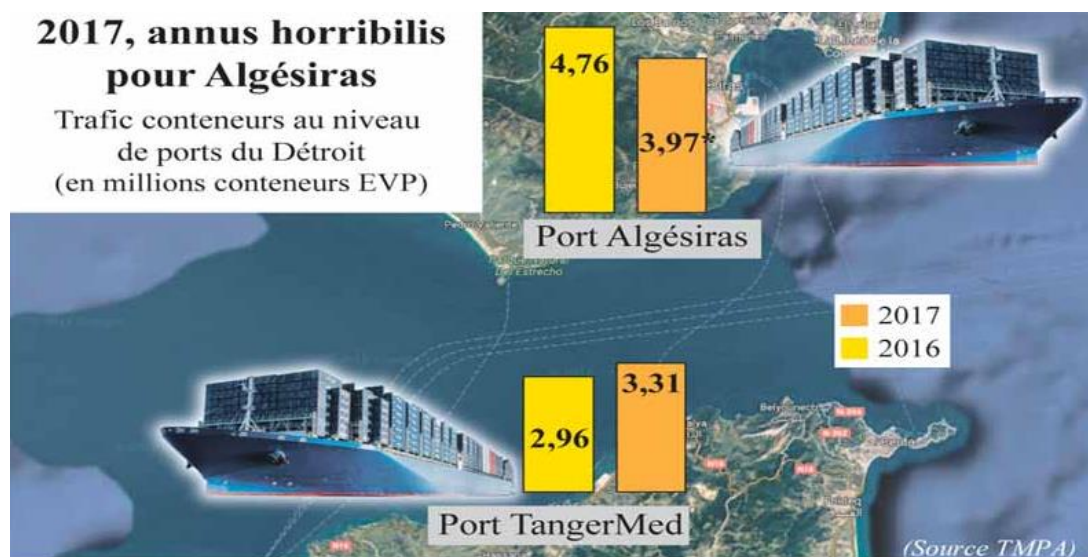


Figure 8 : Evolution des conteneurs échangés en 2016 et 2017

Les statistiques montrent que le port de Tanger Med est en progression exponentielle et ceci avec un total de 3,3 Million EVP échangés durant l'année 2017, une forte croissance en contrepartie d'une baisse de son concurrent, le plus proche « Port d'Algesiras ».

1.4.2 Les Projets de l'amélioration continue

Dans le cadre de l'amélioration continue de ses processus, l'autorité portuaire de Tanger Med a lancé un nouveau projet : TDI (Tanger Diagnostic and Improvment). TDI est un exercice de diagnostic visant la performance du terminal. Tandis que les opérations sont effectuées, les temps de cycle d'équipements ont été mesurés, analysés et des actions ont été prises pour éliminer les pertes.

A l'aide des équipes locales, les mesures sur les équipements concernés dans ce projet sont prises. Nous avons eu l'occasion d'assister à des séances de réflexion qui ont été organisées à la fois pour l'analyse des causes (*root cause analysis*) et la recherche des solutions (*solutions generation*). Le diagnostic a généré un pipeline d'action qui permettra d'améliorer la performance du terminal.

Les niveaux d'améliorations effectuées sont classés en 3 catégories en fonction de la difficulté de la mise en œuvre :

Faible difficulté :

- Ne nécessite pas un investissement
- Peut être mise en œuvre dans une période de temps relativement courte. (< 6 mois)

Difficulté moyenne :

- Nécessite uniquement l'acceptation de l'équipe locale
- Nécessite un petit investissement avec retour de bénéfice < 1 an
- Peut être mise en œuvre dans une période de temps moyenne (6 – 18 mois)

Difficulté élevée :

- Nécessite une négociation formelle avec le bureau d'administration
- Nécessite un investissement élevé
- Peut être mise en œuvre dans une longue période (1-2 ans)

Comme tout processus de planification, il existe plusieurs niveaux de planification : stratégique, tactique et opérationnelle, que ce soit pour les opérations de bord de mer ou celles en internes. Les niveaux de planification dans un terminal à conteneurs sont distingués selon l'horizon de cette planification en trois niveaux :

- **Planification stratégique** qui détermine la position, l'architecture et le nombre des équipements à utiliser pour un nouveau terminal, ainsi que le degré d'automatisation de ce terminal. La durée d'une décision stratégique est généralement de 4 ans
- **Planification tactique** qui détermine la structure du Yard, la disposition des différents types de conteneurs sur le Yard et l'organisation du trafic pour le transport horizontal. Sa durée est entre quatre semaines et quatre mois

- **Planification opérationnelle** qui détermine les plans de travail pour les ressources d'un terminal à conteneurs. Elle dure entre quelques secondes et quelques jours

Notre focus concerne les projets de difficulté moyenne d'ordre tactique et opérationnelle, pour lesquelles des axes de réflexion ont été proposés et testés afin de valider la performance des solutions proposées.

...Objectifs

Notre cas d'étude est le terminal à conteneurs Tanger Med I, avec un focus sur les processus de manutention et de transfert des conteneurs depuis/vers la zone de stockage. Le but était de proposer des stratégies innovantes pour le transfert de conteneurs entre la zone à quai et la zone de cour d'une part en optimisant le coût total des opérations, et d'autre part, d'établir un plan de stockage optimale au niveau de la zone de stockage qui se compose de plusieurs blocs, baies et piles de stockage tout en diminuant le nombre de mouvements parasites et en optimisant le nombre de mouvements total des équipements utilisés. Notre démarche durant cette thèse a été ainsi :

- Utiliser l'approche TDI en tant qu'entrée de notre modèle, puisque à la base de ses analyses nous pourrions choisir les éléments (Wastes) à prendre en compte dans notre étude pour proposer des stratégies plus puissantes. Cette approche sera enrichie par la suite par d'autres éléments de la base de données existante en se basant sur l'historique des arrivés des navires, le temps de séjour des navires et des conteneurs, le traitement des conteneurs durant les trois dernières années
- Des modèles mathématiques ont ainsi été proposés pour cette finalité en prenant en compte un ensemble d'objectifs à optimiser et aussi les différentes contraintes fonctionnelles et techniques qui se présentent au niveau du Port. Cette modélisation se caractérise par son aspect dynamique qui prend en compte les données reçus en temps réel au niveau du port
- La partie simulation va être abordée ensuite en utilisant les valeurs optimales issues de la résolution des modèles mathématiques. Cette simulation concerne dans un premier lieu le cas pratique étudié dans le dernier chapitre qui concerne le traitement des conteneurs vides

La simulation issue de cette première modélisation a montré les avantages des approches de résolution proposées, néanmoins elle doit être améliorée en prenant en compte d'autres règles de gestion qui sont liées à la gestion interne au niveau du port.

1.5 Problèmes des terminaux portuaires

L'évolution permanente des systèmes liés au transport maritime a permis de développer des nouvelles méthodes de management des terminaux à conteneurs pour répondre aux exigences des clients. Ces méthodes de décision peuvent être classées en trois catégories : stratégiques, tactiques et opérationnelles. Un terminal à conteneurs est considéré comme une plateforme qui relie différentes activités afin de gérer les différents flux de conteneurs entre les navires, les véhicules de transport interne, l'espace de stockage, et le transport multimodal. Face à ces différentes interconnexions, plusieurs problématiques peuvent se poser. Pour rester

compétitive chaque autorité portuaire essaie avec ses propres outils et à l'aide des chercheurs à améliorer son efficacité pour être mieux classée mondialement en répondant aux différentes exigences des clients. Ceci a donné donc aux chercheurs intéressés par ce genre de problématiques, un espace d'étude et de proposition pour résoudre des problèmes liés à l'exploitation des terminaux à conteneurs. Ces problèmes peuvent être liés à la structuration du port (stratégique), ou à la gestion des ressources matérielles et humaines (tactiques), ou encore à la planification et l'affectation des grues et des opérations quotidiennes (opérationnelles).

Parmi les études existantes dans la littérature, on trouve celle de Steenken et al. [Steenken 04], et aussi par Stahlbock et Voß [Stahlbock 08] concernant le découpage des activités portuaires dans un terminal à conteneurs, ceci a donné naissance à deux zones principales : la zone à quai (Quay Zone) et la zone de cour (Yard Zone). Rashidi et al. [Rashidi 13] ont découpé les opérations dans ces deux zones en cinq catégories, dans la zone à quai, on peut trouver deux types de problèmes d'optimisation :

- Allocation des postes d'amarrage (Berth Allocation Problem (BAP))
- Allocation des grues à quai (Quay Crane Allocation Problem (QCAP))

Autres problèmes d'optimisation qui sont liés à la zone de cour :

- Allocation de l'espace de stockage (Storage Space Allocation Problem (SSAP))
- Ordonnement des véhicules porte-conteneurs (Container Truck Scheduling)
- Affectation des grues de Cour (Yard Crane Assignment Problem)
- Optimisation des opérations de la zone de cour (Yard Optimization Problem)

Dans le reste de ce chapitre, nous allons détailler beaucoup plus les différentes activités opérationnelles dans un terminal à conteneurs.

1.5.1 Problèmes liés à la zone à quai

Les missions principales d'un terminal à conteneurs sont : la gestion des arrivés des navires, leurs accostages, et l'affectation des grues à quai en minimisant le temps d'amarrage de chaque navire, tout en gardant la stabilité du navire. Dans cette partie, les travaux réalisés visent principalement :

- En fonction du type du navire (nombre de conteneurs, longueur du navire), trouver un compromis entre le temps de service des navires (y compris le temps de rotation), le nombre de postes d'amarrage à affecter et les grues à quai disponibles pour servir le navire en question
- L'optimisation du nombre de mouvements des grues à quai, ainsi que le temps total de traitement

1.5.1.1 Problème d'allocation des postes d'amarrage (BAP)

Le nombre de postes d'amarrage disponibles est connu avant l'accostage de chaque navire. L'enjeu dans cette partie concerne l'optimisation de ces postes lors de leurs attributions aux navires entrants. Kim et al. [Kim 08], ont étudié ce problème en proposant un nouveau modèle d'affectation des navires au poste d'amarrage mais

qui ne prend pas en considération la totalité des quais disponibles, il a été testé et validé pour un nombre de quais déterminé :

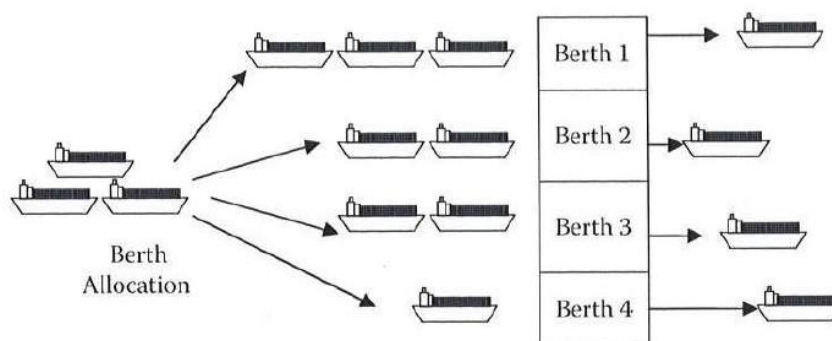


Figure 9 : Ordonnement des postes d'amarrage [Kim 08]

La résolution du BAP dépend d'un ensemble de facteurs qui peuvent influencer les décisions d'amarrage des navires à savoir :

- Dimensionnement du navire : son type, sa longueur, le nombre total des conteneurs à décharger ou charger
- Les postes d'amarrage et le nombre de grues à quai disponibles dans chaque poste d'amarrage ; un poste d'amarrage peut accueillir un ou plusieurs navires dépendamment de la taille du navire

Avec les échanges des données informatiques, les autorités portuaires peuvent recevoir des données techniques concernant le nombre de conteneurs à gérer avant l'arrivée du navire, en utilisant ces données ils cherchent à minimiser le temps de service des navires et aussi de s'assurer que les postes d'amarrage et les grues à quai vont être occupés toute la journée. Ceci s'inscrit dans l'approche de l'optimisation multi-objectifs : minimiser le temps d'attente des navires, ou encore maximiser le taux d'occupation des postes d'amarrage et des grues à quai durant toute la journée.

Dans la littérature, on trouve deux variantes du BAP discret et continue : Discrete Berth Allocation Problem (BAPD), Continuous Berth Allocation Problem (BAPC).

Pour le BAPD Imai et al. [Imai 08] ont introduit un modèle mathématique mixte en nombres entiers qui prend en considération le volume de conteneurs à traiter pour chaque navire. L'objectif était de minimiser le temps de services en incluant le temps d'attente. Comme approche de résolution, ils ont utilisé la relaxation lagrangienne. Les résultats obtenus ont montré la performance de la méthode choisie, la seule contrainte est que pour le cas discret le modèle reste très limité puisqu'il ne prend pas en compte la disponibilité des ressources.

Nishimura et al. [Nishimura 09] ont ensuite amélioré le modèle proposé par Imai et al. [Imai 08]. Ils ont proposé un modèle non linéaire qui a été résolu par l'algorithme génétique et qui prend en considération les caractéristiques techniques des navires (longueur des navires, volumes de conteneurs à traiter). Les comparaisons faites entre les résultats obtenus en utilisant l'algorithme génétique avec celles de la relaxation

lagrangienne [Imai 08] ont montré que la qualité des solutions générées par l'algorithme génétique et la relaxation lagrangienne est identique sauf que ni le type ni la dimension des conteneurs n'a été prise en compte dans leur modèle.

Contrairement au BAPD, le BAPC présente une grande flexibilité pour les terminaux portuaires, l'objectif derrière l'étude de Kim et Moon [Kim 08] (variante de BAPC) était de minimiser le coût des opérations en proposant une méthode de résolution à base du recuit simulé et en tenant compte des caractéristiques des conteneurs : longueur du navire, profondeur d'eau, nombre de conteneurs à traiter. La contribution des auteurs a pu améliorer les résultats trouvés sur les instances utilisées ; la difficulté majeure est que les caractéristiques techniques des conteneurs qui peuvent faciliter leur manutention ont été écartées dans le modèle initial. Imai et al. [Imai 09] ont proposé un nouveau modèle pour minimiser le temps de service total dans la zone à quai et ceci en tenant compte du nombre de mouvements nécessaires pour décharger/charger un navire, le temps des mouvements improductifs ainsi que le temps nécessaire d'affectation à un poste d'amarrage. Les résultats obtenus montrent bien l'efficacité du modèle et des méthodes proposées pour des instances de taille moyenne.

1.5.1.2 Arrimage des navires

Un des facteurs clés dans la gestion du problème d'arrimage est de préciser la position exacte de chaque conteneur dans un navire, et ensuite établir un plan de déchargement adéquat en tenant compte des différentes contraintes : stabilité du navire, tout en minimisant le nombre de mouvements improductifs (parasites) des conteneurs.

Peu de travaux qui ont abordé le sujet d'arrimage des navires avec ses différentes contraintes. Parmi les travaux, il y a ceux de Wilson et al [Wilson 10] qui ont décomposé le processus d'arrimage en deux sous processus et ceci en raison de sa complexité. Le premier sous processus qui a été étudié en 2010, consiste à affecter les conteneurs d'un même navire à des blocs adjacents dans la cour de stockage en utilisant un algorithme de séparation et évaluation, le problème de cette méthode et qu'elle traite un seul type de flux (import), les expérimentations montrent l'efficacité de l'algorithme proposé pour un nombre limité des conteneurs.

Leur deuxième travail en 2011 [Wilson 11], a été consacré au deuxième sous processus qui consiste à former des sous-groupes depuis le navire et ensuite identifier la position de stockage exacte de chaque conteneur en utilisant l'algorithme génétique comme outil de résolution. Tout en restant dans la même approche, les auteurs ont développé une méthode qui regroupe les conteneurs afin d'améliorer le temps d'exécution, leur cas d'étude reste valide pour un seul navire.

1.5.1.3 Affectation des grues à quai

L'opération d'arrimage du navire présentée ci-dessus, précède l'opération d'accostage du navire. Pour être stable durant le processus de chargement et de déchargement, les navires se stabilisent par des dockers qui ont comme fonctionnalités de réduire les mouvements du navire durant les opérations de déchargement/chargement des conteneurs. A ce moment on fait appel aux grues à quai (QC) qui ont comme

but le chargement/déchargement des conteneurs tout en minimisant le temps du service ainsi que le nombre des mouvements. Elles sont parmi les équipements les plus chers dans un terminal à conteneurs. L'affectation et l'ordonnancement des QCs dépend d'un ensemble de facteurs et caractéristiques du terminal à conteneurs : la taille du navire, le nombre de conteneurs à traiter, le nombre des véhicules internes affectés à chaque QC, le nombre de QC disponible par poste d'amarrage. L'enjeu pour ce type de problème est de minimiser le temps de service de chaque navire en minimisant la somme des retards et le nombre de mouvements nécessaires pour servir chaque navire, et ceci dans le but de maximiser la performance des QCs.

Kim et al. [Kim 06] ont proposé un algorithme, pour résoudre les problèmes de petite taille, basé sur la méthode de séparation et évaluation pour résoudre le programme linéaire mixte en nombres entiers proposé. Leur objectif était d'établir une séquence d'opérations de chargement/déchargement des conteneurs pour minimiser le temps de service des navires, la méthode proposée ne tient pas compte de différents types de flux. Moccia et al [Moccia 06] ont utilisé le même modèle en le résolvant avec l'algorithme de Branch-and-Cut, les résultats obtenus ont amélioré légèrement ceux trouvées par [Kim 06], les expérimentations obtenues sont valides pour les instances de petite taille puisque la résolution reste limitée à la méthode exacte citée ci-dessus.

Sammarra et al. [Sammarra 07] ont utilisé les travaux Kim et al. [Kim 06] et Moccia et al. [Moccia 06], ils ont ramené ce problème à un problème de VRP (Vehicle Routing Problem). Ils ont utilisé ensuite un algorithme basé sur la recherche Tabou, leurs résultats ont montré l'efficacité de leur algorithme, la contrainte des coûts ainsi que la disponibilité des grues de cour n'a pas été prise en compte dans leur modèle initial. Le travail récent de Rouky et al. [Rouky 18] traite le côté dynamique du problème d'ordonnancement des tâches pour les grues à quai, les auteurs ont proposé une résolution à la base de l'algorithme de colonie de fourmis hybridé avec le VND (Variable Neighborhood Descent), le modèle considéré ne tient pas compte des coûts d'affectation des tâches et aussi les caractéristiques du navire.

Les travaux ci-dessus sont détaillés dans le tableau ci-dessous avec la composante traitée dans chacun d'eux :

Référence	Objectif	Contraintes Latérales							Type de flux		Catégorie du problème		Approche de Résolution
		Équipement	Stockage	Coût d'affectation	Caractéristiques des conteneurs	Caractéristiques du navire	Mouvements Improductifs	Temps de service	Import	Export	Statique	Dynamique	
[Kim 08]	Minimiser le coût d'affectation des navires aux postes d'amarrage	Δ		Δ							Δ		Relaxation Lagrangienne
[Imai 08]	Minimiser le temps de services en incluant le temps d'attente.												Relaxation Lagrangienne
[Nishimura 09]	Minimiser la distance parcourue par les camions de transfert		Δ								Δ		Algorithme Génétique
[Kim 08]	Minimisation des coûts des opérations			Δ		Δ						Δ	Le recuit simulé
[Imai 09]	Minimisation du temps de service total dans la zone à quai				Δ			Δ			Δ		Algorithme Génétique
[Wilson 10]	Décomposition du processus de stockage selon les types de navire		Δ			Δ	Δ		Δ		Δ		Séparation et évaluation
[Wilson 11]	Constitution des sous groupe de conteneurs avant le stockage		Δ		Δ	Δ				Δ	Δ		Séparation et évaluation
[Kim 06]	Minimisation des temps de service des navires				Δ			Δ	Δ		Δ		Le recuit simulé
[Moccia 06]	Minimisation des coûts d'affectation			Δ		Δ			Δ		Δ		Branch and Cut
[Sammara 07]	Minimisation des tournées des camions de transfert	Δ			Δ				Δ		Δ		Recherche Tabou
[Rouky 18]	Optimisation et séquençement des tâches affectées aux grues de quai	Δ	Δ		Δ			Δ	Δ	Δ		Δ	Colonie de Fourmis et VND (Variable Neighborhood Descent (VND))

Figure 9b : Etat de l'art détaillé des problèmes liés à la zone de quai

1.5.2 Problème liés à la zone stockage

On définit la zone de stockage dans un terminal à conteneurs comme une zone tampon (buffer) de stockage des conteneurs chargés (respectivement déchargés) sur (respectivement depuis) un navire. La réussite d'une opération de stockage nécessite une synchronisation des différents équipements dans un terminal portuaire, en commençant par les QCs, les véhicules de transfert interne (TT), les grues de cour (YC) et finalement les véhicules de transport externes (eXternal trucks (XT)). Ceci est l'élément clé pour augmenter l'efficacité d'un terminal portuaire.

1.5.2.1 Affectation et séquençement des véhicules du transport interne

L'acheminement des conteneurs déchargés par les QCs depuis la zone à quai vers la zone de cour est assuré par les véhicules de transport interne, l'affectation se fait donc entre les QCs affectées au même navire, les véhicules du transport interne et les YCs qui sont affectées à un bloc ou des blocs adjacents qui se trouvent dans la même ligne horizontale. Pour les véhicules de transport interne utilisés, ils dépendent de la nature du port. Pour le port semi-automatisé, on trouve des cavaliers gerbeurs (Straddle Carriers : SC), des remorques. Pour les ports automatisés, on trouve les véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicle : AGV) et les véhicules de levage automatique (Automated Lifting Vehicle : ALV).

Dans notre cas, nous nous intéressons à un port semi-automatisé, à l'ordonnancement des véhicules du transport interne (TT) afin d'éviter les congestions et de faciliter les opérations de manutention de conteneurs dans le but d'augmenter la productivité du terminal portuaire. Les enjeux des différentes recherches effectuées pour ce type de problème visent à :

- Déterminer le nombre optimal des TTs à utiliser/affecter aux QCs et YCs
- Séquençement des opérations de transfert et de manutention des conteneurs

- Définir des itinéraires optimaux pour chaque TT

Les travaux de la littérature ont essayé d'adapter ce problème aux deux problèmes connus : le problème de tournées des véhicules (VRP) et le problème du voyageur de commerce (Traveling Salesman Problem : TSP). Vis et al. [Vis 03] ont défini un nouveau modèle mathématique avec la contrainte du temps de livraison du conteneur, et ils ont mis en place un algorithme pour déterminer le nombre optimal des véhicules à utiliser dans un terminal à conteneurs. Les auteurs n'ont pas inclus les contraintes de disponibilité des équipements ni des espaces de stockage dans la cour de stockage.

Kim et al. [Kim 05] ont essayé de minimiser la distance parcourue par des SCs tout en formulant ce problème VRP pour le chargement des conteneurs, leur approche subdivise le problème maître en deux sous problèmes : affectation des conteneurs et routage des SCs. Ils ont utilisé la méthode de recherche en faisceau (Beam Search Algorithm) pour résoudre le problème de routage des SCs. Le déficit de l'algorithme proposé réside dans le fait que l'état de la zone de stockage n'est pas pris en compte au début de l'horizon de planification.

Bish et al. [Bish 07] ont essayé de leur côté d'étudier le problème d'ordonnement des véhicules de transport interne. Leur idée s'appuie sur le fait d'identifier la position de stockage exacte et ensuite acheminer le conteneur déchargé vers sa position finale, tout en optimisant le trajet total et en relaxant les contraintes des YCs dans la conception du modèle initiale dans lequel ils ont considéré le cas de traitement des conteneurs d'import en provenance d'un seul navire. La difficulté majeure du modèle proposé est le traitement individuel des conteneurs d'un seul navire ce qui impacte le temps de calcul pour des instances de moyenne taille. Un an plus tard, dans leur travail [Bish 07] ils ont introduit la contrainte d'ordonnement des YCs pour minimiser le temps de service total de chaque navire. Avec ce changement, les auteurs ont pu améliorer le premier modèle, mais le temps de résolution reste relativement long puisque les premiers se génèrent après 8 heures d'exécution.

En utilisant un nombre fixe des véhicules de transport interne (deux à cinq) et une seule QC, Chung-Lun et al. [Chung-Lun 08] ont réduit le temps de chargement/déchargement d'un navire en utilisant une heuristique. Les résultats trouvés sont intéressants vu la taille du problème, ils ont soulevé la difficulté de résolution pour des instances de moyenne et de grande taille. Les auteurs n'ont pas pris en compte ni les caractéristiques techniques des conteneurs ni l'état de la zone de stockage au début de l'horizon de planification.

Bish et al. [Bish 13] ont utilisé une heuristique basée sur l'algorithme glouton pour résoudre le problème d'affectation des véhicules. Leur objectif était de minimiser le Makespan d'un navire, la contrainte du nombre d'équipements utilisés n'est pas prise en compte dans le modèle proposé.

La notion d'affectation des tâches à des ALVs a été abordée par Nguyen et al. [Nguyen 11] qui ont développé un modèle mathématique, l'objectif était, en tenant compte des contraintes de QCs et YCs, d'assigner un ensemble de tâches de livraison des conteneurs aux ALVs. L'adaptation du modèle au problème de l'allocation de l'espace de stockage a généré des mouvements improductifs au niveau de la cour de stockage qui ont impacté la performance de l'approche proposée.

Moussi et al. [Moussi 11] ont abordé le problème d'optimisation de la distance globale entre la zone à quai et la zone de cour en tenant compte de la structure de la zone de stockage (organisation par piles), du type et de temps de séjour de chaque conteneur, les auteurs ont écarté la possibilité des mouvements improductifs. Ils ont proposé un algorithme de colonie de fourmis, sans prendre en compte les contraintes liées aux YCs. La difficulté majeure du modèle proposée est qu'on ne peut pas stocker des conteneurs qui ont un temps de séjour supérieur aux temps de séjour de toutes les piles de la cour de stockage. Juliang et al. [Juliang 13] ont proposé une approche de résolution basée sur l'optimisation et la simulation pour résoudre le problème de partage des véhicules de transport interne entre les navires, la fonction objectif consiste à équilibrer la charge de travail entre les blocs adjacents et à optimiser le coût de transfert global. La difficulté soulevée est le fait que la possibilité de congestion est fortement présente puisque les auteurs n'ont pas défini un sens unique du mouvement des TTs. Yongbin et al. [Yongbin 14] ont proposé une nouvelle modélisation mathématique du problème de transfert de conteneurs, l'objectif était de déterminer le nombre de YCs minimum à affecter à chaque navire d'export ou de transbordement. Ils ont utilisé une méthode itérative à la base de la recherche Tabou.

Dans [Razouk 15], nous avons proposé une nouvelle modélisation du problème de stockage des conteneurs en prenant en compte les différentes caractéristiques techniques d'un conteneur, l'approche proposée était à la base du principe d'allocation d'un groupe de conteneurs à un espace de stockage défini. Ce même modèle a été amélioré en 2016 [Razouk 16], en rajoutant la contrainte de type de flux ainsi que l'horizon de planification, nous avons considéré le problème comme un problème de Bin Packing, ce qui a facilité la résolution du problème.

1.5.2.2 Ordonnancement des grues de cour

C'est la partie qui a une importance cruciale dans la chaîne logistique du transport maritime, à peu près 70% des opérations se passent dans la zone de stockage : chargement/déchargement, empilement/dépilement des piles de stockage et manutention des conteneurs. Les grues de cour (YCs) qui assurent ces opérations sont considérées comme un goulot d'étranglement de la chaîne totale si elles ne sont pas organisées et ordonnancées. Une affectation optimale des conteneurs aux TTs augmente légèrement la productivité d'un terminal à conteneurs.

L'enjeu principal pour les autorités portuaires est de planifier l'ensemble de tâches et de mobiliser des ressources avant l'arrivée du navire : les QCs, le nombre de conteneurs à manutentionner, les véhicules porte-conteneurs du transport interne et externe, les positions libres dans chaque bloc et finalement les YCs.

Kim et al [Kim 05] sont les premiers à étudier ce problème dans les années 2000. Leur enjeu était de minimiser le temps de manutention, en proposant une liste séquentielle des tâches de chargement à effectuer par chaque YC, à la base d'un programme mixte en nombres entiers, l'interaction avec les TTs n'est pas prise en compte.

Zhang et al. [Zhang 06] avait comme objectif de minimiser le retard dans la zone de stockage, ils ont proposé un calendrier et un itinéraire des opérations dans un terminal à conteneurs en les divisant sur des périodes de

temps. Pour ce faire, Ils ont proposé un nouveau modèle mathématique pour déterminer le nombre optimal des YCs à affecter par bloc, les auteurs ont pris en considération l'état initial du stockage au début de l'horizon de planification. Ce traitement se fait individuellement sur chaque conteneur ce qui impacte le temps de résolution.

Cheung et al. [Cheung 08] ont essayé d'améliorer le modèle proposé par [Zhang 06] sans contrainte de périodicité, c'est-à-dire qu'une YC continue son plan de manutention des conteneurs même après le shift du travail dédié. Leur enjeu était de déterminer le nombre optimal de mouvements des grues. Ils ont utilisé la relaxation lagrangienne comme première méthode de résolution et l'approximation linéaire par morceaux comme deuxième méthode de résolution. Les résultats obtenus ont montré que la deuxième méthode est plus efficace pour les instances de grande taille sauf que la contrainte de la disponibilité des ressources ainsi que le nombre de TTs utilisés ne sont pas prise en compte. Ng et al. [Ng 10] ont proposé un nouveau modèle mathématique pour la résolution du problème d'ordonnancement des grues de cour pour minimiser le temps total d'attente. Un algorithme de branch and bound a été développé et exécuté sur des instances réelles, les résultats obtenus sont efficaces mais pour des instances de petite taille. Ma et al. [Ma 12] ont proposé une nouvelle approche de résolution de ce problème en utilisant des hybridations entre l'algorithme génétique et le recuit simulé, ils ont appelé les approches proposées : Tabu Search Crossover (TSC) et Tabu Search Mutation (TSM). Leur objectif était d'optimiser le temps total des YCs, l'approche de résolution optimise localement les résultats obtenus, l'inconvénient principal réside dans le fait que les YCs ne prennent pas en compte l'arrivée des nouveaux TTs et ainsi leur affectation aux baies du stockage. Petering et al. [Petering 14] ont proposé une simulation du problème d'ordonnancement des grues de cour, ils ont développé un système de contrôle de la répartition des YCs sur les blocs de stockage avec possibilité de déplacement entre les blocs adjacents.

1.5.2.3 Allocation de l'espace de stockage (Storage Space Allocation)

La zone de cour est considérée comme une zone tampon (buffer), elle est constituée de plusieurs blocs de stockage. L'organisation des blocs dans un terminal à conteneurs dépend de la nature de la marchandise conteneurisée (frigorifique, dangereuse, vrac ainsi que de la nature de flux) (import, export ou transbordement). L'enjeu principal de l'autorité portuaire est de maximiser l'utilisation de l'espace de stockage, et de minimiser les coûts liés à la manutention du nombre total de mouvements y compris les mouvements parasites (à cause des mauvaises manipulations des conteneurs : remaniements) tout en rationalisant l'utilisation des équipements et de l'espace de stockage, ce qui impacte positivement le temps de séjour des navires dans la zone de quai.

Taleb-Ibrahimi et al. [Taleb-Ibrahimi 03] ont opté pour un choix tactique et opérationnel pour la résolution de ce problème. L'objectif était de trouver un espace de stockage optimal pour les conteneurs destinés à l'export. Le niveau tactique concernait le choix des terminaux à étudier et des technologies à utiliser. Quant à l'horizon opérationnel, ils ont mis en place une nouvelle stratégie afin de minimiser le temps total des travaux de

manutention dans la cour de stockage. Les auteurs n'ont pas pris en compte la contrainte des TTs à utiliser ni les caractéristiques des conteneurs à stocker, la validation du modèle a été faite sur un seul type de flux (export).

De Castilho et al. [De Castillo 05] ont étudié un flux d'import. Ils ont pris en considération un ensemble de contraintes techniques : hauteur des piles, nombre de positions libres dans chaque bloc. L'affectation des conteneurs aux blocs se faisait selon leur date d'arrivée au port. La contrainte majeure du problème proposé est que les auteurs ne font pas la distinction entre les dimensions des conteneurs, donc une possibilité d'incompatibilité entre la zone de stockage et les conteneurs sélectionnés pourrait se présenter.

La minimisation de la distance parcourue par les conteneurs de l'export, entre leur position de stockage dans la cour de stockage et leur destination finale était l'objet du travail de Kim et al. [Kim 08]. Leur deuxième objectif était de minimiser le nombre de mouvements improductifs dans la zone de stockage. Ils ont décomposé le problème maître en trois sous-problèmes : identification des baies de stockage, identification et affectation des conteneurs et séquençement des tâches de déchargement et d'empilement. Les auteurs n'ont pas pris en compte la contrainte relative aux équipements de transfert (TTs) ni à l'aspect de minimisation des mouvements de grues ce qui impacte la qualité des solutions générées.

Kim et al. [Kim 09] ont étudié le problème d'allocation d'espace de stockage pour les conteneurs destinés à l'import. Ils ont proposé trois modèles mathématiques en se basant sur le type d'entrée des données à traiter : nombre de conteneurs connu (cas statique), ou inconnu (cas dynamique). La stratégie de stockage développée a pour objectif d'éviter l'empilement des conteneurs récemment déchargés au-dessus de ceux qui se trouvent déjà dans la cour de stockage. La difficulté soulevée ici est qu'on pourrait se retrouver avec conteneurs non stockés vu la contrainte de temps de séjour de chaque pile.

Par la suite, Preston et al. [Preston 10] avait comme objectif la minimisation du temps de service d'un navire en proposant une stratégie de stockage optimale. Le modèle mathématique proposé a été résolu par l'algorithme génétique sur des instances de taille réelle. L'approche proposée ne tient pas compte du nombre de positions libres dans chaque zone de stockage au début de l'horizon de planification.

Bish et al. [Bish 13] ont amélioré le modèle proposé par [Preston 10] en ajoutant la composante de transport interne : ordonnancement des SCs, l'objectif était de minimiser le temps de déchargement des conteneurs sans qu'ils tiennent compte de l'optimisation des parcours des TTs. Ce modèle a été amélioré par la suite en considérant le problème d'ordonnancement des grues à quai dans le travail de Bish et al. [Bish 13], le travail a été consacré à un seul type de flux (export).

Zhang et al. [Zhang 13] ont formulé deux sous problèmes pour le traitement du problème de l'allocation de l'espace de stockage. Le premier sous problème traite les conteneurs déchargés, à affecter à chaque bloc indépendamment du navire depuis lequel ils sont déchargés, le deuxième sous problème tient compte du navire accosté et réserve ainsi un espace approprié aux conteneurs à charger (respectivement à décharger). Pour les deux sous problèmes les auteurs ont proposé deux modèles mathématiques en nombres entiers. Le modèle

proposé ne tient pas compte de l'interaction avec les TTs. On a ainsi constaté une perte d'espace de stockage dû à la réservation d'une zone de stockage par navire.

Chen et al. [Chen 14] ont formulé le problème d'optimisation d'espace de stockage à un problème d'emballage dimensionnel. Leur objectif était d'optimiser l'espace de stockage dédié aux conteneurs reçus (import). Leur approche de résolution est une méta-heuristique. Ils ont généré des instances aléatoires pour valider leur modèle. La limitation de leur travail c'est qu'ils ne l'ont pas comparé avec d'autres travaux de littérature, de plus ils ont éliminé la contrainte des remaniements.

Dans Razouk et al. [Razouk 14] nous avons proposé une première modélisation du problème de stockage des conteneurs en tenant compte des caractéristiques techniques de la zone de stockage avec une approche de résolution à base d'un algorithme de colonies de fourmis. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de l'algorithme proposé dans le cas d'un seul navire d'import. Deux ans plus tard [Razouk 16], nous avons proposé une amélioration du travail précédent en rajoutant des contraintes supplémentaires avec une vision de Bin packing. Cette méthode a été décomposée en trois phases : identification des sous-ensembles de stockage (les bins), groupement des conteneurs de caractéristiques similaires (type, destination, temps de séjour...), et finalement l'affectation des groupes de conteneurs aux sous-ensembles de blocs. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la méthode proposée pour les cas des conteneurs de transbordement et d'export.

Lee et al. [Kim 16] ont cherché à augmenter la productivité du port en maximisant l'utilisation des équipements de manutention sans avoir pris en compte l'état de l'espace de stockage avant le début de l'opération. Kang et al. [Kang 16] ont proposé une nouvelle stratégie d'empilement en se basant sur la taille des conteneurs en utilisant le Recuit simulé comme approche de résolution. L'approche proposée ne tient pas compte de la disponibilité des ressources ni de l'état de stockage au début de l'horizon de planification.

Kozan et al. [Kozan 16] ont construit un nouveau modèle mathématique pour la résolution du problème de transfert et de chargement des conteneurs. Ils ont utilisé plusieurs méta-heuristiques pour résoudre ce problème en générant des instances de différentes tailles. Les résultats obtenus ont montré que l'algorithme génétique était l'algorithme le plus efficace pour résoudre les instances de petite taille. Lee et al. [Lee 17a] ont construit un nouveau modèle MIP (Integer Programming Model) pour résoudre le problème d'allocation de l'espace de stockage pour les conteneurs déchargés (cas de l'import). Leur objectif était de minimiser la congestion entre les véhicules de transport interne et d'optimiser le stockage des conteneurs en minimisant les remaniements, les auteurs ont adopté une méthode de traitement et d'allocation des conteneurs individuellement ce qui impacte le temps requis pour la résolution du modèle.

Nous avons proposé [Razouk 17a] une hybridation entre le problème de Bin Packing et l'allocation pour l'optimisation des coûts d'affectation des véhicules internes (TTs) aux YCs. L'idée était de définir des espaces d'allocation pour chaque navire avant le début de l'opération de déchargement des navires. Les caractéristiques techniques et les contraintes de temps de séjour ont été prises en considération pour éviter les mouvements parasites.

Park et al. [Park 17] ont proposé une nouvelle modélisation du problème d'allocation d'espace de stockage. Leur objectif était d'optimiser l'affectation des conteneurs en import et export dans la zone de stockage. L'algorithme génétique proposé a généré des bons résultats.

Bazzazi et al. [Bazzazi 17] ont proposé une nouvelle variante du problème d'allocation de l'espace de stockage, appelé Extended Storage Space Allocation Problem (ESSAP). Leur approche de résolution est un algorithme génétique. L'enjeu de l'ESSAP est de définir dans chaque période de travail, l'espace temporaire dédié à l'allocation des conteneurs import et export dans les zones de stockage tout en équilibrant la charge du travail entre les blocs, ce qui minimise le temps de manutention global.

Un cas d'étude spécifique pour la gestion des conteneurs vides était le sujet de notre travail [Razouk 17b]. Nous avons proposé une nouvelle configuration des véhicules de transfert interne (TT) pour transporter deux conteneurs vides à la fois. Un impact positif sur le temps de traitement a été remarqué suite à l'utilisation de ce nouveau concept. Une généralisation de Bin Packing adaptée pour la résolution de ce type de conteneurs a été proposée. Une proposition de redimensionnement (relayout) de la zone de stockage des conteneurs a été proposée afin d'optimiser l'espace de stockage des conteneurs traités dans le cas de l'export et le transbordement, ainsi que l'optimisation du nombre de mouvements des équipements de manutention utilisés.

Le tableau ci-dessous représente une synthèse de l'état de l'art des travaux cités dans les paragraphes précédents. L'idée principale est d'identifier l'objectif de chaque travail, spécifier les contraintes et le type du problème aussi bien que la méthode de résolution utilisée par les auteurs. Nous avons positionné aussi nos travaux ainsi que les méthodes de résolution utilisées aussi bien que les variantes traitées. Les travaux de Razouk et al. présentés dans ce chapitre sont abordés beaucoup plus en détails dans les chapitres quatre, cinq et six.

Référence	Objectif	Contraintes Latérales						Type de flux		Catégorie du problème		Approche de Résolution	
		Equipement	Stockage	Coût d'affectation	Caractéristiques des conteneurs	Caractéristiques du navire	Mouvements Improductifs	Temps de service	Import	Export	Statique		Dynamique
[Kim 08]	Minimiser le coût d'affectation des navires aux postes d'amarrage	Δ		Δ							Δ		Relaxation Lagrangienne
[Imai 08]	Minimiser le temps de services en incluant le temps d'attente.												Relaxation Lagrangienne
[Nishimura 09]	Minimiser la distance parcourue par les camions de transfert		Δ								Δ		Algorithme Génétique
[Kim 08]	Minimisation des coûts des opérations			Δ		Δ						Δ	Le recuit simulé
[Imai 09]	Minimisation du temps de service total dans la zone à quai				Δ						Δ		Algorithme Génétique
[Wilson 10]	Décomposition du processus de stockage selon les types de navire		Δ			Δ			Δ		Δ		Séparation et évaluation
[Wilson 11]	Constitution des sous groupe de conteneurs avant le stockage		Δ		Δ	Δ				Δ	Δ		Séparation et évaluation
[Kim 06]	Minimisation des temps de service des navires				Δ				Δ		Δ		Le recuit simulé
[Moccia 06]	Minimisation des coûts d'affectation			Δ		Δ			Δ		Δ		Branch and Cut
[Sammorra 07]	Minimisation des tournées des camions de transfert	Δ			Δ				Δ		Δ		Recherche Tabou
[Rouky 18]	Optimisation et séquençement des tâches affectées aux grues de quai	Δ	Δ		Δ				Δ	Δ	Δ		Colonie de Fourmis et VND (Variable Neighborhood)
[Vis 03]	Optimisation des véhicules utilisés dans un terminal à conteneurs				Δ				Δ		Δ		Hybridation entre Algorithme génétique
[Kim 05]	Minimisation de la distance parcourue par des SCs			Δ	Δ		Δ		Δ		Δ		Recherche en faisceau (Beam Search)
[Bish 06]	Optimisation du trajet total avec un traitement individuel des conteneurs	Δ		Δ	Δ				Δ		Δ		Algorithme Génétique
[Bish 07]	Minimisation du temps de service total de chaque navire	Δ			Δ	Δ			Δ		Δ		Relaxation Lagrangienne
[Chung-Lun 08]	Minimisation du temps de chargement/déchargement d'un navire					Δ			Δ		Δ		Heuristique adaptée au problème
[Bish 10]	Minimisation du Makespan d'un navire				Δ	Δ	Δ		Δ		Δ		Algorithme glouton
[Nguyen 11]	Optimisation de l'affectation des tâches de livraison des conteneurs aux		Δ	Δ					Δ		Δ		Approche d'Allocation de l'espace de
[Moussi 11]	Optimisation de la distance globale entre la zone à quai et la zone de cour	Δ	Δ		Δ				Δ		Δ		Algorithme de Colonie de fourmis
[Juliang 13]	Equilibrage la charge de travail entre les blocs adjacents et optimisation du coût de transfert		Δ						Δ	Δ	Δ		Optimisation et la simulation
[Yongbin 14]	Optimisation du nombre des YCs à affecter à chaque navire d'export	Δ	Δ		Δ				Δ			Δ	Algorithme Génétique
[Razouk 15]	Optimisation du problème du stockage des conteneurs	Δ	Δ	Δ		Δ			Δ		Δ		Approche de Bin Packing adaptée
[Razouk 16]	Optimisation du problème de transfert et stockage des conteneurs	Δ	Δ	Δ		Δ			Δ	Δ		Δ	Approche de Bin Packing adaptée sur des horizons de planification
[Kim 05]	Minimisation du temps de manutention	Δ	Δ			Δ			Δ	Δ		Δ	programme mixte en nombres entiers
[Zhang 06]	Minimisation des retards dans la zone de stockage	Δ	Δ		Δ				Δ	Δ	Δ	Δ	Algorithme de Colonie de fourmis
[Cheung 08]	Détermination du nombre optimal des mouvements des grues	Δ			Δ				Δ		Δ		Relaxation Lagrangienne et approximation linéaire
[Ng 10]	Minimisation des temps d'attente des grues de cour	Δ	Δ						Δ	Δ	Δ	Δ	Branch and Bound
[Mak 12]	Optimisation des temps de traitement des YCs		Δ		Δ				Δ		Δ	Δ	Hybridation entre l'algorithme génétique et le recuit simulé
[Petering 14]	Simulation du problème d'ordonnancement des grues de cour	Δ	Δ	Δ	Δ				Δ		Δ		Branch and Bound
[Taleb-Ibrahimi 03]	L'objectif était de trouver un espace de stockage optimal pour les conteneurs destinés à l'export en optimisant le temps des travaux de manutention dans la cour de stockage	Δ	Δ		Δ				Δ		Δ		Heuristique adaptée au problème
[De Castillo 05]	Optimisation de l'espace de stockage	Δ	Δ						Δ		Δ		Algorithme de Colonie de fourmis
[Kim 08]	Minimisation de la distance parcourue par les conteneurs de l'export de leurs mouvements improductifs	Δ	Δ	Δ	Δ				Δ		Δ		Algorithme génétique
[Kim 09]	Allocation d'espace de stockage pour les conteneurs destinés à l'import		Δ	Δ	Δ				Δ		Δ	Δ	Heuristique adaptée au problème
[Preston 10]	Minimisation du temps de service d'un navire		Δ			Δ			Δ	Δ			Algorithme génétique
[Bish 11]	Minimisation du temps de déchargement des conteneurs		Δ		Δ				Δ	Δ			Algorithme génétique
[Bish 13]	Minimisation du temps de déchargement des conteneurs avec	Δ	Δ		Δ				Δ		Δ		Algorithme génétique
[Zhang 13]	Optimisation des espaces de stockage par type de navire		Δ		Δ				Δ	Δ			Brand and Bound
[Chen 14]	Optimisation de l'espace de stockage dédié aux conteneurs reçus (import).		Δ		Δ				Δ	Δ			Heuristique validée sur des instances générées aléatoirement
[Razouk 14]	Optimisation de la zone de stockage		Δ	Δ	Δ				Δ		Δ		Algorithme de Colonie de fourmis
[Razouk 16]	Optimisation des coûts d'affectation des conteneurs à la zone de stockage	Δ		Δ	Δ				Δ	Δ		Δ	Bin Packing combiné avec la méthode d'insertion et d'allocation
[Kim 16]	Maximisation de l'utilisation des équipements de manutention	Δ	Δ	Δ		Δ			Δ		Δ		Brand and Bound
[Kang 16]	Optimisation de l'empilement des conteneurs			Δ	Δ				Δ	Δ		Δ	Recuit Simulé
[Kozan 16]	Optimisation du problème de transfert et de chargement des conteneurs	Δ	Δ		Δ				Δ	Δ			Algorithme génétique
[Lee 17a]	Minimisation de la congestion entre les véhicules de transport interne et optimisation des remaniements	Δ		Δ	Δ				Δ	Δ	Δ	Δ	résolution du modèle du programmation entier (MIP)
[Razouk 17a]	Optimisation des coûts d'affectation des véhicules internes (TTs) aux YCs	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	Δ	Δ	Hybridation entre le problème de Bin
[Park 17]	Optimisation de l'affectation des conteneurs en import et export dans la		Δ	Δ	Δ				Δ	Δ	Δ		Algorithme génétique
[Bazzazi 17]	définition dans chaque période de travail, l'espace temporaire dédié à l'allocation des conteneurs import et export dans les zones de stockage		Δ		Δ				Δ	Δ	Δ		Algorithme génétique
[Razouk 17b]	Une nouvelle configuration des véhicules de transfert interne (TT) pour une double affectation des conteneurs vides à l'espace de	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ			Δ	Δ		Δ	Bin Packing adaptée

Figure 9c : Etat de l'art détaillé des problèmes liés à la zone de cour

1.6 Conclusion

L'évolution permanente des systèmes liés au transport maritime a permis de développer des nouvelles méthodes de management des terminaux à conteneurs. Ces méthodes de décision peuvent être classées en trois catégories : stratégique, tactique et opérationnelle. Au niveau stratégique, ce sont des décisions à long terme, qui touchent beaucoup à la conception et l'organisation du port, ainsi que les équipements à utiliser. Au niveau tactique, ce sont des décisions à moyen terme, qui permettent de définir le nombre d'équipements et d'effectifs nécessaires, ainsi que le placement des conteneurs et les horaires de travail des équipements et du personnel. Pour le niveau opérationnel, ce sont des décisions à court terme qui font référence aux opérations quotidiennes, à savoir le plan et les opérations à effectuer par les équipements. Ce premier chapitre était une introduction au terminal à conteneurs ainsi qu'à ses différentes composantes. Dans ce chapitre aussi, nous avons présenté l'état de l'art des différentes problématiques principalement liées à deux zones : la zone à quai (Quay Zone) et la zone de cour (Yard Zone). Une étude détaillée a été abordée par la suite de quelques travaux dans la littérature sur les méthodes de résolution qui sont appliquées pour résoudre les problèmes liés aux deux zones, et un focus plus spécifique pour la zone de cour, concernant : le problème d'ordonnancement des grues de cour, le problème d'allocation de l'espace de stockage, ainsi que le problème d'affectation et séquençement des véhicules interne. Nous avons concentré cette étude sur les articles et les travaux qui ont été publiés dans les derniers quinze ans (2003-2018), dans lesquels nous avons sélectionnés quelques travaux qui ont adopté les mêmes stratégies que nous allons présenter dans les autres chapitres. L'étude bibliographique entamée dans ce chapitre a révélé que les problèmes de l'allocation de l'espace de stockage de conteneurs, ainsi que le problème de transfert des conteneurs par les TTs dans un terminal à conteneurs ont été abordé sous différents aspects. Cependant, la majorité des publications proposent des méthodes qui ne tiennent pas compte de toutes les contraintes de l'espace de stockage ainsi qu'au disponibilité des équipements de transfert. Les autres approches de résolution utilisent la notion d'allocation de l'espace de stockage et le transfert des conteneurs à un groupe de conteneurs, ce qui engendre dans la plupart des cas des pertes dans les espaces de stockage, d'autres travaux écartent la possibilité des mouvements improductifs dans la zone de stockage.

Au meilleur de nos connaissances, rares sont les travaux qui traitent les trois problèmes à la fois en tenant compte des différentes contraintes, tout en optimisant les coûts des trajets, le nombre de mouvements des équipements ainsi que l'optimisation de l'espace de stockage, et ceci en tenant compte des différents flux entrants et sortants.

Chapitre 2 : Etat de l'art des problèmes portuaires

2.1 Historique des méthodes de résolution des problèmes traités dans notre thèse

La résolution des problèmes étudiés (liés au problème master : optimisation de la zone de cour « Yard Optimization Problem » (YOP)) passe principalement par deux phases : analyse et simulation. La première vise à résoudre le problème étudié en proposant des méthodes de stockage optimales pour des problèmes d'optimisation multi objectifs, une utilisation rationnelle des équipements utilisés ainsi qu'une réduction des coûts des opérations portuaires. Cependant, cette étude analytique ne peut aboutir à des bons résultats que seulement elle est confrontée à la vie réelle, c'est donc l'objectif de la deuxième phase qui est la simulation, cette dernière utilise donc les données de la première phase comme des entrées du modèle de simulation afin de mesurer l'efficacité des méthodes et solutions proposées dans la première phase et permettre leurs améliorations.

Dans la littérature les deux phases ont été étudiées par les chercheurs, certains d'entre eux se sont intéressés plutôt à la résolution analytique des problèmes étudiés, et ceci en proposant des stratégies de stockage, d'affectation et d'optimisation pertinentes. Tandis que pour les autres, ils se sont servis, en plus des études analytiques des problèmes portuaires, de la simulation pour montrer l'efficacité des décisions prises et des méthodes proposées. Cette partie de notre rapport sera donc dédiée à l'étude de quelques publications qui ont traitées la première phase, avant d'entamer la partie des recherches relative à la deuxième phase qui porte sur les différentes approches de simulation.

2.1.1 Études analytiques des problèmes liés au YOP

Parmi les premières études qui ont traité ce type de problème, on trouve le travail de Ibrahim et al. [Ibrahimi 00], dans lequel les auteurs ont étudié le cas de l'export des conteneurs, qui doivent arriver sur le port avant l'accostage des navires. Ils ont opté pour une stratégie de séparation de flux pour finalement réserver un espace dans la zone de stockage dédié aux conteneurs de l'exportation pour chaque navire. Ils ont étudié par la suite les deux variantes du problème : statique et dynamique. Pour le cas statique, le mouvement des emplacements des conteneurs après l'empilement n'est pas permis. Donc chaque conteneur doit garder son emplacement de stockage en attendant l'arrivée du navire.

Contrairement au cas statique, le cas dynamique utilise plutôt la notion de la zone tampon où les nouveaux conteneurs peuvent être stockés temporairement, puisqu'on suppose qu'à leur arrivées les autorités portuaires ne possèdent pas toutes les informations nécessaires pour leur stockage, en attendant leur affectation à des emplacements de stockage. Cette méthode est plus réaliste, elle permet à l'autorité portuaire d'utiliser l'espace de stockage complet sans limitation et contraintes d'affectation, et elle permet ainsi d'accueillir des nouveaux conteneurs soit du même navire ou d'autres navires. Donc l'utilisation de l'espace de stockage dans le cas dynamique est rationalisée contrairement au cas statique, puisqu'on alloue l'espace de stockage exact aux conteneurs qui se trouvent dans la zone de stockage tampon. Les auteurs ont proposé aussi dans leur article

une formulation mathématique pour calculer le nombre d'emplacements nécessaires pour le stockage des conteneurs pour les deux cas de figures. Cependant, la limitation de leur travail c'est qu'ils ont traité un seul flux (l'export) et ils ont considéré que les conteneurs servis ont la même dimension; ce qui n'est pas toujours le cas dans la vie réelle puisqu'un navire peut contenir des conteneurs de dimensions différentes.

En complément du travail d'Ibrahimi et al. Daganzon et al. [Daganzo 03] ont traité le même problème mais pour le cas de l'import (cas des conteneurs qui arrivent sur un port semi-automatisé qui utilise des grues de cour, et qui sont chargés sur des navires). Les auteurs ont proposé une formulation mathématique qui minimise le nombre de remaniements pour extraire un conteneur spécifique dans la zone de stockage, mais aussi qui prend en compte l'affectation des conteneurs à des endroits précis dans la cour de stockage, ils ne tiennent pas compte des EDT des conteneurs ce qui peut causer par la suite des limitations pour l'utilisation de l'approche proposée. Le nombre de remaniements est calculé comme étant le nombre égale aux conteneurs qui sont stockés au-dessus du conteneur cible. Pour se faire, ils ont proposé deux méthodes de stockage et de manutention différentes. La première est une stratégie de nivellement qui vise à équilibrer les niveaux des piles par une contrainte sur le niveau maximal d'une pile ; donc pour équilibrer la charge des stockages les piles moins remplies peuvent accueillir des conteneurs pour être du même niveau que ceux qui sont déjà remplies, et les conteneurs transférés ne sont pas transférés plus loin que leur emplacement initial. Cette méthode peut être utilisée dans le cas des ports qui ne se soucient pas de la hauteur des piles et qui n'ont pas assez d'espace pour le stockage. Elle présente ainsi un risque de remaniements de plus puisqu'on ne tient pas compte de la hauteur des piles, il y'a aussi le risque d'empiler des conteneurs fraîchement arrivés sur d'autres qui vont partir plus tôt. Pour remédier à ces différentes problématiques, ils ont proposé une stratégie à la base du principe de séparation de flux qui vise à allouer à chaque navire une zone de stockage dédiée. Ils ont réservé dans chaque bloc un ensemble de piles qui peuvent accueillir les conteneurs fraîchement arrivés, la spécificité de ce bloc est que les conteneurs dedans peuvent être inter-changés entre les piles de la même zone. Le risque soulevé par cette méthode est qu'au bout d'un moment, on peut se retrouver face à l'arrivée d'un navire qui coïncide avec le remplissage complet de la zone de stockage (puisque la notion des réservations des ensembles de piles a été appliquée). Pour remédier à ce problème, les auteurs ont proposé de vider les piles les moins remplies et qu'on transfère les conteneurs déchargés sur les mêmes piles moins chargées du même ensemble réservé au même navire d'origine. Malgré de l'avantage présenté par cette méthode qui réduit le nombre de remaniements puisque les conteneurs sont stockés dans des piles presque vides, les déplacements requises pour transférer un conteneur d'une pile moins chargée à une autre, peuvent nécessiter un parcours de longues distances. Cette stratégie reste beaucoup plus adaptée à des terminaux à conteneurs qui n'ont pas assez d'espace de stockage et qui n'ont pas de limitation des hauteurs de stockage des piles. La limitation de ce travail est qu'il traite séparément le cas de l'importation des conteneurs, et que les auteurs considèrent que les navires arrivent dans des intervalles réguliers au port, dans les cas réels l'application de cette méthode reste assez limitée vu les contraintes imposées par la vie réelle au sein du port.

Certaines autorités portuaires ont pensé à fixer la durée de stockage au-delà de laquelle il y aura des frais à payer, ils ont défini des intervalles de temps dans lesquelles les entreprises et les transitaires sont exonérés des frais de stockage pour les encourager à ne pas laisser leurs conteneurs au port pendant des durées indéterminées. L'avantage de cette approche pour l'autorité portuaire est de diminuer le risque de l'encombrement de la zone de stockage, ainsi que la possibilité des pénuries d'espace de stockage et des difficultés d'extraction des conteneurs qui se trouvent parfois au-dessous de certains conteneurs qui sont restés longtemps dans la cour de stockage. Le travail de Kim et al. [Kim 07], s'inscrit dans cette approche, les auteurs ont proposé trois modèles mathématiques pour déterminer finalement la durée de stockage gratuit, et ceci soit en maximisant : les bénéfices, les profits ou les profits des clients. Le premier modèle a été adapté pour le cas d'une entreprise privée qui ne cherche qu'à maximiser ses bénéfices sans prendre en considération les conséquences de ses décisions sur l'aspect gestion. Afin d'empêcher les frais de stockage, l'entreprise pense plutôt à proposer une longue durée de stockage gratuite ainsi qu'un prix plus bas pour les durées de stockage additionnelles. Les auteurs ont souligné que parmi les inconvénients de cette méthode : la congestion au niveau de la cour de stockage, et par conséquent la difficulté d'accéder à certains conteneurs, ce qui augmente le nombre de remaniements ainsi que la charge de travail des grues de cour, et par conséquent aussi le prolongement des durées d'attente des camions externes afin de récupérer les conteneurs en question. Pour le deuxième modèle, les auteurs ont proposé un modèle pour une entreprise qui cherche à maximiser ses profits en minimisant le temps d'attente des camions externes (pour l'import) et des navires pour satisfaire ses clients (pour l'export et le transbordement). L'enjeu principal pour ce type d'entreprise est de rester compétitif sur le marché des opérations portuaires, le modèle proposé optimise considérablement le temps de traitement des conteneurs, le nombre de remaniements en adoptant la stratégie de séparation des flux. Le troisième modèle a été développé plutôt pour des terminaux publics qui visent à maximiser les profits de leurs clients. Dans ce modèle, les autorités portuaires ont décidé que pour ce genre de port, l'idéal c'est d'éliminer la période de stockage gratuite afin de réduire l'encombrement dans la cour de stockage et de minimiser les temps d'attentes des camions externes et des navires. Pour les trois modèles, les auteurs ont considéré un port non automatisé qui utilise des grues de cour, et qui traite plusieurs navires de différentes dimensions (en utilisant la stratégie de séparation des flux pour stocker les conteneurs de mêmes dimensions sur les mêmes baies).

Kozan et al. [Kozan 06] ont essayé de résoudre les problèmes liés au YOP à l'aide des algorithmes génétiques. Leurs études ont été appliquées sur un terminal multimodal qui traite à la fois les conteneurs en import/export et en transbordement. Dans un premier temps, les auteurs ont proposé un modèle mathématique de stockage de conteneurs qui a pour objectif de minimiser les durées de séjour des navires. Le modèle conçu par les auteurs sous forme de programme linéaire mixte en nombres entiers ne tient pas compte de la diversité des tailles des navires ni des dimensions et types de conteneurs. Dans l'algorithme de résolution qui a été développé sous Visual Basic, ils ont considéré que chaque solution générée est sous la forme d'une chaîne de nombres entiers qui représente le nombre de conteneurs à stocker, de ce fait chaque conteneur appartient à un seul chromosome. La première phase de l'algorithme affecte des conteneurs aux camions de transfert, si le nombre de conteneurs

à affecter n'est pas divisible par le nombre de camions, dans ce cas à une étape de l'algorithme, on rajoute à chaque chromosome des conteneurs fictifs pour avoir le même nombre de conteneurs affecté par camion. La composition d'une solution du problème est donc un ensemble de segments, chaque segment contient des conteneurs qui sont affectés à un camion de transfert, l'ordre de transfert de ces conteneurs est bien indiqué dans le chromosome. Les auteurs ont considéré une population de 60 générations et 30 individus dans leurs simulations. La première étape de l'algorithme génétique qui est le croisement a été appliqué sur le modèle proposé, cependant le croisement en un point a généré des résultats meilleurs que le croisement en deux points qui nécessitent par contre plus de temps pour générer des solutions meilleures que ceux du croisement en un point. Tandis que pour la deuxième étape de l'AG qui est la sélection, les auteurs ont utilisé une version personnalisée de la roulette de la chance pour sélectionner les deux meilleurs individus. Quant à la mutation, elle échange la position de deux conteneurs dans un même chromosome. La stratégie adoptée par les auteurs vise à stocker les conteneurs dans des emplacements plus proches des navires dans le cas de l'export ou de transbordement, et ceci pour minimiser les durées de manutention et de transfert des conteneurs. Cette stratégie s'avère très efficace d'après les simulations faites par les auteurs, par contre sa limitation est au niveau du nombre d'équipements utilisés qui influencent considérablement les temps de transfert. En plus de ça, les auteurs ont déduit que même la taille des piles peut impacter la durée totale du transport, ils ont proposé trois niveaux de stockage maximum pour ne pas influencer les temps de transfert des camions. L'algorithme génétique proposé n'a pas été comparé avec une méthode exacte pour les petites et moyennes instances pour tester son efficacité, ni avec d'autres méta-heuristiques.

Deux ans plus tard, Kozan et al. [Kozan 08] ont étudié une version plus étendue. Cette étude a pour objectif d'étudier deux types de problèmes : problème de transfert des conteneurs par les camions, et problème de stockage des conteneurs par les grues de cour. Chaque problème a été résolu séparément, mais dans une approche de collaboration les résultats de l'un sont les données de l'autre et ainsi de suite. Cette étude a été réservée spécialement pour les conteneurs en exportation et par conséquent l'ordonnancement des camions de transfert des conteneurs depuis la cour de stockage vers les quais. Pour la résolution du premier modèle les auteurs ont essayé de trouver un planning de transfert de conteneurs de telle façon à minimiser les durées de séjour des navires, et ceci en minimisant les durées totales des transferts des conteneurs des emplacements de stockage vers les quais. Tandis que pour le deuxième modèle, l'enjeu principal est de trouver un plan de stockage optimal qui réduit le nombre de remaniements et qui minimise les durées de manutention des conteneurs dans la cour de stockage. Les auteurs ont vu l'utilité de combiner les deux problèmes en un seul, pour éviter le fait d'avoir des résultats meilleurs sur l'un et non pas sur l'autre. Dans le modèle mathématique intégré proposé, les valeurs des variables de décision du premier modèle sont les données d'entrées de l'autre et vice versa. Il a été résolu par la suite par l'AG en deux itérations : la différence principale entre les deux itérations est le nombre de générations susceptible d'augmenter au fur et à mesure des itérations, dont la première a un nombre constant de générations, alors que dans l'autre le nombre de générations augmente au cours des itérations.

Les auteurs ont proposé par la suite une hybridation pour la résolution des deux problèmes, dans cette hybridation l'algorithme génétique est utilisé pour résoudre le problème de transfert des conteneurs alors que la recherche taboue est utilisée pour résoudre le problème de stockage. Les auteurs ont conclu que le fait de proposer un modèle intégré procure des résultats meilleurs que ceux obtenus en résolvant séparément les deux problèmes. Ils ont remarqué également que l'hybridation proposée n'améliore pas les résultats obtenus pour l'AG. Ainsi, l'exécution de cette méthode seulement sur le cas d'export reste une limitation en elle-même, vu que dans la vie réelle les trois types d'opérations doivent être considérées. En plus les contraintes des conteneurs (type, EDT, destination...) n'ont pas été traitées dans leur modèle ce qui représente une autre limitation du modèle proposé.

Bruzzon et al. [Bruzzon 10] ont traité le problème d'allocation des postes à quai et ensuite le problème de stockage et de transfert des conteneurs. Selon les auteurs, ces deux problèmes sont liés parce qu'ils ont un ensemble de paramètres en commun : les dates d'embarquement prévues des navires, les types de chargement (export dans leur cas), ainsi que les emplacements des conteneurs dans la cour de stockage. Pour le premier algorithme qui porte sur la résolution du problème de stockage, ils ont développé une fonction d'évaluation qui combine entre les dates d'embarquement prévues des navires et le nombre de conteneurs à transporter. La construction des chromosomes représente ainsi une chaîne de nombres réels qui représente les solutions construites pour chaque navire (dates embarquement prévues des navires, nombre de conteneurs à traiter). Pour l'opération de croisement, les auteurs ont utilisé une méthode originale qui sélectionne un ensemble de navires, ensuite elle change leurs ordres de succession dans les deux parents pour générer deux nouveaux enfants. Le critère du choix des chromosomes par la suite dépend des valeurs de fitness générés (performances) qui doivent être supérieures à une valeur seuil avant d'être ajoutées à la nouvelle génération. La mutation est faite de telle façon à intervertir les quais alloués à deux navires quelconques. Enfin, pour la sélection, les auteurs ont opté pour une méthode de sélection élitiste. Les résultats obtenus de ce premier algorithme sont les entrées du deuxième algorithme génétique. L'objectif étant de trouver les meilleurs emplacements des conteneurs en export qui vont être chargés par la suite sur les navires.

Pour le deuxième algorithme, les auteurs ont opté plutôt pour une ségrégation par groupe de conteneurs, l'objectif est ainsi de déterminer les sous-ensembles de piles qui sont réservés aux conteneurs de chaque navire, avec la supposition que ces piles de stockage peuvent être éloignées les unes les autres. Dans cet algorithme, les auteurs traitent les navires séparément, et ont comme objectif de minimiser la distance totale parcourue par les camions de transfert entre la cour de stockage et chaque navire. Les auteurs n'ont pas comparé les algorithmes génétiques proposés avec une méthode exacte, par contre ils ont comparé le deuxième algorithme qui résout le problème de stockage des conteneurs à un algorithme de recuit simulé qui utilise les résultats du premier algorithme et continue à les améliorer localement. D'après leurs analyses, les résultats générés par l'algorithme génétique sont meilleurs que ceux du recuit simulé. Dans ce même article, et pour justifier l'utilité de combiner les deux problèmes à la fois, les auteurs ont comparé leurs algorithmes à d'autres algorithmes de résolution. Le premier utilise la méthode du Premier-arrivé/Premier-servi (FCFS); ceci signifie que les groupes

de conteneurs (qui appartiennent au même navire) sont stockés dans la cour de stockage selon leur ordre d'arrivée. Le deuxième et le troisième traitent séparément les deux problèmes étudiés : allocation de postes à quai et problème de transfert et de stockage des conteneurs. Le quatrième est le dernier cas, traite les deux problèmes simultanément. D'après les analyses, il s'est avéré que le quatrième algorithme est le plus performant contrairement aux autres qui génère des résultats moins performants, ce qui signifie que l'approche proposée dans cet article est très pertinente, mais malheureusement les auteurs n'ont pas explicité les valeurs des paramètres utilisés dans leurs simulations. L'algorithme proposé a été adapté principalement pour le cas de l'export et son adaptation pour le cas de l'import reste très limité.

Yalaoui et al. [Yalaoui 14] ont proposé une méthode de résolution à la base de l'ACF, son objectif est le problème d'affectation, de transfert et de stockage des conteneurs. L'idée est de se focaliser sur le stockage des conteneurs d'export, afin de minimiser le coût total de stockage et la distance totale effectuée par les camions de transfert interne entre la cour de stockage et les quais. Pour la résolution de ces problèmes, ils ont considéré deux colonies dont chacune a une tâche prédéfinie : la première colonie a un rôle d'affectation des conteneurs de chaque client à une zone de stockage, tandis que la deuxième désigne pour chaque groupe de conteneurs d'un même client un quai d'affectation pour transférer les conteneurs par la suite vers les navires en question, ceci permet de traiter le problème d'une façon séquentielle.

Les auteurs n'ont pas proposé une formulation mathématique à ce problème, mais ils ont utilisé un algorithme d'énumération pour mesurer l'efficacité de l'ACF. A chaque itération de l'algorithme, la matrice de phéromones de chaque colonie se met à jour uniquement par les traces de phéromone qui appartiennent à la solution générée. Dans une approche d'amélioration des résultats, les auteurs ont proposé une hybridation entre l'ACF et la méthode de recherche locale. Pour ce faire, à chaque itération, les solutions non réalisables sont sujets à des modifications que de blocs et de quais, l'idée est donc de les réaffecter à d'autres groupes de conteneurs tout en respectant les contraintes de capacité. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de l'hybridation par rapport à l'ACF.

Le point fort de l'approche proposée est le fait que les auteurs tiennent compte surtout de la disponibilité des postes à quai et aussi des durées de séjour des navires. Pour minimiser la distance totale parcourue entre les blocs et les postes à quai, il serait intéressant que les blocs auxquels sont affectés les conteneurs soient identifiés de telle sorte à minimiser à la fois les coûts de stockage et la distance totale pour transférer les conteneurs de la cour de stockage vers les quais. La pertinence de la méthode proposée se limite au niveau de l'utilisation de l'algorithme pour l'exportation, aussi bien que l'impossibilité de comparer les résultats avec d'autres recherches de la littérature puisque le modèle mathématique associé n'a pas été développé.

Il s'avère que l'utilisation des hybridations est primordiale pour pouvoir améliorer les résultats obtenus. De ce fait, notre travail porte sur des hybridations de l'AG et le RS en s'inspirant du travail d'El-Mihoub et al [El-Mihoub 06].

Lee et al. [Kim 16] ont cherché à augmenter la productivité du port en maximisant l'utilisation des équipements de manutention sans avoir pris en compte l'état de l'espace de stockage avant le début de l'opération. Kang et al. [Kang 16] ont proposé une nouvelle stratégie d'empilement en se basant sur la taille des conteneurs en utilisant le Recuit simulé comme approche de résolution. L'approche proposée ne tient pas compte de la disponibilité des ressources ni de l'état de stockage au début de l'horizon de planification.

Kozan et al. [Kozan 16] ont construit un nouveau modèle mathématique pour la résolution du problème de transfert et de chargement des conteneurs. Ils ont utilisé plusieurs méta-heuristiques pour résoudre ce problème en générant des instances de taille différente. Les résultats obtenus ont montré que l'algorithme génétique était l'algorithme le plus efficace pour résoudre les instances de petite taille. Lee et al. [Lee 17a] ont construit un nouveau modèle MIP (Integer Programming Model) pour résoudre le problème d'allocation de l'espace de stockage pour les conteneurs déchargés (cas de l'import). Leur objectif était de minimiser la congestion entre les véhicules de transport interne et d'optimiser le stockage des conteneurs en minimisant les remaniements, les auteurs ont adopté une méthode de traitement et d'allocation des conteneurs individuellement ce qui impacte le temps requis pour la résolution du modèle.

Nous avons proposé [Razouk 17a] une hybridation entre le problème de Bin Packing et l'allocation pour l'optimisation des coûts d'affectation des véhicules internes (TTs) aux YCs. L'idée était de définir des espaces d'allocation pour chaque navire avant le début de l'opération de déchargement des navires. Les caractéristiques techniques et les contraintes de temps de séjour ont été prises en considération pour éviter les mouvements parasites.

Le tableau ci-dessous synthétise les travaux étudiés ci-dessus avec les variantes et les méthodes de résolution appropriées :

Référence	Objectif	Contraintes Latérales							Type de flux		Catégorie du problème		Approche de Résolution
		Equipement	Stockage	Coût d'affectation	Caractéristiques des conteneurs	Caractéristiques du navire	Mouvements Improductifs	Temps de service	Import	Export	Statique	Dynamique	
[Ibrahimi 00]	Optimisation de l'espace de stockage avec séparation de flux et utilisation d'un espace de stockage tampon		Δ		Δ			Δ		Δ	Δ	Δ	Relaxation Lagrangienne
[Daganzo 03]	Minimisation de mouvements improductifs et affectation des conteneurs aux endroits précis		Δ		Δ			Δ		Δ	Δ		Algorithme Génétique
[Kim 07]	Maximisation des profits avec l'utilisation du concept des surestaries		Δ	Δ	Δ			Δ	Δ	Δ	Δ		Heuristique adaptée aux problèmes
[Kozan 06]	Minimiser la durée de séjours des navires		Δ		Δ				Δ	Δ	Δ		Algorithme Génétique
[Kozan 08]	Minimisation des temps de service des navires et des distances de transfert des conteneurs		Δ			Δ		Δ	Δ		Δ	Δ	Hybridation entre Algorithme génétique et la recherche Tabou
[Buzzon 10]	Optimisation d'allocation des postes à quai et du transfert des conteneurs	Δ	Δ	Δ	Δ					Δ	Δ		Algorithme Génétique
[Yalaoui 14]	Minimisation le coût total de stockage et la distance totale effectuée par les camions de transfert interne entre la cour de stockage et les quais		Δ	Δ		Δ		Δ		Δ	Δ		Hybridation entre l'algorithme de Colonie de fourmis et la méthode de recherche locale
[Razouk 14]	Optimisation de la zone de stockage		Δ	Δ	Δ		Δ		Δ		Δ		Algorithme de Colonie de fourmis
[Razouk 16]	Optimisation des coûts d'affectation des conteneurs à la zone de stockage	Δ		Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ		Δ	Bin Packing combiné avec la méthode d'insertion et d'allocation
[Kim 16]	Maximisation de l'utilisation des équipements de manutention	Δ	Δ	Δ		Δ			Δ		Δ		Brand and Bound
[Kang 16]	Optimisation de l'empilement des conteneurs			Δ	Δ		Δ	Δ	Δ		Δ		Recuit Simulé
[Kozan 16]	Optimisation du problème de transfert et de chargement des conteneurs	Δ	Δ		Δ		Δ		Δ	Δ	Δ		Algorithme génétique
[Lee 17a]	Minimisation de la congestion entre les véhicules de transport interne et optimisation des remaniements	Δ		Δ	Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		résolution du modèle du programmation entier (MIP)
[Razouk 17a]	Optimisation des coûts d'affectation des véhicules internes (TTs) aux YCs	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Hybridation entre le problème de Bin Packing et l'allocation
[Park 17]	Optimisation de l'affectation des conteneurs en import et export dans la zone de stockage		Δ	Δ	Δ				Δ	Δ	Δ		Algorithme génétique
[Bazzazi 17]	définition dans chaque période de travail, l'espace temporaire dédié à l'allocation des conteneurs import et export dans les zones de stockage		Δ		Δ			Δ	Δ	Δ	Δ		Algorithme génétique
[Razouk 17b]	Une nouvelle configuration des véhicules de transfert interne (TT) pour une double affectation des conteneurs vides à l'espace de stockage	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		Δ	Bin Packing adaptée

Figure 9d : Etat de l'art détaillé des problèmes liés au YOP

2.1.2 Études s'appuyant sur la simulation des problèmes liés au YOP

La résolution des problèmes étudiés se fait à travers des méthodes de résolution adaptées et développées par la suite pour générer des solutions réalisables pour des instances de moyenne et de grande taille dans un temps assez raisonnable. La simulation intervient pour compléter cette approche à travers l'utilisation des données générées par la résolution des problèmes étudiés comme point d'entrée pour les paramètres de la simulation. Elle a montré son efficacité dans la modélisation d'un flux réel, et sa capacité à générer des solutions optimales en changeant les valeurs des paramètres du modèle initial. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de cas des conteneurs vides échangés dans les trois flux présentés dans le chapitre six, ainsi nous avons tiré profit de la résolution du problème d'allocation d'espace de stockage et du transfert des conteneurs vides par les TTs, en utilisant les valeurs issues de la résolution des modèles mathématiques comme des valeurs d'entrée de notre modèle de simulation de gestion des conteneurs vides.

Kap et al. [Kap 07] ont développé un programme informatique qui simule les opérations du déchargement et du stockage des conteneurs d'import dans la cour de stockage. L'objectif de ce programme est de calculer le nombre total de remaniements nécessaires généré par les grues de cour pour extraire les conteneurs d'un bloc. Les auteurs ont utilisé la méthode de séparation des flux pour le stockage des conteneurs, l'idée principale est de réserver un sous ensemble de baies pour les conteneurs en provenance du même navire, donc une même baie ne peut pas contenir des conteneurs de différents navires. Lors des opérations de remaniements, les conteneurs déchargés sont supposés être déposés dans la même baie sur des piles moins chargées, donc le déplacement des grues de cour se fait sur la longueur de baie en cas de remaniements. La contribution principale de cet article est le fait de déterminer la matrice de calcul des remaniements lors des déplacements des grues de cour pour la recherche des conteneurs cibles. Pour simplifier le modèle, les auteurs ont considéré que les conteneurs peuvent être déclarés en même temps, et que les dimensions des conteneurs sont prédéfinies pour chaque baie, ce qui rend le modèle applicable sur des cas réels.

Un autre avantage de la simulation est le fait qu'elle permette de réaliser plus facilement des études quantitatives. Sculli et al [Sculli 08] ont utilisé la simulation plutôt pour réaliser des études quantitatives, ils ont choisi un cas spécifique du problème d'affectation de stockage des conteneurs, et ils ont supposés que tous les conteneurs ont les mêmes dimensions. Ils ont considéré les critères de performance suivants : le pourcentage de remplissage de la zone de stockage, le nombre de remaniements, le nombre total des conteneurs qui reste dans la file d'attente, et aussi le nombre d'emplacements libres dans la cour de stockage. La taille maximale de chaque pile étant fixée à trois dans ce modèle, ce qui donne un volume total des emplacements d'un bloc égal au nombre d'emplacements au sol vides dans chaque baie, multiplié par trois. Le nombre de remaniements est calculé en fonction du nombre de mouvements des conteneurs non requis (généralement qui sont stockés en dessus du conteneur cible). Les instances utilisées pour la validation de ce modèle sont caractérisées par : la taille de l'espace de stockage considéré, la stratégie de stockage utilisée, et les différents types de conteneurs considérés puisqu'on traite des conteneurs de mêmes dimensions. Pour la résolution du modèle proposé, les auteurs ont proposé deux stratégies : stratégie de stockage aléatoire, et stratégie de stockage par catégorie. La première stratégie commence par l'affectation des conteneurs dans le premier niveau de baie vide, puis on passe au deuxième niveau et après avoir rempli le premier niveau et ainsi de suite. Tandis que la deuxième méthode, elle regroupe les conteneurs selon leur type ce qui nous permet de répartir les conteneurs du même type sur des piles adjacentes. La limitation de cette méthode est qu'elle ne peut pas stocker parfois des conteneurs même si la zone de stockage n'est pas pleine (séparation des flux plus réservation des piles par type de conteneur). Pour remédier à ce problème les auteurs ont proposé d'appliquer la stratégie de stockage aléatoire pour ces cas de figures. Les résultats obtenus ont montré que la première stratégie influence plutôt le nombre de remaniements en générant des piles plus hautes. Quant à la deuxième stratégie, elle réduit le nombre de remaniements tout en considérant que les conteneurs peuvent être réclamés en même temps. Le pourcentage de stockage est plutôt optimisé avec la deuxième stratégie en prenant en compte un espace de stockage de moyenne taille avec une capacité maximale du bloc qui ne dépasse pas mille emplacements. Même

si les auteurs ont pris des paramètres pertinents dans leurs modèles, sauf que la simplification du problème étudié en considérant des conteneurs de mêmes dimensions aussi bien que les EDTs des conteneurs requis peuvent être égaux, rend le modèle difficile à être généralisé aux terminaux à conteneurs réels.

Afin de comparer l'efficacité des différentes stratégies de stockage proposées, Ma et al. [Ma 12] ont utilisé un logiciel d'optimisation qui s'appelle eM-plant. Leurs études ont été consacré plutôt pour des ports automatisés qui utilisent des RMGCs mais qui utilisent des camions de transfert interne non automatisés, et c'est ce qui nous intéresse le plus dans cet article. Les facteurs étudiés dans cet article sont : les temps de service que passent les camions dans les blocs de la zone de stockage, les temps de transfert des conteneurs entre les quais et la cour de stockage effectués par les camions de transfert interne, et le nombre de conteneurs qui reste à traiter dans la file d'attente que ça soit pour l'import ou l'export. Les auteurs ont proposé trois stratégies d'affectation et de stockage afin de séparer les conteneurs de l'import de ceux de l'export, les conteneurs ne sont pas mélangés entre eux et ceci soit : au niveau du bloc, au niveau des rangées ou au niveau des baies. La première stratégie utilise le principe de stockage par bloc, cette stratégie a été nommée « REBLOCK » qui signifie un bloc associé pour chaque type de flux (import ou export). La deuxième stratégie, utilise plutôt la notion des rangées où chaque bloc est divisé en deux parties chaque partie est réservée à un type de flux, cette stratégie a été appelée « RSROW », qui associe un sous ensemble de rangées à chaque type de flux (une partie pour les conteneurs importés et l'autre partie pour ceux exportés). La troisième stratégie utilise la notion des baies où chaque bloc est divisé en deux parties, cette stratégie est désignée par « RSBAY » qui signifie que chaque sous ensemble des baies est réservé à un type de flux. Pour les trois stratégies, les conteneurs ne peuvent être transférés qu'au sein du même groupe : bloc, rangées ou baies. En complément à ces stratégies, les auteurs ont proposé une catégorisation des conteneurs de même flux selon leur dimension et leur navire de destination pour le cas de l'export et leur destination finale (compagne de transport routier) pour le cas de l'import. Ces catégories sont classifiées par la suite selon un ordre décroissant selon le nombre des conteneurs, l'espace de stockage alloué pour chaque catégorie peut se faire au niveau pile « unité pile » ou au niveau baie « unité baie ». Les auteurs ont conclu qu'avec les trois premières stratégies proposées, les camions passent plus de temps dans les blocs de stockage, et conduisent parfois à des pénuries d'emplacements de stockage où on peut se trouver face à des situations où on ne peut pas stocker des conteneurs même si on a des emplacements vides dans la zone de stockage, ces problèmes peuvent être évités avec la méthode de stockage aléatoire qui ne fait pas de restriction sur le type, la dimension ou la destination des conteneurs. La stratégie d'unité baie provoque plus de pénuries d'emplacements de stockage que la méthode d'unité pile, mais par contre son avantage est qu'elle réduise le temps total passé par les camions dans les blocs de la zone de stockage. Une autre remarque pertinente faite par les auteurs lors des simulations, est que l'affectation des conteneurs à des blocs qui sont plus proches des quais est moins avantageuse que la méthode d'affectation aléatoire, et ceci en calculant le temps moyen passé par les camions dans les blocs de la zone de stockage.

Jiang et al. [Jiang 16] ont proposé un modèle qui se base sur deux principes : la répartition de la cour de stockage et l'attribution d'une charge de travail équitable entre les grues de cour. Ce modèle a été développé

spécialement pour le traitement des conteneurs de transbordement c'est-à-dire ceux qui transitent entre différents navires avec un stockage temporaire dans la zone de stockage. Ce modèle repose sur deux phases principales : phase d'allocation de l'espace de stockage pour chaque navire, et la deuxième phase de précision des espaces de stockage pour deux navires et d'équilibrage de charge entre les grues de cour. Pour la première phase, elle est appelée aussi « template generation », son objectif est d'allouer des espaces de stockage pour chaque navire. Cependant, la deuxième phase appelée « space allocation and workload assignment », vise à déterminer pour les espaces de stockage qui sont déterminées dans la première phase des emplacements de stockage dédiés à deux navires différents, ainsi qu'équilibrer le nombre de conteneurs à stocker entre les grues de cour de chaque bloc. Les auteurs ont proposé trois modèles mathématiques, le premier modélise la première phase d'allocation d'espace de stockage et vise à allouer des espaces de stockage de tailles minimales mais suffisantes, et les deux autres modèles visent à séparer par un espace de stockage commun deux espaces consécutifs réservés à deux navires différents. Pour les deux derniers modèles, deux cas de figures ont été traités, ils visent à identifier des espaces de stockage fixes pour les conteneurs arrivés et à maximiser la taille totale des espaces communs. Une deuxième méthode vise à allouer un espace dynamique variable en fonction de la charge de travail des grues de cour qui vise à minimiser la taille totale des espaces de stockage réservés dans chaque bloc. Les stratégies proposées ont montré leurs performances par rapport à la méthode de séparation de flux, cependant dans les modèles mathématiques, certaines incertitudes et contraintes supplémentaires (à savoir les destinations des navires, EDTs) ne sont pas prises en compte.

2.2 CONCLUSION

Nous avons décrit l'état de l'art détaillé des problèmes des terminaux portuaires qui sont intéressés par la résolution des problèmes liés au YOP dans un premier lieu. Dans la deuxième partie nous avons entamé les approches de résolution à la base de l'optimisation et la simulation. Nous avons présenté aussi quelques travaux qui font le couplage de l'optimisation et de la simulation comme nouvelle approche de résolution.

Le chapitre suivant présente les différentes méthodes de résolution existantes dans la littérature et qui peuvent être adaptées pour la résolution de ces types de problèmes.

Chapitre 3 : Méthodes de résolution et Approche adoptée

3.1 Préambule

L'enjeu principal de la phase de résolution est d'optimiser (minimiser ou maximiser) un ou plusieurs objectifs en satisfaisant un certain nombre de contraintes. Pour chaque problème d'optimisation, l'objectif est donc de bien choisir une méthode de résolution performante pour obtenir des résultats meilleurs. Deux critères principaux derrière le choix d'une méthode de résolution : l'efficacité des résultats et le temps de résolution. Pour la résolution d'un problème d'optimisation, on fait appel à deux classes de méthodes de résolution : méthodes exactes et méthodes approchées (heuristiques ou méta-heuristiques).

Les méthodes exactes sont conçues généralement pour résoudre des problèmes de petite taille, auxquelles elles peuvent trouver des solutions optimales en un temps raisonnable. Les cas échéant, cas des problèmes de moyen et de grande taille de données, on fait recours à des méthodes approchées que ce soit des heuristiques spécifiques ou des méta-heuristiques qui permettent de trouver des solutions réalisables en un temps raisonnable : l'algorithme génétique, l'algorithme de colonies de fourmis, le recuit simulé, la recherche avec tabou, etc. On peut aussi combiner ou hybrider deux méta-heuristiques pour améliorer les résultats trouvés.

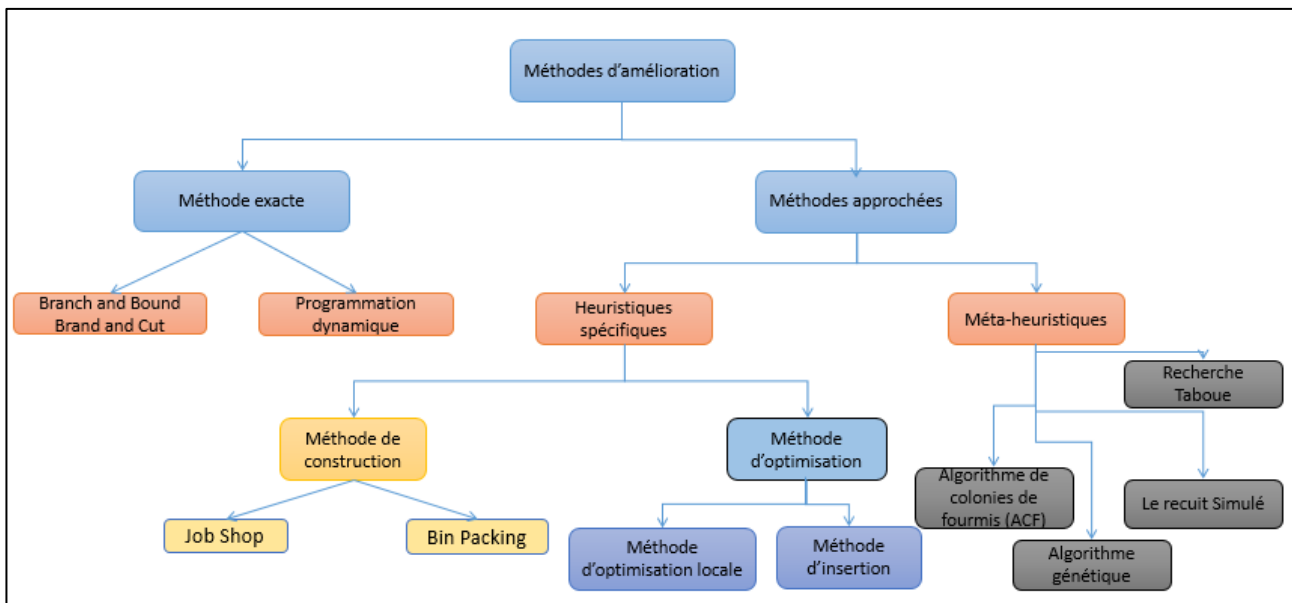


Figure 9e : Méthodes de résolution d'un problème d'optimisation

Vu la diversité des méta-heuristiques, il est difficile d'élaborer une liste exhaustive de toutes les méta-heuristiques qui ont été utilisées jusqu'à présent. Le travail de Kemme et al. [Kemme 12] a classifié différents problèmes de planification dans un terminal à conteneurs en fonction des deux zones. Il a ainsi présenté différentes techniques d'optimisation exactes et méta-heuristiques pour la gestion d'un terminal à conteneurs selon les trois niveaux de décision : stratégique, tactique et opérationnel.

Comme cité auparavant, nous avons traité trois problèmes de logistique portuaire : le problème d'allocation d'espace de stockage des conteneurs, le problème d'ordonnancement et d'affectation des véhicules de transport interne (TT), et le problème d'optimisation de la cour de stockage. Les problèmes d'optimisation étudiés dans cette thèse sont des problèmes d'optimisation combinatoire NP-difficiles, ce qui nous a encouragé à faire appel aux méthodes approchées pour résoudre ce type de problème. Nous signalons aussi le fait d'utiliser les méthodes exactes pour la validation des modèles mathématiques sur des petites instances.

Notre méthodologie dans ce chapitre est la suivante : étudier les méthodes d'optimisation combinatoire appliquées aux problèmes traités. Cette étude commence tout d'abord par la description de la méthode exacte Branch and Bound. Ensuite, détailler les différentes méthodes heuristiques et méta-heuristiques appliquées à chaque problème. Par la suite, présenter la partie simulation en introduisant ses différents aspects, pour finalement présenter notre approche de résolution.

3.2 Méthodes de résolution Exactes

Le principe de base d'une méthode exacte est de générer une solution optimale à un problème d'optimisation. Plusieurs variantes des méthodes de résolution exactes ont été présentées dans la littérature, telles que :

- La méthode des plans sécants
- Les méthodes énumératives : qui énumèrent les solutions de l'espace de recherche de manière implicite. L'efficacité de ces méthodes dépend de leur capacité à écarter les solutions non réalisables à partir d'une analyse du problème. Les trois fameuses méthodes les plus connues dans la littérature sont :
 - La programmation dynamique
 - La méthode d'énumération implicite
 - Les algorithmes de branchement : la méthode de séparation et évaluation (Branch and Bound) et ses variantes Branch and Cut et Branch and Price. Ces méthodes sont considérées comme des algorithmes de recherche arborescente où la recherche des solutions s'effectue sur tout le périmètre du domaine de résolution

3.2.1 Méthodes des plans sécants (Cutting planes)

La méthode des plans sécants est une famille de méthodes itératives utilisées pour résoudre les problèmes de programmation linéaire à variables entières ou mixtes. Pour illustrer cette méthode, on considère le problème de programmation linéaire en nombres entiers (IP) ci-après :

$$Z_{IP} = \max\{C^t x \mid x \in S\} \text{ (IP) où : } S = P \cap Z^n \text{ et } P = \{x \in R^n \mid Ax \leq b\}$$

On notera par $\text{Conv}(S)$ l'enveloppe convexe de S .

A chaque itération, la méthode des plans sécants résout la relaxation linéaire d'une formulation P' du problème (IP). Au cas où la solution optimale, notée S_R , est fractionnaire, elle tente de renforcer P' par l'ajout d'une contrainte (coupe) qui élimine S_R tout en conservant toutes les solutions entières.

L'algorithme des plans sécants se présente comme suit :

Répéter

- Résoudre le problème $\max\{C^t x \mid x \in P\}$. Soit x^* la solution optimale
- Si la solution x^* est entière alors rapporter x^* comme solution optimale du problème (IP) et Terminer
- Résoudre le problème de séparation pour P et x^* et obtenir l'inégalité valide (π, π_0) si elle existe.
- Si (π, π_0) existe, alors poser $P := P \cap \{x \in R^n \mid \pi^t x \leq \pi_0\}$ sinon rapporter la borne générée par la dernière relaxation puis terminer.

Jusqu'à l'infini

Ainsi, les algorithmes de plans sécants se terminent:

- Soit par une solution optimale. C'est le cas de l'algorithme des plans sécants de Gomory [36] qui utilise les coupes de Gomory-Chvatal et dont la convergence en un nombre fini d'étapes avec une solution entière optimale est prouvée
- Soit par une borne qui est au moins aussi bonne que celle obtenue par la relaxation linéaire du problème (IP)

Les algorithmes de plans sécants présentent l'inconvénient de ne pas fournir de solution réalisable au cours de leur exécution. De plus, lorsqu'ils sont orientés vers la recherche de l'optimalité, ils accusent en général un taux de convergence long durant les dernières itérations.

Pour ces deux raisons, ils sont souvent utilisés comme des sous routines des algorithmes de Branch and Bound afin de fournir des bornes duales de bonne qualité aux nœuds de l'arbre de recherche

3.2.2 Méthodes énumératives

3.2.2.1 Méthode de séparation et évaluation (Branch and Bound)

Dans notre thèse, nous avons utilisé la méthode de séparation et évaluation. Cette méthode exacte est utilisée par défaut dans le logiciel ILOG CPLEX. Elle se base sur le principe d'énumération implicite de toutes les solutions du problème traité. Elle subdivise le problème général en sous-problèmes, pour chercher des solutions dans l'espace de recherche entier. Cet espace de recherche se représente comme un arbre, où chaque nœud représente une solution du problème dans l'espace de recherche associé. Les nœuds se présentent comme étant les sous-problèmes de l'espace de solution et les branches des nœuds comme étant des solutions du problème. Les deux opérateurs de séparation et d'évaluation sont derrière la construction et l'élaboration de cet arbre de solutions.

La meilleure solution est améliorée au fur et à mesure de l'évolution de l'algorithme de résolution. Pour améliorer les solutions trouvées, une liste est constituée des nœuds racines générés non encore traités. Les stratégies suivantes sont utilisées à chaque itération :

- La stratégie de séparation : son objectif est de diviser le problème principal en sous-problèmes réalisables. Donc c'est à travers la résolution des sous-problèmes qu'on peut générer une solution du problème principal
- La stratégie d'évaluation : à travers une évaluation de chaque solution partielle, le principe de cette stratégie se repose sur le fait d'éliminer les solutions partielles qui, soit ne génèrent pas une solution réalisable, soit qu'elles ont générées une valeur plus grande par rapport à la meilleure solution trouvée

Généralement les résultats sont générés dans un temps raisonnable lors de l'utilisation de la méthode de Branch and Cut, et ceci pour des instances de petite et moyenne taille. La solution optimale du problème étudié se génère donc dès le départ et après l'élaboration de tous les nœuds actifs.

3.2.2.2 La variante Branch and Cut

L'efficacité de l'algorithme du Branch and Bound est intimement liée à la qualité des bornes duales obtenues pour les nœuds de l'arbre de recherche. En effet, plus les bornes sont meilleures, plus elles entraînent l'élagage par borne des nœuds, prévenant ainsi l'énumération explicite de sous-ensembles entiers de l'espace de recherche.

C'est dans le souci de l'amélioration des bornes duales que l'algorithme de Branch and Bound est souvent associé à un algorithme de plans sécants, dans le cadre de la résolution des problèmes de programmation linéaires en nombres entiers ou mixtes, donnant ainsi lieu à la variante Branch and Cut.

Cette variante se distingue par un appel à un algorithme de plans sécants au lieu de la simple résolution d'une relaxation du sous problème courant.

Enfin, il est à noter que les algorithmes Branch and Cut sont largement utilisés dans les solveurs d'optimisation professionnels en raison de l'efficacité des coupes qu'ils utilisent.

3.3 Méthodes de résolution approchées

Les méthodes approchées ont été appliquées pour la résolution des problèmes complexes et ceci dans différents domaines d'activités : la logistique, le transport, l'industrie automobile, l'aéronautique, l'ordonnancement de la production, etc. Elles sont conçues principalement pour résoudre les problèmes de moyenne et grande taille contrairement aux méthodes exactes, et génèrent donc des solutions réalisables en un temps raisonnable.

Les méthodes approchées peuvent se diviser en deux catégories : heuristiques spécifiques et méta-heuristiques. Les heuristiques sont souples et facile à implémenter par rapport aux méta-heuristiques, mais qui peuvent générer aussi des résultats meilleurs en un temps raisonnable. Les méta-heuristiques sont basées sur trois critères principaux : la diversification, l'exploitation et la mémorisation. Pour la diversification, elle consiste à consulter les différents espaces de recherches pour trouver les solutions réalisables possibles. L'exploitation quant à elle, permet d'utiliser et d'exploiter la meilleure solution trouvée en la comparant avec celles qui sont déjà générées. Et enfin la mémorisation, elle permet de mémoriser l'ensemble des bonnes solutions générées.

3.3.1 Heuristiques

Puisque les approches exactes ne peuvent traiter que des problèmes beaucoup plus petits que ceux envisagés dans les applications réelles, et que les méta-heuristiques peuvent traiter des problèmes de grande taille mais elles sont relativement difficiles à implémenter, nous allons nous concentrer sur les approches heuristiques. La plupart des procédures de résolution fonctionnent en deux phases, cherchant d'abord à obtenir une bonne solution, puis cherchant à l'améliorer.

Les heuristiques choisies sont appliquées sur les différents problèmes étudiés, l'objectif principal est donc de vérifier l'optimalité de chaque solution trouvée, et ensuite de l'améliorer par les méthodes d'amélioration locale.

Chaque heuristique choisie doit veiller à la satisfaction de trois critères principaux qui contrôlent la qualité de la solution :

- *Le temps de calcul* : L'importance est que le temps de calcul dépend de la préparation et de la qualité de la solution requise. Dans notre cas, l'affectation et l'enchaînement des opérations se fait presque en temps masqué juste avant l'arrivée du navire, ce qui nécessite une rapidité de l'exécution de l'algorithme proposé
- *La simplicité* : Quelques heuristiques de VRP sont rarement utilisées, car elles sont trop compliquées à comprendre et à coder. C'est pourquoi l'algorithme de CW (Clark and Weight) est si populaire. Son principe de base est assez facile à comprendre et à coder
- *La flexibilité* : Une bonne heuristique de VRP doit être suffisamment souple pour les différentes contraintes rencontrées dans des applications réelles. C'est le principal thème dans la plupart des revues de la littérature de VRP. Souvent, il n'est pas trop difficile à se trouver face à des changements nécessaires, mais le plus difficile est de se trouver face aux relaxations de quelques contraintes, et dans la plupart des cas ça serait très difficile de modifier tout le modèle

Contrairement aux méthodes exactes les heuristiques ne garantissent pas l'optimalité de la solution trouvée. On distingue trois familles majeures d'heuristiques :

- Les heuristiques constructives ;
- Les heuristiques de recherche locale ;
- Les méta-heuristiques qui font l'objet de la section suivante ;

Heuristiques constructives

Une heuristique constructive construit progressivement une solution à travers une suite de choix partiels et définitifs (sans retour en arrière).

Une solution typique retournée par l'heuristique prend la forme suivante :

$$S = (<k_1, V_1 >, <k_2, V_2 >, \dots, <k_n, V_n >)$$

où k_i est l'indice de la variable fixée à l'itération i et V_i sa valeur.

L'efficacité des heuristiques constructives dépend dans une large mesure de leur capacité à exploiter des connaissances sur le problème. Parmi ces heuristiques, on distingue l'algorithme glouton qui opère le meilleur choix possible à chaque itération.

Heuristiques de recherche locale

Une heuristique de recherche locale est une méthode itérative qui démarre avec une solution de départ S_0 et se déplace à chaque itération i d'une solution S_{i-1} à une autre solution S_i en exploitant une structure de voisinage. Le but est de trouver une solution intermédiaire ou finale meilleure que celle de départ.

3.3.2 Les variantes des méta-heuristiques

Selon Talbi et al. [Talbi 09], il existe plusieurs variantes des méta-heuristiques dépendamment de leurs origines et de leurs caractéristiques :

- Les méta-heuristiques originaires de la nature : les systèmes biologiques artificiels (colonies de fourmis et d'abeilles), et les phénomènes physiques qui sont originaires d'autres types de méta-heuristiques tels que le recuit simulé.
- Les méta-heuristiques avec et sans sauvegarde (mémoire) : certaines méthodes méta-heuristiques (comme le recuit simulé et les recherches locales) peuvent donner des informations sur l'évolution de la résolution, mais qui ne possèdent pas de mémoire pour sauvegarder les résultats obtenus. D'autre part, d'autres méta-heuristiques possèdent une mémoire (comme la méthode de recherche Tabou).
- Les méta-heuristiques déterministes et dynamiques : les méta-heuristiques à population utilisent des données fixes et des objectifs prédéfinis avant le début de chaque phase de résolution (la recherche tabou). Quant aux méta-heuristiques dynamiques ou stochastiques, elles sont basées sur des règles dynamiques qui changent au fur et à mesure (le recuit simulé).
- Les méta-heuristiques à population : elles utilisent une population entière des solutions générées pour l'améliorer à travers des opérations tout au long du processus de résolution (algorithmes génétiques) ou en parcourant les solutions trouvées (algorithme de colonies de fourmis).

3.3.2.1 Le Recuit Simulé

Métropolis dans les années 50 était derrière le principe de Recuit simulé, il s'appuie principalement sur l'effet de la température, où un métal peut être chauffé puis refroidit lentement ce qui génère un nouvel état solide cristallisé. S'il y a un déséquilibre entre le chauffage à température élevée (ou non élevée), le refroidissement obtenu est donc n'est pas progressive, il est très difficile que le matériau atteigne son état cristallisé. Le principe du RS est de simuler les changements de température dans un système jusqu'à ce qu'il converge vers un état d'équilibre.

Le RS utilise un des principes des méta-heuristiques qui est la stratégie d'exploration. Il a été appliqué sur plusieurs domaines d'activités y compris les problèmes d'optimisation combinatoire. Il se caractérise par sa facilité d'implémentation et son efficacité de résolution.

Le RS fait partie des algorithmes itératifs sans mémoire, qui démarre avec une solution initiale et après plusieurs itérations il essaie de l'améliorer en s'approchant de la solution optimale. Comme résultat, il génère un voisin aléatoirement à chaque itération, il sera accepté s'il améliore la fonction objectif. Le critère de sélection dépend de la probabilité qui dépend de la température courante et la valeur de la dégradation ΔE . Si on suppose que la solution courante S_0 est moins bonne que la solution précédente S , et les fonctions objectifs sont $f(S)$ et $f(S_0)$ des deux solutions. Par conséquent, la valeur de la dégradation du résultat est : $\Delta E = f(S) - f(S_0)$. Cette probabilité de sélection suit la loi de Boltzmann : $P(\Delta E, T) = e^{-\frac{f(S_0) - f(S)}{T}}$.

Il s'avère que cette distribution dépend du paramètre de température T . Dépendamment du niveau de température plusieurs solutions peuvent être acceptées. La température commence à diminuer progressivement une fois l'état d'équilibre est atteint, par conséquent on limite l'adhésion des nouvelles solutions [Talbi 09].

Algorithme de recuit simulé (RS)

Initialiser

S : Solution initiale

T : Température initiale

K : Coefficient de la température

Répéter

Générer un voisin : S_0 ;

$\Delta E = f(S_0) - f(S)$;

Si $\Delta \leq 0$ alors $S = S_0$; / S_0 est la nouvelle solution */*

Sinon Accepter S_0 en fonction de $P(\Delta E, T)$

Mise à jour de la température ;

***Jusqu'à** une condition d'arrêt ; /* On s'arrête quand T atteint un seuil fixé proche de 0 */*

***Résultat** : la meilleure solution obtenue.*

Le principe de fonctionnement de l'algorithme RS, s'appuie principalement sur :

- *Solution initiale* : cette solution est générée principalement par une méthode heuristique simple.
- *Acceptation du voisinage* : si le voisin généré est bon il sera accepté automatiquement, sinon on calcule la probabilité d'acceptation de ce voisin, qui est proportionnelle à la température T .
- *Température* : on fixe la température T à chaque étape i de l'algorithme (T_i), le choix T_i a un impact majeur sur la résolution du problème. La probabilité d'acceptation des solutions moins bonnes diminue au fur et à mesure de l'exécution, ceci est contrôlé par le paramètre de refroidissement. La règle géométrique la plus utilisée pour le contrôle de ce paramètre s'écrit suivant la formule : $T = \alpha \times T$ tel que $\alpha \in]0, 1[$.

3.3.2.2 Recherche Tabou Unifié (Unified Tabu Search : UTS)

Plusieurs auteurs ont utilisé l'approche Tabou. Cette méta-heuristique fait partie des méta-heuristiques avec mémoire, elle a été proposée au milieu des années 80. Son caractère spécial est qu'elle accepte que la fonction se dégrade avec le moins pire des voisins même si ce dernier est moins bon que la solution connue. Elle restreint également l'accès à des solutions déjà rencontrées et force l'exploration de nouvelles régions en conservant les informations sur les solutions déjà visitées dans une liste Tabou. C'est pourquoi il faut que l'heuristique ait de la mémoire : le mécanisme consiste à interdire (d'où le nom de *tabou*) de revenir sur les dernières positions explorées. Cela a pour effet d'éviter de cycler et de retourner trop rapidement dans des optimums locaux déjà visités. La recherche Tabou se résume comme suit :

Recherche Tabou Unifié (UTS)

Initialiser

S_0 : Solution initiale

M : initialiser la mémoire

$S^* = S_0; k = 0$

Répéter

Choisir S_{K+1} , une solution voisine de S_K , en utilisant les données de la mémoire tabou.

Si S_{K+1} est meilleur que S^* alors $S^* = S_{K+1}$

Mettre à jour la mémoire tabou. Les derniers tabous sont éliminés pour faire place aux nouveaux

Si non $k = k+1$;

Jusqu'à une condition d'arrêt ;

Résultat : la meilleure solution obtenue.

Les solutions requises après l'exploration de l'espace de recherche sont sauvegardées dans une liste selon la stratégie FIFO, cette liste est appelée liste tabou. Une des difficultés de cette méthode est qu'elle doit conserver les positions complètes dans liste générée, ce qui cause parfois des problèmes de mémoire, et qui nécessite une opération d'archivage des informations mémorisées. Cette difficulté peut être surmontée et ceci en ne gardant en mémoire que les derniers mouvements associés aux valeurs optimales de la fonction objectif.

3.3.2.3 Les Algorithmes Génétiques (AG)

Principe des AG ordinaire

L'application des AGs a commencé depuis les années 90 sur différents problèmes d'optimisation combinatoire y compris le problème du voyageur de commerce.

Dans la première étape de l'AG, on génère une population fixée de parents (ou d'individus). Un parent est une solution réalisable exprimée sur un ensemble de bits appelés aussi des chromosomes. Un AG s'appuie sur différentes étapes pour améliorer la solution générée : sélection, mutation, croisement et remplacement. L'opérateur de sélection consiste à choisir des parents d'une façon aléatoire ou rationalisée. Ensuite,

l'opérateur de mutation a pour objectif de modifier d'une façon aléatoire le contenu d'un individu pour créer des nouveaux individus. Les enfants sont générées suite à l'opérateur de croisement, qui consiste à combiner deux parents. Finalement, les solutions requises sont insérées dans la population à l'aide de l'opérateur de remplacement.

La politique de remplacement des parents se fait en fonction de la qualité de ses descendants pour assurer finalement la conservation des solutions optimales pour améliorer la fonction objectif. Dans ce qui suit, nous introduisons les différentes étapes de l'application d'un AG :

Opérateur de sélection

Les règles de sélection reposent sur le principe de choisir les meilleurs individus qui seront les mieux placés pour devenir des parents. Les moins bons ou les mauvais ne sont pas rejetés, ils peuvent être sélectionnés dans les prochaines itérations.

Il existe plusieurs types de sélection selon Talbi et al. [Talbi 09], à savoir :

- Sélection uniforme : c'est une sélection aléatoire des individus. Ce principe se repose sur le fait qu'il n'y a aucun critère pour éliminer les individus, ils ont donc la même chance d'être sélectionnés.
- Sélection par rang : consiste à faire un tri des solutions existantes, et par la suite de choisir celles qui ont des meilleures valeurs de la fonction objectif.
- Sélection par tournoi : comme son nom l'indique, c'est une compétition entre k individus choisis au hasard. Il convient finalement à choisir de ces k membres la meilleure solution.
- Sélection par roue de la fortune : c'est la stratégie la plus connue et utilisée pour la plupart des algorithmes génétiques. Chaque individu a une probabilité de sélection qui est proportionnelle à sa fonction d'adaptation (son fitness).

La probabilité p_i de sélection d'un individu i qui a un fitness f_i est égal à : $p_i = \frac{f_i}{\sum f_i}$.

La sélection des individus se fait à travers un tirage au sort homogène.

Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation agit principalement sur un seul individu (unaire), à travers un petit changement de l'individu choisi. On définit P_m comme étant la probabilité de mutation du gène pour chaque élément. Les valeurs de P_m qui sont choisis sont généralement entre [0.001, 0.01]. Au début de chaque cycle, le nombre de bits de l'enfant à muter est fixé.

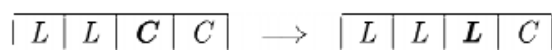


Figure 10: Exemple d'une mutation

Opérateurs de croisement

Cet opérateur se caractérise par son aspect binaire ou n-aires, son rôle est de croiser deux parents ou plus pour générer les descendants en héritant leurs caractéristiques. Comme l'opérateur de mutation, cet opérateur a une probabilité P_x d'application pour laquelle une valeur entre $[0.45, 0.99]$ est recommandée pour choisir un tel individu.

Par exemple, l'opérateur de croisement en 1-point, un individu est choisi au hasard et par conséquent deux enfants sont créés en échangeant les parties sélectionnées des deux parents. Pour le passage en n-unaires une extrapolation de cette opération permet donc d'obtenir le croisement en n-points.

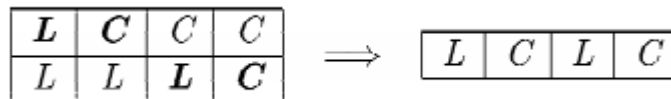


Figure 11: Exemple de croisement

Stratégies de remplacements

La dernière étape dans un algorithme génétique est la phase de remplacement, dans laquelle on fait un regroupement des individus de la population actuelle et ceux de la population descendante. Etant donné que le nombre des membres d'une population est constant, il est donc nécessaire de retirer les individus les moins bons et ceci à travers une stratégie de remplacement définie. On peut distinguer désormais entre deux stratégies de remplacement :

- (1) Le premier type est un remplacement qui prend en compte la population entière.
- (2) Le deuxième type utilise un seul individu comme entrée, il convient donc à choisir depuis la population globale le plus mauvais individu pour être remplacé avec celui qu'on vient de générer. La figure 12 représente les différentes étapes d'un AG.

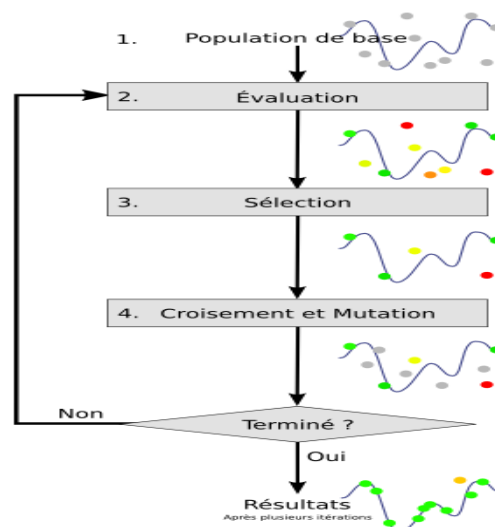


Figure 12 : Processus de l'Algorithme génétique

Algorithmes génétiques hybrides

Les algorithmes génétiques hybrides sont de plus en plus sollicités ces dernières années pour résoudre des problèmes plus complexes de grande taille. Les opérateurs génétiques habituels (sélection, croisement et mutation) y sont associés à une éducation des solutions par recherche locale, qui remplace ici la mutation pour produire un algorithme hybride plus puissant.

Cette méthode s'appuie aussi sur une relaxation particulière du problème, où des solutions pénalisées enfreignant les limites sont maintenues dans une population secondaire. Ainsi en effectuant des croisements entre individus réalisables et irréalisables, nous cherchons à placer la recherche près des frontières de faisabilité.

D'après plusieurs travaux de Hart dans les années 90, qui étaient menés sur les différentes variantes de l'AG, l'enjeu principal est d'assurer une intégration entre l'AG classique et les méthodes de recherche locale à savoir la recherche Tabou ou le recuit simulé Yao et al. [Yao 03]. L'objectif derrière cette intégration est d'éviter la convergence rapide vers un optimum local, et par contre accélérer la recherche d'un optimum global et réduire par conséquent le temps d'exécution total.

3.3.2.4 Les algorithmes de colonies de fourmis (ACF)

Principe de l'ACF

L'algorithme de colonie de fourmis (ACF, en anglais Ant Colony Algorithm (ACF)) comme son nom l'indique, est inspiré de la nature depuis les mouvements coopératifs des fourmis. L'idée principale est d'utiliser donc ce principe pour résoudre les problèmes d'optimisation à savoir : les problèmes d'affectations, d'ordonnancement ou de routage... Les premières applications de L'ACF reviennent au milieu des années 90 par Dorigo et al. La base de ces algorithmes est l'approche multi-agent où chaque agent représente le comportement d'une fourmi réelle.

Chaque fourmi contribue au bien-être de la communauté, et inversement, la communauté aide chaque fourmi dans son évolution, c'est le principe de l'Hétéarchie (contrairement à la Hiérarchie). En observant le comportement collectif des fourmis, on s'aperçoit qu'elles sont entrain de trouver le plus court chemin entre les environs du nid et la source de nourriture.

Le principe de communication entre les fourmis se repose sur un principe simple. En partant de son nid, une colonie de fourmis peut accéder à une source de nourriture à travers plusieurs chemins. Elles déposent lors de leurs déplacements une substance odorante appelée phéromone.

La phéromone est une substance chimique à partir de laquelle les fourmis s'y retrouvent, et elle permet ainsi de les guider vers le point cible.

Le choix du chemin dépend alors de la quantité des phéromones déposées sur chaque chemin, cette méthode permet à l'ensemble de la colonie de détecter le chemin le plus court entre plusieurs autres chemins grâce à des capteurs sur leurs antennes. Ce principe se dégrade au fil du temps à cause du processus d'évaporation qui diminue la quantité des phéromones sur les chemins tracés par les fourmis.

L'ACF utilise ainsi ces deux principes lors de la construction des solutions et la mise à jour des phéromones.

Algorithme de colonie de fourmis

Initialiser

Q_0 : Quantité des phéromones;

Répéter

Pour Chaque fourmi faire

A la base de la quantité des phéromones, construire les solutions possibles.

Mettre à jour la quantité des phéromones :

Evaporation ;

Renforcement.

Jusqu'à une condition d'arrêt /*Nombre maximal d'itérations*/;

Résultat : la meilleure solution obtenue ou ensemble de meilleures solutions.

Les différents systèmes d'ACF

Plusieurs types d'ACF ont été étudiés dans la littérature, on cite dans ce qui suit les deux types d'ACF les plus utilisés :

– *Ant Colony System (ACS)* : ce système a été proposé par Dorigo dans les années 90 [Dorigo 90], il est adapté beaucoup plus aux problèmes de grande taille. Il se caractérise par son aspect dynamique concernant la génération des solutions à la base du calcul de la quantité des phéromones.

– *Max-Min Ant System* : ce système repose sur l'utilisation du principe des pistes des phéromones comme il est indiqué dans le travail de Stutzel dans les années 2000 [Stutzel 00], la base de ce système est décrite comme suit :

- (1) Les quantités des phéromones encadrent les valeurs des pistes de phéromone : ρ_{min} et ρ_{max} .
- (2) La quantité de phéromone est initialisée à ρ_{max} .
- (3) La piste de la quantité de phéromone, la piste se met à jour par la meilleure fourmi.
- (4) La mise à jour des pistes est proportionnelle.

Dans ce travail, on a opté pour le deuxième système qui est à la base du système Max-Min Ant System pour la résolution des problèmes étudiés.

Comme il a été présenté précédemment, L'ACF a été initialement créé pour la résolution du problème du voyageur de commerce ; mais il a été généralisé par la suite à d'autres types de problèmes, à savoir les problèmes des terminaux à conteneurs.

3.4 Simulation

L'approche de la simulation s'appuie principalement sur trois piliers principaux : la modélisation qui consiste à construire un modèle correspondant au problème étudié, ensuite l'expérimentation qui vise à tester le modèle proposé suivant la variation d'un ensemble de paramètres, et finalement la validation qui vise à valider les données et les résultats obtenus en contre partie de ceux de la réalité. La simulation est utilisée aujourd'hui dans la chaîne logistique dans les flux de production, d'expédition et de planification. Plusieurs modèles ont été conçus aussi pour la gestion des flux de transport et acheminement des marchandises.

La simulation permet donc d'évaluer la performance du comportement d'un système réel. De ce fait, elle peut être utilisée pour mesurer un système, accroître le taux d'utilisation des ressources et aussi dans certain cas prouver la performance et le potentiel d'installation d'un nouvel équipement. Les approches de simulation peuvent traiter aussi les incertitudes et les imprévus qui peuvent être engendrés par les différents intervenants de la chaîne logistique.

Etant donné que les approches de simulation nécessitent des valeurs d'entrée pour leur exécution, les méthodes de résolution approchées génèrent des solutions qui peuvent être utilisées par les systèmes de simulation. Drogoul et al. dans les années 90, ont défini les étapes principales pour la mise en place d'une approche de simulation, en se basant sur les étapes ci-dessous :

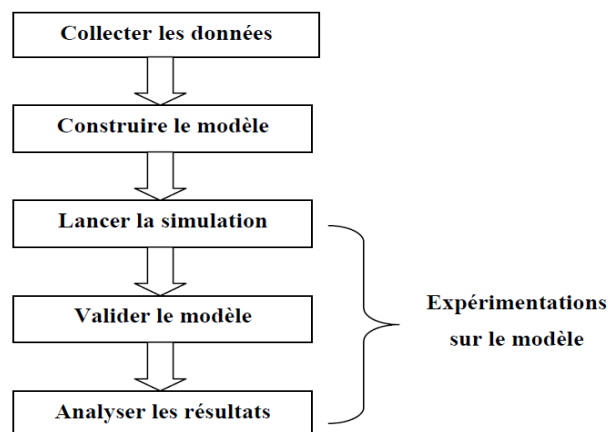


Figure 13 : Etapes de conduite d'une approche de simulation

1) *Modélisation du système étudié* : à partir d'un système réel, la simulation consiste à construire un modèle afin de réaliser des expériences et des tests sur le modèle conçu pour évaluer son fonctionnement. La première modélisation du système étudié doit prendre en considération les différentes relations et interactions entre les processus et les acteurs existants, ainsi que les liens du nouveau système avec l'ancien environnement.

2) *Construction du modèle de simulation* : la mise en place d'un simulateur peut se faire soit à travers un langage de simulation (ARENA, Flexsim, Anylogic) ou un langage de programmation. Dans notre cas on a opté pour le premier choix.

3) *Mise en place du modèle de simulation* : cette étape est le fruit des deux premières étapes. L'objectif derrière cette étape est de tester plusieurs scénarios de résolution pour analyser et tester le système étudié.

4) *Validation du modèle de simulation* : c'est la partie la plus critique qui consiste à bâtir une confiance mutuelle entre les concepteurs et les exploitants à travers la performance des résultats des simulations présentées. L'objectif est donc de s'assurer que les hypothèses et les circonstances du système réel sont prises en compte et ainsi qu'elles sont résolues dans un temps raisonnable.

Il existe deux types de simulation discret et continu :

La base d'une simulation à événements discrets, se repose sur le fait que le système étudié change d'état et ceci après l'arrivée d'un événement déclencheur, donc à chaque instant précis elle est susceptible de générer un nouvel état comme résultat. Parmi les points faibles de ce type de simulation, le fait qu'elle consiste à définir pour chaque événement l'ordre de priorité entre les contraintes liées à l'activité à travers l'établissement des nouveaux algorithmes.

La simulation continue quant à elle, permet de modéliser un système dynamique qui évolue avec le temps, à travers des variables d'état qui évoluent dans le temps. L'idée de cette simulation a été développée par Forrester et al. dans les années 50 [Forrester 50], qui a mis en place des principes et un langage de modélisation afin de décrire et étudier la dynamique des systèmes économiques, et ensuite les systèmes sociaux.

Parmi les approches de simulation pour modéliser les systèmes à événements discrets [Xiaojun 94] à savoir : Approche par événements, Approche par cycle d'activités, Approche par processus et Approche par objets. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'approche par objets.

3.5 Choix de l'approche de résolution

La simulation reste le meilleur outil qu'on peut utiliser pour représenter n'importe quel système réel complexe selon Masanobu et al. [Masanobu 09]. Cependant, elle ne peut pas générer une solution optimale.

La simulation vise à évaluer le comportement d'un système réel, et à mesurer ses performances en tenant compte des différentes caractéristiques et contraintes du système réel. La finalité derrière un système de simulation est de mesurer l'impact des nouvelles décisions sur le système réel, et aussi, en ce qui concerne l'utilisation des nouveaux équipements et leurs impacts sur la productivité du port. La simulation peut prendre en considération les incertitudes inhérentes à chaque système.

L'approche de simulation des terminaux portuaires a été largement utilisée pour étudier les différents processus d'accostage, de transfert et de manutention des conteneurs. Le travail de Kia et al. [Kia 03] a abordé le problème de congestion dans un terminal à conteneurs. Le modèle de simulation développé par Nam et al. [Nam 08] a pour objectif de déterminer le nombre optimal d'équipements à utiliser dans un terminal à conteneurs : QCs, YCs et les véhicules de transfert interne. Tandis que Khosnevis et al. [Khosnevis 12] ont abordé le problème de la zone de stockage à travers l'utilisation des véhicules automatisés pour le chargement /déchargement des conteneurs.

L'enjeu principal est ainsi de coupler les deux approches : Simulation et optimisation. Puisque, pour la simulation, l'objectif est de pouvoir décrire le fonctionnement d'un système sans avoir à chercher une solution

optimale. Mais par contre, l'optimisation se focalise sur la génération d'une solution optimale sans se concentrer sur la description du fonctionnement du système étudié selon Armando et al. [Armando 12].

Pour tirer profit simultanément des deux approches, plusieurs travaux proposent des couplages entre les deux approches. Ainsi une approche d'optimisation [Glover 08] a été intégrée dans la simulation pour prendre en compte les risques et les incertitudes.

Plusieurs travaux ont essayé d'entamer cette nouvelle approche. Le travail de Almeder et al. [Almeder 09] a utilisé cette approche pour la résolution du problème de transfert de conteneurs qui vise à déterminer les variables de décision de la simulation grâce à l'optimisation. Ce couplage récursif permet à la simulation d'alimenter l'optimisation par la détermination des coûts d'affectation et les délais de transfert et de stockage), et en contrepartie l'optimisation détermine les valeurs optimales des variables de décision de la simulation et vice versa. Dans le travail de Benghalia et al. [Benghalia 14], un modèle de simulation a été couplé avec l'optimisation afin de déterminer les variables de décision de la simulation du transfert ferroviaire des conteneurs dans le port du Havre. Cordeau et al. [Cordeau 15] ont pu intégrer la simulation dans une heuristique de recherche locale pour la minimisation des distances parcourues par les chariots cavaliers et la réduction des temps d'attente.

Ces travaux de littérature ont prouvé l'utilité de la recherche opérationnelle dans la résolution des problèmes liés au YOP. Pour les auteurs qui ont étudié le couplage de l'optimisation à la simulation, ils ont montré l'efficacité de cette approche malgré les problèmes rencontrés et que nous avons abordé en détail.

Nous nous focalisons premièrement sur le traitement des problèmes de l'allocation de l'espace de stockage, ensuite le transfert des conteneurs par les TTs et l'optimisation de la cour de stockage et ceci en traitant le cas général de l'import, l'export et le transbordement des conteneurs.

Nous nous intéressons dans un deuxième lieu au couplage de la simulation et l'optimisation pour la résolution d'un cas pratique, qui commence d'abord par le problème d'allocation de l'espace de stockage pour des conteneurs vides, ensuite leur transfert via les TTs et finalement à travers les ATTs (Automated Terminal Trailer) pour mesurer l'amélioration obtenue à travers l'application de ce nouveau modèle.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit les méthodes de résolution qui peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes portuaires. Nous avons distingué entre les approches de résolution exactes et approchés en présentant quelques variantes de chacun d'eux. Enfin, nous avons mis l'accent sur l'approche de résolution qu'on pourra adopter dans la suite de notre thèse. Cette approche consiste dans un premier lieu dans la validation des modèles proposés pour chacun des problèmes étudiés et ceci à travers les méthodes exactes pour les petites instances. Ensuite nous abordons les instances de moyennes et de grandes tailles pour la résolution des cas réelles liés avec les contraintes spécifiques établies avec les autorités portuaires. Finalement, nous avons utilisé le nouveau concept du couplage de la simulation et l'optimisation pour la résolution d'un cas

pratique qui est l'affectation des conteneurs vides à leur espace de stockage pour les trois types de flux et ceci en utilisant un nouveau type des camions de transfert interne qui est l'ATT.

CONCLUSION :

Cette première partie était une introduction au terminal à conteneurs ainsi qu'à ses différentes composantes. Nous avons présenté l'état de l'art des différentes problématiques principalement liées à deux zones : la zone à quai (Quay Zone) et la zone de cour (Yard Zone). Par la suite, une étude détaillée a été abordée de quelques travaux dans la littérature sur les méthodes de résolution qui sont appliquées pour résoudre les problèmes liés aux deux zones, et un focus plus spécifique pour la zone de cour, concernant : le problème d'ordonnement des grues de cour, le problème d'allocation de l'espace de stockage, ainsi que le problème d'affectation et séquençement des véhicules interne. Nous avons concentré cette étude sur les articles et les travaux qui ont été publiés dans les derniers quinze ans (2003-2018), dans lesquels nous avons sélectionnés quelques travaux qui ont adopté les mêmes stratégies que nous allons présenter dans les autres chapitres. L'étude bibliographique entamée dans cette partie a révélé que les problèmes de l'allocation de l'espace de stockage de conteneurs, ainsi que le problème de transfert des conteneurs par les TTs dans un terminal à conteneurs ont été abordé sous différents aspects. Cependant, la majorité des publications proposent des méthodes qui ne tiennent pas compte de toutes les contraintes de l'espace de stockage ainsi qu'au disponibilité des équipements de transfert. Les autres approches de résolution utilisent la notion d'allocation de l'espace de stockage et le transfert des conteneurs à un groupe de conteneurs, ce qui engendre dans la plupart des cas des pertes dans les espaces de stockage. D'autres travaux écartent la possibilité des mouvements improductifs dans la zone de stockage. Au meilleur de nos connaissances, rares sont les travaux qui traitent les trois problèmes à la fois en tenant compte des différentes contraintes, tout en optimisant les coûts des trajets, le nombre de mouvements des équipements ainsi que l'optimisation de l'espace de stockage, et ceci en tenant compte des différents flux entrants et sortants.

Nous avons décrit ensuite l'état de l'art détaillé des problèmes des terminaux portuaires qui sont intéressés par la résolution des problèmes liés au YOP dans un premier lieu, aussi bien que les approches de résolution à la base de d'optimisation et la simulation. Enfin, nous avons présenté les différentes méthodes de résolution existantes dans la littérature et qui peuvent être adaptées pour la résolution de ces types de problèmes.

La partie suivante portera sur les études détaillées sur les problèmes d'allocation des espaces de stockage, le transfert des conteneurs par les camions de transfert interne, et enfin le problème master de l'optimisation de la cour de stockage (YOP).

Partie II : Problèmes portuaires et approches de résolution

Après avoir élaboré la présentation des différentes méthodes de résolution qui peuvent être appliquées à nos problèmes, nous abordons en premier temps dans cette partie la modélisation mathématique et la résolution du problème d'allocation de l'espace de stockage dans un terminal à conteneurs. Ainsi, nous allons présenter un nouveau modèle mathématique avec ses variables, ses contraintes et sa fonction objectif. Ensuite, nous proposons l'adaptation de quelques méthodes de résolution. Ensuite dans le chapitre cinq, nous présentons la modélisation et la résolution du problème de transfert des conteneurs avec les méthodes de résolution choisies. Enfin, nous abordons les problèmes liés à la zone de cour à travers le problème YOP avec une nouvelle modélisation mathématique (avec le concept de la fonction multi objectifs). Le YOP fait appel aux deux problèmes étudiés précédemment dans les chapitres quatre et cinq, l'idée principale est de pouvoir utiliser les meilleurs résultats obtenus après la résolution de chacun de ces problèmes, et de les utiliser pour la résolution des problèmes globale appelé YOP. Nous donnerons les résultats des expérimentations numériques dans chacun de ces problèmes avec une étude comparative avec les autres approches de résolution dans la littérature. Et finalement dans la fin du chapitre six, nous présentons un cas pratique de transfert des conteneurs vides à travers l'utilisation des résultats de l'optimisation et la simulation.

CHAPITRE 4 : Problème d'allocation de l'espace de stockage (SSAP)

Le choix de la méthode de résolution est un facteur déterminant dans la performance du résultat trouvé. Nous avons opté pour le choix d'une méta-heuristique qui se base sur le problème de Bin Packing et avec une combinaison avec la méthode d'insertion et d'allocation. Le choix se justifie par sa maturité et son efficacité qui réside dans le fait qu'il peut générer une solution réalisable diverse et de meilleur coût.

4.1 Préambule

Les terminaux à conteneurs sont divisés en deux catégories : ports automatisés et non automatisés. Les équipements utilisés dans chaque port dépendent de la nature de ce dernier, dans un port automatisé (Automated Port (AP)), on peut trouver par exemple les RMGC (Rail Mounted Gantry Crane), les véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicles (AGV)), l'ALF (Automated Lift Vehicle...). Contrairement aux AP, les Ports non automatisés (Non Automates Port (NAP)) ou semi automatisés utilisent des équipements adaptés pour la manutention des conteneurs à savoir les YCC (Rubber-Tyred Gantry Cranes) et les camions de transfert interne.

Les RMGCs sont des portiques automatisés qui ne nécessitent pas de conducteurs dédiés. Leur circulation se fait sur des rails, et sont généralement deux fois plus rapides que les YCCs :



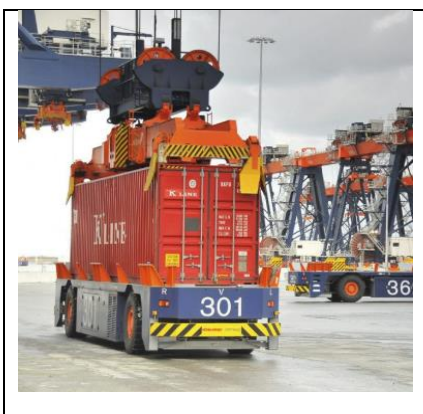


Figure 14 : Exemple d'une RMGC



Figure 15 : Exemple d'une YCC

Les YCCs peuvent circuler librement à l'intérieur de la zone de stockage : passage d'un bloc à un autre, rotation 90° pour effectuer des mouvements orthogonaux au cas de besoin contrairement aux RMGCs qui ne peuvent rouler que sur les voies ferrées. L'inconvénient des YCCs c'est qu'ils dépendent de l'existence et la disponibilité des conducteurs contrairement aux RMGCs qui peuvent être utilisées à tout moment.

Un véhicule autoguidé (AGV) est un robot mobile (permet essentiellement d'économiser la main d'œuvre) capable de s'orienter automatiquement à l'aide : des marqueurs du sol, des aimants ou des lasers. Le contrôle des AGVs se fait via des ordinateurs, et ils sont dotés de pare-chocs automatiques. Les AGVs peuvent transporter un à deux conteneurs selon leur configuration, et ils peuvent interagir avec des grues.

		
<p>Figure 16 : Exemple d'un AGV</p>	<p>Figure 17 : Cavalier gerbeur</p>	<p>Figure 18 : Exemple d'un camion de transfert interne</p>

L'autre type de véhicules utilisés pour le transfert des conteneurs est les cavaliers gerbeurs. Ils peuvent combiner trois opérations à la fois : soulever, transférer et manutentionner/placer un conteneur sans aucune interaction avec les grues. L'autre avantage des cavaliers gerbeurs, c'est qu'ils sont capables d'empiler jusqu'à quatre conteneurs. Ils nécessitent, par contre, un conducteur pour effectuer les différents types d'opérations.

Le type de camion standard utilisé dans la plupart des ports internationaux sont les camions de transfert interne. Ils peuvent interagir avec les grues de quai et les grues de cour. Leur utilisation peut entraîner des congestions avec d'autres véhicules vu le trafic de transfert dans chaque port. Ils sont conduits par des chauffeurs dédiés pour effectuer le transfert entre la zone de quai et la zone de stockage et vice versa.

Selon une étude menée par Wise et al. [Wise 11] sur une variété de 114 terminaux à conteneurs, et qui avait comme objectif la distinction des types de port selon les équipements utilisés. 63% des ports utilisent des YCCs, 21% utilisent des cavaliers gerbeurs, et 6.1% utilisent des RMGCs.

En corrélation avec les équipements utilisés on trouve la configuration de la zone de stockage correspondante. Comme il a été présenté dans la première partie, on peut distinguer principalement deux types de configuration : pour les terminaux à conteneurs qui utilisent des grues de cour on parle plutôt d'un modèle compact, et pour ceux qui se servent des cavaliers gerbeurs on se retrouve face à un modèle linéaire. Pour le modèle compact, on ne trouve pas d'espaces de séparation entre les piles adjacentes. Les rangées et les baies se rassemblent pour constituer des blocs et se croisent pour former des piles de stockage dans lesquelles les conteneurs de même taille sont superposés.

Dans le cas des ports non automatisés (NAP) qui utilisent des YCCs, la disposition des blocs se fait parallèlement aux quais. Dans chaque bloc on trouve sept rangées, dont une rangée au moins est réservée pour le passage des camions de transfert interne. Leur objectif est d'acheminer les conteneurs aux baies souhaitées. Une fois arrivé, c'est aux grues de se déplacer vers eux pour charger ou décharger un conteneur. Ce type de fonctionnement est largement utilisé dans les ports asiatiques, africains et quelques ports européens.

Dans le cas des ports automatisées (AP) qui utilisent des RMGCs, les blocs de stockage se disposent d'une façon perpendiculaire par rapport aux quais. Dans ce type de configuration on trouve deux espaces

d'interaction entre les RMGCs et les véhicules de transfert interne et externe. La première zone est celle qui est adjacente à la zone à quai qui est réservée aux échanges avec les AGVs ou les véhicules de transfert interne. L'autre zone est adjacente à la zone de stockage et qui est réservée aux échanges avec les camions externes.

<p>Figure 19 : Exemple de configuration d'un port qui utilise des YCCs</p>	<p>Figure 20 : Configuration d'un port qui utilise des RMGCs</p>	<p>Figure 21 : Configuration d'un port qui utilise des cavaliers gerbeurs</p>

L'autre type de modèles linéaires est composé de blocs de stockage constitués par des rangées qui sont séparées par des espaces, pour laisser un espace pour les roues des cavaliers gerbeurs pour qu'elles se déplacent entre les blocs. Les rangées pour ce type de configuration peuvent être disposées soit parallèlement soit verticalement par rapport aux quais.

D'après Chu et al. [Chu 08], l'efficacité de l'utilisation des cavaliers gerbeurs est plus appropriée aux terminaux qui sont dotés d'un seul quai, alors que la configuration du modèle compact qui utilise les grues de cour est plus avantageuse pour les terminaux qui utilisent plusieurs portiques.

Comme il a été présenté tout au début du premier chapitre, nous avons focalisé notre étude sur les ports non-automatisés (comme c'est le cas du port de notre étude : Tanger Med), qui utilisent les YCCs et les camions de transfert comme équipement de manutention des conteneurs et bien évidemment les grues de quai pour le déchargement/chargement des conteneurs depuis/vers le navire.

Après l'accostage du navire, des grues de quai sont assignées à chaque navire amarré. Les conteneurs import sont déchargés par les grues de quai (Quay Crane (QC)). Ensuite, ils sont transportés depuis les quais vers la zone de stockage par les camions de transfert interne, l'affectation des camions à la zone de stockage doit vérifier les contraintes du modèle. Les conteneurs qui ont un temps de séjour assez court doivent être stockés auprès du point de transfert vers les camions externes dans le cas import, et tout près de la zone de quai dans le cas du transbordement. Une fois un conteneur arrive dans sa baie de stockage dans la zone de stockage, la grue de cour soulève le conteneur du camion et l'empile dans la pile de stockage selon les positions de stockage disponibles dans chaque bloc. Après la phase de stockage, une opération de manutention est toujours possible dans le temps des pauses, pour pouvoir arranger les conteneurs dans la zone de stockage en fonction de leur temps de départ prévu (Expected Departure Time (EDT)) ainsi que de leur destination.

La position d'un conteneur dans la cour est alors indiquée par ses identifiants de bloc, de baie (baie), de rangée et de niveau. Un bloc est défini par ses baies (longueur : essentiellement [20, 30] par bloc) et lignes (largeur :

environ 6 par bloc, une est réservée au passage du camion de transfert interne) et les niveaux de stockage (4 niveaux par baie). La zone de stockage est divisée généralement en plusieurs blocs, chacun composé d'un certain nombre de baies. Une baie est composée de plusieurs piles (rangées et niveaux) d'une certaine taille et contient des conteneurs de même taille. L'enjeu principale est de pouvoir assigner les conteneurs arrivant dans la zone de stockage tout en suivant une stratégie optimale qui évite les retards des opérations, optimise l'espace de stockage, évite les mouvements improductifs après chaque phase de stockage et finalement optimise les ressources matérielles ou humaines utilisées. Le problème d'allocation de l'espace de stockage (Storage Space Allocation Problem (SSAP)) est l'un des problèmes les plus courants et les plus importants dans les terminaux à conteneurs. Le SSAP traite à la fois le problème standard du stockage des conteneurs (Container Stacking Problem (CSP)) aussi bien que l'allocation et l'affectation de l'espace de stockage pour un groupe de conteneurs.

La figure 22 montre un aperçu schématique d'un terminal à conteneurs avec une capacité de $15 \times 30 \times 5 \times 4 = 9\,000$ EVP (unités équivalentes à vingt pieds), ce qui correspond à 9 000 conteneurs standard de 20 pieds.

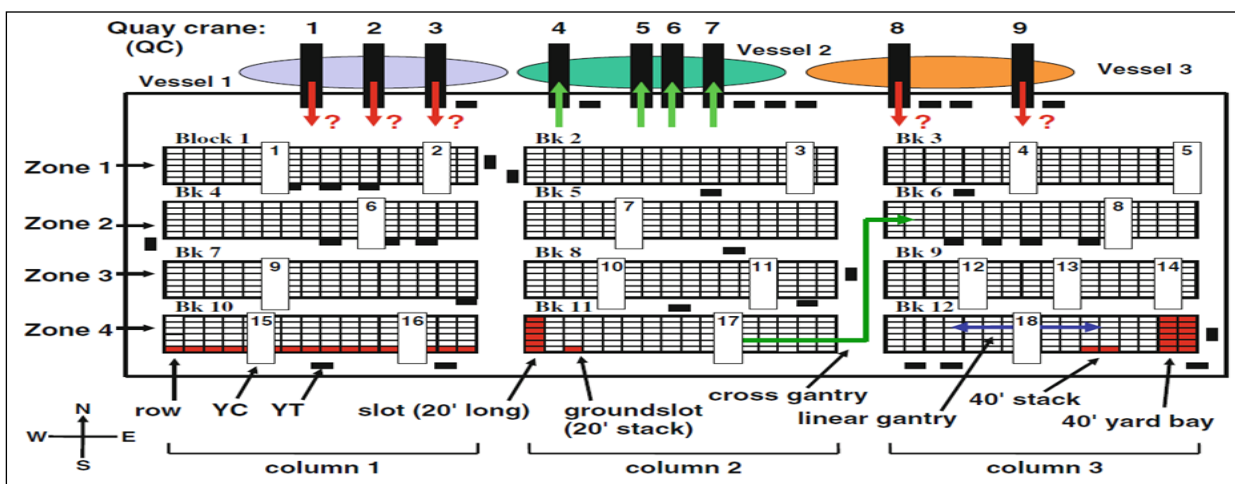


Figure 22 : Une maquette qui présente la configuration de notre port d'étude

Suite au développement exponentielle du commerce internationale, le nombre de conteneurs transitant par les ports ne cesse d'augmenter. L'enjeu de cette croissance se traduit par le fait qu'il est impossible parfois de stocker des conteneurs vu le nombre d'emplacements limité. Théoriquement, la solution la plus facile à problème pourrait être l'augmentation des surfaces de stockage, mais il est presque impossible de l'adapter vu la croissance cruciale des nombres de conteneurs en plus du coût d'investissement très élevé. L'autre solution à laquelle plusieurs terminaux à conteneurs ont fait recours, est l'utilisation d'un des avantages de la conteneurisation qui est la standardisation des tailles des conteneurs, qui rend possible leur superposition. Cette superposition a bien ses difficultés comme ses avantages. Des difficultés liées principalement aux temps de départ des conteneurs, la nature des marchandises, les destinations et le poids des conteneurs. L'idée est de pouvoir effectuer un rangement des conteneurs dans une pile selon un ordre croissant des EDT. Si cette contrainte n'est pas satisfaite on doit effectuer ainsi des opérations de manutention de conteneurs juste avant

les heures de leur départ ; ces opérations, dites mouvements improductives ou remaniements, impactent négativement sur l'efficacité des opérations portuaires.

Dans ce chapitre, nous proposerons une nouvelle formulation mathématique du SSAP, Ensuite nous présentons une nouvelle stratégie de stockage optimale qui tient compte des contraintes de stockage des conteneurs, des disponibilités des ressources aussi bien des temps d'exécution des opérations portuaires.

4.1 Les stratégies de stockage

La superposition des conteneurs dans un espace de stockage présente ses limites au niveau de l'empilement des conteneurs avec des temps d'évacuation différents. Ses limites résident dans l'effet de générer des remaniements. Ce genre d'opération concerne bien les piles dans lesquelles on a des conteneurs qui se retrouvent au fond de la pile et qui doivent quitter en premier lieu. Il s'avère nécessaire que chaque port doit adopter une stratégie de stockage pour éviter ce genre de situation. Selon Saanen et al [Saanen 07] les stratégies de stockage existantes dans la littérature peuvent être classifiées en quatre catégories qu'on présentera dans ce paragraphe en détaillant les objectifs, les avantages et les difficultés de chaque stratégie. Plus de détails sur les algorithmes utilisés ainsi que pour les travaux qui traitent les types de stratégie a été rajouté dans l'Annexe C.

4.1.1 Séparation des flux :

La séparation de flux s'articule sur le fait que l'import et l'export ont un traitement spécifique. Le principe de ce type de stockage est de séparer le flux d'importation (conteneurs entrants) et d'exportation (conteneurs sortants). Dans le cas du flux export, les conteneurs arrivent au port via des camions de transport externe ou parfois via des wagons, ils sont ensuite déchargés des camions et stockés temporairement dans la cour de stockage avant d'être transportés vers leur destination finale. Quant au flux import, le flux est inversé c'est-à-dire que les conteneurs arrivent sur les navires, ensuite déchargés par les grues et acheminés par les moyens de transfert interne vers la cour de stockage (camions ou navette ferroviaires), avant d'être chargés sur les camions externes ou les wagons pour être acheminés vers leur destinations finales. Les zones de stockage peuvent être devisées pour séparer les deux types de flux. D'après Ma et al. [Ma 12], il existe au moins trois types de stockage : réservation par blocs, par rangées ou par baies. Pour la réservation par bloc, l'idée c'est de réserver un ensemble de blocs pour les conteneurs en import ou en export. La deuxième et la troisième méthode sont à peu près identiques, vu que la deuxième s'appuie sur le fait de réserver une moitié des rangées de chaque bloc pour les conteneurs en import et l'autre pour ceux en export, tandis que la troisième méthode part sur le même principe sauf qu'elle utilise les baies de chaque bloc au lieu des rangées.

L'autre possibilité de ce type de cette stratégie est de réserver un sous ensemble de piles pour un navire spécifique par exemple. Cette stratégie présente des limitations dans l'espace et dans le temps vu qu'on peut se retrouver parfois face à des limitations de l'espace de stockage si la réservation est faite sur l'ensemble de la cour de stockage et si on a plus d'espace à allouer à un navire qui arrive. Autre inconvénient de cette stratégie c'est qu'elle ne prend pas en compte le flux de transbordement. L'autre type de stockage ne fait pas de

distinction entre les flux ni les catégories des conteneurs. Donc pour ce type de stratégie les conteneurs peuvent être superposés indépendamment de leur flux de leur destination.

4.1.2 Assignment d'espace de stockage pour un groupe de conteneurs et pour des conteneurs individuels

L'idée de cette stratégie est de former des groupes de conteneurs qui partagent les mêmes caractéristiques (par exemple : dimension, destination, catégorie, contenu, etc.) et les affecter à l'espace de stockage selon un ensemble de critères (piles adjacentes, baies, etc.). Le critère d'adjacence des baies se diffère entre les objectifs des travaux. Nous avons trouvé dans la littérature des travaux qui définissent ce critère à la base des distances entre les destinations finales (cas de l'import) ou de l'ordre de visite des ports (cas de l'export et du transbordement). Pour notre cas, l'autorité portuaire utilise un autre critère d'adjacence qui est les clients (transitaires) contractuels, pour lesquelles l'autorité portuaire essaie de regrouper les conteneurs par client et par type de flux.

Les conteneurs qui partagent quelques caractéristiques d'un même groupe sont supposés être interchangeables, d'où la possibilité de ne pas se soucier sur leur empilement et donc leur stockage se fait indépendamment de leur EDT selon Dekker et al. [Dekker 07].

4.1.3 Zone Tampon et Stockage Direct

Plusieurs terminaux à conteneurs utilisent la notion du stockage direct qui vise à transférer les conteneurs déchargés directement depuis le navire de déstockage vers la cour de stockage et ensuite vers les camions externes ou les wagons dans le cas d'un port multimodal, et vice versa dans le cas de l'exportation. Pour ce type de stockage l'autorité portuaire reçoit en avance les informations des conteneurs avant leurs arrivés que ça soit dans le cas de l'import ou de l'export.

En contrepartie, il existe quelques terminaux à conteneurs qui ne disposent pas de toutes les informations détaillées des conteneurs que ça soit avant ou durant la période de stockage indirect, les conteneurs sont d'abord placés dans une zone tampon pour un stockage provisoire (buffer) avant d'être acheminés vers la zone de stockage. L'idée principale derrière ce type de stockage est de diminuer le temps de traitement des navires, aussi bien que le temps d'attente que ça soit des camions interne dans le cas d'import ou des camions externe dans le cas de l'export. Les grues de quai travaillent ainsi en deux périodes : période de retrait des conteneurs depuis le navire et période de déstockage depuis la zone tampon.

Ensuite, les transferts des conteneurs entre la zone tampon et la zone de stockage se fait généralement pendant la période de repos des grues de cour. L'événement déclencheur de déstockage des conteneurs depuis la zone tampon est la récolte des informations détaillées des conteneurs qui sont primordiales pour désigner l'emplacement exacte de chaque conteneur dans la zone de stockage finale en fonction de ses caractéristiques : EDT, destination, type, etc.

La configuration d'un port qui utilise un processus pareil se diffère des autres architectures que nous avons présenté tout au début de cette section. L'enjeu principal est de pouvoir définir une configuration optimale qui divise l'espace de stockage en deux parties : stockage temporaire et stockage court/moyen terme.

4.1.4 Priorité au déstockage et au stockage

Ce type de stratégie repose sur le fait de prioriser un type d'opération pour maximiser les performances des activités portuaires qui sont directement liées à ce type d'opération. La première méthode a été proposée par Duinkerken et al. [Duinkerken 03], qui consiste à utiliser tout l'espace de stockage d'un bloc (premier niveau) avant de superposer les conteneurs sans prendre en considération tous le détail et les caractéristiques techniques des conteneurs.

L'inconvénient principale de cette méthode c'est que le risque des mouvements improductifs est toujours présent, une autre limitation c'est le fait que le nombre de conteneurs reçus peut dépasser largement le nombre des piles vides disponibles; l'autre point faible de cette approche, c'est qu'elle nécessite des déplacements assez longues pour pouvoir stocker les conteneurs au plus bas niveau possible, ce qui impacte négativement le temps de traitement des opérations portuaires pour effectuer les opérations de stockage ou de déstockage.

Une autre méthode qui priorise le stockage des conteneurs dans une même pile cette fois ci selon un ordre décroissant de leurs EDT. Selon Dekker et al. [Dekker 07], le stockage des conteneurs se fait selon un ordre décroissant des EDTs. Ce travail a été amélioré par la suite par Borgman et al. [Borgman 10], qui ont proposé une méthode stockage par nivellement des EDTs, ils ont essayé de minimiser l'espace de stockage en empilant les conteneurs selon un ordre décroissant de leur EDT. Si on se retrouve face à plusieurs piles qui peuvent accueillir le conteneur sélectionné, on opte plutôt pour la pile qui a le plus haut emplacement vide, ceci évite bien évidemment les remaniements entre les conteneurs stockés puisque la contrainte de l'EDT est satisfaite.

Cette méthode est plus adaptée aux terminaux à conteneurs non automatisés qui combinent entre les opérations de transbordement et les opérations d'import et d'export. Les mouvements improductifs sont très limités vu que les critères de stockage sont bien vérifiés à l'avance. En revanche, cette méthode nécessite un peu plus de temps pour l'exécution ce qui peut impacter la satisfaction des clients en termes de temps de réponse.

Dans cette thèse nous avons combiné plusieurs méthodes de stockage selon le type de flux, la nature des opérations aussi bien le flux organisationnel. Les méthodes de résolution proposées dans les chapitres suivant, illustre les approches abordées pour la définition des sous-ensembles de positions libres et des conteneurs qui ont les mêmes caractéristiques techniques.

4.2 Formulation Mathématique

4.2.1 Contexte général du problème

Notre étude s'inscrit dans le cadre de l'amélioration continue des processus portuaires du port Tanger Med, l'autorité portuaire a lancé un projet d'amélioration qui s'appelle : Diagnostique et amélioration du port de Tanger (Tangier Diagnostic and Improvement (TDI)).

TDI est un exercice de diagnostic visant la performance du terminal. Tandis que les opérations sont effectuées, les temps de cycle d'équipements ont été mesurés, analysés et des actions ont été prises pour éliminer les pertes. Suite à l'aide des équipes locales, et en collaboration avec l'équipe de supervision du projet, nous avons pu identifier plusieurs pistes d'amélioration qui impactent négativement la productivité du port. Nous avons considéré ainsi les problèmes étudiés et traités par des chercheurs académiques (Voir chapitre 2) pour donner une vue globale sur les opérations portuaires et confronter l'étude académique à la réalité au sein du port. Des séances de réflexion ont été organisées à la fois pour l'analyse des causes (root cause analysis) et la recherche des solutions. Le diagnostic a généré un pipeline d'action qui permettra d'améliorer la performance du terminal.

La modélisation de notre problème SSAP consiste à mettre en place un nouveau modèle qui tient compte des différentes contraintes et objectifs issus de notre étude.

Notre formulation mathématique du SSAP tient compte de plusieurs règles de gestion qui sont imposées par les autorités portuaires. Les informations de chaque navire étant reçues en avance par EDI (Échange de Données Informatique), ce qui permet à l'autorité portuaire et aux équipes opérationnelles de se préparer en avance de phase. Les caractéristiques techniques de chaque conteneur sont gérées séparément à savoir : l'EDT, destination, dimension, type, etc. Pour établir un plan de chargement/déchargement efficace, les acteurs principaux au sein du port doivent être en contact permanent :

- Dispatcher (DSP) : Le DSP contribue à la planification des opérations en interne. Il est responsable de l'allocation des équipements de manutention et le suivi des opérations en cours, selon les plans préétablis. Il doit aussi assigner ces équipements aux activités de Housekeeping et de transport horizontal au sein du Terminal. Ceci va lui permettre d'assurer que l'opération est en accord avec le plan, de gérer les événements inattendus, de mener des actions correctives et de prévoir et détecter les problèmes et les défis rencontrés en cours.
- Yard Planner (YP) : La mission du YP (Planificateur de la cour de stockage « Yard ») est de présenter une planification complète et d'assurer une productivité maximale, tout en tenant compte des différentes opérations : chargement/déchargement, Housekeeping, remaniements et manutention. Et ceci en tenant compte du Plan d'accostage et le Game Plan relatifs au navire, et aussi la stratégie de Yard.
- Vessel Planner (VP) : Le VP (Planificateur du navire) est responsable de la préparation d'un plan efficace de chargement/déchargement du navire en respectant les règles de sécurité et de stabilité du navire pendant les opérations. Il réalise ainsi, et dans le cadre des opérations de bord de mer, une planification du travail des QC selon un plan d'arrimage.
- Berth Planner (BP) : L'allocation des postes d'amarrage du navire et l'affectation des QC pour les opérations au bord de mer se fait par le BP (Planificateur d'amarrage). Il doit alors élaborer un plan d'amarrage (Berth Plan) précis en collaboration avec les clients après avoir reçu et analysé les informations sur le navire. Il détermine ainsi le nombre des QCs et des heures nécessaires pour l'opération sur le navire. Il établit ensuite,

après le départ du navire, un récapitulatif contenant toutes les opérations réalisées (L'utilisation du Yard, KPIs...).

- Yard Strategist (YS) : Dans le cadre de la planification des opérations en interne, et en particulier, le management du Yard, l'YS planifie le Yard à travers l'allocation des Blocks spécifiques selon plusieurs modèles, que ça soit par service, par plusieurs services ou par baies. Il a pour objectif l'augmentation de la productivité à travers la diminution des distances parcourues par les équipements et des mouvements improductifs.
- Resources Coordinator (RC) : assure la nomination, les emplois du temps, la présence, les congés, les retards, l'absentéisme... du personnel afin de garantir des ressources humaines adéquates et disponibles.

La coordination se fait en temps réel entre les différents acteurs de l'autorité portuaire. Cette coordination permet de déterminer l'état de remplissage de chaque bloc au début de chaque horizon de planification, ensuite d'identifier les EDT des conteneurs qui se retrouvent dans les têtes des piles et qui contiennent toujours des emplacements vides. Le niveau maximum de chaque pile est prédéfini, ce qui permet de recenser le nombre d'emplacements vides au début de chaque horizon de planification.

L'originalité de ce modèle proposé réside dans le fait qu'il traite une variété de contraintes, objectifs aussi bien que les règles de gestion du port de notre étude qui peuvent être généralisées ou adaptées bien évidemment à d'autres terminaux à conteneurs :

(1) On traite les trois opérations à la fois dans le même modèle : transbordement, import et export.

Rares sont les travaux de recherche qui s'intéressent aux trois types d'opérations à la fois, les chercheurs optent plutôt pour un seul type d'opération pour bâtir leur modèle mathématique. Dans notre modèle c'est plutôt le contraire, nous focalisons notre étude sur l'opération de transbordement qui représente à peu près 90% des activités du port, mais nous n'oublions pas la partie dédiée aux opérations de l'import et de l'export.

(2) L'affectation des conteneurs à l'espace de stockage se fait par groupe de conteneurs selon le critère de leurs destinations.

Ceci est un enjeu majeur, puisque la plupart des travaux traitent plutôt des conteneurs individuels. L'affectation de l'espace de stockage se fait pour chaque conteneur indépendamment des autres. Notre approche s'articule plutôt sur le fait que le groupage des conteneurs se fait à la base de leur destination ce qui permet de préparer des sous-ensembles de conteneurs suivant l'opération maritime et la destination.

(3) Le recensement des emplacements de stockage avant l'opération de stockage pour une affectation optimale des conteneurs.

Dans la plupart des travaux de recherche, l'affectation des conteneurs aux blocs de stockage se fait suivant la meilleure baie qui peut accueillir le conteneur sélectionné. Dans notre modèle nous focalisons notre recherche plutôt au niveau des piles selon le critère des EDTs des conteneurs stockés dans la tête de chaque pile après avoir calculé la différence entre l'EDT du conteneur sélectionné et celui des piles sélectionnées afin de choisir le meilleur emplacement possible.

(4) La contrainte de compatibilité de dimension entre la baie et les conteneurs sélectionnés est vérifiée bien en avance.

Dans une même baie/pile, on ne stocke que des conteneurs de même type, la standardisation des conteneurs a permis d'établir des places pour des conteneurs 20, 40 pieds, et c'est aussi le cas dans notre port d'étude. Tout au début de l'horizon de planification on définit la typologie de chaque baie/pile avant l'opération d'empilement et dépilement.

(5) Réduction des mouvements improductifs dans l'espace de stockage.

Le travail de Moussi et al. [Moussi 11] par exemple, présente une limitation du modèle proposé car on peut se retrouver avec des conteneurs qui ne peuvent être stockés à cause des critères de stockage fixés par l'auteur. Dans notre modèle, on donne cette flexibilité de faire quelques mouvements improductifs dans les périodes de repos par exemple.

4.2.2 Description du problème

Nous focalisons notre étude sur un terminal à conteneurs multimodal, comme c'est le cas du Port Tanger Med où les conteneurs peuvent transiter entre navires (transbordement), ou transférer entre navires et camions (import/export).

Les opérations de manutention et de transfert sont réalisées par les camions de transfert interne pour transférer chacun des conteneurs des quais vers la cour de stockage et vice versa. Contrairement à Moussi et al. [Moussi 11] qui ont considéré plutôt les cavaliers gerbeurs pour le transfert des conteneurs, et se sont intéressés seulement à l'opération d'importation des conteneurs tout en considérant que ces conteneurs ne sont pas mélangés dans la cour de stockage avec d'autres conteneurs d'autres types (sortant ou en transit). Ils ont considéré aussi une répartition par zone et chaque zone est réservée à un type de conteneur. L'inconvénient majeur de cette stratégie de stockage est qu'il n'y a pas de compatibilité entre l'espace alloué à un type de conteneur et le nombre de conteneurs à stocker, donc il se peut que pour une zone on aura des conteneurs à stocker mais il n'y aura plus de position libre de cette zone alors qu'il y en a d'autres positions libres dans les autres zones. Pour remédier à ce problème, nous avons considéré dans notre modèle qu'il est possible de mélanger des conteneurs de différents types dans une même zone de stockage. Cette première approche a été améliorée par la suite en définissant des catégories différentes des conteneurs à stocker. Une catégorie peut être stockée sur différentes piles, sauf que les distances qui les séparent doivent être minimales. Une autre restriction du modèle de Moussi et al. [Moussi 11] est le fait d'éliminer la possibilité des remaniements dans la cour de stockage, c'est-à-dire qu'un conteneur qui a un EDT qui est supérieur aux EDTs des conteneurs qui sont en têtes de piles, avec aucune pile vide, ne peut pas être stocké. C'est une vraie limitation de ce modèle qui ne peut pas être appliqué que sur des terminaux à conteneurs qui contiennent des piles vides à chaque horizon de planification. Ce qui est un peu éloigné de la réalité, car presque la plupart des terminaux à conteneurs ont du mal à avoir des espaces de stockage vides pour faire face aux nombres de conteneurs qui arrivent simultanément sur des porte-conteneurs qui ne cessent de se développer d'année en année. Dans notre

modèle, et pour se rapprocher de la réalité, nous essayons de minimiser le nombre des remaniements mais non pas les interdire. Nous essayons ainsi de minimiser la distance entre les quais et la zone de stockage selon le type de conteneur (transit ou import/export). L'objectif principal est la réduction des coûts de stockage, l'optimisation de la cour de stockage et ainsi la minimisation des distances parcourues par les camions de transfert contrairement à Ndiaye et al. [Ndiaye 15] qui sont intéressés seulement à la partie stockage des conteneurs par unité de pile, sans avoir évalué l'impact des temps de transfert des conteneurs ni d'affectation des conteneurs aux quais sur les résultats de la résolution du modèle.

Nous considérons quatre hypothèses dans la proposition des méthodes de résolution :

1) Dimensionnement des baies : adoption d'une approche de stockage par baie (unité baie), dans chaque baie, nous ne stockons que des conteneurs de mêmes dimensions. Deux baies adjacentes peuvent contenir des conteneurs de différentes dimensions. Dans le cas où on dépasse un nombre limité du temps de traitement on réserve dans chaque bloc un minimum deux baies qui peuvent contenir des conteneurs de différentes dimensions (baies tampon).

2) Catégorisation des conteneurs : regroupement des conteneurs dans des catégories selon leur dimension et destination. Pour les conteneurs de transbordement ou d'exportation, ils doivent être de même dimension et appartiennent au même navire, et pour les conteneurs qui sont destinés à l'importation, ils doivent être de même dimension et appartiennent à un même client (en principe le transitaire qui prend en charge le transfert des conteneurs vers le client final par les camions de transfert externe), la contrainte du poids du conteneur s'impose aussi au moment de l'affectation et de stockage des conteneurs dans les piles.

3) Numérotation des conteneurs : puisque les plans de déchargement/chargement des navires sont connus à l'avance, nous supposons donc que la numérotation des conteneurs se fait selon leur ordre d'arrivée (import) et de déchargement (transbordement et export).

4) Numérotation des baies : elle se fait selon l'ordre croissant dans la zone de stockage, du premier bloc de stockage (le plus proche aux quais) au dernier bloc qui se trouve proche de la guérite.

4.2.3 Modèle Mathématique

Dans une même baie, nous ne pouvons stocker que des conteneurs de même dimension, et dans une baie nous optons plutôt pour des conteneurs qui ont la même destination (même client) cas de l'import ou les mêmes navires dans le cas de l'export ou du transbordement, nous n'utilisons les baies tampon que dans les cas extrêmes après l'exécution de l'algorithme. La stratégie d'empilement proposée est utilisée pour décider où stocker les nouveaux conteneurs arrivés que ça soit pour le transbordement ou l'import/l'export. Les conteneurs entrants appartiennent à l'un des trois types, à savoir 20, 40 pieds. Un conteneur de vingt pieds occupe un EVP dans la zone de stockage, tandis qu'un conteneur de 40 pieds occupe 2 EVP. Cependant, la baie de triage ne peut accueillir que des conteneurs de même taille. Il s'agit d'une restriction physique visant à prévenir d'éventuels dommages. Par conséquent, le terminal de conteneurs attribue chaque position dans la

baie à un type de conteneurs avant le début de chaque horizon de planification; Cela se fait automatiquement, même pour les piles vides.

Le modèle proposé est appliqué à chaque période de la journée de travail dans un terminal à conteneurs. Notre horizon de planification hebdomadaire consiste en plusieurs équipes (trois équipes par jour). Dans notre étude, nous prenons une plage de travail de trois équipes par jour pendant sept jours.

Notre Modèle a trois objectifs majeurs qui sont l'optimisation de l'espace de stockage (moins condensé avec une charge équitable entre les différents blocs), la réduction du nombre des remaniements (qui sont pris en compte dans les contraintes) et la minimisation du coût d'affectation et du transfert des conteneurs depuis le navire vers la cour de stockage et vice versa en optimisant le temps de traitement des conteneurs (pris en compte dans la fonction objectif). Notre objectif est de minimiser la distance globale des conteneurs de déchargement du quai à l'espace de stockage puis d'équilibrer la charge de travail entre les baies adjacentes. Les paramètres de notre modèle sont définis comme suit [Razouk 13] :

k : Indice du conteneur.

b : Indice de la baie de cour.

r : Indice de la rangée dans la baie b.

e : Indice du niveau dans la rangée de la baie.

N : Nombre total des conteneurs à stocker dans l'horizon de planification.

B : Nombre total des baies de stockage qui peuvent contenir des conteneurs dans l'horizon de planification.

w_k : Poids du conteneur k.

C_b : Espace de stockage libre dans la baie de stockage (les emplacements libres).

r_b : Type de baie de stockage (trois types: 20, 40 pieds).

R_k : Type du conteneur k.

D_k : Destination du conteneur k.

D_b : Destination de la baie b.

t_k : Temps de départ prévu du conteneur k (EDT).

C_k^b : Le coût relatif à l'affectation/stockage du conteneur k dans la baie de stockage b.

Pour ce premier modèle et pour des raisons de simplification du modèle, nous considérons une seule variable de décision :

$$X_{bk}^{re} = \begin{cases} 1 & \text{si le conteneur k est affecté à la baie b, la rangée r et le niveau e.} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

La fonction objectif de notre problème du SSAP est formulée de la façon suivante (modèle linéaire) :

$$Min \sum_{k=1}^N \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E C_k^b X_{bk}^{re} \quad (4.1)$$

Afin de simplifier notre modèle, le coût associé à l'affectation d'un conteneur spécifique à la baie sera proportionnel à la distance entre l'emplacement d'accostage du navire et la position finale de stockage dans la baie. La raison de ce choix est de pouvoir comparer nos résultats à ceux de la littérature. Dans le cas statique du SSAP, un seul navire est considéré dans chaque horizon de planification, l'horizon de planification étant défini avant l'arrivée du navire. Les équipements à affecter par la suite seront en fonction de la longueur du navire ainsi que du nombre de conteneurs à traiter. Dans le cas dynamique du SSAP, plusieurs navires sont pris en compte à la fois plus d'autres contraintes organisationnelles qui reflètent l'état réel du port étudié.

$$\sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E X_{bk}^{re} \leq C_b ; b \in \{1, \dots, B\} \quad (4.2)$$

Pour chaque baie, le nombre total des positions libres est calculé pour chaque baie de stockage, de sorte que le nombre total de conteneurs attribués ne doit pas dépasser le nombre de positions libres (ce nombre est connu au début de l'horizon de planification). Cette contrainte vise à éliminer la possibilité d'affecter des conteneurs à une baie pleine.

$$\sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E X_{bk}^{re} = 1 ; k \in \{1, \dots, N\} \quad (4.3)$$

Cette contrainte fait partie des contraintes d'affectation, où chaque conteneur doit être affecté à un seul emplacement libre défini par l'indice de la baie, de la rangée et du niveau de stockage. Ceci évite bien évidemment le fait d'avoir la possibilité d'affectation du même conteneur à deux positions différentes.

$$\sum_{k=1}^N (N - k + 1) X_{bk}^{re} \geq \sum_{k=1}^N (N - k + 1) X_{bk}^{re+1}, \forall b = 1, \dots, B, e = 1, \dots, E \quad (4.4)$$

La contrainte (4.4) impose que, dans chaque baie et selon le niveau de remplissage, les conteneurs nouvellement arrivés soient stockés dans la baie suivant l'ordre de leurs arrivée (export) ou bien de leur déchargement (transbordement ou import). Ce qui permet de réduire le temps de traitement des conteneurs export et évite la possibilité de l'encombrement pour les conteneurs import ou de transit.

$$\sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E (R_k - r_b) X_{bk}^{re} = 0 ; b \in \{1, \dots, B\} \quad (4.5)$$

L'objectif de cette contrainte est de s'assurer que le type de baie et de conteneur à stocker sont les mêmes dans chaque horizon de planification, l'objectif est de faire un tri des conteneurs par type avant la phase d'affectation aux baies de la cour de stockage. D'où l'idée de réserver dans les baies de stockage des espaces par types de conteneurs (principe de la stratégie de consignation)

$$\sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^R \sum_{e=1}^E (D_k - D_b) X_{bk}^{re} = 0 ; b \in \{1, \dots, B\} \quad (4.6)$$

Même principe que la contrainte précédente sauf que cette fois-ci c'est au niveau destination des conteneurs, pour permettre à la méthode de résolution de trier les destinations des conteneurs en question et faire des affectations selon le type et la destination des conteneurs.

$$\sum_{k=1}^N X_{bk}^{re} \leq 1 ; b \in \{1, \dots, B\}, r \in \{1, \dots, R\}, e \in \{1, \dots, E\} \quad (4.7)$$

Cette contrainte représente le fait que chaque position de stockage défini par le numéro de baie, de rangée et de niveau de stockage peut contenir à la fois au plus un et un seul conteneur. Ceci explique bien évidemment

l'unicité des emplacements de stockage et évite le fait de considérer une position doublement dans le comptage des positions libres au début de chaque horizon de planification.

$$(t_k - t_{k'}) (X_{bk}^{re} - \sum_{e=e'+1}^E X_{bk'}^{re}) \leq 0, b \in \{1, \dots, B\}, r \in \{1, \dots, E\}, e' \in \{1, \dots, E\}, k \neq k' \quad (4.8)$$

L'heure de départ estimée (EDT) de chaque conteneur est également connue au début de chaque horizon de planification, avec le recensement des emplacements libres dans la zone de stockage avec bien évidemment l'EDT des conteneurs qui se trouvent dans les têtes des piles. Le calcul de la différence entre le conteneur à stocker et ceux des piles, nous permettent d'identifier la meilleure affectation possible des nouveaux conteneurs arrivés.

$$(w_k - w_{k'}) (X_{bk}^{re} - \sum_{e=e'+1}^E X_{bk'}^{re}) \leq 0, b \in \{1, \dots, B\}, r \in \{1, \dots, R\}, e \in \{1, \dots, E\}, k \neq k' \quad (4.9)$$

Pour des raisons de sécurité, l'autorité portuaire a imposé la contrainte des poids entre les conteneurs stockés. Ceci s'explique par le fait que quelques conteneurs lourds peuvent parfois représenter un risque sur des conteneurs qui contiennent des marchandises fragiles. Cette contrainte vise à vérifier le poids des conteneurs à stocker avec ceux qui se trouvent déjà dans les piles de stockage. Dans le cas des piles vides, on choisit le conteneur le plus lourd.

$$\sum_{k=1}^N X_{bk}^{re} \geq \sum_{k'=1}^N X_{bk'}^{re+1}, b \in \{1, \dots, B\}, r \in \{1, \dots, R\}, e \in \{1, \dots, E\} \quad (4.10)$$

Cette contrainte vise à éliminer la possibilité des emplacements vides entre les conteneurs stockés. Cette contrainte rend le problème réaliste vu qu'on ne peut pas sauter des emplacements dans la même pile du stockage, tous les conteneurs doivent être superposés les uns au-dessus des autres.

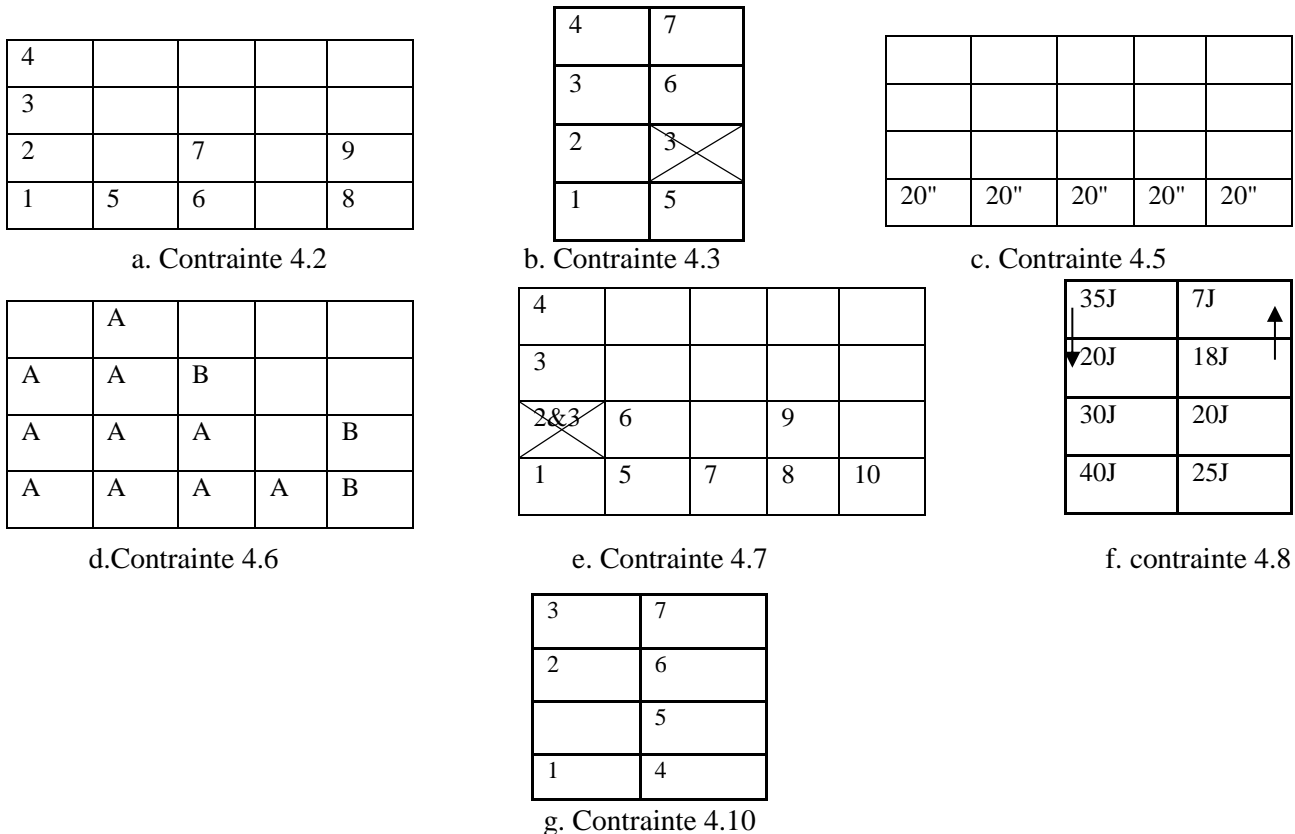


Figure 23 : Illustrations des contraintes du SSAP

4.3 Méthodes de résolution

Les méthodes de résolution proposées dans cette partie sont réparties en deux catégories : les méthodes exactes appliquées sur des instances de petites et moyennes tailles qui génèrent dans la plupart des cas des solutions optimales, et les méta-heuristiques pour les grandes instances (taille réelle du problème étudié) donnant des solutions approchées.

Ndiyaë et al. [Ndiyaë 15] ont considéré deux cas de figures pour la résolution du problème de stockage à travers la théorie des graphes. Le premier considère que la zone de stockage est vide et assez grande pour accueillir tous les conteneurs reçus. Pour se faire, ils ont simplifié le problème à travers la relaxation des contraintes de temps de séjour des conteneurs par rapport à ceux des piles, aussi bien que la contrainte de compatibilité entre la baie et le conteneur à stocker. Chaque sommet du graphe correspond à un conteneur, une arête entre deux sommets signifie que les deux sommets ne peuvent pas être stockés dans une même pile, la difficulté majeure constatée pour cette partie c'est que réellement un port conteneurisé ne peut pas être vide vu le flux des conteneurs entrants et sortants. Le deuxième cas de figure est le cas où toutes les piles ne sont pas initialement vides, le problème de stockage devient ainsi un problème de coloration avec capacité où chaque pile p a une capacité max C_p , dont chaque couleur peut être utilisé au plus C_p fois. Pour faciliter le problème étudié, les auteurs ont supposé que les ordres d'arrivés et les dates de départ des conteneurs sont tous compatibles ce qui facilite la génération des graphes.

Pour cette partie, nous supposons que :

Hypothèse 1 : Le Problème étudié est NP difficile, pour la résolution des instances étudiées, nous gardons la structure initiale du problème avec ses contraintes (sans relaxation contrairement à [Ndiyaë 15]).

Hypothèse 2 : Les dates de départ et des arrivés des conteneurs sont connues à l'avance, ce qui permet une pré-préparation avant la phase d'affectation des conteneurs aux positions de stockage.

Hypothèse 3 : Pour les méthodes de résolution proposées, nous distinguons entre le cas statique où le nombre des conteneurs qui arrivent et qui quittent le terminal à conteneurs est connu à l'avance et le cas dynamique qui tient compte des incertitudes.

4.3.1 Résolution Exacte

Pour la résolution du SSAP dans le cas statique, nous tenons compte du corollaire 3 afin de déterminer les emplacements de stockage nécessaires au début de l'horizon de planification, en prenant en compte la contrainte de remaniements, nous essayons de réduire au maximum le nombre de remaniements dans cette partie. Pour la résolution de ce problème, nous faisons appel à la méthode de séparation et évaluation « Branch and Cut » intégrée par défaut dans le logiciel « ILOG CPLEX », cette méthode combine à la fois la méthode de branch-and-bound ainsi que la méthode de coupe.

Pour la résolution du modèle mathématique par l'algorithme de branch-and-cut, l'exécution de l'algorithme doit passer principalement par les étapes suivantes : des inégalités valides et non satisfaites (méthode de séparation), une relaxation du problème étudié, une technique de recherche d'une borne supérieure et inférieure ainsi qu'une règle de branchement. Cette méthode est appliquée sur des problèmes de taille petite et moyenne

pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux des autres méthodes appliquées (Algorithme génétique, Algorithme de Colonie de fourmis et l'adaptation au problème du Bin Packing).

Relaxation du problème

Cette phase de l'algorithme de Branch and Cut consiste à éliminer les contraintes d'intégrité dans le modèle mathématique. Pour notre modèle, la contrainte (4.7) sera transformée ainsi : $\sum_{k=1}^N X_{bk}^{re} \geq 0; \forall b \in \{1, \dots, B\}, r \in \{1, \dots, R\}, e \in \{1, \dots, E\}$, afin de diminuer le nombre de contraintes de notre modèle, nous supprimons aussi les contraintes du poids (4.9) et de destination (4.6) puisque la catégorisation des conteneurs prend en compte ces deux aspects. Ceci nécessite la création d'une inégalité valide (4.11) pour garder l'optimalité de la résolution fournie par notre algorithme de résolution.

Ajout d'une inégalité valide

La création de cette inégalité valide regroupe les contraintes (4.6) et (4.9) pour former un ensemble de positions adjacentes à la baie du stockage du même bloc, tel que $1 \leq k \leq C_b$. On note par $N\{k\}$ l'ensemble des positions libres qui se trouvent dans les baies voisines de k , avec B_b l'ensemble des baies qui appartiennent au bloc sélectionné.

$$\sum_{k' \in N\{k\}} X_{bk'}^{re} + |N\{k\}| X_{bk}^{re} \leq |N\{k\}|, \forall b \in \{1, \dots, B_b\}, \forall r, \forall e, k \in \{1, \dots, C_b\} \quad (4.11)$$

Recherche d'une borne supérieure

Nous obtenons une borne inférieure de notre modèle à travers la résolution du problème relaxé. Afin d'améliorer le temps de résolution du problème étudié à travers la résolution par Branch and Cut, il est utile d'avoir aussi une borne supérieure. Pour se faire nous avons résolu notre problème avec un focus spécial sur la contrainte du temps de séjour. L'idée principale est de satisfaire cette contrainte en premier lieu pour identifier les positions de stockage les plus adéquats en fonction de type de flux : Transbordement ou export qui nécessite un stockage proche de la zone à quai, ou dans le cas de l'import qui nécessite un stockage proche de la zone du transport multimodal. Au fur et à mesure de l'exécution de l'algorithme, on effectue des mises à jour sur les capacités de stockage des baies et des blocs.

Règle de branchement

La règle du branchement est plutôt utilisée dans le cas où la solution fournie n'est pas entière pour finalement améliorer le résultat obtenu. L'idée principale de la règle de branchement est de choisir la variable de décision la plus fractionnaire, c'est-à-dire la plus proche à sa partie supérieure ou inférieure.

Les jeux de données utilisés pour la validation du modèle sont des données réelles récupérées depuis les autorités portuaires et qui représentent le flux des conteneurs entrants et sortants durant l'année 2015. La validation de ce modèle tient compte des contraintes suivantes :

- Les trois types de flux sont considérés dans ce modèle (import, export et transbordement).
- Il existe trois types de conteneurs (20 pieds, 40 pieds).
- La taille maximale de chaque pile dans une baie est de : quatre conteneurs.

- L'autorité portuaire encourage l'approche des surestaries pour les transitaires, afin de minimiser les durées de séjour des conteneurs qui varient principalement entre [10h, 96h].
- La configuration de la zone de stockage est connue au début de chaque horizon de planification.

Les paramètres clés de notre modèle sont :

- $\sum_{b=1}^B C_b$: est la somme des positions libres pour tous les blocs de stockage
- N : nombre de conteneurs
- X_b^r : ensemble de positions libres dans une baie (formée de l'intersection d'une baie et ligne de stockage)
- Le pourcentage des positions libres Pd est calculé en fonction des positions libres dans chaque baie, soit :

$$P_d = \frac{\sum_{b=1}^B C_b}{4 * \sum_{b \in B} \sum_{r \in R} X_b^r} * 100$$

Le modèle proposé a été appliqué à chaque période de la journée de travail dans un terminal à conteneurs, au début de chaque Shift (étant donné qu'un shift correspond à 8 heures de travail, et on a donc 3 shifts (équivalent à 3 équipes) par jour). Dans notre étude, nous supposons que la planification de l'attribution des conteneurs sera préparée sur une base hebdomadaire (7 x 3Shift = 21 Shift par semaine). La productivité des grues à quai (QC) est le facteur clé pour l'horaire exacte d'embarquement de chaque navire spécifique ainsi que le temps total des opérations de manutention et le temps supplémentaire nécessaire pour terminer le processus en cas de problèmes d'interférence, de congestion, de tempête maritime ou d'obscurité. La chose la plus importante ici est que le port doit rembourser ses clients si les délais de manutention des navires dépassent les horaires conventionnés qui sont déjà communiqués par l'autorité portuaire. Dans notre cas d'étude, la productivité des QCs varie entre 30 et 50 mouvements par heures. Ce qui signifie par exemple que pour un navire qui nécessite 900 mouvements, si on suppose que la productivité est égale à "30" mouvements/heure :

- Pour 1 QC: $900/30 = 30$ heures
- Pour 2 QCs: $900/2*30 = 15$ heures
- Pour 3 QCs: $900/3*30 = 10$ heures
- Pour 4 QCs: $900/4*30 = 7.5$ heures

Dans l'exemple ci-dessous, pour la première instance par exemple on a un total décharge de 868 mouvements, et un total charge de 3707 mouvements et 40 mouvements supplémentaires pour garder la stabilité du navire, ce qui donne un total de 4615 mouvements pour l'ensemble des conteneurs à gérer pour ce premier navire.

Etant donné que les données réelles du port sont considérées comme des instances de grandes tailles (vu le nombre de mouvements nécessaires pour chaque navire). Nous nous sommes inspirés de ces instances pour pouvoir les adapter à notre modèle, en tenant en compte des ressources actuelles dans le port d'étude en plus du nombre des conteneurs à gérer, à savoir : le nombre des QCs, YCs, les camions de transfert interne (ITs) et finalement le nombre des navires qui arrivent simultanément au port.

La figure 24 montre l'exemple de seize instances (réelles) qui reflètent les données reçues par le port via les EDI (Echange de Données Informatique), pour chaque navire le nombre total des mouvements est calculé en

Container	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Size	20'	40'	20'	20'	20'	20'	40'	40'	20'	40'	20'	20'	20'	40'	20'
Destination	1	2	5	6	9	10	3	4	4	1	2	3	3	3	4
EDT	W3-1	W3-2	W3-5	W4-4	W4-5	W2-6	W2-7	W5-3	W3-5	W2-1	W5-5	W5-4	W3-3	W4-1	W3-5
Weight	5	6.5	4.5	5.2	4.3	5.1	6.3	6.7	3.6	4.7	3.9	4.5	5.2	6.9	4.2

Figure 25 : Exemple simplifié des instances du modèle pour quinze conteneurs

Le premier champ fait référence à la taille du conteneur utilisé : 20' ou 40' pieds. Le deuxième champ fait référence à la destination finale du conteneur. Nous avons dans cet exemple 10 destinations. Les destinations adjacentes sont les suivantes : 1 & 2, 3 & 4. Les critères pour définir les destinations adjacentes sont ceux qui appartiennent au même transitaire, ou encore ceux qui ont une distance spécifique définie entre les destinations finales. Le troisième champ est l'heure de départ prévue définie en fonction des semaines de l'année (52 semaines par an) et des jours de la semaine, par exemple : W3-1 correspond au premier jour de la troisième semaine. Le dernier champ représente le poids des conteneurs.

La deuxième colonne dans le tableau 1 des résultats illustre le taux d'utilisation de la zone de stockage, c'est un ratio entre le nombre total des positions libres et la capacité totale de chaque bloc. Ces instances ont été résolues premièrement par l'algorithme de Branch and Cut, les performances de l'ordinateur utilisé sont les suivantes: Core i7, avec 2,7 CPU, Win7 et 12 Go de mémoire. Cet algorithme est inclus dans les bibliothèques de base du logiciel Cplex. Ci-dessous le tableau des résultats obtenus après l'exécution de Branch-and-Cut sur les trente-deux instances de petites et moyennes tailles.

Dans le tableau ci-dessous, on présente les instances utilisées pour la validation du modèle proposé, ensuite l'utilisation qui représente le pourcentage moyen des positions libres par rapport à l'ensemble des positions des blocs de stockage. La taille du problème est définie par le nombre des équipements et des conteneurs traités.

Le make-span définit la valeur de la fonction objectif après la résolution avec Cplex. La dernière colonne représente le temps écoulé pour la génération de la solution par Cplex.

Taux d'utilisation (TU) = Nombre de position disponibles / nombre de positions totale dans un bloc de stockage

La complexité du problème est définie par le nombre des équipements utilisés, dans notre cas c'est le nombre des conteneurs, des camions de transfert, des grues de quai et de cour ainsi que le nombre de navire traiter simultanément qui définit la complexité du cas étudié.

Les résultats obtenus illustrent la performance de Cplex pour les petites et les moyennes instances, où les résultats sont générés dans un temps raisonnable et qui respectent les différentes contraintes du modèle. A noter que Cplex tourne avec une contrainte de temps d'exécution qui est fixé par les autorités portuaires, la limite du temps de calcul a été fixée à 6 heures. Cplex génère donc des résultats optimaux pour les petites instances et des bornes inférieures pour les instances de taille moyenne.

Instance	TU	Taille du problème: K x IT x YC x QC x V	CPLEX	
			Make-span	Temps
1	0,05	40 x 5 x 2 x 1	15,35	6
2	0,1	50x 5 x 3 x 1	10,5	10,78
3	0,15	50x 8 x 2 x 2	17,35	30,48
4	0,2	60 x 6 x 2 x 2	19,93	70,25
5	0,25	60x 6 x 3 x 2	21,34	150,42
6	0,3	60 x 8 x 2 x 2	20,06	342,01
7	0,35	60 x 8 x 3 x 3	31,5	2832
8	0,38	70x 5 x 2 x 1 x 1	136,04	4154
9	0,4	70x 5 x 3 x 1 x 1	141,13	5680
10	0,42	80x 8 x 2 x 2 x 2	147,58	3461
11	0,45	80x 16 x 2 x 2 x 2	148,27	4529
12	0,47	80x 16 x 3 x 2 x 2	152,12	6177
13	0,5	90x 8 x 2 x 2 x 1	160,29	5594
14	0,52	90x 8 x 3 x 3 x 1	166,32	3529
15	0,55	90x 15 x 2 x 1 x 2	176,04	3521
16	0,56	90x 15 x 3 x 1 x 2	181,13	5780
17	0,57	100x 8 x 2 x 2 x 1	187,58	9800
18	0,6	100x 16 x 2 x 2x 1	188,27	11500
19	0,62	105x 16 x 3 x 2x 2	190,12	14500
20	0,63	110x 8 x 2 x 2x 2	190,29	15600
21	0,65	112x 8 x 3 x 3x 2	192,32	17900
22	0,67	114x 8 x 2 x 2x1	193,58	18000
23	0,7	115x 16 x 2 x 2x2	194,27	18600
24	0,75	115x 16 x 3 x 2x1	197,12	19000
25	0,8	115x 8 x 2 x 2x2	198,29	21600
26	0,81	120x 18 x 3 x 3x1	NA	NA
27	0,83	120x 25 x 2 x 1x2	NA	NA
28	0,85	120x 25 x 3 x 1x1	NA	NA
29	0,87	130x 18 x 2 x 2x2	NA	NA
30	0,9	140x 16 x 2 x 2x2	NA	NA
31	0,95	150x 16 x 3 x 2x1	NA	NA
32	1	160x 18 x 2 x 2x2	NA	NA

Tableau 1: Résultats numériques des petites et moyennes instances générés par ILOG CPLEX.

4.3.2 Résolution par les Méta-heuristiques

Dans cette partie, nous proposons des méthodes approchées (méta-heuristiques) pour remédier au problème de mémoire insuffisante survenue lors de la résolution des instances de moyennes et grandes tailles par Cplex, pour se faire, nous proposons une résolution à base de plusieurs algorithmes :

- Recuit simulé ;
- Algorithme génétique développé (Developped Gynetic Algorithm Strategy « DGAS ») [Razouk 16]
- Algorithme de colonie de fourmis (Ant Colony Algorithm « ACA ») ;
- Problème de Bin Packing (Bin Packing Problem « BPP ») [Razouk 16] ;

Pour les instances de petites tailles, la comparaison entre les méthodes approchées et les méthodes exactes est possible pour mesurer la performance de ces dernières. Cette comparaison est faite à travers le calcul d'un pourcentage de déviation par rapport à l'optimum avec la formule :

$$\frac{\text{Résultat méthodes approchées} - \text{Résultat méthodes exactes}}{\text{Résultat méthodes exactes}} * 100.$$

4.3.3 Le Recuit Simulé

C'est une méthode qui date des années 80, elle a été créée par Kirkpatrick en 1983. Son principe se base sur l'amélioration de l'aspect d'un métal, et ceci à travers son chauffage jusqu'à une température très élevée et ensuite commence l'étape de refroidissement graduelle. Le Recuit Simulé fait partie de la classe des algorithmes de recherche locale qui traite et améliore une solution réalisable, il explore son voisinage afin de de l'améliorer en cherchant des meilleures solutions. La figure ci-dessous montre les étapes d'exécution de l'algorithme du Recuit Simulé :

Initialisation :

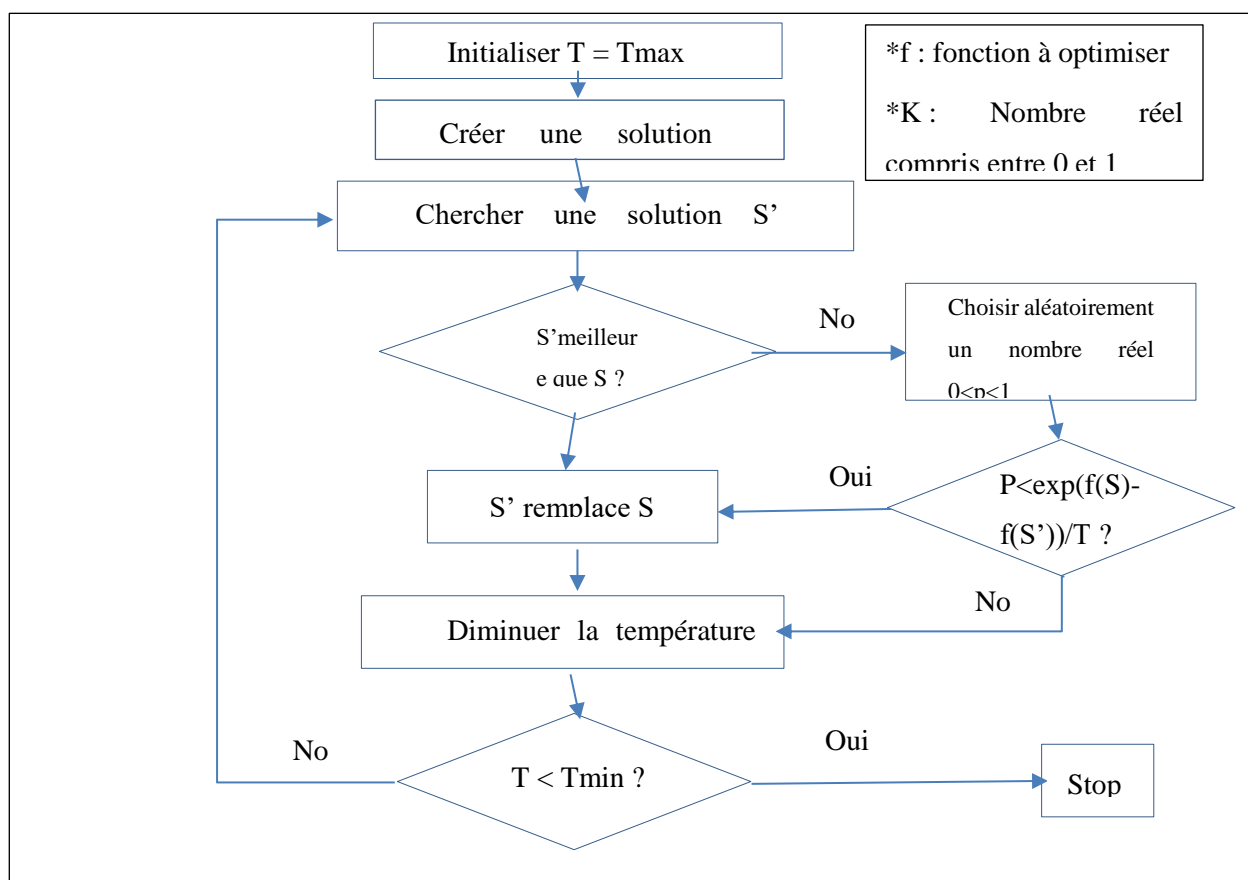


Figure 26 : Étapes d'exécution de l'algorithme de Recuit Simulé

Pour l'initialisation de l'algorithme du recuit simulé, nous utilisons la configuration réelle de notre port d'étude. Une solution est représentée sous la forme d'une combinaison entre le service de stockage et le sous ensemble de conteneurs à affecter. Le premier tableau représente les caractéristiques des conteneurs à stocker (voir figure 25). Tandis que le deuxième représente la configuration de la zone de stockage et le troisième tableau représente une affectation des conteneurs à chaque service de stockage.

Lors de la construction d'une solution initiale, nous affectons séquentiellement les conteneurs aux piles dans un ordre aléatoire.

Concrètement chaque conteneur est affecté à un endroit précis (formé à la base des spécificités du navire, type de conteneur et type de flux), appelé aussi service, dans la zone de stockage comme le montre la figure ci-dessous, les conteneurs sont stockés dans les colonnes (1A, 2A,..5A), ensuite un service de stockage est identifié en fonction des caractéristiques de chaque conteneur :

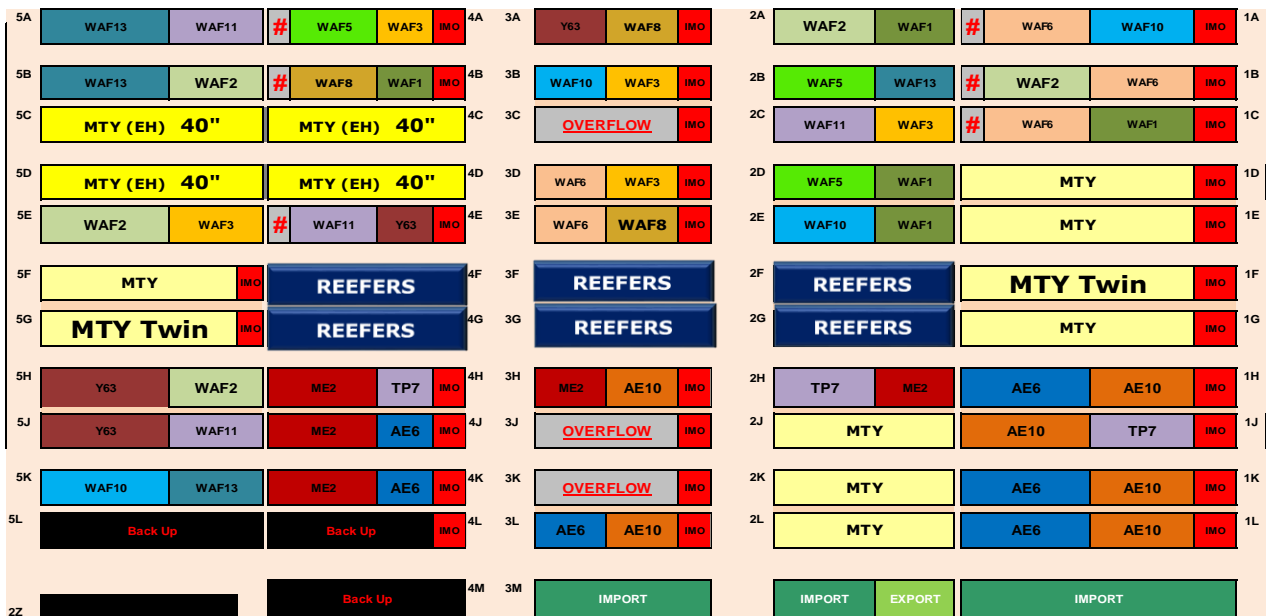


Figure 27 : Configuration de la zone de stockage

Pour un exemple concret, l'affectation des 15 conteneurs au service dans la zone de stockage est :

Conteneur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Service	AE10	AE10	AE10	WAF3	WAF7	WAF7	WAF7	WAF3	WAF3	WAF1	WAF1	WAF1	TP7	TP7	TP7

Figure 28 : Affectation des conteneurs à la zone de stockage

L'avantage de configuration actuelle est qu'elle réduit la numérotation des piles qui peut être parfois gênante lors de l'affectation des conteneurs à l'espace de stockage.

Une solution est représentée sous la forme d'un tableau. Dans ce tableau chaque position représente une baie qui contient une position libre, le maximum de chaque baie est 4 conteneurs de hauteur. Par exemple le premier service AE10 peut contenir les trois premiers conteneurs du tableau et ainsi de suite. Cette première affectation des conteneurs génère une solution initiale pour l'algorithme du recuit simulé. Le pseudo-code de cette première partie d'initialisation est présenté comme suit :

Algorithme 01 : RS1

1. $b = 1 (< N)$
 2. $S = S_0$
 3. **Tant que** ($b < N$) faire
 - 3.a. sélectionner aléatoirement un conteneur k qui est non traité
 - 3.b. sélectionner aléatoirement un service b qui contient des positions libres, et qui a la même taille que k , et que son ETD T_k est inférieure à T_b .
 - 3.c. $S1 = S(k, b)$
 - 3.d. $b = b + 1$
 4. **Fin tant que**
- **b : indice de la baie, S : pattern sélectionné, p : indice des piles, N : nombre de conteneurs à traiter*

Amélioration par les solutions de voisinage:

Lors de l'exploration des positions libres dans une baie de stockage ou dans des baies du même bloc, on choisit aléatoirement un des conteneurs qui sont déjà affectés à une position de stockage, ensuite nous affectons aléatoirement ce conteneur à une baie du même bloc. L'idée principale de cette affectation est de respecter les différentes contraintes de stockage et ainsi la nouvelle position sélectionnée doit être différente de la première position de stockage.

Le pseudo-code ci-dessous explique les différentes étapes de cette partie d'identification d'un voisinage de la solution initiale :

Algorithme 02 : RS2

- Répéter** Tant que ($Fin = faux$, et $Compteur \leq N$) faire
1. Choisir aléatoirement un conteneur k
 2. Soit b la baie affectée au conteneur k dans la solution S
 3. Construire une liste l des positions libres dans la baie b ou ceux du bloc B , qui vérifient les contraintes de stockage du conteneur k sélectionné
 4. Arrêt = faux
 5. $i = 1$
 6. **Tant que** ($Arrêt = faux$, et $i \leq card(l)$) faire
 7. $b' = l(i)$
 8. **Si** ($C_{b'}^k + x_{b'}^k + A < C_b^k + x_b^k + B$) alors
 9. Arrêt = vrai
 10. **Si non**
 11. $i = i + 1$
 12. **Fin tant que**
 13. **Si** ($Arrêt = vrai$) alors
 14. Affecter k à b'
 15. Mettre à jour les positions libres des
 16. baies ($c_p = c_p + 1$; et $c_{p'} = c_{p'} - 1$)
 17. $Fin = vrai$
 18. **Sinon**
 19. $Compteur = Compteur + 1$
- Fin Répéter tant que**

$B = \sum_{k' > k}^N y_k^{k'}$ sachant que k est affecté à b avec $y_k^{k'}$: séquence d'affectation des conteneurs k et k' aux bays de stockage formant B

Résultats Numériques

Pour une meilleure exécution de l'algorithme de recuit simulé, le choix des bonnes valeurs des paramètres est primordial. Contrairement à Ndiyaie et al. [Ndiyaie 15] qui ont traité les paramètres un par un, nous avons opté plutôt pour un couplage des paramètres. Donc dans les étapes d'identification des bonnes valeurs, nous avons fait varier tous les paramètres à la fois. L'hypothèse proposée (suite au travail de Ndiyaie et al.) est de faire varier la T_{max} entre 200 et 450 et T_{min} entre 0 et 40, dans notre étude nous prenons les mêmes conditions pour l'exploration de l'espace de recherche des solutions. Les expérimentations ont montré qu'à partir de la température 310 la valeur de la fonction objectif ne diminue plus, donc c'est la valeur à retenir pour T_{max} . Le coefficient de diminution de la température a été recherché dans l'intervalle [0.2, 1]. Le tableau ci-dessous montre les résultats obtenus :

Instance	TU	Taille du problème: K x IT x YC x QC x V	CPLEX		Recuit Simulé		
			Make-span	Temps	Make-span	Time	*GAP(%)
1	0,05	40 x 5 x 2 x 1	15,35	0,1	15,35	0,15	0,00%
2	0,1	50x5 x 3 x 1	10,5	0,18	10,5	0,39	0,00%
3	0,15	50x8 x 2 x 2	17,35	0,51	17,35	0,51	0,00%
4	0,2	60 x 6 x 2 x 2	19,93	1,17	21,13	1,17	6,02%
5	0,25	60x6 x 3 x 2	21,34	2,51	21,34	2,53	0,00%
6	0,3	60 x 8 x 2 x 2	20,06	5,7	29,02	5,77	44,67%
7	0,35	60 x 8 x 3 x 3	31,5	47,2	31,5	47,28	0,00%
8	0,38	70x5 x 2 x 1 x 1	136,04	69,23	145,81	64,23	7,18%
9	0,4	70x5 x 3 x 1 x 1	141,13	94,67	146,2	89,66	3,59%
10	0,42	80x8 x 2 x 2 x 2	147,58	57,68	147,95	52,68	0,25%
11	0,45	80x16 x 2 x 2 x 2	148,27	75,48	154,8	70,48	4,40%
12	0,47	80x16 x 3 x 2 x 2	152,12	102,95	156,35	97,95	2,78%
13	0,5	90x8 x 2 x 2 x 1	160,29	93,23	164,46	88,23	2,60%
14	0,52	90x8 x 3 x 3 x 1	166,32	58,82	172,1	53,81	3,48%
15	0,55	90x15 x 2 x 1 x 2	176,04	58,68	181,13	53,68	2,89%
16	0,56	90x15 x 3 x 1 x 2	181,13	96,33	183,94	91,33	1,55%
17	0,57	100x8 x 2 x 2 x 1	187,58	163,33	189,92	158,33	1,25%
18	0,6	100x16 x 2 x 2x1	188,27	191,67	190,12	186,66	0,98%
19	0,62	105x16 x 3 x 2x2	190,12	241,67	190,23	236,66	0,06%
20	0,63	110x8 x 2 x 2x2	190,29	260	191,02	255	0,38%
21	0,65	112x8 x 3 x 3x2	192,32	298,33	192,56	293,33	0,12%
22	0,67	114x8 x 2 x 2x1	193,58	300	193,95	295	0,19%
23	0,7	115x16 x 2 x 2x2	194,27	310	194,42	305	0,08%
24	0,75	115x16 x 3 x 2x1	197,12	316,67	197,54	311,66	0,21%
25	0,8	115x8 x 2 x 2x2	198,29	360	198,76	315	0,24%
26	0,81	120x18 x 3 x 3x1	NA	NA	199,02	317,45	NA
27	0,83	120x25 x 2 x 1x2	NA	NA	199,18	322,13	NA
28	0,85	120x25 x 3 x 1x1	NA	NA	199,2	335,22	NA
29	0,87	130x18 x 2 x 2x2	NA	NA	207,45	437,12	NA
30	0,9	140x16 x 2 x 2x2	NA	NA	208,12	449,89	NA
31	0,95	150x16 x 3 x 2x1	NA	NA	208,25	452,23	NA
32	1	160x18 x 2 x 2x2	NA	NA	209,11	455,44	NA
					Moyenne déviation		3,32%

Tableau 2 : Résultats d'exécution de l'algorithme du recuit simulé

Les résultats du tableau, montrent que l'algorithme du recuit simulé génère des résultats réalisables dans un temps raisonnable pour les moyennes et grandes instances. Nous avons constaté que l'écart relatif moyen entre les résultats des deux algorithmes est de : 3.32%

Nous avons adopté une approche d'identification des conteneurs à stocker selon les critères de la zone de stockage et non pas l'inverse, aussi bien qu'une prise en compte simultanée des paramètres de modèle (T_{max} , T_{min} , K) pour finalement proposer un modèle robuste qui résout le problème en un temps raisonnable.

4.3.4 Algorithme génétique

Pour résoudre notre nouveau MIP, un AG a été développé, noté : Developed Gynetic Algorithm Strategy (DGAS) Razouk et al. [Razouk 16a]. L'AG s'est avérée efficace pour résoudre différents problèmes de gerbage dans les terminaux à conteneurs, He et al. [He 10], et la planification des camions de transfert interne, comme présenté dans Ng et al. [Ng 07]. Dans notre étude, la DGAS est personnalisée dans MATLAB 2013 Global Optimization Tool, le code source a été modifié et adapté à notre problème. Le processus global de l'DGAS est présenté ci-dessous :

Algorithme 03 : AG1

- 1 Définir l'horizon de planification sur n équipes pour le navire arrivé
 - 2 Générer l'UB & LB pour les conteneurs entrants: temps de séjour dans le navire, dans la cour de stockage ainsi que dans les camions de transfert.
 - 3 Définir LB & UB pour les grues à quai et de cour: YCs, QCs (nombre de mouvements)
 - 4 Attribuez les équipements nécessaires pour servir le navire accosté.
 - 5 Recevoir et traiter un nouveau navire. Retour à l'étape 3.
- ** UB : Borne supérieure, LB : Borne inférieure

Afin de réduire le temps de calcul, une heuristique en deux étapes a été utilisée pour créer des solutions initiales de haute qualité pour le DGAS. La solution initiale comprend deux parties. La première partie est utilisée pour la première étape du problème: choisir un conteneur dans le navire en fonction d'un certain nombre de critères spécifiques. Ces critères, en plus des caractéristiques techniques de chaque conteneur, sont définis par le planificateur de quai et le planificateur de zone de stockage afin de diminuer les remaniements dans la cour de stockage:

Algorithme 04 : AG2

- 6 Étape 1: Définir les critères de sélection pour choisir les conteneurs du navire
- 7 Choisir les conteneurs en fonction de la taille du conteneur
- 8 Diviser les conteneurs en fonction de leurs types.
- 9 Diviser les conteneurs en fonction des destinations & d'EDT.
- 10 Regrouper les conteneurs dans des clusters
- 11 **Répéter** jusqu'à fin des conteneurs à traiter
- 12 Étape 2: Définir le chromosome (position disponible) et les gènes sont les clusters des conteneurs
- 13 Define the chromosome (available position) & genes are the container clusters.
- 14 Opération de crossover pour générer de nouvelles solutions
- 15 Mutation entre les solutions obtenues, changement des conteneurs entre les clusters
- 16 Si S' est une solution optimale ($S' < S$) Fin Si
- 17 Si non, revenir vers l'étape 2.1
- 18 **Répéter** jusqu'à fin des combinaisons de b , retour vers l'étape 1

Le nombre de mouvements (conteneurs à gérer) ainsi que la taille du navire, ces deux facteurs ont un impact sur le nombre de QCs à attribuer. Ceci a pour but de créer une charge de travail équitable entre les QCs adjacents. La deuxième partie est utilisée pour la deuxième étape du problème (affectation et planification des camions de transfert interne et affectation des espaces de stockage) qui est basée sur une méta-heuristique et

qui a pu générer une solution optimale aux problèmes étudiés pour des instances avec un maximum de : 2 QC, 25 IT, 3 YC, mais il n'a pas pu trouver des solutions optimales en cas de plus de deux QCs et plus de trois YC. Chaque camion qui arrive à la zone à quai recherche le conteneur le plus ancien prêt à être ramassé après avoir été déchargé par la grue de quai. Une partie des solutions initiales ont été générées aléatoirement, ce qui explique le fait que l'optimisation robuste est utilisée dans notre méthode de résolution, de sorte que les limites inférieure et supérieure en ce qui concerne le nombre d'équipements utilisés spécifiées soient définies et vérifient les critères définis (étape 1 de l'algorithme GA, voir ci-dessous).

Dans l'étape 2, nous avons calculé le coût global d'affectation des conteneurs aux clusters. Celui-ci est à la base de la création de la prochaine génération, la DGAS est décrite par les étapes de la figure :

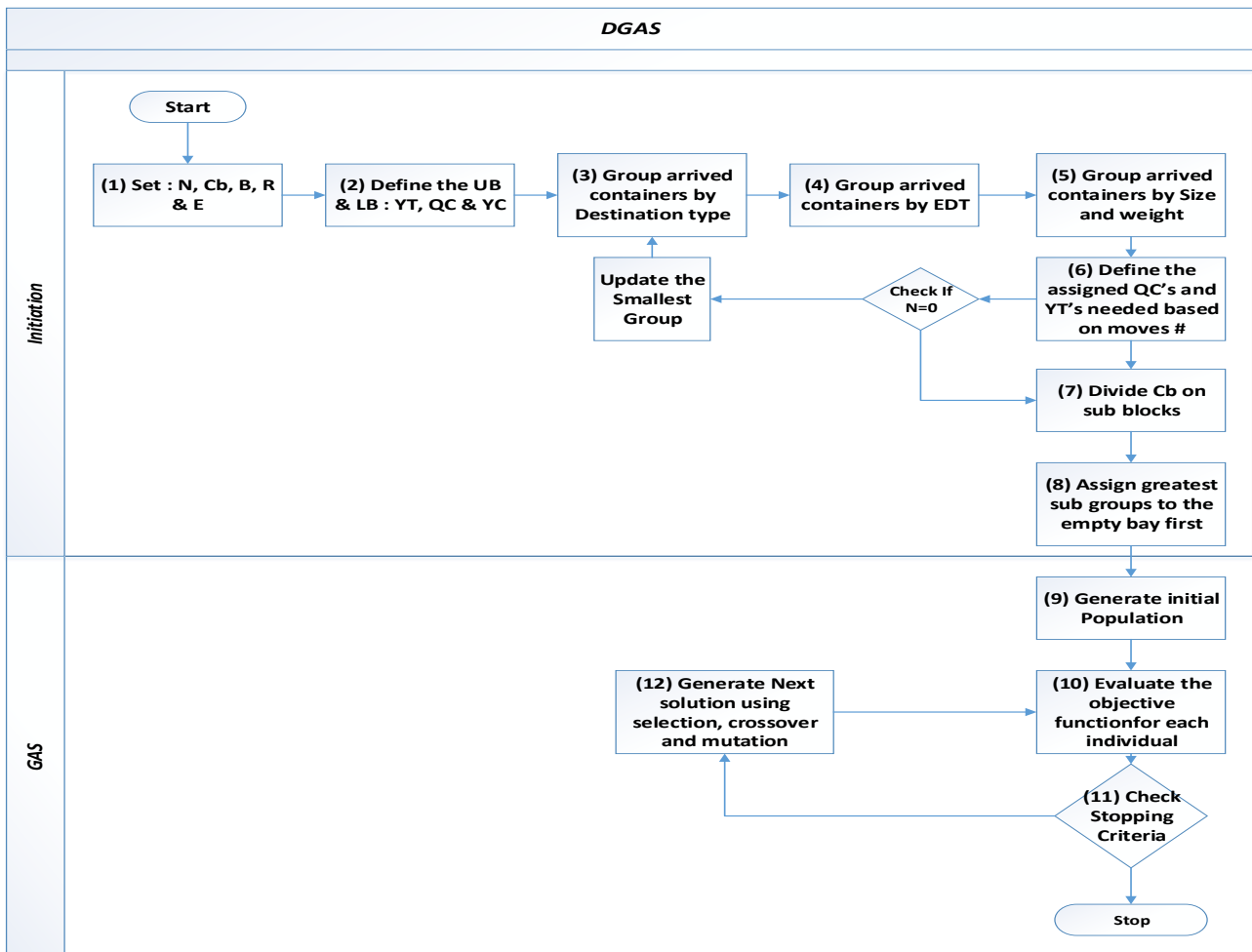
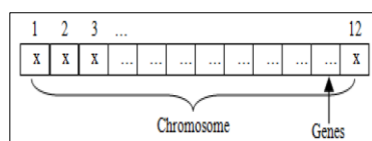


Figure 29 : Organigramme de l'algorithme DGAS.

Les positions ont été modifiées dans un chromosome. Un chromosome représente le nombre de toutes les positions libres dans la baie de stockage, et les gènes sont le nombre de clusters de conteneurs, comme indiqué:



Étapes de croisement et de mutation après la génération initiale:

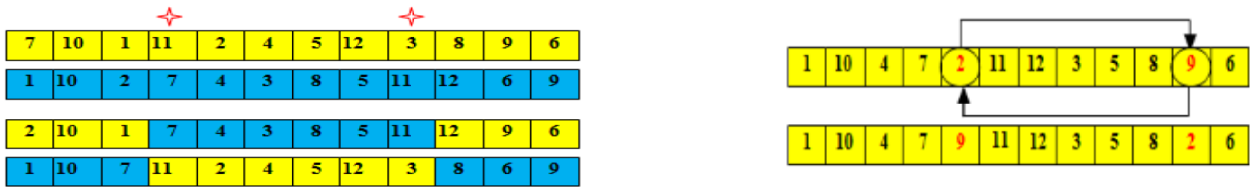


Figure 30 : Exécution de l'algorithme DGAS.

Nous expliquons ci-dessous les différentes étapes de notre DGAS en détail, nous devons noter que la validation de notre MIP et la génération de l'UB et LB ainsi que la génération de la sous-solution ont donné des bons résultats dans la résolution des instances utilisées.

Le résumé de la DGAS est défini comme suit:

Algorithme 05 : AG3

1. Population initiale aléatoire DGAS en respectant la taille, l'EDT et la contrainte de destination pour les conteneurs, l'UB & LB pour les équipements
2. L'évaluation de la fonction objectif, qui a comme données d'entrée: (nombre de grues, nombre de conteneurs, nombre de positions disponibles, etc.) et renvoie la valeur de la fonction objectif doit être développée pour chaque problème particulier
3. Des critères d'arrêt, différents critères d'arrêt peuvent être spécifiés dans MATLAB (durée d'exécution, numéro d'itération, solutions réalisables, etc.
4. Prochaine Génération.

Pour démontrer la solvabilité de notre MIP et évaluer la performance de la stratégie proposée, la DGAS a été évaluée sur un total de 32 instances, allant de problèmes de petite à grande taille. Pour l'analyse comparative, des cas de test de la littérature ont été utilisés pour l'évaluer. Les résultats obtenus ont été comparés avec CPLEX ainsi que la méthode de recuit simulé.

L'utilisation est définie comme le rapport entre l'espace de stockage total occupé par tous les conteneurs de déchargement et l'espace de stockage total dans le parc de stockage. Ce ratio est un indicateur de performance clé pour mesurer la difficulté de notre MIP. Les résultats obtenus après la résolution avec la DGAS pour les problèmes de petite taille sont présentés dans le tableau 1. La première et deuxième colonne indique successivement le numéro de l'expérience et l'utilisation. La troisième colonne indique la taille du problème constituée du nombre de conteneurs, de camions internes, de grues de chantier et de grues de quai. La quatrième colonne indique les valeurs de la fonction objectif (make-span) obtenues par CPLEX en appliquant l'algorithme branch & cut à notre MIP. La cinquième et la sixième colonne indiquent respectivement la valeur de la fonction objectif obtenue avec la méthode DGAS et sa différence par rapport à Cplex.

Instance	TU	Taille du problème: K x IT x YC x QC x V	CPLEX		DGAS		
			Make-span	Temps	Make-span	Time	*GAP(%)
1	0,05	40 x 5 x 2 x 1	15,35	0,1	15,35	0,15	0,00%
2	0,1	50x 5 x 3 x 1	10,5	0,18	10,5	0,39	0,00%
3	0,15	50x 8 x 2 x 2	17,35	0,51	17,35	0,51	0,00%
4	0,2	60 x 6 x 2 x 2	19,93	1,17	19,99	1,17	0,30%
5	0,25	60x 6 x 3 x 2	21,34	2,51	21,34	2,53	0,00%
6	0,3	60 x 8 x 2 x 2	20,06	5,7	26,82	5,77	33,70%
7	0,35	60 x 8 x 3 x 3	31,5	47,2	31,5	47,28	0,00%
8	0,38	70x 5 x 2 x 1 x 1	136,04	69,23	140,61	185	3,36%
9	0,4	70x 5 x 3 x 1 x 1	141,13	94,67	143,2	187	1,47%
10	0,42	80x 8 x 2 x 2 x 2	147,58	57,68	147,92	189	0,23%
11	0,45	80x 16 x 2 x 2 x 2	148,27	75,48	152	191	2,52%
12	0,47	80x 16 x 3 x 2 x 2	152,12	102,95	155,15	193,34	1,99%
13	0,5	90x 8 x 2 x 2 x 1	160,29	93,23	169,26	196	5,60%
14	0,52	90x 8 x 3 x 3 x 1	166,32	58,82	169,66	199	2,01%
15	0,55	90x 15 x 2 x 1 x 2	176,04	58,68	179,93	207	2,21%
16	0,56	90x 15 x 3 x 1 x 2	181,13	96,33	181,14	212	0,01%
17	0,57	100x 8 x 2 x 2 x 1	187,58	163,33	188,02	227	0,23%
18	0,6	100x 16 x 2 x 2x 1	188,27	191,67	189,46	245	0,63%
19	0,62	105x 16 x 3 x 2x 2	190,12	241,67	190,93	252	0,43%
20	0,63	110x 8 x 2 x 2x 2	190,29	260	190,92	258	0,33%
21	0,65	112x 8 x 3 x 3x 2	192,32	298,33	192,43	268,45	0,06%
22	0,67	114x 8 x 2 x 2x1	193,58	300	193,75	282,23	0,09%
23	0,7	115x 16 x 2 x 2x2	194,27	310	194,92	287	0,33%
24	0,75	115x 16 x 3 x 2x1	197,12	316,67	197,44	294	0,16%
25	0,8	115x 8 x 2 x 2x2	198,29	360	198,46	303,12	0,09%
26	0,81	120x 18 x 3 x 3x1	NA	NA	198,04	307,33	NA
27	0,83	120x 25 x 2 x 1x2	NA	NA	198,98	312,97	NA
28	0,85	120x 25 x 3 x 1x1	NA	NA	198,87	315,56	NA
29	0,87	130x 18 x 2 x 2x2	NA	NA	206,49	327,43	NA
30	0,9	140x 16 x 2 x 2x2	NA	NA	207,92	339,14	NA
31	0,95	150x 16 x 3 x 2x1	NA	NA	208,05	342,76	NA
32	1	160x 18 x 2 x 2x2	NA	NA	208,91	355,15	NA
					Moyenne déviation		2,23%

Tableau 3 : Résultats numériques de DGAS et CPLEX pour les petites instances

* Le résultat obtenu doit être multiplié par 100

, afin de simplifier l'interprétation dans le tableau ci-dessus, nous ajustons les 2 premiers chiffres.

** GAP = (DGAS - Cplex) / Cplex X 100

On peut constater que les solutions DGAS ont une moyenne de déviation de 2.23% par rapport aux résultats de Cplex sur l'ensemble des instances. En d'autres termes, la DGAS a trouvé des solutions très proche de l'optimum pour les moyennes et les grandes instances.

Dans le tableau 3 ci-dessus, nous traiterons les instances de différente taille, le tableau montre donc les résultats obtenus après l'exécution de DGAS. La première et la deuxième colonne indique successivement le numéro de l'instance utilisée et le pourcentage de l'utilisation (déjà défini dans la section précédente). La troisième colonne définit la taille du problème. Les analyses CPLEX ont été limitées à 6 heures (contrainte de l'autorité portuaire, afin de récupérer les données et se préparer pour le prochain shift (équipe de travail)), et la meilleure solution obtenue est indiquée dans la quatrième colonne. La quatrième colonne indique que CPLEX n'a pas pu obtenir de solution. La cinquième colonne indique le temps de calcul CPLEX, si une solution a été obtenue dans moins de 6 heures. La sixième et la septième colonne indiquent la valeur de la fonction objectif et le temps de calcul de la DGAS. La dernière colonne indique l'écart qui mesure la différence entre la solution DGAS et la solution CPLEX ($GAP = (DGAS - CPLEX) / CPLEX * 100$). Et dans les dernières colonnes, nous avons recopié les données de l'exécution du recuit simulé pour pouvoir les comparer avec DGAS, du coup une moyenne de déviation par rapport aux résultats de DGAS a été calculée. Un écart négatif signifie que la solution DGAS était inférieure (meilleure) à la solution CPLEX et recuit simulé, en partie à cause du délai imparti. Pour les très gros problèmes, CPLEX n'a pas pu trouver la solution optimale en raison d'une limite de temps ou de mémoire, d'où l'utilité de les comparer avec le recuit simulé. Sur les 32 instances, DGAS a obtenu la solution beaucoup plus rapidement que CPLEX. Il a été observé que le temps de calcul de la DGAS n'était pas aussi affecté par l'augmentation de la taille du problème : nombre de conteneurs et de camions.

Le temps de calcul maximal pour les DGAS est de respecte la contrainte du temps d'exécution maximum défini par les autorités portuaires (moins de 6heures), ce qui explique le fait qu'il peut être utilisé par les planificateurs du terminal à conteneurs. La colonne time est exprimé ainsi en minutes.

Les résultats obtenus par la méthode proposée sont pertinents pour la majorité des cas mentionnés ci-dessus, avec une moyenne de déviation de -39% par rapport aux résultats du recuit simulé. Cela signifie que la méthode DGAS proposée est plus efficace pour résoudre notre MIP.

4.3.5 Problème du Bin Packing

Dans les revues de littérature, la plupart des travaux ont été dédiés à l'adaptation des méta-heuristiques standards aux problèmes étudiés. Pour les problèmes d'optimisation des terminaux à conteneurs, on trouve par exemple, l'AG, l'algorithme de colonie de fourmis, le recuit simulé, la recherche tabou aussi bien que des hybridations de celles-ci. Rares sont les travaux qui sont intéressés à l'application des heuristiques types : Bin Packing, Tie Breaking, underfitting et overfitting pour le machine learning, etc pour résoudre les problèmes portuaires et plus exactement notre cas d'étude du SSAP.

Nous avons opté dans notre étude pour l'adaptation de principe du Bin Packing pour la résolution du SSAP (BPSSAP : Bin Packing for Storage Space Allocation Problem). Le principe du problème de Bin Packing est d'emballer des bins (bacs) contenant des articles de mêmes ou de différentes tailles de la manière la plus efficace en temps, emballer les articles de manière à ce qu'ils soient répartis uniformément et enfin ranger les articles dans le bin de manière à réduire le nombre de bins utilisés.

Il y a différentes façons d'y parvenir, chacune ayant ses propres avantages. On trouve dans la revue de littérature les algorithmes suivants:

- Le pire ajustement/le pire ajustement décroissant : Worst fit/Worst fit decreasing
- Le premier ajustement / premier ajustement décroissant First fit/ First fit decreasing
- Ajustement complet /Meilleur ajustement décroissant : Full fit/Best fit decreasing (BFD)

Dans notre étude, nous avons testé les trois algorithmes, les meilleurs résultats trouvés sont ceux cités dans [Razouk 16]. D'après les expérimentations extraites, nous optons dans notre étude sur l'utilisation du BFD. Pour la définition des clusters, nous choisissons un sous ensemble des conteneurs qui vérifient les contraintes des caractéristiques techniques des conteneurs, ensuite ils sont classés dans des catégories à la base des critères de temps de séjour (EDT), destination et poids. Nous préparons les ensembles des positions libres dans des sous-groupes pour former les bins (bacs), ces sous-groupes tiennent compte des services (liste des tâches par type de flux) et les caractéristiques techniques des conteneurs, le couplage entre les deux sous-groupes affectent une meilleure position de stockage pour chaque conteneur du bac, c'est ce qui justifie le choix de cette stratégie.

Nous considérons plusieurs attributs des conteneurs afin de déterminer une position de stockage optimale à chaque conteneur. Après avoir trié les conteneurs par type et par dimension, le premier attribut est le temps de séjour de chaque conteneur (EDT), qui définit la date du dépilement du conteneur de la zone de stockage. Deuxièmement, la catégorie de chaque conteneur est prise en compte, ainsi que la destination de chaque conteneur et son poids.

Dans cette section, nous étudions la manière dont nos sous-groupes de conteneurs sont construits. Tout d'abord nous identifions les conteneurs en fonction de leurs caractéristiques: Identifiant du conteneur, dimension, type, poids, destination, EDT. Nous supposons que leurs positions de stockage dans le navire sont connues à l'avance et que le nombre de remaniements nécessaires a été déjà identifié pour finalement garder la stabilité du navire. Le nombre de conteneurs à décharger et à charger ainsi que le nombre de mouvements pour établir la situation souhaitée du navire est connue à l'avance. Ceci est valide pour les conteneurs en transbordement ou qui sont dédiés à l'import. Pour le cas de l'export, les conteneurs sont triés d'abord en fonction de leurs destinations (prochaîne Port à visiter, ainsi que le temps de séjour EDT). Le type de la baie de stockage doit être vérifié et confirmé avant l'attribution des conteneurs aux baies de stockage qui forment des sous-groupes de stockage adjacents.

Problème de Bin Packing détaillé adapté pour le SSAP est présenté ci-dessous :

Algorithme 06: BP1

Générer des bacs

1. Initialiser le paramètre $CB_c = CB_0$ étant donné que CB est le nombre possible des Bins de conteneurs.
2. Borner le sujet pour la contrainte du temps d'exécution, ne pas dépasser un nombre maximal de (5000 Clusters): N_{MAX}
3. Initialiser St_0 qui est l'état initial de l'espace de stockage
4. **Répéter**

5. $I \leftarrow I + 1$
6. Construire un ensemble de Bins possible avec l'indice du Bin et la classe des conteneurs qui partagent les mêmes caractéristiques $(CB_1^K, CB_2^K \dots, CB_{N_{MAX}}^K)$ où chaque bins contient les conteneurs qui partagent les mêmes caractéristiques.
7. **Jusqu'à N_{MAX} faire**
8. **Pour $b \leftarrow 1$ jusqu'à B faire**
9. Générer une liste des l_b des positions libres par baie
10. $Sol_{l_b}^{CB_1^K} \leftarrow$ recherche solution (l_b, CB_1^K)
11. **Si** vérification_de_compatibilité($Sol_{l_b}^{CB_1^K}$)=**vrai alors**
12. $cost(Sol_{l_b}^{CB_1^K}) =$ Evaluation_cas($Sol_{l_b}^{CB_1^K}$)
13. **Sinon**
14. $cost(Sol_{l_b}^{CB_1^K}) =$ Best_Known($Sol_{l_b}^{CB_1^K}$)
15. **Fin si**
16. **Fin pour**
17. Générer les LB et UB pour le temps de séjour des conteneurs
18. Générer les LB & UB pour le nombre de moves des YC et QC
19. **Si** Solution_optimale= vraie **alors**
20. $SolRealisation_{(UB, LB)} \leftarrow SolRealisation_I + cost(Sol_{l_b}^{CB_1^K})$
21. **Sinon**
22. $SolRealisation_{(UB, LB)} \leftarrow SolRealisation_I$
23. **Fin Si**
24. **Fin Pour**
25. Définir l'horizon de planification à S Shift
26. Sélectionner Les bins qui sont rejetés pour les n conteneur
27. **Si** $n < 2$
28. Nous créons b' bins en fonction des n conteneurs
29. $Sol_{l_{b'}}^{CB_n^K}$ est optimale, revenir à l'étape 5
30. **Sinon**
31. **Si** $n < C_b$
32. $CB \leftarrow b$
33. **Sinon** $C_b \leftarrow C_b + 1$, retour à l'étape 27
34. **Fin Si**
35. **Fin Si**

Fin de Génération des Bins

Après la phase de génération de Bins, nous avons fait un listing des positions libres dans chaque baie afin de s'assurer de l'optimalité de notre solution et ainsi de récolter l'ensemble des positions pour le prochain horizon de planification.

Algorithme 07: BP2

- 1- Il existe initialement un ensemble N de conteneurs, un ensemble B de positions vides et un ensemble de CB de clusters.
- 2- **Répéter** pour $k \leftarrow 1$ **jusqu'à** N

- 3- Trier les positions vides par ordre croissant suivant leurs numérotations, le n°1 indique le premier qui arrive au port.
- 4- **Attribuer** à chaque conteneur la position vide la plus proche en tenant compte des contraintes de stockage
 - a- **Choisir** les conteneurs en fonction de la dimension et du type
 - b- **Grouper** ses conteneurs en clusters. Pour ceux qui restent aller à 4
 Répéter $|N|*(|B|-1)$ fois
 - 3- **Générer** les Bins de stockage.
- 5- **Si** la solution est trouvée, elle ne peut qu'être optimale
- 6- **Fin Si** (l'algorithme s'arrête par optimalité).

Sinon, ajoutez la meilleure affectation (conteneurs, positions vides)

 - 7- Fin Répéter
 - 8- Si aucune solution trouvée
 - 9- Répétez $|CB|$ fois et Construire les nouveaux Bins avec toutes les combinaisons possibles
 - 10- Fin

Afin de montrer comment fonctionne les algorithmes ci-dessus, reprenons l'exemple de la figure 25 qui illustre les caractéristiques techniques des conteneurs. Les critères d'adjacence se caractérisent par les distances entre les pays/villes de destination aussi bien que par les compagnies de transit opérant dans le port.

Le tableau ci-dessous est une récapitulation des résultats de l'exécution du Problème de Bin Packing sur le SSAP. Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent que la nouvelle modélisation, qui utilise le principe de Bin Packing, permet de réduire considérablement le temps total de service.

Le GAP dans le tableau ci-dessous, se calcule pour les deux premières algorithmes (Recuit Simulé et DGAS) par rapport aux bornes inférieures de CPLEX. Tandis que pour le BPSSAP, le GAP se calcule par rapport à la CPLEX pour les premières instances pour lesquelles Cplex a pu générer une borne inférieure, pour le reste des instances le GAP se calcule par rapport à la BKS (Best Know solution) des deux premières méthodes. La moyenne de déviation est : **0,61%** ce qui signifie que nous sommes proche de l'optimum, ceci dit qu'une comparaison aussi avec la borne supérieure générée par Cplex s'avère intéressante pour arriver à cette conclusion. En outre, pour les instances dont le GAP est écrit en blue, le modèle proposé a trouvé des solutions réalisables (i.e. solutions sans violation des contraintes de remaniements) même quand un petit nombre de ressources (i.e. camions de transfert) a été utilisé.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé un nouveau modèle mathématique pour la résolution du problème (SSAP). Le modèle a été validé premièrement à travers la résolution des instances de petite taille par le logiciel CPLEX avec la méthode de Branch & Cut. Ensuite, nous avons proposé des méta-heuristiques à savoir l'algorithme de Recuit Simulé et l'Algorithme Génétique, les résultats obtenus ont été comparés à ceux du Cplex pour les instances de petite taille, et avec la meilleure solution connue (BKS) pour les instances de moyenne et de grande taille. Finalement, nous avons adapté le problème de Bin packing au SSAP, les résultats obtenus montre l'efficacité de la méthode proposée.

Les chapitres suivants sont dédiés à l'étude du problème du transfert des conteneurs ainsi que le problème d'optimisation des mouvements des équipements utilisés, ces deux problèmes sont regroupés en un seul problème, appelé problème maître et qui contient : problème d'optimisation de cour de stockage (Yard optimization problem : YOP). Il s'agit de résoudre à la fois le problème SSAP (étudié dans ce chapitre), aussi bien que le problème de transfert des conteneurs par les camions de transfert interne et l'optimisation de l'affectation des grues de cour dans un terminal à conteneurs. Par ailleurs, nous avons utilisé l'approche de simulation pour le problème du transfert des conteneurs vides.

CHAPITRE 5 : Problème de Transfert des Conteneurs par les remorques du terminal (Terminals Trailers : TT)

5.1 Préambule

Dans cette partie, nous avons modélisé des problèmes réels de terminaux portuaires. Nous traitons dans ce chapitre le problème de transfert des conteneurs par les remorques du terminal (Internal Trucks Containers Transfert Problem : « ITCTP »). Le port de notre étude ainsi que d'autres port semi-automatisés utilisent les mêmes équipements et principalement les mêmes standards et processus de travail. Pour se faire nous avons utilisé les résultats des études expérimentales qui ont été faites sur le terrain.

Pour une meilleure compréhension et une meilleure gestion de la performance des équipements, et pour détecter les causes de leurs arrêts fréquents, un calcul du Taux de Rendement Global TRG (OEE en anglais : Overall Equipment Effectiveness) est nécessaire en se basant sur le temps de cycle chronométré des équipements.

Le « TRG » définit le rendement global d'un équipement, d'un centre de charge ou d'une usine en tenant compte simultanément des trois principaux paramètres de performance manufacturière :

La disponibilité : le nombre d'heures réellement travaillées à produire par rapport au nombre d'heures planifiées.

L'efficacité : le nombre d'unités produites (mouvement ou conteneurs traités) pendant les heures productives par rapport à la capacité maximale spécifiée par le fabricant.

La qualité : le nombre d'unités respectant les critères de qualité par rapport au nombre total d'unités produites.

La figure ci-dessous montre les temps d'attente des véhicules de transport interne (temps perdu dans la file d'attente et le temps d'attente dans la file des opérations au niveau des grues) que ça soit les QCs ou les YCs, ainsi que d'autres types de temps perdu.

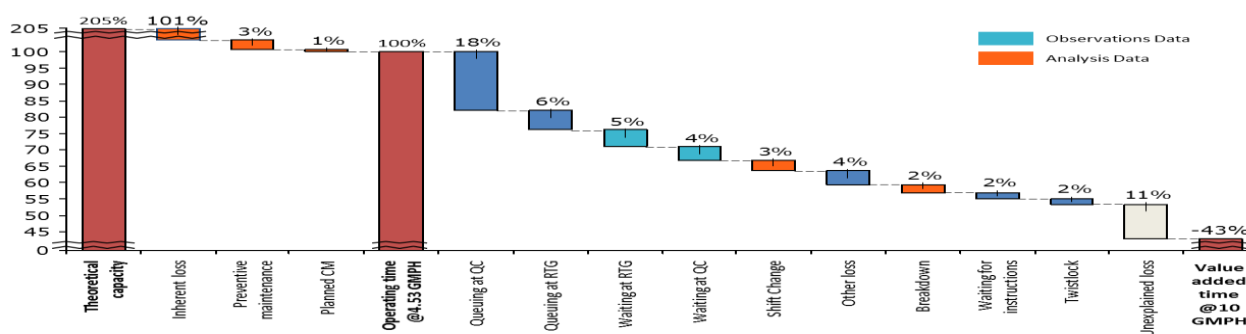


FIGURE 31 : REPARTITION DES TAUX DE GASPILLAGE PAR RAPPORT AU TEMPS TOTAL DE MESURE [RAZOUK 17]

La figure ci-dessus, extraite de l'étude théorique faite par l'équipe du projet dans notre port d'étude, montre que le cumul des temps d'attente des QCs et des YCs impactent en grande partie (33% des pertes calculées) la productivité des camions de transfert interne (TTs). Le GMPH (Gross Moves Per Hour) pour une QC par exemple est défini comme un rapport entre le nombre total des mouvements des conteneurs et le nombre

d'heures de travail des QCs. Plusieurs sources de gaspillage ont été identifiées, qui représentent les temps d'attente au niveau des QCs et des YCs, aussi bien que le temps de changement des équipes, des pauses, etc. Ces données sont les fruits des analyses théoriques et analytiques faites sur le terrain de notre étude. Les problèmes cibles de cette étude sont : l'ordonnancement des QCs et l'affectation des tâches de chaque TTs, l'optimisation des itinéraires et la maximisation de la charge transportée par les TTs, l'optimisation de la zone de stockage ainsi que le nombre de remaniements.

Les niveaux d'améliorations effectuées sont classés en 3 catégories en fonction de la difficulté de la mise en œuvre :

Faible difficulté :

- Ne nécessite pas un investissement.
- Peut être mise en œuvre dans une période de temps relativement courte. (< 6 mois)

Difficulté moyenne :

- Nécessite uniquement l'acceptation de l'équipe locale
- Nécessite un petit investissement avec retour de bénéfice < 1 an
- Peut être mise en œuvre dans une période de temps moyenne (6 – 18 mois)

Difficulté élevée :

- Nécessite une négociation formelle avec le bureau d'administration.
- Nécessite un investissement élevé.
- Peut être mise en œuvre dans une longue période (1-2 ans)

Notre focus est plutôt sur les problèmes de la première et la deuxième classe de difficulté faible et moyenne. L'idée principale est de pouvoir proposer des solutions faciles à implémenter applicables sur le moyen terme avec un coût d'investissement moyen.

Nous allons traiter dans ce chapitre le problème d'ITCTP en se focalisant sur les camions de transfert interne (Terminal Trailer : TT). Le type d'équipements de manutention utilisés dans cette étude est égal à trois : TTs, QCs et YCs.

Les enjeux principaux de ce chapitre sont :

- Préparer une liste optimale des tâches de chargement et de déchargement des conteneurs tout en respectant les différentes contraintes du problème étudié;
- Identifier une liste des TTs optimale pour mieux affecter les conteneurs sélectionnés dans un cycle de traitement;
- Définir une affectation optimale des TTs aux grues de telle façon à identifier un itinéraire optimal entre la zone à quai et la zone de cour pour chaque IT qui invite la possibilité de congestion avec d'autres TTs.

5.2 Problème de transfert des conteneurs par les camions de transfert :

5.2.1 Processus simplifiés des opérations

Pour pouvoir décrire l'itinéraire emprunté par les TTs, nous allons tout d'abord décrire les processus simplifiés du chargement et du déchargement

Processus simplifié pour le déchargement :

- 1) Le TT en attente sous le portique dans le quai
- 2) Le portique (QC) dépose le conteneur sur le TT
- 3) Le TT se dirige vers la position assignée pour le conteneur
- 4) Le YC existe déjà sur le block associé sur le yard
- 5) Le TT arrive
- 6) Le YC manutentionne le conteneur et le met dans sa place sur le yard
- 7) Le TT décharge et revient vers le quai

Processus simplifié pour le chargement :

- 1) Le camion est en attente sous le YC
- 2) Le YC dépose le conteneur sur le camion
- 3) Le TT se dirige vers le quai
- 4) Le portique(QC) manutentionne le conteneur et le met dans sa place associée sur le vaisseau
- 5) Le TT revient vers le yard.

Nous pouvons alors résumer ces processus par un schéma, qui est valable pour le chargement/ déchargement :

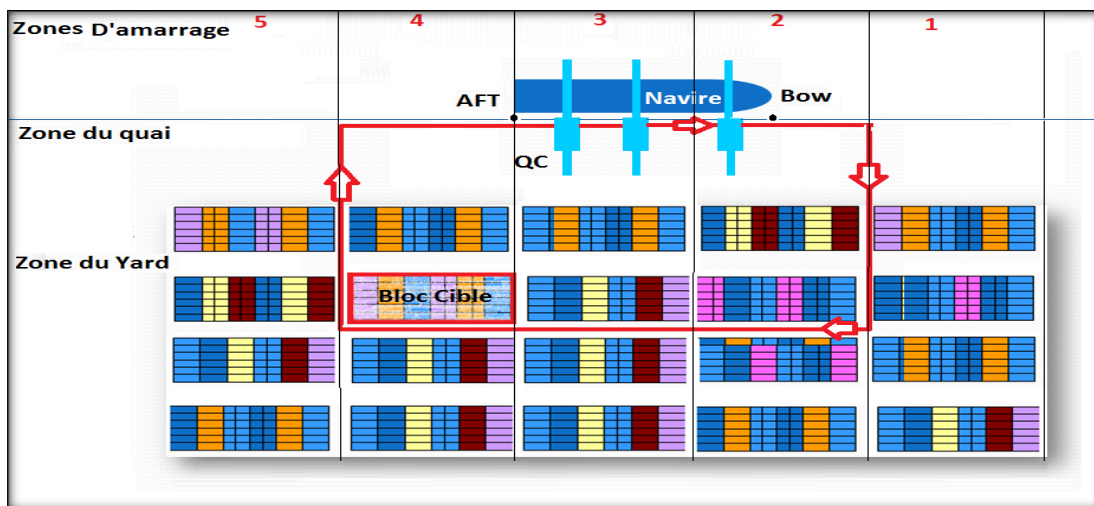


Figure 32 : Représentation du chemin parcouru par un camion pour transporter un conteneur

La distance parcourue par un camion dépend de deux paramètres, la position d'amarrage du navire et celle du bloc cible. Elle peut être décomposée en distance horizontale et verticale :

Distance Verticale : La distance verticale représente la distance qui sépare le bloc de la zone du quai, elle ne dépend que de la position verticale du bloc sur le yard. Le tableau ci-dessous représente les distances verticales relatives aux blocs du terminal d'étude (en mètres) :

zone	Vertical Distance
A	65
B	77
C	125
D	137
E	186
F	198
G	248
H	260
J	311
K	323
L	373
M	385

Tableau 5 : Distances horizontales relatives aux blocs du Terminal

Distance Horizontale : La distance horizontale dépend de la position du block et de celle du navire. Elle peut être mesurée par la connaissance de la distance séparant les extrémités de la zone formée par les colonnes de blocks parcourues par le TT. Ainsi, nous avons défini une matrice (A_{ij}), où :

A_{ij} = Distance parcourue horizontalement par un TT allant de la colonne i vers la colonne j , avec $i \neq j$.

A_{ii} = Largeur de la colonne de blocs j si $i=j$

	1	2	3	4	5
1	147,5	282,725	430,95	574,175	728,675
2	282,725	109,225	257,45	400,675	555,175
3	430,95	257,45	109,225	252,45	406,95
4	574,175	400,675	252,45	109,225	263,725
5	728,675	555,175	406,95	263,725	128,5

Tableau 6 : La matrice A_{ij} relative au terminal d'étude

5.2.2 Exemple d'application sur deux cas d'étude :

Nous avons traité deux cas qui représentent les scénarios les plus fréquents : l'arrivée d'un seul navire (on suppose que la zone d'amarrage est entièrement disponible), et ensuite l'arrivée de deux navires simultanément. Nous avons créé ensuite des sous programmes qui vont être utiles, et qui sont détaillés comme suit:

- **Truck_Travel_dis (bld1, bld2, blk):** Ce programme détermine la distance parcourue par un TT pour charger /décharger un conteneur. Avec :
 - ✓ "blk" : réfère à la position du mouvement dans le yard.
 - ✓ "bld1" et "bld2" réfèrent aux numéros des bollards qui identifient la position d'amarrage du navire.
- **Total_truck_dist :** Ce Programme calcule la distance totale parcourue par les camions pour effectuer toutes les opérations sur le yard en se basant sur la position d'amarrage du navire et la liste des mouvements à effectuer.

Ensuite en se basant sur les positions d'amarrage des navires, nous distinguons deux cas de figures :

Cas d'un seul navire : C'est le cas le plus simple, nous supposons que le quai est entièrement disponible, pour chaque position d'amarrage, nous calculons la distance totale parcourue par les camions (Total_truck_dist). On choisit les positions qui offrent une distance minimale.

AFT	BOW	Distance (km)
42	59	480
43	60	480
44	61	480
45	62	480
46	63	480
47	64	480
48	65	480
49	66	570
50	67	503
51	68	503
52	69	503
53	70	503
54	71	503
55	72	503
56	73	605
57	74	567
58	75	567
59	76	567
60	77	567
61	78	567
62	79	567
63	80	567
64	81	567
65	82	513

Tableau 7 : Distances parcourus pour toutes les positions possibles d'un navire

minimal Dsistance(Km)		480
Right bollard	Left Bollard	
	42	59
	43	60
	44	61
	45	62
	46	63
	47	64
	48	65

Tableau 8 : Positions optimales d'amarrage d'un navire

Cas de deux navires :

Etape 1 :

Pour chaque navire, un tableau est créé pour renseigner pour chaque position d'amarrage possible, la distance totale calculée. Ces tableaux sont triés par ordre croissant de la distance pour faciliter la recherche des positions optimales :

Vessel 1			Vessel 2		
Bow	AFT	Distance(km)	Bow	AFT	Distance(km)
42	59	480	45	61	412
43	60	480	46	62	412
44	61	480	47	63	412
45	62	480	48	64	412
46	63	480	49	65	412
47	64	480	37	53	428
48	65	480	38	54	428
50	67	503	39	55	428
51	68	503	40	56	428
52	69	503	41	57	428
53	70	503	52	68	465
54	71	503	53	69	465
55	72	503	54	70	465
65	82	514	55	71	465
57	74	567	56	72	465
58	75	567	42	58	480
59	76	567	43	59	480
60	77	567	44	60	480
61	78	567	50	66	503
62	79	567	51	67	503
63	80	567	60	76	514
64	81	567	61	77	514
49	66	571	62	78	514
56	73	605	63	79	514
			64	80	514
			65	81	514
			66	82	514
			57	73	567

Tableau 9 : récapitulation des distances parcourues pour toutes les positions d'amarrages pour chacun des deux navires

Etape 2 :

Nous associons pour chaque position d'amarrage du premier tableau, les positions du 2ème tableau, qui respectent la distance minimale entre deux navires (40 mètres équivalente à au moins deux bollards) et qui généreront un parcours dont la distance est minimale pour les camions de transport des conteneurs.

Exemple :

Une des positions optimales du navire 2 qui correspond à la position (42,59) du premier navire est : (61,77). La distance totale parcourue est égale à la somme des distances des deux navires.

	Bow	AFT	Distance
Vessel 1	42	59	480
Vessel 2	61	77	514
		Total Distance	994

Tableau 10 : exemple de deux navires

Nous obtenons alors pour chaque position d'amarrage du navire 1, les positions du deuxième navire qui permettront de réaliser l'optimum pour les deux navires tout en respectant les réglementations de distance minimale entre les navires.

Etape 3 :

Nous refaisons la même procédure avec le deuxième navire par rapport au premier.

Etape 4 :

Comparaison entre tous les résultats obtenus des étapes 2 et 3. Les positions d'amarrages optimales des deux navires correspondent à la valeur de distance totale minimale trouvée.

Allocation des postes d'amarrage optimale pour deux navires			
Distance minimale (Km)		926	
Navire1		Navire2	
AFT	Bow	AFT	Bow
65	82	45	61
43	60	65	81

Tableau 11 : Positions optimales d'amarrages pour deux navires

5.3 Modélisation du problème

Afin d'assurer une bonne circulation des processus, les règles de déplacement des camions sont fixées pour éviter tout événement qui peut nuire aux opérations (confrontation, congestion, etc...)

Sur la zone du quai, il existe six passages, chaque passage est réservé pour les camions servis par le même portique, un camion doit passer sous tous les portiques assignés au navire. Et par conséquence, la distance parcourue ne dépend pas du portique servant le camion.

Sur le yard, les camions se déplacent dans le sens horaire. Les demi-tours sont interdits sur les couloirs verticaux qui séparent les blocs.

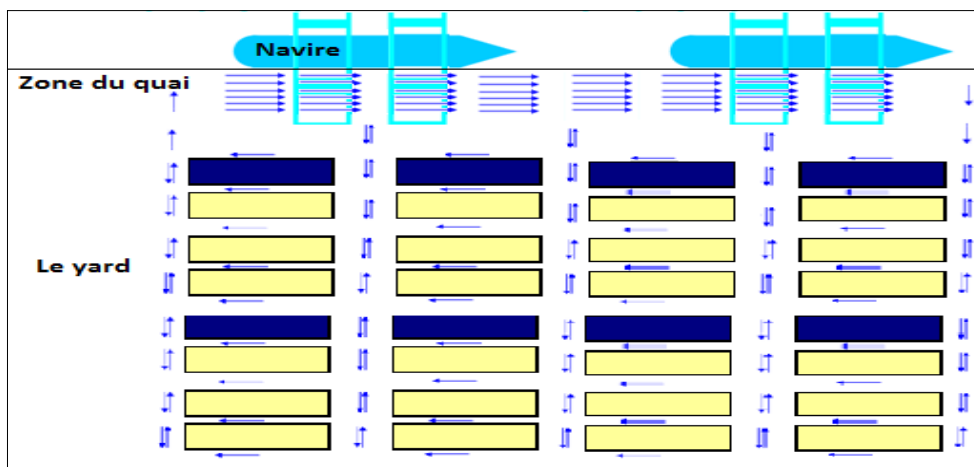


Figure 33 : Représentation du flux des camions dans le terminal

Nous avons essayé de formuler notre problème en un problème des tournées de véhicule multi attributs (Vehicule Routing Problem « VRP »). Les problèmes VRP multi-attributs sont dans leur grande majorité liés aux exigences des cas réels d'applications, qui impliquent par exemple fréquemment des problèmes avec plusieurs dépôts, une flotte de véhicules homogène. Au cours de sa tournée, chaque véhicule doit parcourir N points d'arrêts en partant de son dépôt de départ pour y retourner. Le problème consiste alors à trouver un ensemble de routes à parcourir par les véhicules qui permettent de visiter chaque point d'arrêt en ayant comme objectif de minimiser le coût total. Si on suppose que les coûts sont proportionnels aux distances parcourues, le problème consiste à trouver des parcours dont la somme de leurs coûts est minimale avec respect des contraintes du dépôt multiple et la périodicité. On désignera ce problème par le **MDPVRP (Multiple Depot Periodic Vehicle Routing Problem)** avec : **de multiples dépôts (MD)**. Chaque véhicule est affecté à un unique dépôt qui constitue l'origine et la destination de sa route avec une capacité maximum qui peut transporter. Dans notre cas le dépôt correspond au bloc dans la zone de stockage. Par ailleurs, la planification des routes est opérée successivement sur un horizon de plusieurs périodes temporelles. Chaque conteneur requiert un nombre de services (empilement et dépilement) total sur l'horizon de planification et ceci en prenant en considération les ETD de chaque conteneur, cette combinaison est appelée pattern de visite.

5.3.1 Notations et terminologie:

Pour toute la suite, nous supposons que nous disposons d'une flotte homogène de TTs qui transfèrent les conteneurs entre les quais et les baies de stockage $b = \{1, 2..B\}$. Un TT peut traiter k conteneur avec $k \in \{1..N\}$. Ces conteneurs peuvent être stockés dans des baies b avec $b \in \{1..B\}$. Chaque conteneur k sélectionné dans l'horizon de planification h et il est affecté ensuite à l'ensemble des listes valides l a un coût proportionnel à son parcours : c_l^{hb} , ce qui caractérise le pattern construit (ensembles de routes possibles et baies de stockage possibles pour le conteneur sélectionné) en fonction des baies de stockage, du navire en question ainsi que l'horizon de planification.

Pour les autres variables on les définit comme suit :

Notations	Définitions
B	Ensemble des baies de stockage.
H	Ensemble des périodes de planifications formant l'horizon de planification.
K	{1..N} Ensemble des Conteneurs.
V_h	Ensemble des conteneurs qui peuvent être traités dans la période h.
C_k	Ensemble de patterns de visites admissibles pour le conteneur k $\in V_h$.
R^{hb}	Ensemble des routes associées à la baie b dans la période k $\in H$.
R_k^{hb}	Un sous-ensemble de routes ($\subset R^{hb}$) couvrant le conteneur k $\in V_h$.
P_{ks}	Variable binaire qui vaut 1 si le conteneur k est associé au pattern de visites s (qui inclut l'indice du navire), et 0 sinon.
y_{kb}	Variable binaire qui vaut 1 si le conteneur k est associé à la baie b, et 0 sinon.
q_{hb}	Capacité de stockage de la baie b dans la période h.
x_l^{hb}	Variable binaire qui vaut 1 si la route « l » est associée à la période h et à la baie b, et 0 sinon.
c_l^{hb}	Variable entière qui représente le coût d'affectation d'un conteneur k de la route l à la baie b et à la période h.
a_{hs}	Sous ensemble de pattern s valide dans la période h pour les conteneurs k sélectionnés.

Tableau 12 : Notations du problème.

L'objectif est d'aboutir à une affectation optimale des conteneurs à un sous-ensemble de baies et de patterns tout en respectant les contraintes posées, ce qui revient donc à jouer sur les tournées qui seront générées au début par nos solveurs partiels. Une tournée est dite réalisable si elle satisfait les différentes contraintes du problème.

5.3.2 La fonction objectif :

Le MDPVRP est constitué de deux sous problèmes. Il s'agit d'une part de déterminer l'affectation optimale des conteneurs aux véhicules, et d'autre part l'affectation des conteneurs aux patterns de visite définies précédemment.

La fonction objectif du problème est formulée de la manière suivante :

$$\text{Min } \sum_{h \in H} \sum_{b \in B} \sum_{l \in R_k^{hb}} c_l^{hb} x_l^{hb} \quad (5.1)$$

Minimiser la sommation des coûts d'affectation des conteneurs k associée à des routes l, à des baies de stockage b dans une période de planification h.

5.3.3 Contraintes

Les contraintes du problème sont représentées par les expressions suivantes :

$$\sum_{h \in H} \sum_{b \in B} \sum_{l \in R_k^{hb}} x_l^{hb} = f_k, \forall k \in V \quad (5.2)$$

La contrainte (5.2) impose que chaque conteneur k peut être sélectionné exactement f_k fois pour la formulation des patterns.

$$\sum_{b \in B} \sum_{l \in R_k^{hb}} x_l^{hb} - \sum_{s \in C_k} a_{hs} P_{ks} = 0, \forall h \in H, \forall k \in V_h \quad (5.3)$$

La contrainte (5.3) exprime le fait que le nombre de sélection f_k associées au conteneur k appartiennent à un pattern s appartenant à l'ensemble des patterns possible qui affecte le conteneur k dans la période h ($\forall k \in V_h$) provenant d'un navire sélectionné à la baie de stockage b . Cette contrainte exprime le fait qu'un conteneur n'est associé qu'à un pattern valide pour lui, ce conteneur doit être affecté dans la période h à une baie b et servi à partir d'une route l .

$$\sum_{d \in D} y_{id} = 1, \forall k \in V_h \quad (5.4)$$

La contrainte (5.4) assure le fait que chaque conteneur est affecté à une seule baie.

$$\sum_{l \in R_k^{hb}} x_l^{hb} \leq y_{kb}, \forall h \in H, \forall b \in B, \forall k \in V_h \quad (5.5)$$

La contrainte (5.5) explique le fait qu'une route n'est choisie que si elle est reliée à un conteneur k que lui-même est affecté à une baie b

$$\sum_{l \in R_k^{hb}} x_l^{hb} \leq m_{hb}, \forall h \in H, \forall b \in B \quad (5.6)$$

La contrainte (5.6) force la solution d'avoir au plus m_{hb} routes reliées à la baie b dans la période h et ceci dépendamment de la capacité de stockage de chaque baie pour respecter le nombre de véhicules disponibles.

$$\sum_{l \in R_k^{hb}} x_l^{hb} \leq q_{hb}, \forall h \in H, \forall b \in B \quad (5.7)$$

La contrainte (5.7) définit le fait que la capacité de stockage d'une baie doit être respecté lors de l'affectation des conteneurs lors de la période de planification h .

$$x_l^{hb}, y_{kb}, P_{ks} \in \{0,1\}, \forall h \in H, \forall b \in B, \forall k \in V_h, \forall l \in R_k^{hb} \quad (5.8)$$

La dernière contrainte (5.8) est une contrainte d'intégrité.

Cette contrainte exprime le fait qu'un conteneur n'est associé qu'à un pattern valide pour lui, ce conteneur doit être affecté dans la période h à une baie b et servi à partir d'une route l . Tandis que la 3ème contrainte assure le fait que chaque conteneur est affecté à une seule baie. La contrainte (4) explique le fait qu'une route n'est choisie que si elle est reliée à un conteneur k que lui-même est affecté à une baie b . La 5ème contrainte force. L'avant dernière contrainte (6) définit le fait que la capacité de stockage d'une baie doit être respecté lors de l'affectation des conteneurs lors de la période de planification h . Finalement, la dernière contrainte (7) est une contrainte d'intégrité.

5.4 Méthodes de résolution

Nous avons commencé la construction des solutions partielles de notre problème à travers la constitution des bins de conteneurs ensuite les patterns et les routes de service qui relient chaque conteneur à une baie de stockage dans une période de panification h . Puisque les approches exactes ne peuvent traiter que des problèmes beaucoup plus petits que ceux envisagés dans les applications réelles, nous nous sommes concentrés sur les approches heuristiques. La plupart des procédures de résolution fonctionnent en deux phases, cherchant d'abord à obtenir une bonne solution, puis cherchant à l'améliorer.

5.4.1 Calcul des tournées :

Une heuristique simple et qui donne de bons résultats est celle de Clarke et Wright. Notre motivation est la suivante, au lieu de changer l'affectation de tous les conteneurs aux baies de stockage, il serait préférable de sélectionner un sous-ensemble de conteneurs à qui on va changer l'affectation aux patterns. Reste à déterminer comment choisir ce sous-ensemble pour lequel on changera l'affectation des conteneurs aux baies de stockage. L'idée est de commencer par récupérer les dernières solutions générées par la première partie dans laquelle nous avons affecté les conteneurs aux Bins de stockage. Après nous procédons au calcul des trajets nécessaires résultants de la réaffectation de chaque conteneur sélectionné d'une route à une autre. Le calcul d'économie va se faire de la manière suivante : supposons qu'on a reçu la route suivante de la part de notre SP1 : (Navire1, $c_1, c_2, c_3, c_5, B1$), le détour fait pour calculer c_3 serait donc : $\text{détour} = c_{23} + c_{35} - c_{25}$ avec c_{ij} est le coût associé à l'arc (i, j) , ce qui veut dire que le détour est calculé en fonction des coûts qui sont liés directement avec le conteneur en question moins les coûts indirects qui ne contient pas le conteneur en question, et ceci pour mesurer l'impact d'éloigner le conteneur choisi de la liste initiale. Après calcul, nous choisissons un sous ensemble des conteneurs qui ont couté le plus en détour. Ce sous-ensemble, et pour des raisons de simplification, peut être réduit à un petit nombre de conteneurs dans un premier temps pour lesquels nous allons essayer de changer leurs affectations aux baies de stockage.

Après le choix de ces conteneurs, l'objectif est de les affecter aux autres baies avec le moindre coût possible. Ensuite, le conteneur choisi est inséré dans une des routes possibles valide pour cette baie choisie.

Dans un deuxième temps, ça serait la même chose qu'avec les patterns. C'est-à-dire qu'on peut changer aussi l'affectation des baies de stockage aux patterns pour recalculer les coûts d'affectations et réaffecter à nouveau les conteneurs sélectionnés.

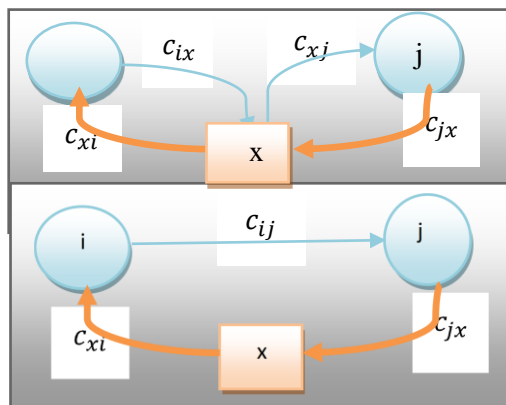


Figure 34 : Illustration du principe de la méthode des économies (Savings).

Algorithme 08 : calcul des détours :

- 1: $CoutCnt = 0$ //coût du choix conteneur
- 2: récupérer s // s est la solution initiale de la constitution des patterns reçu (dans lequel on fixe l'affectation des conteneurs aux baies).
- 3: répéter.
- 4: pour toutes les routes r de cette solution s .
- 5: répéter.
- 6: pour tous $CntRest$ //les conteneurs restants appartenant à une de ces routes.
- 7: Choisir un conteneur j dans les conteneurs restants.
- 8: $CoutCnt_j = c_{xj} + c_{jy} - c_{xy}$ //sachant que x et y sont deux conteneurs de la même route que j .
- 9: Stocker ce cout du conteneur j dans $TabCnt$ //un tableau dynamique des coûts du choix des contenurs.
- 10: Jusqu'à ($CntRest = \emptyset$).
- 11: Jusqu'à ($s = \emptyset$).
- 12: répéter
- 13: $k=j$ //pour les conteneurss du tableau dynamique
- 14: si $CoutCnt_j > CoutCnt_{j+1}$ // choisir les conteneurs qui nous ont coûté le plus en détour.
- 15: $[TabCoutElv] = CoutCnt_j$ //conserver le coût le plus grand dans un autre tableau.
- 16: jusqu'à ($p \leq 5$)// on opte pour les cinq conteneurs qui nous ont couté le plus en détour.
- 17: pour chaque baie b // non encore choisi
- 18: répéter
- 19: pour chaque conteneur k // parmi les 5 conteneurs choisis
- 20: $CoutAffDep = \text{Min} \{r_{kb} / k \in N_5(\text{parmi les 5 conteneurs choisis}), b \in B\}$.
- 21: Affecter le conteneur k à la baie b .
- 22: jusqu'à ($B = \emptyset$).

5.4.2 Insertion et optimisation locale :

Pour insérer un nouveau conteneur dans une route donnée, une procédure d'insertion dépendra de l'ordre dans lequel on envisage des conteneurs à insérer. De nombreuses variantes sont proposées, suivant que l'on envisage d'abord les sommets les plus loin des baies disponibles, les plus près ou au hasard.

En revanche, on peut se baser sur le coût de chaque route pour déterminer dans quelle route on va insérer notre nouveau conteneur. On part de K routes, l'algorithme examine les sommets un par un, et il choisit de les insérer entre deux sommets dans une route, de sorte que cette insertion fasse diminuer le moins possible le coût de la route. Mentionnons encore qu'une des meilleures heuristiques connues à ce jour est une "procédure d'insertion généralisée", qui choisit d'insérer un sommet I entre deux sommets X et Y d'une route R , sans que ceux-ci ne soient nécessairement consécutifs dans R avant l'insertion. Ceci revient à faire en même temps une insertion et une réparation du tour, pour insérer I entre X et Y , nous étions amenés à couper la route en plusieurs chaînes et à les reconnecter autrement.

Nous avons proposé une nouvelle heuristique basée sur la coopération fine entre un algorithme d'insertion et un algorithme d'optimisation locale. Le principe consiste à enrichir une procédure d'insertion en faisant un peu

d'optimisation locale après chaque insertion. Bien entendu, pour garder un caractère pratique à une telle procédure, il faut que la phase d'optimisation locale soit de complexité limitée. L'idée de cette procédure est que, puisque l'optimisation locale permet dans un premier lieu la "réparation" des routes, il vaut mieux faire ces réparations au fur et à mesure que les défauts apparaissent dans la solution, plutôt qu'à la fin, une fois que l'on dispose d'une solution complète (ce qui correspond à l'utilisation habituelle de l'optimisation locale). Ceci a l'avantage de limiter la zone d'optimisation puisque les réparations ne se font que localement, à l'endroit de l'insertion.

Algorithme 09 : Insertion et d'optimisation locale :

- 1: Pour les baies b choisies //les baies du Bloc à qui on a affecté le conteneur k
- 2: répéter
- 3: Choisir une route r' //le choix peut se faire au hasard
- 4: $CoutRoute = c'$ //le coût actuel de la route.
- 5: répéter // phase d'insertion du conteneur i dans la route r' .
- 6: pour chaque conteneur i de la route r .
- 7: $DistCnt = \text{Max} \{c_i^{hb} / b \in B, h \in H \text{ et } l \in R_i^{hb}\}$ //choisir le conteneur le plus loin de la baie sélectionnée, sachant qu'on suppose que le coût est proportionnel à la distance parcourue.
- 8: Remplacer i par k //remplacer le client de la route r' par le client k attaché à la baie b juste pour calculer le nouveau coût.
- 9: Calculer $CoutNvRoute$ //calculer le coût associé à la nouvelle route.
- 10: Si $CoutNvRoute < CoutRoute$
- 11: conserver le remplacement de i par k .
- 12: Si non
- 13: Calculer $DistCnt2 = \text{Min} \{c_i^{hb} / b \in B, h \in H \text{ et } l \in R_i^{hb}\}$ //choisir le conteneur le plus proche de la baie.
- 14: Calculer $CoutNvRoute2$. //calculer le nouveau coût d'insertion
- 15: Si $CoutNvRoute2 < CoutRoute$
- 16: Remplacer i par k .
- 17: Si non
- 18: Choisir au hasard un client i de la route r' .
- 19: Calculer $CoutNvRoute3$
- 20: Si $CoutNvRoute3 < CoutRoute$
ou $CoutNvRoute3 < CoutNvRoute1$
ou $CoutNvRoute3 < CoutNvRoute2$
- 21: remplacer i par k .
- 22: Fin Si.
- 23: Fin Si.
- 24: Fin Si.
- 25: jusqu'à ($i = \emptyset$).
- 26: jusqu'à ($r' = \emptyset$).

Le schéma ci-dessous explique le fonctionnement de notre heuristique d'insertion et d'optimisation locale, qui se base sur une reconstruction d'une route choisie. La baie de stockage sélectionnée dans la période h fait partie d'un de l'ensemble de routes validées pour cette baie. Un coût d'affectation est ensuite affecté à chaque route

r de la liste l des routes valides pour la baie b dans l'horizon h. Finalement nous explorons l'ensemble des conteneurs affecter à chaque route pour voir l'impact de la réaffectation des nouveaux conteneurs :

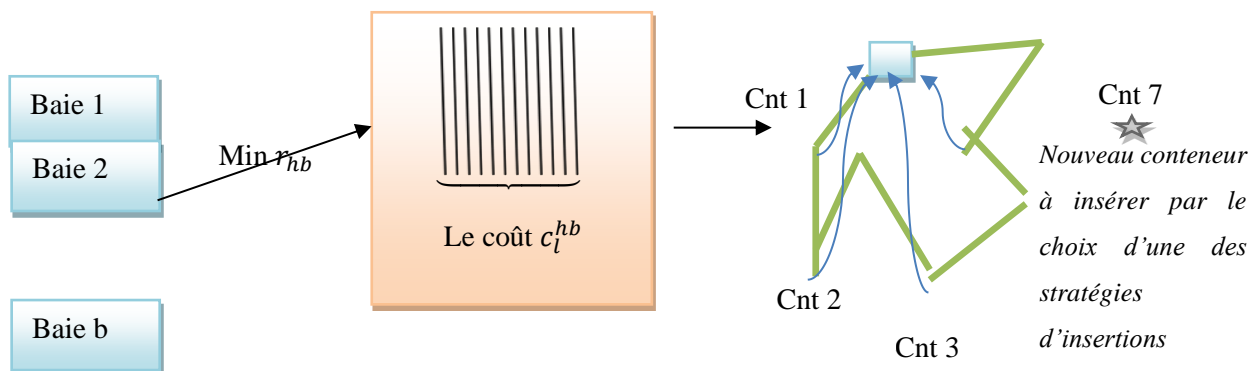


Figure 35 : Architecture d'insertion dans les nouvelles routes.

La figure ci-dessus montre le mode de fonctionnement de la méthode d'insertion et d'optimisation locale, dans laquelle nous évaluons l'impact d'insertion d'un nouveau conteneur dans une route déjà construite. Cet impact se justifie par le recalcul du c_l^{hb} qui est définie par l'ensemble des baies disponibles dans l'horizon de planification h qui sont affectées à la route l. L'avantage de cette méthode est qu'elle améliore les résultats trouvés à travers la proposition des affectations de nouveaux conteneurs aux routes issues de la première phase de l'algorithme. Les résultats obtenus qui sont présentés dans le prochain chapitre, montre la performance de l'approche proposée.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le deuxième type des problèmes des terminaux portuaires qui est le problème de transfert des conteneurs par les remorques du terminal (Internal Trucks Containers Transfert Problem : « ITCTP ») ; dans lequel nous avons proposé une nouvelle modélisation mathématique adaptée au problème de tournée de véhicules périodique et multi-dépôt (MDPVRP). La résolution du modèle proposé a été traitée en parallèle avec le YOP, l'objectif est ainsi l'optimisation des trajets parcourus par les ITs ainsi que les coûts associés. Ensuite, nous avons présenté quelques heuristiques et méta-heuristiques de résolution à travers l'utilisation des algorithmes d'optimisation des tournées et calcul des détours, en plus de l'algorithme d'insertion et d'optimisation locales. Ces méthodes ont prouvé leurs capacités à générer des solutions réalisables et parfois optimales. La partie des expérimentations numériques va être présentée en détail dans le chapitre suivant, puisque le problème étudié qui est le problème d'optimisation de la cour de stockage (Yard Optimization Problem) fait appel aux deux problèmes étudiés dans le chapitre quatre, le chapitre cinq ainsi que dans la première partie du chapitre six.

Chapitre 6 : Problèmes d'optimisation de la zone de Cour (Yard Optimization Problem)

Nous traitons ici le problème d'optimisation de la cour de stockage (Yard Optimization Problem) qui englobe trois problèmes d'optimisation dans les terminaux à conteneurs : Problème d'allocation de l'espace de stockage (Storage Space Assignment Problem : « SSAP »), problème de transfert des conteneurs par les camions de transfert interne (Internal Trucks Containers Transfert Problem : « ITCTP »), ainsi que le problème d'affectation des grues de cour et optimisation des mouvements des grues (Yard Cranes Assignment Problem : « YCAP »).

Nous considérons ici un aspect dynamique, à savoir que tous les conteneurs ne sont pas encore arrivés à notre port d'étude et que leurs dates d'arrivées sont connues à l'avance. C'est-à-dire que nous supposons que le port est en pleine activité au moment de l'accostage du nouveau navire.

6.1 Préambule

La tâche de transfert commence par la sélection des conteneurs depuis le navire et se termine au point de livraison du conteneur à la grue de cour au niveau du bloc et de baie attendue pour l'opération de l'import ou du transbordement. Pour le cas de l'export, l'opération commence depuis la cour de stockage et se termine au niveau de la zone à quai pour livrer le conteneur à la grue à quai. Les règles de gestion au niveau du port imposent le fait que chaque véhicule doit être affecté à un seul navire durant l'opération de chargement ou du déchargement des conteneurs. Pour le YCAP, l'enjeu principal est d'affecter le nombre optimal de grues dans un horizon de planification qui vérifie la contrainte de temps de séjour des navires et qui optimise le nombre de remaniements possibles dans la cour de stockage.

Puisque les autorités portuaires reçoivent des informations détaillées sur les navires par EDI avant leur arrivée pour le cas import ou de transbordement, idem pour les opérations d'export, ils obligent les transitaires à déclarer bien en avance les informations nécessaires sur les conteneurs export avant l'arrivée au port. Les informations reçues permettent aux opérateurs du terminal de prévoir le nombre de QCs qui doit être affecté aux navires et le nombre de grues de cour (YC) qui doit être affecté aux navires durant chaque horizon de planification, le listing des conteneurs à charger ou à décharger est bien connu en avance. Pour les camions de transfert, nous focalisons notre étude sur l'utilisation des camions de transfert interne, qui nécessite une interaction avec les YCs et les QCs pour les opérations de chargement/déchargement.

Les enjeux principaux concernent la préparation d'une liste optimale des tâches de chargement/déchargement des conteneurs tout en respectant les différentes contraintes du problème étudié, la définition d'une affectation optimale des TTs aux grues de telle façon à identifier un itinéraire optimal entre la zone à quai et la zone de cour pour chaque TT qui évite la possibilité de congestion avec d'autres TTs et enfin l'optimisation du nombre de grues utilisées pour chaque opération, ceci dans l'optique de satisfaire la contrainte de séjour des navires ainsi que l'optimisation des remaniements au niveau de la cour de stockage.

Pour se faire, nous avons proposés une nouvelle formulation mathématique du YOP et des méthodes de résolution approchées.

Nous avons traité un cas d'étude pratique, l'objet de Razouk et al. [Razouk 17], qui consiste à utiliser les résultats de l'optimisation pour le modèle de simulation proposé. Ce modèle repose sur la base d'un nouveau type de camions de transfert qui consiste à effectuer un transfert double des conteneurs (deux conteneurs transportés à la fois). Le modèle a été testé et validé premièrement pour le transfert des conteneurs vides à travers la proposition d'une nouvelle organisation de l'espace de stockage.

6.2 Contexte général du problème : YOP

La notion des équipes de travail continu vise à garantir une disponibilité des ressources 24h/7j. C'est le cas au niveau d'un port qui utilise trois équipes par jour.

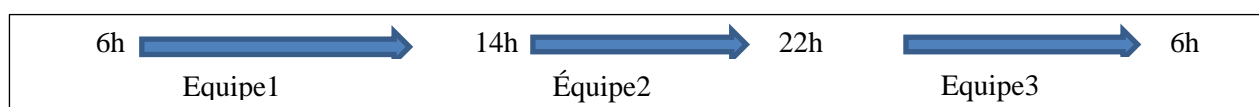


Figure 36 : Horizon de planification actuel

Les instructions pour les équipes de travail dépendent du type de flux utilisé. Pour l'export, les conteneurs arrivent sur des camions pour ensuite être positionnés dans la cour de stockage selon leur date de départ. Pour l'import ou le transbordement, les conteneurs arrivent sur des navires pour être acheminés sur d'autres navires ou sur des camions externes. Dans les deux cas, les instructions pour les équipes de travail sont d'abord le traitement des conteneurs destinés à l'import avant ceux de l'export/transbordement. Si l'extraction d'un conteneur nécessite un mouvement improductif, les conteneurs au-dessus sont mis dans des baies adjacentes qui contiennent moins de conteneurs.

L'organisation de la zone de stockage dans notre étude, ne dépend pas du type de flux, c'est-à-dire, qu'aucun espace de stockage n'est réservé aux conteneurs import ou export. Plusieurs travaux de recherche ont en effet montré la limitation de ce type d'approche pour des problèmes de grandes tailles vu le risque de gaspillage des espaces de stockage. Dans la stratégie de stockage proposée, nous optons pour une stratégie de stockage dans des baies qui contiennent des conteneurs de différents types de flux.

Pour une affectation efficace des conteneurs aux espaces de stockage, des regroupements de chaque type de flux ont été formés dans chaque horizon de planification suivant les critères de dimension, de type, de destination et de l'EDT des conteneurs, ils sont ensuite affectés à des baies adjacentes dans les blocs de stockage. Ensuite, l'acheminement depuis ou vers les navires est garanti par les camions de transfert interne qui font des rotations contrairement aux aiguilles d'une montre. D'après plusieurs recherches que nous avons effectuées, il n'existe pas de travail dans la revue de littérature qui traite le YOP en affectant un conteneur à un emplacement spécifique (bloc, baie, rangée, niveau).



Figure 37 : Configuration de la zone de Stockage

La structure de base de la zone de stockage est présentée ci-dessus. Nous constatons une organisation par bloc, chaque bloc contient deux colonnes. À chaque bloc, nous affectons des grues de cour qui peuvent se déplacer horizontalement comme indiqué ci-dessus, pour récupérer ou déposer des conteneurs depuis/dans les camions de stockage. Les hypothèses qui sont considérées sont les suivantes :

- 1) La contrainte de compatibilité entre le type de la baie et des conteneurs à stocker doit être vérifiée avant la phase de stockage pour éviter le risque d'endommagement des marchandises.
- 2) Pour une affectation efficace des conteneurs aux espaces de stockage, des regroupements de chaque type de flux ont été formés dans chaque horizon de planification suivants les critères de dimensions, de types, de destination et de l'EDT des conteneurs. Les conteneurs export sont stockés dans la même baie ou dans des baies adjacentes selon leur navire de destination. Pour ceux de l'import, les conteneurs du même client (transitaire) sont stockés dans la même baie ou dans des baies adjacentes selon leur destination finale. L'enjeu principal est de construire le plus petit nombre possible des conteneurs avec les mêmes caractéristiques.
- 3) La numérotation est faite selon l'EDT des conteneurs que nous connaissons dès le début de l'horizon de planification, en identifiant chaque conteneur avec son numéro croissant suivant la date de déchargement ou du chargement ainsi que par le type de flux (l : load, d : discharge).
- 4) Nous regroupons un ensemble de baies adjacentes du même bloc dans un service de stockage, nous faisons un listing des sous-groupes de conteneurs identifiés dans l'hypothèse 2) suivant un ordre décroissant pour pouvoir tester la possibilité d'affectation des conteneurs sélectionnés à chaque service du bloc de stockage.

6.3 Modèle mathématique

Dans notre formulation mathématique du YOP, nous avons tenu compte des exigences et contraintes matérielles et humaines. Les caractéristiques techniques des conteneurs, y compris les temps de séjour et les destinations. Le tri des conteneurs traités dans un premier lieu se fait à la base de ces deux critères.

Dans l'optique de garder l'originalité du modèle développé pour Yard Cranes Assignment Problem « YCAP », nous avons traité les différentes contraintes matérielles, humaines et organisationnelles telles que :

- (1) Les caractéristiques des conteneurs sont reçus avant et durant l'horizon de planification, suite à cette réception, l'autorité portuaire prépare une liste des tâches par type de flux (chargement ou déchargement), et ensuite identifie les ressources pour accomplir chaque liste.
- (2) Le temps de séjour de chaque conteneur est connu à l'avance, le chargement/déchargement des conteneurs se fait sur la base des temps de départ prévus de chaque conteneur pour éviter les remaniements.
- (3) Nous focalisons notre étude sur un terminal à conteneurs semi automatisés qui utilise trois équipements : YC, QC et IT. L'organisation de la zone de stockage est divisée en bloc et baies, nous rajoutons la notion des services qui représente un ensemble de baies adjacentes du même bloc.

Pour la résolution du YOP, nous avons divisé le problème en sous-problèmes pour pouvoir les résoudre séparément par des méthodes de résolution appropriées. La résolution de chacun de ses sous-problèmes fait appel à la méthode de résolution la plus adaptée et qui génère des résultats meilleurs par rapport à Cplex pour les petites et les moyennes instances, et par rapport aux autres méthodes proposées pour les grandes instances.

6.3.1 Introduction au problème d'optimisation de l'affectation des grues YCAP :

Après avoir étudié les deux problèmes d'affectation des espaces de stockage, ainsi que le transfert des conteneurs, nous abordons dans cette partie le troisième problème qui consiste à développer un nouveau modèle mathématique pour l'optimisation de l'utilisation des grues ainsi que le nombre de mouvements nécessaires pour compléter une tâche de charge/décharge d'un navire.

En tant qu'opérateur d'un terminal à conteneurs, l'autorité portuaire essaie d'affronter l'évolution continue du marché de transbordement des conteneurs et la demande continue des clients (les lignes des navires) en optimisant son système opérationnel surtout au niveau de la planification de ses équipements (QCs, YCs et TTs). Ceci est dans le but de réduire le délai d'exécution des opérations (en respectant le délai d'attente des navires) tout en augmentant l'efficacité du débit des conteneurs.

Les planificateurs du terminal (le planificateur d'amarrage, le planificateur du yard et le planificateur du navire) sont généralement informés à travers un *proforma* envoyé par le client de la ligne avant l'arrivée des navires, à propos des conteneurs qui doivent être chargés et déchargés. Le planificateur du navire commence à planifier l'ordonnancement des mouvements (charge et décharge des conteneurs) au niveau des QCs quelques heures avant l'arrivée du navire. En même temps, le planificateur de la cour affecte les conteneurs à décharger aux positions sur les blocs.

En se basant sur ces informations, le répartiteur (Dispatcher) essaie d'ordonnancer ces mouvements sur le yard en les affectant aux équipements de la cour.

Pour augmenter le taux des mouvements bruts par heure d'une QC (GMPH) qui se considère comme un des indices de performance les plus significatifs des terminaux à conteneurs, on doit agir directement sur le taux de travail des YCs sur le yard. C'est la raison pour laquelle nous avons formulé un modèle qui détermine une affectation efficace des mouvements aux YCs sur les blocs de la cour.

6.3.2 Concepts utilisés dans la formulation du YCAP :

Le mouvement :

Un mouvement dans un terminal à conteneurs est le déplacement d'un conteneur dans le terminal. On distingue deux types de mouvements :

Le mouvement de charge :

Chaque mouvement de ce type est identifié par :

- La source : C'est la position du conteneur sur le yard
- La destination : C'est la QC qui sert à charger le conteneur dans le navire
- Le temps du début et de la fin de charge du conteneur par la QC

Le mouvement de décharge :

Chaque mouvement de ce type est identifié par :

- La source : C'est la QC qui sert à décharger le conteneur du navire
- La destination : C'est la position du conteneur sur le yard
- Le temps du début et de la fin de décharge du conteneur par la QC

Axe du temps et intervalles du temps des opérations :

Dans le but de réduire le nombre des variables utilisées dans ce modèle, il est nécessaire de construire un axe de temps formé par des intervalles de temps égaux durant lesquels les mouvements de charge et de décharge vont se dérouler.

Les caractéristiques de cet axe sont :

La longueur d'un intervalle de temps est fixée à 2,5 min :

- ✓ Nous prenons 2 min comme temps moyen de manutention des mouvements par le portique à roues (Voir le tableau ci-après)

RTG15		RTG2		RTG21	
Discharge	Load	Discharge	Load	Discharge	Load
0:02:02	0:01:32	0:02:25	0:01:21	0:01:44	0:01:27
0:02:19	0:01:25	0:01:57	0:01:24	0:02:40	0:01:23
0:02:07	0:01:35	0:02:30	0:01:35	0:02:06	0:01:39
0:02:05	0:01:48	0:02:10	0:01:38	0:02:42	0:01:20
0:01:47	0:01:41	0:02:25	0:01:41	0:02:26	0:01:22
0:02:32	0:01:38	0:01:44	0:01:37	0:02:25	0:01:26
0:02:25	0:02:00	0:02:50	0:01:24	0:01:59	0:01:39
0:02:17	0:01:17	0:02:01	0:01:33	0:02:30	0:01:32
0:01:59	0:01:24	0:02:43	0:01:32	0:02:16	0:01:25
0:02:04	0:01:32	0:02:25	0:01:25	0:02:25	0:01:36
0:02:38	0:01:38	0:02:17	0:01:37	0:01:59	0:01:41
0:02:04	0:01:45	0:01:59	0:01:48	0:02:03	0:01:24
0:02:25	0:01:37	0:02:25	0:01:41	0:02:38	0:01:33
<i>Average</i>	<i>0:01:54</i>	<i>Average</i>	<i>0:01:56</i>	<i>Average</i>	<i>0:01:54</i>

Tableau 13 : Temps de manutention des conteneurs par les YCs

Nous prenons 0,5 min comme le temps moyen de déplacement horizontal des YCs (en se basant sur les expérimentations du terrain).

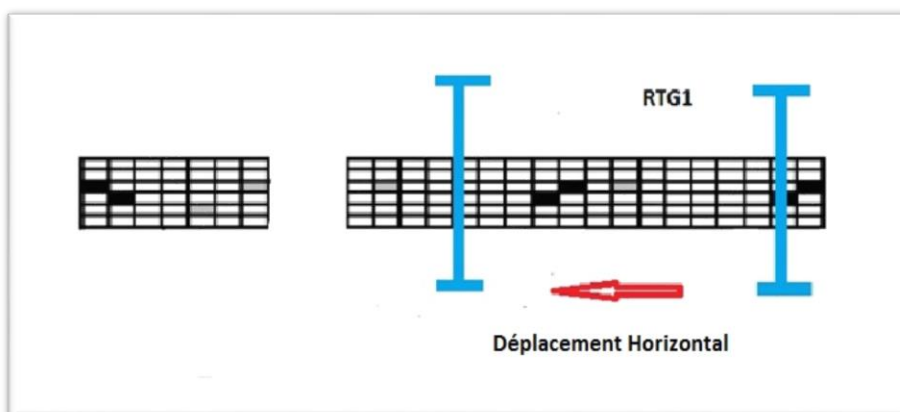


Figure 38 : Déplacement horizontal des YCs

Le nombre des intervalles de temps est déterminé par la formule :

$$\frac{[\text{Max (temps prévu)} + 50\text{min}] - [\text{Min (temps prévu)}]}{\text{IntLg}}$$

Avec :

- IntLg : la longueur d'un intervalle de temps (2,5 min)
- Max (temps prévu) : aucun mouvement ne pourra être ordonnancé après 50 min qui suit le temps prévu du dernier mouvement de l'opération

Le temps prévu du mouvement de décharge TP_m :

C'est la période du temps durant laquelle un portique à roues peut manipuler le mouvement de décharge après que le camion libère ce mouvement.

Le temps prévu du mouvement de charge TD_m :

C'est la période du temps pendant laquelle un mouvement de charge peut être manipulé par le portique à roues toujours en respectant le délai fixé par l'ordonnancement des mouvements de charge par les portiques du quai. Les temps prévus de charge et de décharge sont estimés par le logiciel de planification utilisé au sein du département des opérations de l'autorité portuaire.

La précocité du mouvement de charge (PC_m):

C'est la quantité du temps calculée avant le temps prévu d'un mouvement de charge manipulé par le YC avant son temps prévu :

$$PC_m = TP_m - TM_m$$

TM_m : Le temps de manutention du mouvement

Le délai du mouvement de charge (DC_m):

C'est la quantité du temps calculée après le temps prévu pour un mouvement de charge manipulé par un YC après son temps prévu :

$$DC_m = TM_m - TP_m$$

Le délai du mouvement de décharge DD_m :

C'est la quantité du temps calculée après le temps prévu pour un mouvement de décharge manipulé par un YC après son temps prévu :

$$DD_m = TM_m - TP_m$$

La zone de yard et sa numérotation en baies :

La zone de yard est divisé en 12 zones horizontales (A,B,C,D,E,G,H,J,K,L,M). Chaque zone se compose de 5 blocs dont 2 blocs sont de 21 baies (les rangées de conteneurs de 20 pieds), tandis que les 3 autres blocs sont de 18 baies placées sur la même ligne horizontale du yard.

Pour simplifier la formulation du problème, nous adapterons une numérotation en baies différente de celle utilisée par l'autorité portuaire:

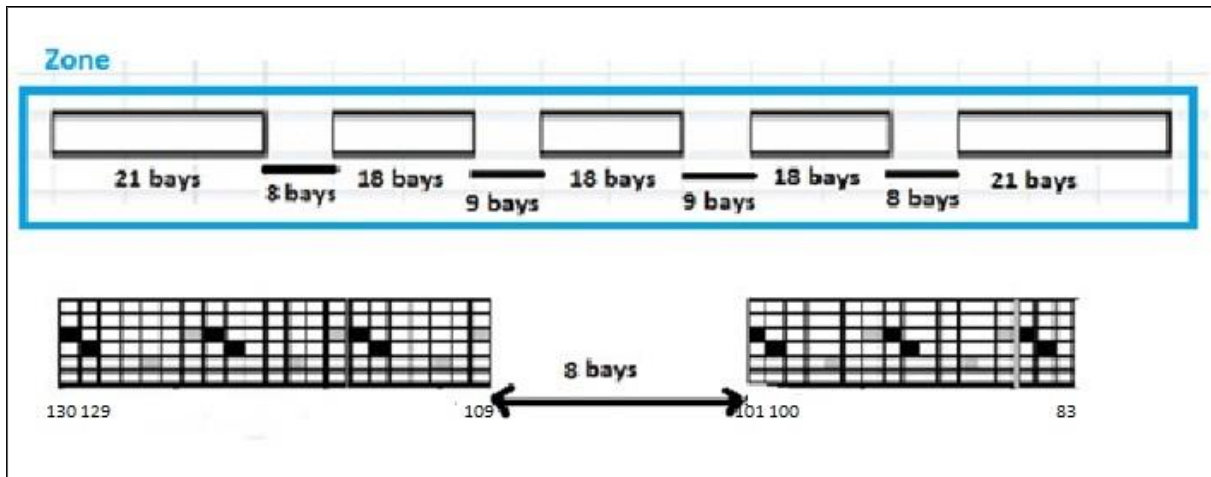


Figure 39 : Numérotation d'une zone du yard en baies

6.3.3 Contraintes organisationnelles & collecte des données :

Objectifs

L'ordonnement des mouvements de charge et de décharge par les QCs est caractérisé par :

- Le temps de début et de fin d'un mouvement sur le quai
- Le temps prévu de chaque mouvement sur le yard
- L'emplacement de chaque mouvement sur le yard (dans ce modèle il suffit de savoir la zone et la baie)

En connaissant le nombre des YCs disponibles sur chaque zone de yard, nous devons déterminer un ordonnancement optimal des mouvements manipulés par les YCs sur chaque zone et ce en minimisant la combinaison de la quantité totale des précocités des mouvements de charge et la quantité totale des délais de mouvement de charge et de décharge. Autrement dit, nous devons déterminer les sorties suivantes pour chaque mouvement :

- L'intervalle de temps durant lequel le mouvement sera manipulé après son stockage dans la cour
- Le YC qui va manutentionner le mouvement dans sa position

Contraintes

Nous avons pris en considération les contraintes suivantes :

- La différence minimale permise en nombres de baies qui séparent deux YCs travaillant durant le même intervalle de temps est estimé à $SEP=8$ baies. Autrement dit, cette contrainte sert à éviter l'interférence entre deux YC
- La grue de cour ne doit pas se déplacer de plus de 10 baies durant les opérations de manutention des conteneurs
- Les mouvements qui se situent dans les 8 premières baies de la zone doivent être manipulés par le YC le plus proche sur la zone, la même contrainte est imposée sur les mouvements qui se situent dans les 8 dernières baies de la zone

- Deux YCs ne doivent pas manutentionner le même mouvement. C'est-à-dire qu'un mouvement est manutentionné par une seule YC
- Le nombre des YCs qui travaillent simultanément ne doivent pas dépasser le nombre des YCs disponibles sur la zone

Collecte des données :

A partir de l'ordonnancement donné par le logiciel utilisé par l'autorité portuaire des mouvements de charge/décharge des QCs, nous devons déterminer pour chaque zone les données suivantes :

- Les temps prévus de charge et de décharge en minutes.
- L'axe du temps et les intervalles du temps.
- Les locations de chaque mouvement sur la zone c'est-à-dire le numéro de baie dans la zone, en respectant la numérotation décrite dans la Figure 39.
- Le nombre des YCs qui vont être déployés.
- Le nombre des baies dans la zone.
- Le nombre des mouvements de charge et de décharge.

6.3.4 Formulation du problème :

La fonction objectif

L'objectif multiple de ce modèle est de minimiser à la fois la quantité totale des précocités des mouvements de charge, la quantité totale des délais des mouvements de charge et la quantité totale des mouvements de décharge :

$$\text{Minimiser } CT = W_{pc} \sum_{m \in C_m} PC_m + W_{dc} \sum_{m \in C_m} DC_m + W_{dd} \sum_{m \in D_m} DD_m \quad (6.1)$$

Avec les notations suivantes:

m, n : Indices pour les mouvements ;

C_m : Ensemble des mouvements de charge sur le yard ;

D_m : Ensemble des mouvements de décharge sur le yard ;

PC_m : Précocité du mouvement de charge m en minutes ;

DC_m : Délai du mouvement de charge m en minutes ;

DD_m : Délai du mouvement de décharge m en minutes ;

W_{pc} : Poids attribué au total des PC_m dans la fonction objectif ;

W_{dc} : Poids attribué au total des DC_m dans la fonction objectif ;

W_{dd} : Poids attribué au total des DD_m dans la fonction objectif.

Nous fixons les poids, dans le contexte actuel par exemple, à $W_{pc} = W_{dd} = 1$ et $W_{dc} = 2$ parce que le délai de mouvement de charge affecte significativement l'ordonnancement de QC et les opérations du quai alors que la précocité de mouvement de charge et le délai de mouvement de décharge affectent seulement les opérations de yard. Les valeurs attribuées aux poids peuvent varier dans le modèle afin de mesurer l'efficacité de la solution générée.

Les contraintes:

Chaque mouvement doit être manipulé durant un seul intervalle du temps :

$$\sum_{t \in T} X_{mt} = 1, \forall m \in M \quad (6.2)$$

Avec :

$$X_{mt} = \begin{cases} 1 & \text{Si le mouvement } m \text{ est manipulé durant l'intervalle du temps } t. \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

T: l'ensemble des intervalles de temps ordonnancés, il est déterminé par la formule suivante:

$$T = \{t: Ord_t * IntLg \leq H + 50\},$$

Avec:

Ord_t : La position relative de l'intervalle du temps dans l'ensemble T.

$IntLg$: La longueur de chaque intervalle du temps.

H : La valeur maximale des temps prévus de tous les mouvements.

Dans un ordonnancement optimal, aucun mouvement ne peut être manutentionné 50 min après H.

M: L'ensemble des mouvements m des conteneurs.

Chaque mouvement doit être affecté à une seule YC :

$$\sum_{r \in R} W_{mr} = 1, \forall m \in M, NR > 1 \quad (6.3)$$

Avec les notations suivantes: $W_{mr} = \begin{cases} 1 & \text{Si le mouvement } m \text{ est affecté au } YC_r \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$

R: L'ensemble des YCs qui travaillent sur le yard (26 YCs pour notre cas d'étude).

r: L'indice des YCs.

NR : nombre total des YCs affectés aux mouvements dans la zone.

Le mouvement de décharge m ne doit pas être manipulé avant son temps prévu TP_m :

$$\sum_{t \in T} IntLg * (Ord_t - 1) * X_{mt} \leq TP_m, \forall m \in D_m \quad (6.4)$$

Autrement : $X_{mt} = 0, \forall m, t \in XS_{mt}$

Avec: $XS_{mt} = \{m \in D_m, t \in T: IntLg * (Ord_t - 1) - TP_m < 0\}$.

L'ensemble des intervalles de temps qui précèdent le temps prévu du mouvement m TP_m .

NR YCs Au plus peuvent travailler simultanément durant le même intervalle du temps t :

$$\sum_m X_{mt} \leq NR, \forall t \in T \quad (6.5)$$

La précocité de chaque mouvement de charge m:

$$PC_m \geq TP_m - \sum_{t \in T} IntLg * (Ord_t - 1) * X_{mt}, \forall m \in C_m \quad (6.6)$$

Le délai de chaque mouvement de charge m:

$$DC_m \geq \sum_{t \in T} IntLg * (Ord_t - 1) * X_{mt} - TP_m, \forall m \in C_m \quad (6.7)$$

Le délai de chaque mouvement de décharge m :

$$DD_m \geq \sum_{t \in T} \text{IntLg} * (\text{Ord}_t - 1) * X_{mt} - TP_m, \forall m \in D_m \quad (6.8)$$

Pour garder l'information sur le travail de chaque YC_r durant chaque intervalle du temps t , nous faisons appel à la variable binaire suivante:

$$YY_{mrt} \geq X_{mt} + W_{mr} - 1 \quad \forall m \in M, \forall r \in R, \forall t \in T, NR > 1 \quad (6.9)$$

$$YY_{mrt} \leq W_{mr} \quad \forall m \in M, \forall r \in R, \forall t \in T, NR > 1$$

$$YY_{mrt} \leq X_{mt} \quad \forall m \in M, \forall r \in R, \forall t \in T, NR > 1$$

Avec: $YY_{mrt} = \begin{cases} 1 & \text{Si } YC_r \text{ manipule le mouvement } m \text{ durant l'intervalle } t \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$

Deux YCs qui travaillent sur la même zone, doivent garder entre elles une distance de sécurité minimale de 8 baies. (Voir la figure ci-après)

$$\sum_{n \in SSB_{mn}} YY_{n,r+1,t} \leq 1 - YY_{m,r,t} \quad \forall m \in M, \forall r \in R, \forall t \in T, NR > 1, r < NR \quad (6.10)$$

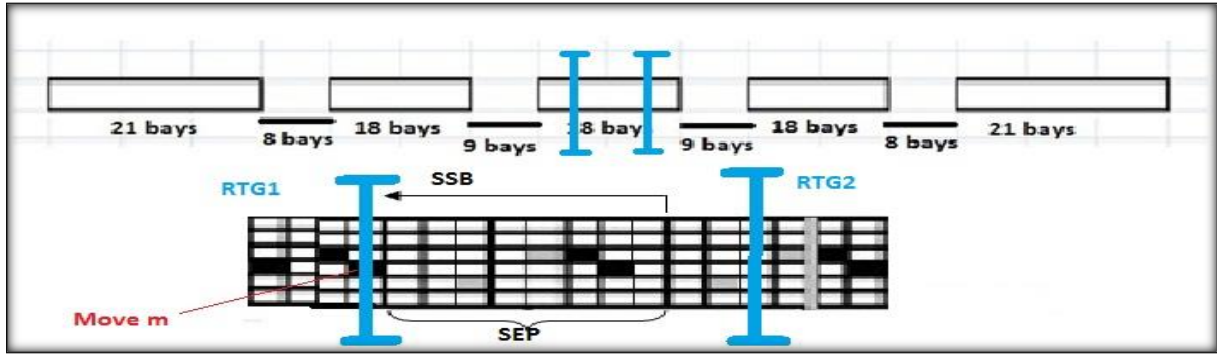


Figure 40: La distance de séparation entre deux YCs

Avec les notations suivantes:

$$SSB_{mn} = (bay_n - bay_m) < SEP; m, n \in M: m \neq n, \text{ avec:}$$

bay_m : Le numéro de baie qui désigne l'emplacement du mouvement m .

En général si $m < n$ alors $bay_m < bay_n$.

SEP : La distance de sécurité minimale qui sépare deux YCs qui travaillent simultanément sur la même zone (8 baies).

SSB_{mn} : L'ensemble des mouvements qui se situent à gauche et à droite du mouvement m et qui s'éloignent de ce mouvement de moins de 8 baies.

Durant un intervalle du temps t , un YC peut manipuler au plus un mouvement m :

$$\sum_{m \in M} YY_{mrt} \leq 1, \forall r \in R, \forall t \in T, NR > 1 \quad (6.11)$$

Durant l'intervalle du temps $t+1$, un YC ayant manipulé un mouvement m à l'intervalle t ne peut pas manipuler un mouvement n qui est plus loin que 10 baies de ce mouvement :

$$YY_{n,r,t+1} \leq 1 - YY_{mrt}, \forall r \in R, \forall t \in T, t < NT, \forall m, n \in SSGT_{mn}, NR > 1 \quad (6.12)$$

Avec les notations suivantes:

NT: le nombre total des intervalles du temps dans l'ensemble T.

$SSGT_{mn} = |(bay_n - bay_m)| > MGB ; m, n \in M: m \neq n$ l'ensemble des mouvements qui s'éloignent de plus de MGB baies du mouvement m .

MGB : Le YC ne doit pas se déplacer de plus de $MGB = 10$ baies entre les opérations de manutention des conteneurs.

S'il y a une seule YC qui travaille sur la zone, la dernière contrainte est remplacée par celle-ci :

$$X_{n,t+1} < 1 - X_{mt}, \forall t < NT, \forall m, n \in SSGT_{mn}, NR=1 \quad (6.13)$$

Les mouvements qui se situent dans les 8 premières baies de la zone doivent être manipulés par la première YC disponible sur la zone, de même pour les mouvements qui se situent dans les 8 dernières baies de la zone. (Voir la figure ci-après)

$W_{mr} = 1, \forall m \in FSB_m, r = 1$ pour les premières SEP baies.

$W_{mr} = 1, \forall m \in LSB_m, r = NR$ pour les dernières SEP baies.

Avec:

$$FSB_m = \{m \in M: bay_m \leq SEP\}$$

$$LSB_m = \{m \in M: bay_m > (NB - SEP)\}$$

NB: Le nombre total des baies dans la zone. (130 baies).

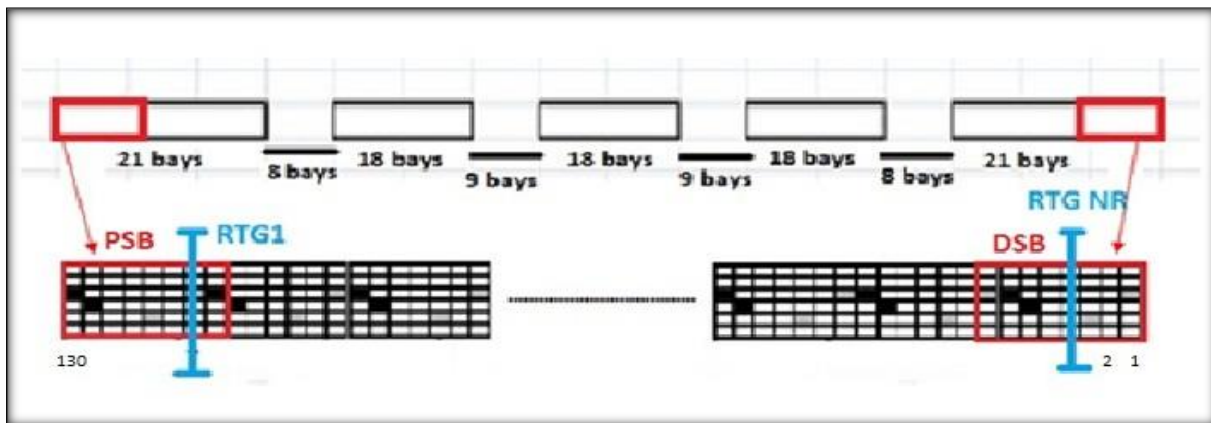


Figure 41: Première et dernière distance de Séparation

Nous prenons ci-dessous un exemple de 32 mouvements (20 mouvements de décharge et 12 mouvements de charge) manipulés par trois YCs sur la même zone de stockage, les types de mouvement sont spécifiés dans la dernière colonne « D » pour décharge et « C » pour charge :

Mouvement	TP	Baie	Type
1	270,56	2	D
2	261,32	3	D
3	226,34	6	D
4	198,96	8	D
5	168,45	9	D
6	214,00	11	D
7	272,08	13	D
8	217,11	15	D
9	200,29	16	D
10	250,96	20	D
11	171,54	22	D
12	204,81	23	D
13	172,90	24	D
14	260,13	26	D
15	204,78	27	D
16	262,88	31	D
17	192,81	32	D
18	261,39	33	D
19	212,64	36	D
20	261,32	37	D
21	290,85	37	C
22	220,24	42	C
23	246,35	43	C
24	174,54	44	C
25	230,68	47	C
26	207,90	47	C
27	217,20	51	C
28	290,62	52	C
29	221,77	54	C
30	180,47	58	C
31	204,88	59	C
32	224,63	60	C

Tableau 14 : les mouvements manipulés, leurs temps prévus, leurs locations et leurs types

Le tableau ci-dessus montre les temps de traitement pour chaque mouvement depuis le début de l'opération jusqu'à l'empilement dans la zone de stockage. Dans les résultats générés nous faisons la distinction entre les mouvements de charge et de décharge.

Nous présentons ainsi les paramètres de notre modèle issu de la résolution du modèle mathématique par CPLEX :

M	32	IntLg	2,5
MC	12	MGB	10
MD	20	SEP	8
NB	130	NR	3
NT	68		

Figure 42 : Les paramètres du modèle

La table et la figure en dessus représentent l'ensemble des données nécessaires pour résoudre l'exemple traité, la résolution avec CPLEX nous avons permis de générer les valeurs optimales pour les variables en question.

Après l'exécution de ce modèle, nous avons obtenu les résultats suivants :

MC	PC	MC	DC	MD	DD
21	110,56	21	0	1	0
22	98,817	22	0	2	0
23	61,336	23	0	3	0
24	31,457	24	0	4	0
25	10,951	25	0	5	0
26	46,504	26	0	6	0
27	109,578	27	0	7	0
28	52,108	28	0	8	0
29	40,291	29	0	9	0
30	83,459	30	0	10	0
31	9,035	31	0	11	0
32	39,811	32	0	12	0
				13	0
				14	0
				15	0
				20	0

Tableau 15 : les précocités de charge, les délais de charge et les délais de décharge

6.4 Approche de résolution

Après avoir validé le module mathématique de l'optimisation des mouvements et des grues utilisées pour les opérations de charge/décharge. Il est temps maintenant d'introduire le modèle global « YOP » qui fait appel aux trois sous-problèmes :

- Le problème d'allocation de l'espace de stockage (SSAP)
- Le problème de transfert des conteneurs par les camions interne (ITCTP)
- Le problème d'affectation des grues (YCAP)

La résolution du YOP se base sur la résolution de chacun de ses problèmes. Chaque problème a un coût équivalent de la fonction objectif qui peut être utilisé pour formuler le coût global du YOP.

Dans ce qui suit nous présentons le modèle complet, qui prend en compte un ensemble de paramètres en entrée, et il génère des valeurs qui sont : le coût optimal de toutes les opérations portuaires (relatif à chaque problème cité ci-dessus), l'affectation optimale des conteneurs ainsi que la minimisation des temps d'exécution et des itinéraires des ITs.

Pour chaque horizon de planification, on se retrouve face à deux types de données, les conteneurs qui sont stockés dans la zone de stockage et les conteneurs qui arrivent simultanément. Dans les approches de résolution proposées, nous supposons que le plan de stockage des conteneurs entrants est déterminé et ceci en tenant compte de l'état de stockage à la fin de la période précédente. Ceci signifie que le traitement des conteneurs entrants et la détermination de leur positions de stockage se fait d'une manière séquentielle selon leur ordre d'arrivée au port.

Donc les méthodes de résolution proposées prennent en compte la configuration ci-dessous, où les données d'entrée sont les conteneurs stockés dans l'horizon de planification t ainsi leurs caractéristiques sont connues en avance. Le deuxième paramètre concerne les conteneurs qui arrivent dans l'horizon $t+1$ ainsi que leurs caractéristiques.

Chaque algorithme de résolution génère un fichier de sortie qui contient les meilleures affectations possibles ainsi qu'une optimisation des itinéraires des TTs et une optimisation des mouvements et des grues utilisées, il introduit désormais une première valeur de la fonction objectif du YOP dès la première résolution. Le modèle proposé présente la possibilité d'avoir des pertes qui sont représentées par le nombre de mouvements parasites, les équipements non utilisés (ITs) aussi bien que les retards prévus soient en terme de livraison des conteneurs cas de l'import ou de départ des navires cas de l'export ou du transbordement.

Les instances utilisées sont fournies par les autorités portuaires (Figure 24), elles sont caractérisées par leurs diversités. Elles contiennent ainsi les différents cas de figure que nous pouvons trouver dans un port à savoir les types de flux étudiées (import/export, transbordement), les types de conteneurs pris en compte dans cette thèse, les temps de séjours qui se diffère d'un navire à un autre aussi bien que le type de mouvement de chaque conteneur.

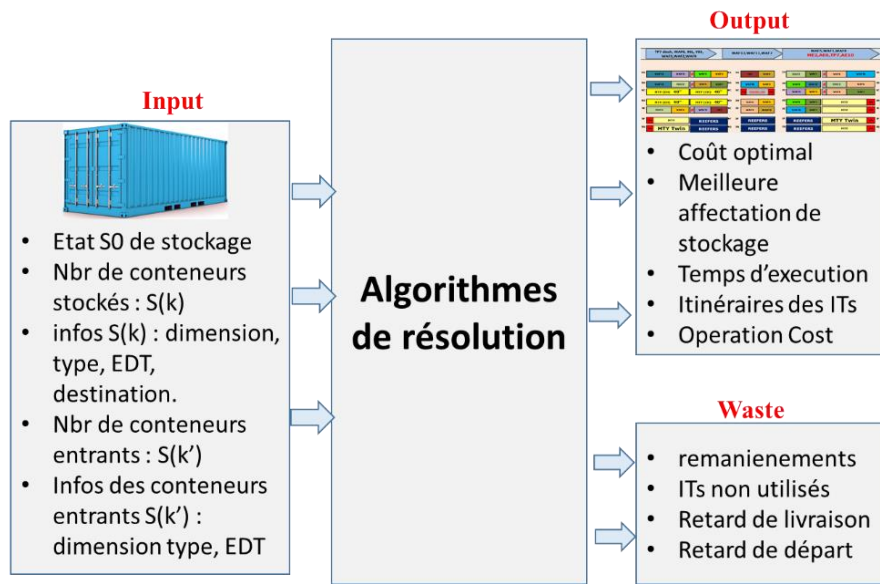


Figure 43 : Méthodologie de résolution.

Dans le reste de ce sous paragraphe, nous allons présenter les méthodes de résolution adoptées pour la résolution du YOP. Les méthodes de résolution proposées dans cette partie pour le YOP sont : le Recuit Simulé, l'AG ainsi que notre nouvelle méthode appelée : NAMYOP (New Adapted Method for Yard Optimization Problem).

6.4.1 Recuit Simulé

Solution initiale

Une solution est représentée par le triplet (V_i, IT_c, YC_r) ainsi que les conteneurs en question, V_i représente le navire de transport interne avec l'indice i , IT_c correspond au véhicule de transport interne affecté au conteneur c et YC_r correspond au grue de cour affecté à la ligne r . Dans la première ligne nous spécifions le triplet en mission et dans la deuxième ligne les conteneurs sélectionnés. La procédure proposée consiste à générer une solution réalisable pour laquelle les conteneurs sélectionnés sont affectés aléatoirement au triplet en question en respectant les différentes contraintes y compris les positions de stockage libres dans chaque baie. La figure 44 représente l'exemple d'une solution réalisable pour :

- Triplet 1 assure le transfert des conteneurs : 1, 3 et 6 ;
- Triplet 2 assure le transfert des conteneurs : 2, 4 et 5.

1	3	6	2	4	5
Triplet1 (V_1, IT_1, YC_1)			Triplet2 (V_1, IT_2, YC_2)		

Figure 44 : Solution initiale pour le RS

Procédure de voisinage

L'objectif de cette procédure est de rechercher une solution voisine s' de la solution initiale s . Nous proposons trois variantes de recuit simulé :

– Pvoisinage1 (PRS1) : elle se base sur le choix et la réaffectation d'un conteneur depuis un triplet vers un autre tout en respectant les différentes contraintes du problème. Le tableau ci-dessous montre la méthode de fonctionnement du PRS1 :

Dans l'exemple ci-dessous de la figure 45, le triplet1 assure le transfert des conteneurs : 1, 3 et 6 et le triplet2 assure le transfert de conteneurs : 2, 4 et 5. Pour l'application du PRS1, nous sélectionnons le conteneur 2 afin d'être réaffecter au triplet1. La contrainte du temps de séjour des conteneurs est indiquée par les numéros séquentiels des conteneurs afin de respecter l'ordre d'empilement et du dépilement. Pour se faire le conteneur 2 du triplet2 doit être placé avant le conteneur 3 dans le triplet1. Nous obtenons ainsi la nouvelle configuration ci-dessous (avec une affectation de quatre conteneurs pour le triplet1).

1	3	6	2	4	5
Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		

1	2	3	6	4	5
Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)				Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)	

Figure 45 : Exemple d'application de PRS1

– Pvoisinage2 (PRS2) : cette méthode repose sur le fait de choisir aléatoirement deux conteneurs affectés à deux triplets différents. Après, nous procédons à la permutation des deux conteneurs sélectionnés entre les deux triplets (Figure 46). Nous utilisons la solution initiale utilisée pour le Pvoisinage1, dans ce cas nous avons choisi les conteneurs 3 et 5. La réaffectation du conteneur 3 se fait du triplet1 vers le triplet2 en le positionnant devant le conteneur 4 pour respecter la contrainte de séjour des conteneurs affectés au même triplet. La nouvelle affectation à chaque triplet est définie ainsi :

1	3	6	2	4	5
Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		

1	5	6	2	3	4
Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		

Figure 46 : Exemple de fonctionnement de PRS2

– Pvoisinage3 (PRS3) : cette méthode repose sur le fait de créer une nouvelle solution à la base d'un choix aléatoire d'une des deux méthodes PRS1 et PRS2 ;

Résultats

Le comparatif entre les résultats de Recuit simulé a montré que les meilleurs résultats ont été générés en utilisant le Pvoisinage2 (PRS2), les résultats numériques sont présentés dans le paragraphe suivant dans lequel nous donnons une comparaison aussi avec la borne inférieure générée par Cplex pour les premières instances. Pour les instances de grandes tailles nous avons calculé le GAP par rapport à notre méthode.

D'après le tableau des résultats (Tableau 21), nous constatons que la moyenne du pourcentage de déviation du RS par rapport à la borne inférieure de Cplex est de : 1.42%. Nous faisons appel ensuite au deuxième méthode (l'AG) pour l'amélioration des résultats obtenus.

6.4.2 Algorithme génétique

L'objectif visé est l'implémentation de l'AG pour la résolution du YOP afin de surmonter les difficultés soulevées après la résolution avec le RS. Ce choix est justifié par le fait que l'AG a été utilisé dans plusieurs travaux d'ordonnancement, il a généré ainsi des résultats considérables d'après les auteurs.

Comme déjà présenté dans le chapitre quatre, l'AG se base sur trois opérateur principaux : sélection, croisement et mutation. Le choix des parents se fait par l'opérateur de croisement, dans notre cas nous utilisons les mêmes solutions initiales qui ont été utilisées par le RS comme point de départ de l'AG (parents). Le deuxième opérateur est le croisement qui a comme objectif de générer un ou plusieurs enfants en combinant deux parents. Le dernier opérateur est celui de mutation, qui se base sur la modification aléatoire d'un enfant ou individu pour engendrer des solutions diversifiées. Finalement, le principe de remplacement a pour objectif d'améliorer les solutions trouvées en remplaçant les parents par leurs enfants.

Génération de la population

Etant donné que la population initiale est composé de N individus. Nous faisons un listing des individus pour lesquels on distingue entre les individus qui ont une meilleure qualité *highest*, et le reste moins bons *bad*. Nous divisons ainsi notre population en deux sous-ensembles :

- Highest : entre les individus qui ont une meilleure qualité de solution *highest*;
- Bad : contient le reste de la population.

Selon les statistiques issues de l'application du RS sur le YOP, le pourcentage des individus qui appartient au premier ensemble varie entre 10% et 40% de la population initiale, du coup nous définissons P_h comme un paramètre qui désigne ce pourcentage.

Mutation

Pour cette partie, nous utilisons les mêmes principes que dans Pvoisinage1 et Pvoisinage2 dans le RS. La probabilité d'application de l'opérateur de mutation P_m ($P_m \in [0.2, 0.6]$).

Croisement

Le principe de base de l'opérateur de croisement est d'utiliser les parents et leurs caractéristiques pour générer les descendants. Dans notre cas, suite aux statistiques la probabilité d'application de l'opérateur de croisement est P_c ($P_c \in [0.25, 0.75]$).

Dans ce qui suit, nous distinguons entre deux type de croisements :

- Croisement1 : croisement entre les triplet en gardant le même navire (contrainte organisationnelle) ;
- Croisement2 : croisement des conteneurs entre les triplets.

Croisement1

Pour ce premier type de croisement, nous supposons que :

- étant donné que le nombre de triplet est fixé à n, le nombre de positions de croisement est égal à n – 1 ;
- le choix de la position du croisement se fait d’une manière aléatoire ;
- le croisement doit se faire dans la même position pour les deux parents sélectionnés.

L’exemple de croisement1 est montré dans la figure 47, comme montré dans la figure 48, la position de croisement divise chaque parent en deux parties. Le croisement de Prt1 et Prt2 génère deux enfants résultants de la concaténation de chaque partie du Prt1 avec la partie correspondante dans Prt2 comme montré dans les figures ci-dessous :

Prt1	1	2	4	6	3	5	Enf1	1	2	4	6	2	4	6
	Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)				Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)			Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)				Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		
Prt2	1	3	5	2	4	6	Enf2	1	3	5	3	5		
	Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)				Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)			

Figure 47 : Exemple de Croisement1

Figure 48 : Exemple de deux enfants après Croisement1

Des procédures de correction s’avèrent nécessaires après cette phase de croisement en vue des problèmes soulevés que nous essayons de résoudre par la suite à travers des nouvelles méthodes:

- Nous avons constaté que des conteneurs se répètent dans chaque enfant. Pour l’Enf1 par exemple, les conteneurs 2, 4 et 6 se répètent ;
- Nous avons constaté aussi l’absence de quelques conteneurs au niveau de chaque enfant. Pour l’Enf2, nous avons les conteneurs 2, 4 et 6 qui sont absents.

La première méthode de correction se base sur le principe des poids pour chaque conteneur du triplet. Ainsi nous affectons des poids en ordre croissant pour chaque conteneur du triplet. Ensuite nous comparons entre les poids des conteneurs appartenant au même enfant. Selon la méthode choisie *Poids Min* ou *Poids Max* nous procédons à l’élimination du conteneur qui a le plus grand poids (cas du *Poids Min*) ou celui qui le plus petit poids cas du *Poids Max*. en cas d’égalité entre les poids, nous faisons une sélection aléatoire d’un conteneur de la liste.

Poids	1	2	3	4	1	2	3	Enf1	1	2	4	6	2	4	6
	Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)				Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)				Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)				Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		

Figure 49 : Enfant avant correction

Figure 50 : Enfant après correction par *Poids Min*

L’étape suivante de la méthode et l’amélioration du résultat de l’Enf1 présenté dans les figures ci-dessus. Nous ajoutons les conteneurs manquants dans chaque triplet, après nous affectons un poids par ordre croissant à chaque conteneur. Pour la procédure *Poids Min* nous gardons le conteneur avec le poids min et pour le *Poids Max* nous gardons celui qui a le plus grand poids. Prenons l’exemple de l’Enf1, les conteneurs 3 et 5 sont

absents, nous commençons par le premier conteneur 3 que nous essayons d’injecter dans un des deux triplets et ensuite nous traitons le conteneur 5 de la même façon.

Poids	1	2	1	2	3	4						
Enf1	1	3	2	3	4	6	Enf1	1	3	2	4	6
	Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)				Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)	

Enf1	1	3	5	2	4	6
	Triplet1 (V ₁ , IT ₁ , YC ₁)			Triplet2 (V ₁ , IT ₂ , YC ₂)		

Figure 51 : Ajout des conteneur absent 3,5 avec la méthode *Poids Min*

Pour les deux méthodes *Poids Min* et *Poids Max* nous obtenons quatre enfant soit deux enfants par méthodes, mais nous ne gardons que ceux qui vérifient les contraintes du YOP. Le meilleur enfant qui génère la meilleure valeur de la fonction objectif sera inséré dans la population suivante. Pour simplifier la présentation des résultats dans le tableau 21, le *croisement1* avec *Poids Min* s’appelle *TAG1*, et le *croisement1* avec *Poids Max* s’appelle *TAG2*,

Croisement2 :

Pour ce type de croisement, nous choisissons aléatoirement un triplet aussi bien qu’une position de croisement, étant donné que pour chaque individu nous avons n-1 positions de croisement avec n le nombre de conteneurs par triplet.

Nous constatons qu’on se retrouve face aux mêmes difficultés soulevées avec *Croisement2*, nous serons amenés donc à appliquer les mêmes méthodes de correction afin de ne garder que les enfants qui vérifient les contraintes du problème. Nous insérons par la suite dans la population les enfants qui génère une meilleure valeur de la fonction objectif. Pour simplifier la présentation des résultats dans le tableau 21, le *croisement2* avec *Poids Min* s’appelle *CAG1*, et le *croisement2* avec *Poids Max* s’appelle *CAG2*,

6.4.3 Notre méthode de résolution pour le YOP : NAMYOP

Dans cette partie nous présentons notre contribution pour la résolution du YOP, pour cela nous avons développé une méthode qui se base sur trois étapes appelée : *New Adapted Method for the Yard Optimization Problem* (NAMYOP). Cette méthode a pour objectif de résoudre les difficultés remontées lors de la résolution du YOP avec le RS et l’AG, elle se base sur trois étapes principales : la formulation des patterns, affectation des bins de conteneurs aux baies de stockage et le choix des patterns pour les conteneurs. Dans chacune de ces étapes, nous définissons l’affectation des conteneurs aux bins, l’acheminement des conteneurs vers les grues aussi bien que l’optimisation des mouvements et du nombre de grues utilisées.

Formulation des patterns

Cette partie fait l'objet de notre article Razouk et al. [Razouk 19] dédié à l'étude du Problème de Bin Packing Adapté aux problèmes d'optimisation de cour : ABPAYOP. Comme mentionné précédemment, le nombre de conteneurs à décharger/charger d'un navire arrivé est déjà connu au début de l'horizon de planification. Ainsi, nous construisons nos patterns (combinaison des conteneurs sélectionnés avec les positions de stockage disponibles dans un horizon de planification) 3D basés sur: la baie de stockage identifiée par le numéro de la ligne, les conteneurs sélectionnés dans la période de planification ainsi que le navire en question. Chaque bac est défini comme suit:

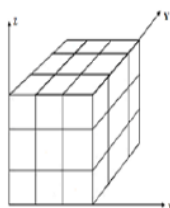


Figure 52 : Structure de pattern

Alors que x définit le nombre de baies de stockage adjacents pouvant être affectés au même sous-groupe ou à différents sous-blocs avec des piles adjacentes. L'index y définit le nombre de lignes disponibles pour les baies de stockage. L'index z fait référence à la capacité maximale de chaque baie de stockage.

Les positions vides par baie sont triées par ordre décroissant, ce qui signifie que les baies adjacentes vides sont classées en premier, suivies des piles vides, puis des baies de stockage qui contiennent déjà des conteneurs de la période précédente.

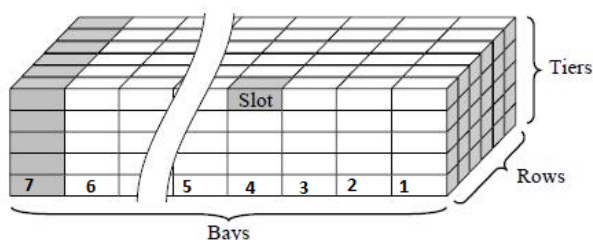


Figure 53 : Représentation des baies de la cour de stockage

Dans la figure ci-dessus, on suppose que les baies de cour sont organisées et triées comme suit:

- Bin1: 1, 2 et 3 qui partages les mêmes caractéristiques sont des baies de stockage vides appartenant au même pattern.
- Bin2: 4, 5 sont des baies de stockage vides qui appartiennent à un autre pattern selon leurs caractéristiques de stockage.
- Bin3: contient la seule baie vide n° 6.
- Bin4: est partiellement rempli, il contient une baie avec des conteneurs déjà stockés avant l'horizon de planification; la première et deuxième rangée sont déjà remplies. Ce qui signifie que les emplacements disponibles = 18 soit $(6 * 5 - 6 * 2)$. Dans ce cas, les piles disponibles sont utilisées au lieu des baies.

Reprenons l'exemple de la figure 25 du chapitre quatre, les caractéristiques des conteneurs sont présentées dans cette figure. Les conteneurs sont triés par la suite en se basant sur leurs type, temps de séjour ainsi que leurs destinations. Nous avons effectué le tri de toutes les positions disponibles avant l'affectation des conteneurs à la zone de stockage.

Algorithme 10 : BPYOP1

Répéter Tant que ($Fin = faux$, et $Compteur \leq N$, $b \leq B$) faire

- 1) **Sélectionner** les k selon les EDT, destination et type
- 2) **Trier** les b selon leurs positions libres de stockage dans l
- 3) **Classer** les baies dans une liste de tri selon l'ordre décroissant des positions libres.

Si la baie b et une des baies adjacentes sont vides, $Adj_b = Vrai$

Fin Répéter

Pour chaque k de N , et b de l

- 4) Vérifier si b la baie affectée au conteneur k est compatible
- 5) Si $Adj_b = Vrai$, placer le conteneur dans les baies de triage sélectionnées par ordre décroissant.
- 6) Si non vide, vérifier chaque baie et affecter les conteneurs arrivés aux positions vides.
- 7) Arrêt = faux
- 8) $i = 1$
- 9) **Tant que** ($Arrêt = faux$, et $i \leq card(l)$) faire
- 10) $b' = l(i)$
- 11) **Si** ($C_{b'}^k < C_b^k + M$) alors
- 12) Arrêt = vrai
- 13) **Si non**
- 14) $i = i + 1$
- 15) **Fin tant que**

Les conteneurs sont ensuite affectés aux baies de stockage vides, la priorité est donnée aux baies adjacentes et aux conteneurs du même pattern. Le tri des conteneurs est effectué en fonction de la destination, de l'EDT:

Algorithme 11 : BPYOP2

1. Si la catégorie est identique, vérifiez si la destination du conteneur le plus haut de la pile est la même destination que le conteneur entrant.
2. Si oui, vérifiez la contrainte de poids.
3. Si (7) est satisfaite
4. Si l'ETD est inférieur à l'ETD du conteneur le plus haut de la pile, empilez le conteneur.
5. Si non retournez à Alg02.Step3
6. En cas de violation, retournez à Alg02.Step3 pour vérifier une autre pile de la baie sélectionnée.
7. Si non, retournez à Alg02.Step3
8. Si la catégorie n'est pas la même, retourner à Alg02.Step3

Faisant référence à la figure 25 présentée dans le chapitre 4. Nous avons inclus aussi la contrainte du poids des conteneurs pour répondre au cahier des charges de l'autorité portuaire. Le poids vide des conteneurs est de :

- 2,2 tonnes pour les 20 'EVP.
- 3,7 tonnes pour le 40 'EVP.

La structure de la zone de stockage est définie dans la figure ci-dessous. L'espace de stockage est divisé en 5 colonnes de 1 à 5 et de 12 lignes de A (Alpha) à M (Mike) donnant lieu à 59 blocks d'une forme rectangulaire,

il s'agit du bloc dans lequel le conteneur est stocké, il est déterminé par deux paramètres qui sont : la colonne et la ligne du bloc. Les cases bleues sont réservées pour le stockage des conteneurs frigorifiques. Le nombre de conteneurs vides par bloc de parc est défini dans le deuxième tableau. Il contient les baies adjacentes vides et les baies incomplètes (avec des piles totalement vides ou des piles vides incomplètes qui contiennent déjà des conteneurs de la période précédente). La chose la plus importante à mentionner ici est que, pour chaque navire accosté, nous disposons de 3 grues de quai à chaque navire et nous essayons de minimiser le nombre de mouvements nécessaires pour maintenir les conteneurs en question. Pour le premier navire par exemple dans notre exemple, nous avons besoin de 1900 mouvements pour terminer l'opération de chargement / déchargement du navire (Voir Figure 28, chapitre 4).

Comme nous l'avons déjà mentionné ci-dessous concernant les blocs disponibles, nous calculons l'utilisation (défini comme le ratio entre le nombre de positions libres et l'ensemble des positions de stockage dans un bloc donné) en tant que KPI (critère de performance) pour définir les positions disponibles au début de chaque horizon de planification:

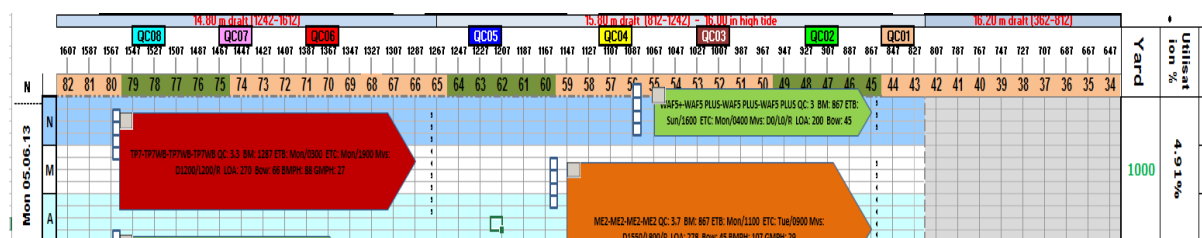


Figure 54 : Affection des QCs aux navires

Dans cette figure, nous avons par exemple le premier navire qui arrive dans la première période de la semaine « Shift de Nuit ». Le nombre de positions disponibles: 1000 * 1,4 positions. Le nombre total de positions par baie de verges est de 28505. L'utilisation dans notre cas est donc de 4,91%.

Lors de la première étape, les zones de blocs ME2, TP7 et WAF5 faisant référence à nos baies sont vides afin que les conteneurs sélectionnés puissent y être stockés.

Les sous-blocs adjacents sont définis comme suit:

Cat1: Destination 1&2	4	TP7
Cat2: Destination 3&4	7	WAF5
Cat3: Other destinations	1*3	ME2

Cela signifie que l'affectation des conteneurs arrivés aux sous-blocs adjacents est réalisée dans la première étape de notre algorithme.

Affectation des bins de conteneurs aux baies de stockage

Le graphe associé à la figure ci-dessous est un graphe qui représente les Bins de conteneurs d'une part et les baies de stockage de l'autre part. Chaque arc de ce sous-graphe modélise le fait qu'une Bin de conteneurs peut être affectée à une baie de stockage avec un coût x_l^{hb} assurant le fait que le conteneur k sélectionné dans la route « l » est affecté à la baie b dans la période h. La deuxième sous-partie de ce graphe traduit le fait que l'affectation recherchée respecte la capacité de chaque baie au début de chaque période de planification. L'objectif est de maximiser la partie reliée au coût marginal pour un jour k donnée tout en affectant chaque

client à un dépôt et en respectant la capacité journalière (associée au nombre de véhicule disponible) de chaque dépôt.

Le coût réel associé à chaque affectation est : c_i^{hb} . Donc en se basant sur ce coût et en faisant référence à notre problème, on pourra dire aussi qu'en plus de l'objectif de minimisation des coûts d'affectation on pourra parler aussi d'un objectif de maximisation des routes sélectionnées dans les patterns. Ce qui génère une sommation des r_{hb}^l . Ceci fera l'objet de notre première stratégie de branchement. Donc pour une période h fixé on veut maximiser : $Max \sum_{l \in V} \sum_{b \in B} r_{hb}^l X_{hb}$ avec :

$$X_{hb} = \begin{cases} 1 & \text{si le bin est affecté à la baie } b \text{ dans la période } h. \\ 0 & \text{si non.} \end{cases}$$

Ceci va nous générer des nouvelles affectations Bins-Baies qui pourront améliorer les solutions trouvées. La faiblesse de cette stratégie réside dans le fait que le changement l'affectation de tous les conteneurs aux dépôts est un changement global qui peut s'avérer inutile. Il faudrait déterminer un sous-ensemble de conteneurs à qui changer les affectations que ça soit les affectations aux routes ou aux patterns. La figure ci-dessous, explique le fait d'associer un coût d'affectation d'un bin donné à une baie sélectionnée dans une période de planification donnée :

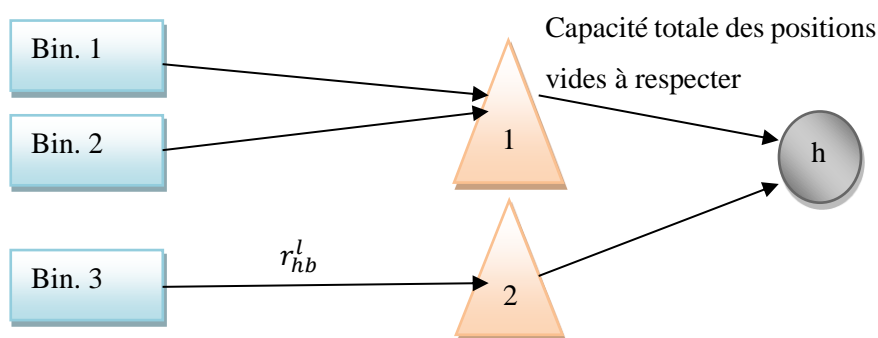


Figure 55 : Stratégie d'affectation des Bins aux baies de stockage

Choix de patterns pour les conteneurs :

Le graphe associé à la figure ci-dessous peut être décomposé en trois parties telles que la première assure que chaque conteneur soit affecté à un seul pattern, la deuxième partie se charge de relier chaque pattern aux périodes de planification possibles. La dernière partie traduit le fait que le choix de pattern doit respecter la capacité globale de chaque baie dans chaque période de planification (capacité globale périodique = la somme des capacités périodiques des positions vides des baies). Le coût sur chaque arc de la première partie est $(\sum_{h \in S} u_{kh})$ la somme des coûts de la constitution des patterns pendant toutes les périodes associées. Le Pattern définit le couplage entre les Bins et les baies de stockage. Dans le graphe ci-dessous nous définissons l'affectation des nouveaux conteneurs aux patterns de visite, pour le premier pattern nous essayons l'affectation des deux conteneurs et qui vérifient les contraintes de pattern (contraintes des conteneurs déjà sélectionnés en plus des contraintes des baies de stockage), ensuite nous affectons ce pattern à une période de planification donné tout en respectant le nombre total des positions libres par baie de stockage ainsi que le temps limite de chaque opération.

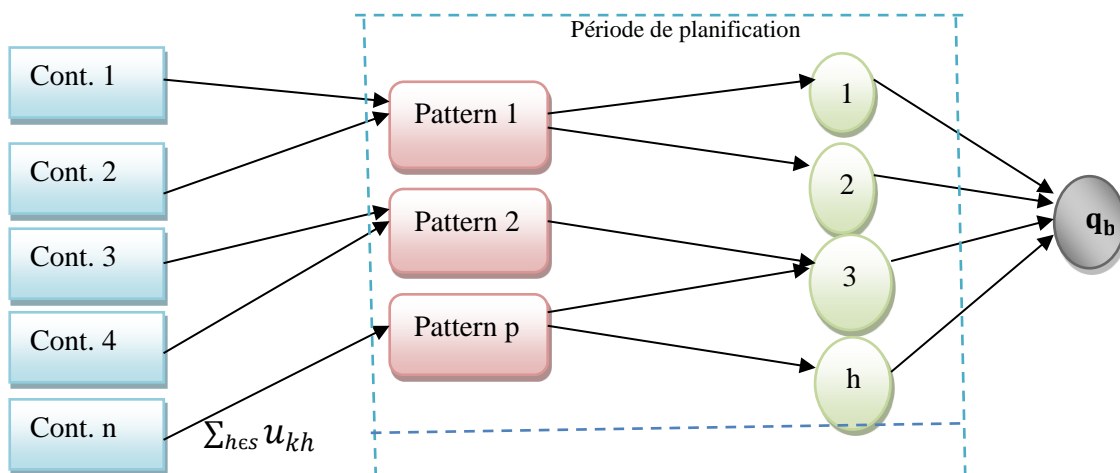


Figure 56 : Deuxième Stratégie d'affectation des conteneurs au pattern de visite

L'application des exemples sur cette partie, montre bien l'efficacité des méthodes proposées. L'ensemble des conteneurs traités dans le cas d'étude ont été affectés aux positions de stockage tout en respectant la contrainte du temps et des positions libres pour chaque baie. Dans ce qui suit nous distinguons entre les résultats de l'application des trois étapes de la méthode soit en commençant par la construction des Bins (*BinFirst*) ou les patterns (*PatternFirst*) ou bien la méthode de construction aléatoire des Bins et des patterns (*RandomBuild*).

6.5 Récapitulatifs de résultats

Avant de clore ce dernier chapitre, nous proposons de donner un aperçu sur l'efficacité des méthodes et des techniques qui y ont été mentionnées, ainsi qu'une comparaison de ces efficacités. Précisons tout d'abord que les méthodes exactes ne sont pas efficaces sur des problèmes de grande taille (plus de 100 conteneurs). La méthodologie de comparaison est basée sur l'évaluation, pour chaque méthode, des critères de performance suivants :

1. le temps CPU d'exécution,
2. les moyennes des nombres des TTs utilisés ainsi que celles des distances totales parcourues,
3. Autres indicateurs globaux sont le coût moyen proportionnel à la distance totale parcourue.
4. Le nombre optimal des mouvements effectués par les grues pour la manutention des conteneurs traités.

Pour l'exécution des modèles, nous avons utilisé des instances réelles aussi bien que des instances de la littérature pour la comparaison avec les résultats trouvés dans la littérature. Le tableau ci-dessous, présente les dix instances qui ont été retenues et jugées difficile afin de pouvoir tester et valider nos approches et méthodes de résolution.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats obtenus pour le problème YOP. A noter que dans ce problème on calcule le coût total d'affectation d'un conteneur à une position de stockage, tout en prenant en considération les contraintes étudiées dans les trois problèmes définis précédemment. Les premiers tableaux présentés par la suite correspondent aux tests réalisés sur les dix instances, la valeur indiquée dans chaque test correspond au meilleur coût trouvé pour chacune des méthodes essayées.

Les premiers résultats issus de l'application du Recuit Simulé pour la résolution du YOP sont présentés dans le tableau 17. Comme présenté précédemment les trois variantes du recuit simulé : PRS1, PRS2 et PRS3 selon la procédure de voisinage sélectionnée :

Résultat du RS			
	PRS1	PRS2	PRS3
Inst-1	2019,07	2019,07	2019,07
Inst-2	3547,45	3547,45	3547,45
Inst-3	4483,53	4501,33	4484,35
Inst-4	5286,87	5174,69	5174,99
Inst-5	5930,1	5688,39	5747,95
Inst-6	6724,85	6642,02	6724,02
Inst-7	4502,02	4502,02	4502,02
Inst-8	6024,24	6024	6024,45
Inst-9	8430,09	8356,62	8458,36
Inst-10	10646,8	10402,3	10380,5

Tableau 17 : Résultat de notre approche de résolution

Les résultats obtenus montrent que le RS a pu trouver des résultats pour les dix instances jugées difficiles. Le PRS2 a généré des résultats meilleurs en comparaison avec le PRS1 et le PRS3. Nous avons ensuite utilisé l'AG pour l'amélioration des résultats trouvés par le PRS2. Dans le tableau suivant nous présentons les résultats d'exécution de l'AG sur les mêmes instances.

Résultats de l'AG				
	TAG1	TAG2	CAG1	CAG2
Inst-1	2019,07	2019,07	2019,07	2019,07
Inst-2	3547,45	3547,45	3547,45	3547,45
Inst-3	4516,73	4480,94	4503,95	4481,24
Inst-4	5162,11	5154,51	5169,41	5169,42
Inst-5	5663,33	5666,44	5677,23	5763,6
Inst-6	6650,37	6631,26	6639,97	6642,95
Inst-7	4502,02	4502,02	4502,02	4502,02
Inst-8	6023,98	602,98	6023,98	6023,98
Inst-9	8380,91	8330,28	8369,27	8343,93
Inst-10	10273	10251,7	10638,5	10505,7

Tableau 18 : Résultat d'exécution de l'AG

Le tableau ci-dessus présente l'application de l'algorithme génétique sur le YOP, la résolution a été effectuée à travers les quatre variantes de l'AG présentées précédemment. Les résultats obtenus montrent que le TAG2 (défini par le couplage de la méthode *le croisement1 du triplet* et la méthode *Poids Max* a montré son efficacité à résoudre les dix instances montrées dans le tableau ci-dessus.

Ensuite nous présentons les résultats d'application de notre approche de résolution NAMYOP. Comme présenté précédemment nous présentons trois variantes développées pour notre méthode : *BinFirst*, *PatternFirst* et *RandomBuild*

Résultats de NAMYOP			
	<i>BinFirst</i>	<i>PatternFirst</i>	<i>RandomBuild</i>
<i>Inst-1</i>	2019,07	2019,07	2019,07
<i>Inst-2</i>	3547,45	3547,45	3547,45
<i>Inst-3</i>	4480,87	4480,87	4480,87
<i>Inst-4</i>	5158,71	5144,41	5155,55
<i>Inst-5</i>	5636,66	5611,47	5703,86
<i>Inst-6</i>	6634,06	6592,97	6673,2
<i>Inst-7</i>	4502,02	4502,02	4502,02
<i>Inst-8</i>	6023,98	6023,98	6023,98
<i>Inst-9</i>	8283,95	8326,7	8293,96
<i>Inst-10</i>	10155,3	10355,1	10099,9

Tableau 19 : Résultat de notre approche de résolution NAMYOP

Le tableau 19 décrit les résultats trouvés pour chaque instance en utilisant le NAMYOP, les résultats obtenus montrent que la variante *PatternFirst* génère des résultats significatifs par rapport aux deux variantes.

Dans ce qui suit, nous présentons un tableau récapitulatif des résultats de notre méthode en comparaison avec Cplex qui contient en plus des numéros des instances, le détail concernant les baies, les patterns, les périodes de planification et les conteneurs traités.

Le tableau ci-dessous illustre les résultats retenus par *PatternFirst*, dans ce tableau le nombre maximum des conteneurs à traiter a été spécifié par les autorités portuaires en prenant en considération l'historique des traitements aussi bien que la prévision du court et du moyen terme. Le nombre de baies respectes ainsi l'organisation dans l'espace de stockage déjà présenté dans les chapitres précédents. Les intervalles de temps nécessaires pour le traitement de chaque opération sont ainsi définis dans la colonne h, le dernier indice est les patterns utilisés pour le traitement des conteneurs de chaque instance. Les résultats générés par notre méthode sont satisfaisants pour qu'on puisse juger sur sa performance, le GAP par rapport à la borne inférieure de Cplex est : **1,57%** et une amélioration dans le temps du traitement par : **-17,06%**.

Pour les instances auxquelles Cplex n'a pas pu générer une borne inférieure vu la contrainte du temps de traitement, notre méthode a pu générer une solution réalisable qui peut servir pour les autorités portuaires afin d'exécuter le modèle sur n'importe quel type d'instance.

<i>Inst</i>	<i>k</i>	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>s</i>	<i>CPLEX</i>	<i>T(Min)</i>	<i>NAMYOP</i>	<i>T(Min)</i>	<i>GAP</i>
<i>Inst-1</i>	480	24	1	4	2019,07	70,35	2019,07	58,35	0,00%
<i>Inst-2</i>	896	45	1	4	3547,45	130,49	3547,45	118,49	0,00%
<i>Inst-3</i>	1544	77	1	4	4470,87	177,72	4480,87	165,72	0,22%
<i>Inst-4</i>	1992	95	2	4	5134,17	182,1	5144,41	170,1	0,20%
<i>Inst-5</i>	2340	120	2	4	5520,45	230	5611,47	218	1,65%
<i>Inst-6</i>	3188	180	2	4	6324,92	310	6592,97	288	4,24%
<i>Inst-7</i>	3900	210	3	6	4302,02	355,8	4502,02	333,8	4,65%
<i>Inst-8</i>	4344	230	3	6	NA	NA	6023,98	342	NA
<i>Inst-9</i>	4816	244	3	6	NA	NA	8326,7	351,4	NA
<i>Inst-10</i>	5288	270	3	6	NA	NA	10355,1	359	NA
<i>Diff Moyenne / CPLEX</i>									1,57%
<i>Temps Moyen</i>								-17,06%	

Tableau 20 : Résolution des instances avec NAMYOP

Le tableau ci-dessus montre le GAP par rapport à Cplex, la méthode de calcul de ce GAP est définie par :

$$GAP = \frac{NAMYOP - CPLEX}{CPLEX} * 100.$$

Nous calculons ainsi l'écart par rapport à Cplex pour les instances pour lesquelles Cplex a pu générer une borne inférieure. Le temps d'exécution doit satisfaire la contrainte de 6 heures d'exécution imposée par les autorités portuaires (360 min).

Les deux dernières colonnes présentent le temps d'exécution et le GAP par rapport à la borne inférieure de Cplex. L'amélioration constaté dans le temps d'exécution (toujours < 360 min) nous permet de traiter d'autres instances réelles plus complexes.

Dans le tableau 21, nous présentons les méthodes utilisées pour le RS et l'AG. Les variantes sélectionnées d'après les premières analyses sont : le PRS2 et le TAG2 qui ont montré leurs performances par rapport aux autres variantes. Nous rajoutons aussi les données de Cplex aussi bien que le GAP par rapport aux deux autres méthodes.

Les paramètres des instances utilisés sont les conteneurs, les baies de stockage, les intervalles de temps ainsi que le nombre de destination traitées. Les autres caractéristiques des conteneurs sont prises en compte dans la modélisation du problème ainsi que dans les contraintes développées. Le nombre total des baies de stockage disponibles et les coûts des opérations sont définies dans les instances traitées. Pour les instances 8,9 et 10 nous utilisons l'AG comme référence pour calculer le GAP puisque Cplex ne génère pas une borne inférieure vu la contrainte du temps de calcul.

Les résultats obtenus montrent la performance de la méthode proposée et pourra servir ainsi pour le traitement des instances jugés difficiles afin d'être utilisé par les autorités portuaires.

<i>Inst</i>	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>CPLEX</i>	<i>T(Min)</i>	<i>PRS2</i>	<i>GAPI</i>	<i>TAG2</i>	<i>GAP2</i>	<i>NAMYOP</i>	<i>T(Min)</i>	<i>GAP Vs BKS</i>
<i>Inst-1</i>	480	24	1	4	2019,07	70,35	2019,07	0,00%	2019,07	0,00%	2019,07	58,35	0,00%
<i>Inst-2</i>	896	45	1	4	3547,45	130,49	3547,45	0,00%	3547,45	0,00%	3547,45	118,49	0,00%
<i>Inst-3</i>	1544	77	1	4	4470,87	177,72	4501,33	0,68%	4480,94	0,23%	4480,87	165,72	0,22%
<i>Inst-4</i>	1992	95	2	4	5134,17	182,1	5174,69	0,79%	5154,51	0,40%	5144,41	170,1	0,20%
<i>Inst-5</i>	2340	120	2	4	5520,45	230	5688,39	3,04%	5666,44	2,64%	5611,47	218	1,65%
<i>Inst-6</i>	3188	180	2	4	6324,92	310	6642,02	5,01%	6631,26	4,84%	6592,97	288	4,24%
<i>Inst-7</i>	3900	210	3	6	4302,02	355,8	4502,02	4,65%	4502,02	4,65%	4502,02	333,8	4,65%
<i>Inst-8</i>	4344	230	3	6	NA	NA	6024	NA	6023	NA	6023,98	342	0,02%
<i>Inst-9</i>	4816	244	3	6	NA	NA	8356,62	NA	8330,28	NA	8326,7	351,4	- 0,04%
<i>Inst-10</i>	5288	270	3	6	NA	NA	10402,3	NA	10251,7	NA	10355,1	359	1,01%
<i>Diff Moyenne / CPLEX</i>						208,07		2,03%		1,82%		240,49	1,19%
<i>Temps Moyen</i>												15,58%	

Tableau 21 : Synthèse des résultats

On peut représenter l'écart par rapport à la BKS (Best Know Solution), pour les instances 1 à 7, cet écart se calcul par rapport à la borne inférieure à Cplex. Pour les autres instances, l'écart se calcul par rapport à la BKS des deux méthodes. Dans notre cas c'est l'AG qui génère des résultats meilleurs par rapport au RS, soit une moyenne de déviation de **1,82%** pour l'AG vs **2,03%** du RS. Nous constatons une amélioration du GAP par cette méthode par rapport à celui calculé dans le tableau 21 soit **1,19%** par rapport à **1,57%** calculé dans le tableau 20. L'ensemble des instances ont été résolues par la NAMYOP, ce qui explique que notre méthode peut être utilisée pour résoudre ce type d'instances et ainsi elle peut être généraliser par les autorités portuaires pour traiter d'autres types de problèmes.

6.6 Interprétation :

A partir du tableau de la synthèse des résultats, nous remarquons que le coût total calculé par notre modèle de résolution est en moyenne très proche de la borne inférieure de Cplex. Pour les autres instances, nous avons calculé le GAP entre le coût calculé par notre modèle ainsi que la meilleure solution trouvée par les autres méthodes (BKS). Les valeurs de la fonction objectif obtenues peuvent être utilisées par les autres chercheurs comme une base de référence pour des travaux qui peuvent s'intéresser par le même type des problèmes.

Comme il est déjà décrit, le coût total d'une solution est égal à la somme des coûts de chaque colonne (route) appartenant à cette solution (nous supposons que le coût est proportionnel à la distance parcourue). Par conséquent, le pourcentage de différence entre le coût total obtenu par notre modèle pour chaque instance et le coût total optimal (BKS) sera en moyenne inférieur à 1,19% (d'après le tableau récapitulatif des résultats).

Nous constatons aussi que la distance totale parcourue des instances qui ont un horizon de planification court et qui permettent de servir quelques centaines de conteneurs (>5000) est plus proche du coût optimal de l'ensemble des opérations.

Nous avons remarqué aussi que le temps d'exécution (CPU-time) des méthodes de résolution implémentées ne dépasse pas, pour la majorité des problèmes 360 min pour générer des résultats, ce qui signifie que notre modèle de résolution a un temps de réponse assez satisfaisant et qui améliore le temps des autres méthodes

(relatif à la BKS) de **15,58%**. Cette caractéristique est importante puisque les besoins des entreprises exigent souvent que les outils de résolution des problèmes portuaires aient un temps de réponse raisonnable qui leur permettent de les utiliser dans les opérations quotidiennes.

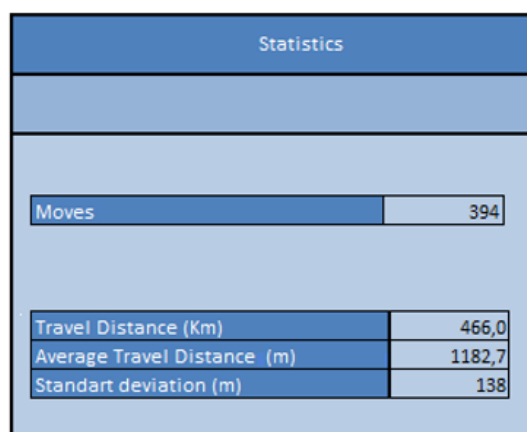
6.7 Interface d'utilisation

Pour une représentation de notre approche de résolution une interface homme machine (IHM) a été proposée. L'objectif est de pouvoir calculer la position d'amarrage optimale qui génère des distances parcourues qui sont optimales aussi par les TTs et ainsi optimiser le nombre de mouvement sur le yard (charge et décharge), ce qui permet aussi de déterminer la (les) position (s) optimale (s) d'accostage du navire.

Les données relatives aux navires (input): Identifiant du navire, sa taille (en mètres), et les positions sur le yard de tous les mouvements planifiés du navire.

Fonctionnalités offertes :

Parmi les fonctionnalités offertes, on calcule pour une position choisie la distance parcourue par les TTs pour effectuer chaque mouvement, et de donner ensuite des statistiques relatives à cette position d'amarrage : distance totale parcourue, distance moyenne, écart type :



Statistics	
Moves	394
Travel Distance (Km)	466,0
Average Travel Distance (m)	1182,7
Standart deviation (m)	138

Figure 57 : Statistiques relatives au choix d'une position d'amarrage d'un navire

Afin d'améliorer la présentation de la performance du modèle proposé, et aussi pour améliorer l'ergonomie et rendre l'approche plus facile dans son utilisation, nous avons pensé à des interfaces homme-machines pour récolter les données relatives aux navires ainsi que les positions libres dans la zone de stockage. Dans cette partie, nous avons présenté une approche de résolution pour un ou deux navires qui arrivent simultanément. Le menu principal offre la possibilité de choisir entre les deux cas de figures :



Figure 58 : Menu principal

Pour le premier exemple du choix d'un navire on présente ici les statistiques relatives au choix de la position d'accostage ainsi que les distances parcourues pour servir les conteneurs à traiter ainsi que le nombre de mouvements nécessaires pour effectuer cette opération :

Vessel 1		
ID	8CF	
Length	322	
Left Bollard	81	

statistics		
Travel distance (km)	567	
Moves	369	
Average Distance (m)	1536	
Standart Deviation (m)	272	

Optimal Positions		
Minimal Distance (km)	480	
	Bow	Aft
Pos 1	59	42
Pos 2	60	43
Pos 3	61	44

Figure 59 : Tableau de Bord (pour un seul navire)

- Dans le frame « Vessel 1 » l'utilisateur choisit l'identifiant du navire (ID) et sa taille s'affichera automatiquement dans la case qui suit. Ensuite nous choisissons la position d'amarrage « left bollard » pour laquelle nous aimerions avoir des statistiques.
- Dans le frame « statistics » les statistiques relatives à la position choisie s'affichent, et qui sont déterminées en fonction des positions de stockage libres initialement remplies dans le fichier des données.
- Le frame « optimal positions » on affiche les bollards qui délimitent la position optimale pour le navire.
- Le bouton « add new vessel » permet d'ajouter dans la base des données un nouveau navire
- Le bouton statistics and optimal berth allocation permet d'afficher les résultats déjà expliqués.

Critiques et amélioration

Dans notre étude nous avons mis le focus sur le cas des arrivées de deux navires maximum simultanément, alors qu'on pourra avoir plus de deux navires si tous les quais sont libres au début de l'horizon de planification. C'est un cas rare mais qui peut arriver. Donc l'amélioration possible est de pouvoir traiter plus de deux navires qui arrivent au port simultanément.

En comparant la modélisation proposée sur l'affectation des YCs et les contraintes exigées par l'autorité portuaire dans le processus de planification du travail des YCs, nous remarquons qu'il nous reste plusieurs contraintes qui doivent être prises en considération. Nous prenons par exemple :

- Le dispatcher (voir Annexe) planifie le travail des équipements (YCs et TTs) sur tout le yard : la planification des équipements ne se fait pas sur les zones indépendamment l'une de l'autre.
- Nous avons ignoré la possibilité de déplacement des YCs entre les zones.
- Nous n'avons pas pris en considération les pannes des YCs qui peuvent influencer la planification des mouvements au niveau de :
 - L'ordonnancement des mouvements sur la QC si le YC tombe en panne peut être déplacé sur le yard.
 - Les locations des mouvements sur le yard si le YC tombe en panne ne peut pas être déplacé sur le yard.

Dans le cadre d'amélioration du modèle, nous essaierons de :

- Réduire le nombre des variables utilisés et ajouter des contraintes qui peuvent cerner la résolution du modèle. Cela est dans le but de réduire le temps de résolution du modèle.
- Ajouter la possibilité de déplacement des YCs entre les zones. Et prendre en considération les cas de panne. Pour rendre le modèle plus adaptable au terminal.
- Introduire les contraintes de présence du personnel surtout les personnes clés qui pilotent l'activité portuaire.

6.8 Cas d'application pratique

6.8.1 Etude de Cas

Dans notre simulation, nous ne tenons pas compte du processus d'allocation des navires ni de l'attribution des équipements. Par contre nous introduisons un nouveau concept qui est l'utilisation des ATTs au lieu des TTs pour le cas de traitement des conteneurs vides (Automated Terminal Trailer : ATT) [Razouk 17].

La figure ci-dessous montre la modélisation du nouvel ATT proposé, qui peut transférer simultanément deux à quatre conteneurs [Fig. 60] si nous attachons deux remorques au même camion. La structure de cet ATT double est définie ci-dessous:



Figure 60 : Structure of the new ATT

En tenant compte d'une grue de quai, cinq ATT pour manipuler les conteneurs et une grue de manutention des conteneurs vides (Empty Handler : EH) notre tâche est la réalisation du processus de chargement et de déchargement des conteneurs vides, car notre objectif est de montrer l'impact de l'utilisation des ATTs sur les résultats obtenus par l'application de notre modèle de résolution sur le temps d'exécution ainsi que sur la productivité des ATTs.

Le premier conteneur vide 40" est déchargé, puis transféré vers une baie de la zone stockage. Si l'EH est disponible, le conteneur est transféré et le nombre de positions libres dans la baie est ajusté. Sinon, le conteneur est placé dans la queue. La figure ci-dessous montre en détail le processus de déchargement des conteneurs vides, qui sera l'inverse du processus du chargement. Dans l'espace de stockage de la zone MTY (zone dédié aux conteneurs vides) est l'espace de stockage attribué aux conteneurs vides, et on trouve un EH attribué dans cet espace [Figure 61].

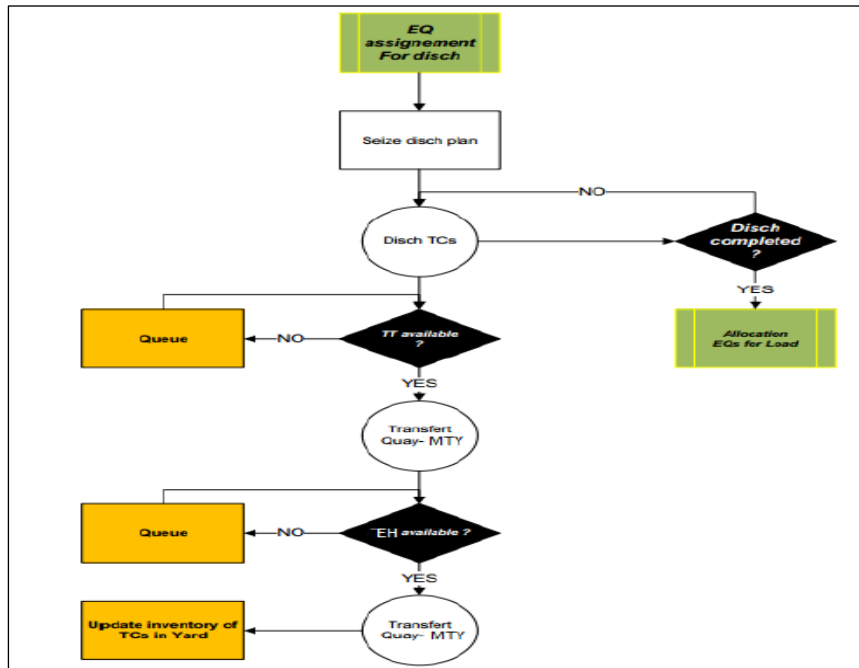


Figure 61: Unloading process for the empty containers

Une analyse détaillée du temps de cycle par opération est présentée ci-dessous. Nous mesurons l'efficacité globale de l'équipement (OEE) de l'ATT [Figure 56]. Le GMPH est défini comme un rapport entre le nombre total des mouvements des conteneurs et le nombre d'heures de travail des QCs. Nous pouvons voir que l'ATT perd du temps au niveau des quais et dans la cour de stockage en file d'attente, en attente de conteneurs ou en attente de déchargement ou de chargement des conteneurs, selon le processus.

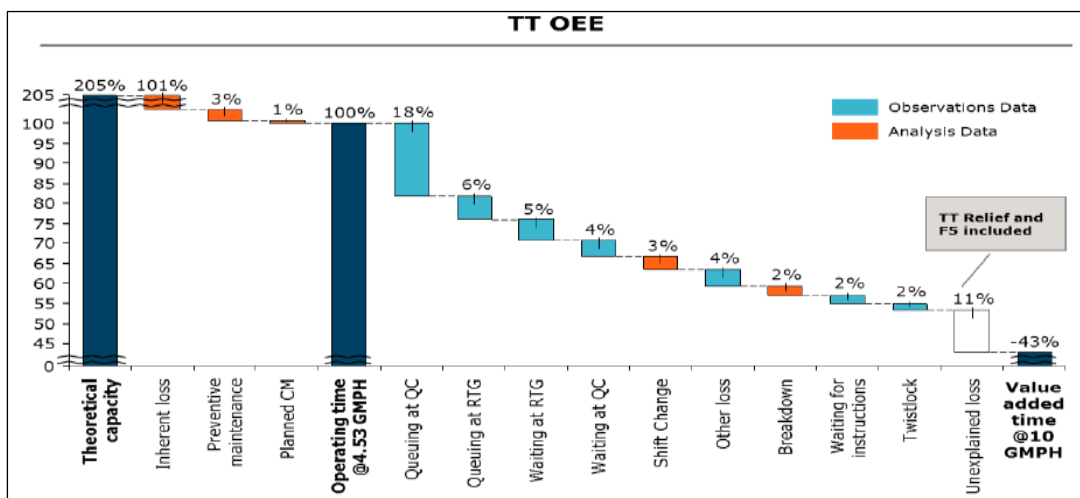


Figure 62: Efficacité générale de l'ATT

Pour simuler un phénomène aléatoire tel que les temps de cycle d'une machine, des lois de distribution statistique doivent être utilisées, les valeurs générées par ces lois doivent être proches des valeurs maximales prises lors du fonctionnement réel du système. Notre conclusion est que la conception du nouvel ATT optimisera le temps de file d'attente au niveau des quais et dans la zone de stockage et améliorera le volume des conteneurs transférés. Nous présentons dans notre simulation le nombre de déplacements par heure en utilisant l'ATT double.

6.8.2 Données et Simulation

Les opérateurs du terminal reçoivent le fichier EDI avant l'arrivée du navire, qui contient le nom et l'identité du navire, sa longueur, le plan d'arrimage et le nombre de conteneurs à décharger et à charger, le type d'opération de chaque conteneur (déchargement / chargement / transbordement), la taille et le type de conteneurs, heure des opérations (début / fin), heure d'arrivée prévue, accostage et départ du port, date prévue de départ de chaque conteneur.

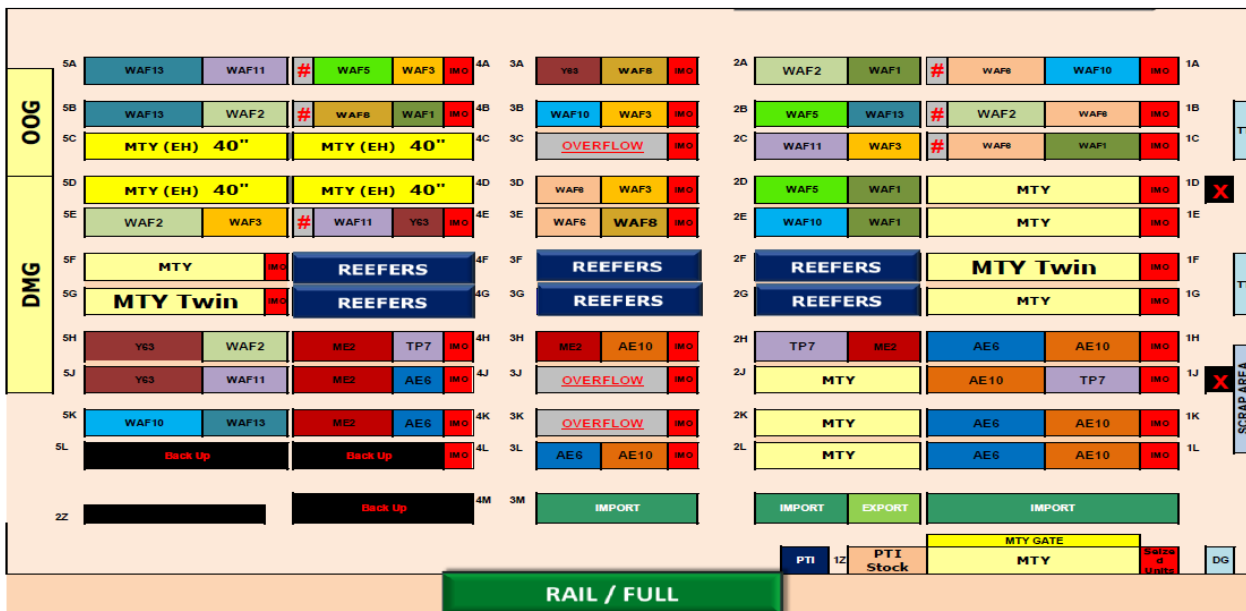


Figure 63: Stratégie de la cour de stockage de notre port d'étude

Nous avons utilisé la version 14 du simulateur ARENA, qui permet un accès facile aux différents modules et qui se caractérise par une grande flexibilité pour les données externes. De plus, des multitudes de distributions statistiques sont disponibles pour représenter autant que possible la variabilité du phénomène modélisé. Les problèmes étudiés peuvent être stochastiques, dynamiques et discrets, en utilisant l'analyseur d'entrée, qui utilisent les données historiques en entrée, l'erreur quadratique moyenne et le test de Kolmogorov-Smirnov en tant que paramètres. Le résultat de ce test est une valeur comprise entre un et zéro, pour un paramètre p qui permet de tester l'hypothèse nulle (H_0), qui stipule que deux lois de distributions proviennent de la même fonction de distribution aléatoire, une valeur de p inférieure à 0,05 indique une faible corrélation entre les données et la loi de distribution. Alors qu'une valeur supérieure à 0,10 montre une bonne correspondance entre

les deux séries de données et valide H0. Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous montrent l'efficacité du modèle proposé, les trois dernières colonnes indiquent le nombre de mouvements calculés en plus des temps d'exécution en utilisant le modèle proposé par rapport au système actuel. Dans le tableau 22, le nombre total de conteneurs traités pour le transfert entrant ou sortant ou venant du transbordement à partir de types et de destinations différents. La colonne tampon de cour de stockage définit le nombre de mouvements nécessaires pour repenser la zone de stockage afin de placer les conteneurs dans le bon ordre et d'éviter les mouvements non productifs. Dans la colonne suivante, nous avons le nombre de mouvements nécessaires pour décharger, charger un navire spécifique. Les deux dernières colonnes contiennent le temps d'opération par navire, soit à l'aide du modèle actuel, soit à l'aide du nouveau modèle, qui utilise l'ATT. Nous pouvons voir que le temps d'opération a été optimisé dans le deuxième modèle, ce qui permet de traiter les navires à temps et d'augmenter le nombre de mouvements liés à d'autres opérations portuaires.

SQ.	Date	Service	Discharge												Load												Restow Via Yard			Teus	Total Moves	Total Operation time Using current model	Total Operation time Using proposed Approach						
			Empty			Full						Empty			Full						20'	40'	45'																
			20'	40'	45'	Local		Transshipment		20'	40'	45'	Local		Transshipment																								
						DC	RF	DC	RF				DC	RF	DC	RF	DC	RF	DC	RF																			
1	1/12/16 11:16	AE10	0	2	0	7	0	25	1	0	382	4	331	116	0	23	158	0	933	1742	0	0	0	1	0	596	1	237	16	0	2	18	20	7282	4615	960	518		
2	1/12/16 17:12	WAF2	206	411	0	0	0	0	0	0	143	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	244	0	175	58	0	0	36	0	2015	1304	220	118	
3	2/12/16 5:49	WAF5	345	279	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	39	0	89	61	0	0	0	0	1244	814	315	170		
4	2/12/16 7:48	WAF3	407	1	0	0	0	1	0	0	98	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	21	5	0	2	14	0	836	696	234	126		
5	2/12/16 10:39	WAF7	265	238	0	0	0	0	0	0	69	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	225	2	123	18	0	0	0	0	1326	944	325	175		
6	2/12/16 21:34	TP7	0	0	0	70	0	55	0	3	478	0	409	7	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	25	1	0	4	0	2	1615	1084	367	198		
7	3/12/16 12:39	ME2	0	131	0	35	0	49	1	0	657	4	537	11	0	14	1	0	112	184	0	7	1	23	1	0	182	1	154	199	0	0	6	0	3607	2310	620	334	
8	3/12/16 18:00	WAF6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	171	0	309	4	0	0	0	0	799	485	142	76		
9	4/12/16 8:20	AE6	0	0	0	1	0	5	0	0	465	8	540	221	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	241	0	102	0	0	4	74	2	2607	1663	467	252		
10	4/12/16 21:11	WAF13	9	419	0	20	0	14	2	0	122	1	53	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	262	2	244	90	0	0	4	0	2072	1244	387	208		
11	5/12/16 13:32	WAF1	585	349	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	312	1	284	88	8	2	4	0	2374	1641	498	268		
12	5/12/16 15:45	WAF9	73	141	0	0	0	1	0	0	231	0	35	10	0	0	18	9	218	370	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	12	0	1734	1132	332	179	
13	5/12/16 21:00	TP7	0	0	0	0	0	0	0	0	23	0	44	77	0	0	0	6	41	445	0	0	0	3	0	4	0	30	148	0	2	34	0	1644	857	256	138		
14	6/12/16 12:47	Y63	0	0	0	23	0	0	0	0	286	0	140	2	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	200	1	299	9	19	0	0	0	1608	1059	309	166		
15	7/12/16 14:49	WAF13	1	406	0	0	0	0	0	0	106	2	4	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187	3	244	40	0	22	4	0	1759	1040	307	165		
16	7/12/16 19:24	AE10	0	0	0	3	0	13	0	0	283	2	226	205	0	8	8	0	1543	1409	0	0	0	5	0	548	1	122	10	0	18	384	88	7346	4876	1108	598		
																																				39868	25764	6847	3689

Tableau 22 : Container Terminal Actual Operation Vs Operation with the proposed model

Dans ce premier modèle, nous simulons de la situation actuelle (ATT avec capacité d'un seul conteneur), l'analyse faite pendant le projet du TDI au niveau du GMPH va nous aider à valider et vérifier la justesse de notre simulation. Le calcul a été lancé durant 60 minutes, avec le calcul de nombre de mouvements IN/Out de charge et décharge ainsi que le GMPH des QC , ATT et EH utilisés :

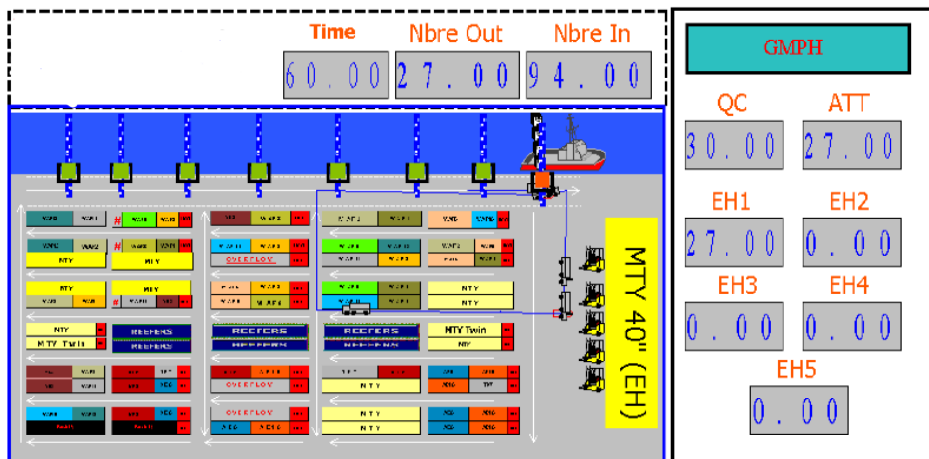


Figure 64. Screenshot from container terminal from Arena: Actual Model

Le modèle 2 sera celui de la simulation de la situation future ou espérée (ATT avec empilement de deux conteneurs), les résultats de ce modèle ont montré l'impact du changement sur le GMPH de chaque équipement, cela nous aidera à avoir une décision puissante.

Rappelons que la simulation concerne seulement le flux des conteneurs vides. Par ailleurs, le GMPH est l'indicateur de performance primordiale au sein de l'entreprise. Ce qui nous amène à faire une simulation de 1h (pour respecter la fenêtre de temps allouée par l'autorité portuaire).

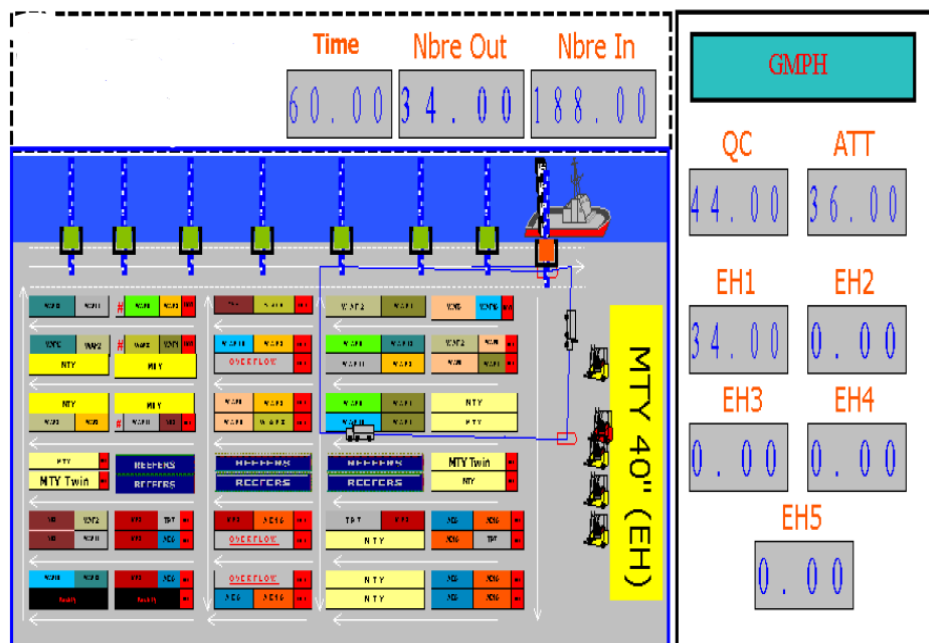


Figure 65 : Modélisation du terminal à conteneur par Arena

Comme le montre la figure, l'impact est assez énorme au niveau de GMPH des équipements et surtout de la grue portique qui est l'équipement primordiale de l'entreprise et l'image d'un service performant et efficace ; plus la grue portique est performante plus le taux de sortie et d'entrée des conteneurs sera optimale, plus le navire sera servi dans le délai contracté entre le client et l'autorité portuaire.

6.8.3 Interprétation des résultats:

A la lumière des tests effectués et des comparaisons avec les données réelles, la simulation a démontré sa capacité à représenter les opérations du terminal. L'objectif de cette simulation est de représenter les opérations du terminal afin d'être utilisé comme outil d'analyse et d'optimisation de nombre d'équipements et de monter l'impact d'implantation des ATTs avec double transfert. Les valeurs de GMPH mesurées à partir des figures suivantes ont été améliorées entre le modèle classique et le nouveau modèle de l'ATT. Ceci pourrait être réalisé grâce à l'optimisation du temps de traitement, ainsi que la distance totale parcourue par les ATTs. L'augmentation du nombre de mouvements par heure indiqué dans la [Fig. 65] montre que le nombre total de conteneurs entrants et sortants a également été augmenté [Figure 65] en utilisant le logiciel Arena (*). Le temps de cycle de l'EH et du QC a été amélioré, ce qui démontre bien l'efficacité du modèle proposé, en améliorant le temps de fonctionnement de 54% et en augmentant le nombre de mouvements par heure de 48% [Figure 66].

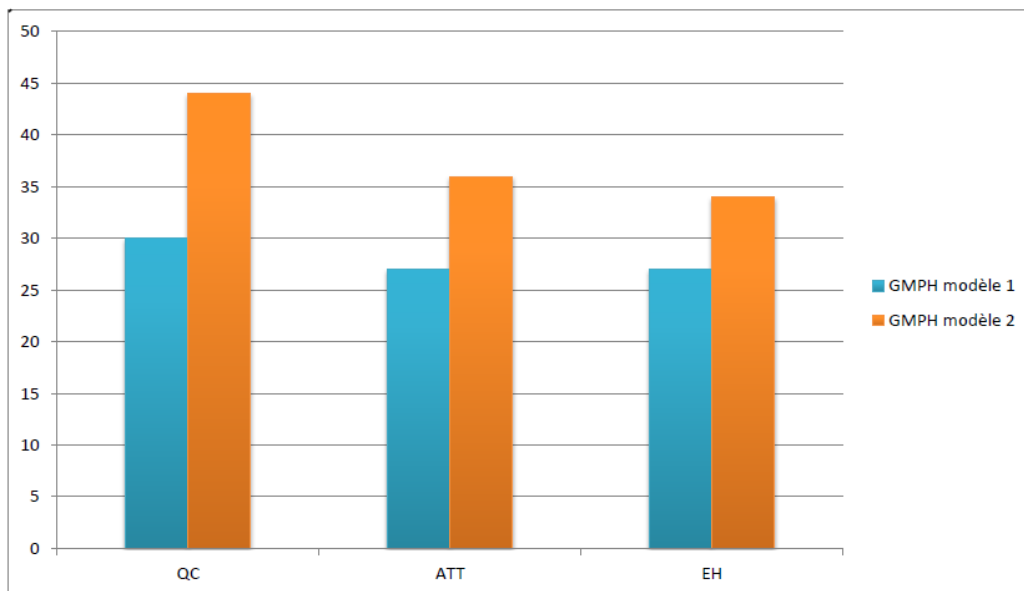


Figure 66 : Comparaison entre Le GMPH du modèle 1 et celui du modèle 2

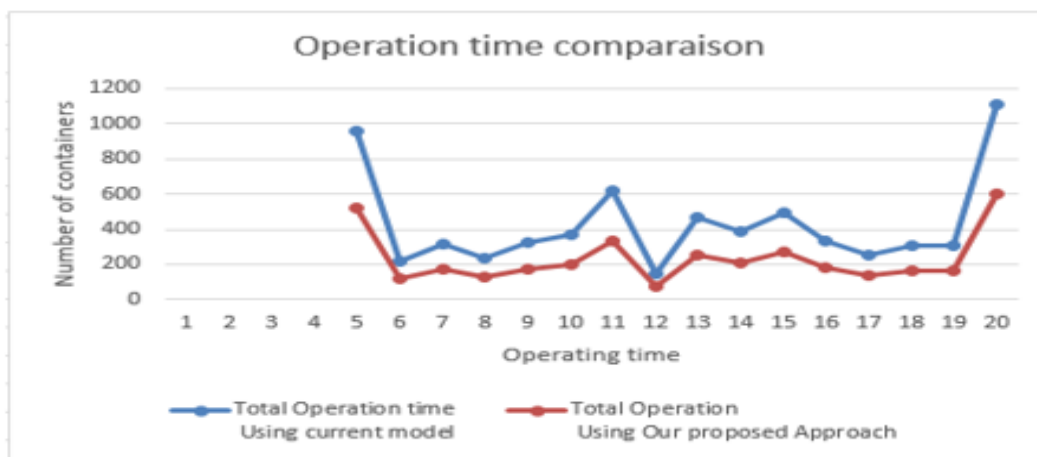


Figure 67. Temps d'opération ancien et nouveau modèle

6.9 Conclusion

L'analyse du problème YOP, classé NP-difficile, nous a incité à proposer une nouvelle formulation mathématique pour modéliser le problème de transfert des conteneurs en adaptant une variante du problème de tournée des véhicules, le Multiple Depot Periodic Vehicle Routing Problem (MDPVRP). Une deuxième modélisation qui répond à des contraintes de l'autorité portuaire vise à améliorer le nombre de mouvements des équipements utilisés, le problème étudié est le : Yard Containers Assignment Problem (YCAP). Ce dernier est considéré comme un critère de performance primordial au sein des terminaux portuaires.

L'originalité des modèles proposés réside dans le fait qu'ils traitent simultanément plusieurs contraintes organisationnelles, physiques et logiques de notre terminal d'étude. Nous avons proposé une méthode de résolution basée sur deux approches de résolution : des méta-heuristiques et des heuristiques de résolution.

Les heuristiques de résolution sélectionnées qui utilisent trois étapes de calcul et dans lesquelles nous distinguons entre trois variantes, ont montré leurs performances par rapport aux méta-heuristiques étudiés. Les résultats des approches proposées ont été validés via l'exécution des programmes sur des instances réelles fournies par les autorités portuaires, afin de pouvoir les comparer avec les meilleures solutions connues (BKS) : nous avons utilisé la borne inférieure de Cplex pour quelques instances et le meilleur résultat des autres méthodes utilisées pour les autres instances. Ce qui a confirmé à nouveau la performance du modèle proposé à travers les résultats trouvés sur plusieurs instances.

Ensuite, le modèle a été testé sur les données réelles fournies par l'autorité portuaires, pour se faire une interface homme machine a été développée pour faciliter la récolte ainsi que l'affichage des résultats obtenus.

Pour un exemple plus pratique, nous avons essayé de valider nos modèles et vérifier nos résultats à travers la simulation faite sur les conteneurs vides en utilisant le concept du nouvel ATT, nous avons donc développé une plateforme de simulation 2D pour cette finalité. En entrée, nous récupérons les données des navires et des conteneurs, aussi bien les positions de stockage libres dans la zone dédiée. Après application des algorithmes de résolution, nous obtenons le nombre optimal des mouvements effectué pour le processus de chargement et de déchargement ainsi que le GMPH des équipements utilisés.

Conclusion générale

Le présent travail contribue à l'amélioration possible des opérations maritimes étudiées tout au long de notre étude ; ces opérations représentent le cœur de métier d'un port. Notre contribution s'est focalisée sur l'étude de trois problèmes principaux :

- 1) Problème d'allocation de l'espace de stockage (SSAP)
- 2) Problème de transfert des conteneurs depuis ou vers la zone de stockage
- 3) Problème de minimisation des mouvements de grues

La résolution de ces problèmes commence d'abord par l'établissement d'une modélisation mathématique originale qui répond aux exigences des autorités portuaires. L'originalité de ce travail réside dans la combinaison de l'approche académique et la vie réelle au sein du port. Pour cela, nous avons utilisé des données de la littérature (les instances existantes), et aussi des données réelles de l'autorité portuaire pour pouvoir valider notre modèle afin d'effectuer les simulations et les validations nécessaires. Les études effectuées sur le terrain avec les équipes de travail nous ont permis de détecter les indicateurs majeurs à prendre en compte dans notre étude. La valeur ajoutée de ce travail par rapport à ce qui a été déjà traité dans la littérature c'est que le traitement des données se fait sur des données réelles, ensuite l'intégration des algo TOS dans le modèle de l'optimisation en intégrant les données reçues dans via les EDI comme des input du modèle d'optimisation et finalement le traitement des sous problèmes portuaires que nous intégrons dans un modèle général à la fin ce qui crée l'originalité du modèle proposé et ainsi du travail réalisé.

Problème d'allocation de l'espace de stockage (SSAP)

Dans la plupart des terminaux à conteneurs la gestion des affectations des conteneurs se fait dans la plupart des cas sur la base de l'expérience des opérateurs, ce qui génère des problèmes d'interférence entre les quais et de congestion entre les camions de transfert interne. L'étude qualitative effectuée nous a permis d'identifier les pistes des améliorations possibles y compris au niveau du SSAP. Nous avons proposé une nouvelle modélisation mathématique de ce problème avec trois principaux objectifs, la minimisation des coûts d'affectation des conteneurs aux espaces de stockage, l'optimisation des nombres de remaniements au niveau de la zone de stockage et le regroupement des conteneurs dans des catégories typiques selon un ensemble de critères.

L'enjeu principal consiste à identifier les positions de stockage optimales tout en optimisant le coût total des opérations inhérentes : la distance parcourue par les camions de transferts interne, ainsi que le nombre de mouvements des grues de cour et des grues à quai.

Pour la résolution du modèle proposé, nous avons fait appel à une méthode exacte et une méthode approchée ou méta-heuristique. Pour la résolution via la méthode exacte, nous avons utilisé le Branch-

and-Cut via le logiciel ILOG CPLEX pour les instances de tailles moyennes. Les résultats obtenus ont été utilisés pour évaluer la performance des méthodes approchées pour la résolution des instances de petites tailles.

Pour les méthodes approchées, nous avons opté pour trois algorithmes : Le Recuit Simulé, l'Algorithme génétique développé (DGAS) et le Bin packing (BPSSAP). Pour les petites instances, la comparaison des résultats des méthodes proposées ainsi que ceux du CPLEX a prouvé l'efficacité des méthodes proposées. Pour les moyennes et les grandes instances, nous avons effectué une comparaison entre les différents algorithmes proposés. Les résultats obtenus ainsi que le pourcentage de déviation calculé, ont prouvé que le BPSSAP est plus efficace que les autres algorithmes et qu'il génère des résultats meilleurs pour les instances de moyennes et de grandes tailles.

Yard Optimization Problem

L'originalité des modèles proposés, premièrement le YCAP et ensuite le YOP réside dans le fait que nous traitons simultanément plusieurs contraintes organisationnelles, physiques et logiques de notre terminal d'étude :

- au début de chaque horizon de planification, l'autorité portuaire reçoit la liste des navires
- chaque navire doit accoster et quitter dans les temps agréés avec l'autorité portuaire, chaque retard peut entraîner des surcoûts à facturer aux clients.
- pour la liste des conteneurs à traiter, chacun possède une date prévue de départ à respecter.
- le terminal que nous avons étudié fait partie des terminaux semi automatiques, qui utilisent trois types d'équipements pour la gestion des conteneurs vers ou depuis la zone de stockage. Un autre type a été rajouté dans la dernière partie de ce chapitre qui est indispensable pour la gestion des conteneurs vides (Empty Handler).
- chaque type de flux est connu bien en avance, ce qui nous permet de respecter l'ordre des mouvements des TTs et ainsi définir des emplacements optimaux des conteneurs à stocker dépendamment de leurs types de flux.

Nous avons proposé une méthode de résolution basée sur deux approches de résolution : des méta-heuristiques et des heuristiques.

Les heuristiques (Savings, Insertion et optimisation locale) sélectionnées ont montrés leurs performances par rapport aux méta-heuristiques étudiés (présentées dans l'Annexe). Les résultats des approches proposées ont été validés via l'exécution des programmes sur des instances de littérature pour pouvoir les comparer avec les meilleures solutions connues dans la littérature. Ce qui a confirmé à nouveau la performance du modèle proposé à travers les résultats trouvés sur plusieurs instances.

Ensuite, le modèle a été testé sur les données réelles fournies par l'autorité portuaires, pour se faire une interface homme machine a été développée pour faciliter la récolte ainsi l'affichage des résultats obtenus.

Les résultats des applications traitées pendant notre étude, vont contribuer à l'amélioration de la qualité et de la rapidité du service que ce soit au niveau de la détermination des postes optimaux d'amarrage des navires ainsi que pour les trajets optimums des TTs, ou au niveau de l'affectation des portiques à roues aux mouvements des conteneurs au sein des zones de service du yard.

Pour un exemple plus pratique, nous avons essayé de valider nos modèles et vérifier nos résultats à travers la simulation faite sur les conteneurs vides en utilisant le concept du nouvel ATT, nous avons donc développé une plateforme de simulation 2D pour cette finalité. En entrée, nous récupérons les données des navires et des conteneurs, aussi bien les positions de stockage libres dans la zone dédiée. Après application des algorithmes de résolution, nous obtenons le nombre optimal des mouvements effectués pour le processus de chargement/déchargement ainsi que le GMPH des équipements utilisés.

En conclusion, les résultats obtenus confirment la performance des approches proposées et le temps de traitement raisonnable permet à l'autorité portuaire de tirer profit de nos méthodes pour optimiser les opérations quotidiennes au niveau du port.

Nous citons ci-dessous nos travaux de recherches qui ont été effectués tout au long de cette thèse et qui sont réparties entre publications et communications internationales :

1. Razouk, C., Benadada, Y., Boukachour, J. "Container stacking problem - Mathematic model and resolution", ILS 2014 - 5th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Castle of Breda (NL), August 24-27 2014.

Link : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190796590>

2. Chafik Razouk, Youssef Benadada and Jaouad Boukachour, "Stacking policy for solving the container stacking problem at a containers terminal", TALT 2015, 1st International Workshop on Theory and Applications of Logistics and Transport, Tetuan, Morocco on May 25th and 26th 2015.

3. Razouk, C., Benadada, Y., Boukachour, J, "New approaches for solving the container stacking problem " Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Logistics Operations Management, GOL 2016, FST-FEZ Morocco, 23-25 May 2016.

Link : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190796590>

4. Chafik, R., Benadada, Y., Boukachour, J, "Stacking policy for solving the container stacking problem at a containers terminal ", ILS 2016 - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, KEDGE Business School -Bordeaux (France), 1st-4th June 2016.

Link : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191032679>

5. Razouk, C., Benadada, Y., Boukachour, "A Hybrid Bin-Packing algorithm for solving the yard optimization problem : Deterministic Case", The 6th International Conference on Metaheuristics and Nature Inspired Computing META'16, Marrakech - Morocco, 27th-31st Oct 2016.

6. Chafik Razouk, Youssef Benadada and Jaouad Boukachour, " New approaches for solving the container stacking problem", , **IEEE Xplore**: 03 November 2016, **INSPEC Accession Number**: 16430436

Link : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7731679/>

7. Chafik, R., Benadada, Y., Boukachour, J, "A hybrid bin-packing algorithm for solving the yard optimization problem : Non-Deterministic case ", IEOM 2017, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Rabat- Morocco, 11th - 13th April 2017.

Link : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57191032679>

8. Razouk C., Benadada Y., Boukachour J. (2019) Adapted Bin-Packing Algorithm for the Yard Optimization Problem. In: Talbi EG., Nakib A. (eds) Bioinspired Heuristics for Optimization. Studies in Computational Intelligence, vol 774. Springer, Cham

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-95104-1_9#citeas

9. Chafik Razouk and Youssef Benadada, "Optimization and Simulation Approach for Empty Containers Handling" International Journal of Advanced Computer Science and Applications (ijacsa), 8(11), 2017. <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2017.081164>

Perspectives

Les résultats obtenus sont encourageants et nous invitent à continuer dans la même directive pour améliorer les modélisations effectuées en tenant compte d'autres paramètres et contraintes supplémentaires. Nous pourrions essayer des hybridations avec d'autres méthodes et ainsi que d'autres approches de résolution qui peuvent améliorer les résultats trouvés. La prise en compte d'autres problèmes portuaires peut être considérée comme une nouvelle piste d'amélioration, elle pourra ainsi accomplir le travail qu'on a effectué pour une meilleure modélisation de toute la chaîne maritime.

L'application de l'optimisation robuste nécessite l'identification de trois composantes principales: la détermination de la manière de présenter les incertitudes, par intervalles dans le cas continu ou par scénarios dans le cas discret. Ensuite, la définition de l'objectif visé, en termes de robustesse, en tenant compte de la nature du problème et des incertitudes. Finalement, la définition d'une méthodologie de suivi pour la mise en œuvre de l'optimisation robuste. Nous distinguons dans les méthodes d'utilisation entre : les méthodes pour les problèmes dont les coefficients de la fonction objectif sont incertains, ou les méthodes pour les problèmes affectés par des coefficients incertains situés dans la matrice des contraintes. Ceci fera l'objet d'un article dans lequel l'intégration de cet aspect se fera en tenant compte du contexte d'étude des problèmes traités.

Storage space Allocation Problem

Pour l'enrichissement du modèle proposé dans cette partie, nous proposons l'ajout d'autres contraintes au modèle de base proposé :

- pour l'optimisation du coût de stockage, introduire la notion de surestarie qui vise à encourager les clients pour extraire leurs conteneurs dans un délai de [48h,72h] pour pouvoir libérer beaucoup plus l'espace de stockage.
- introduire dans le modèle la notion de compatibilité entre les types de conteneurs : dangereux, frigorifiques ou autres. Cela est dans l'optique d'éviter éventuellement des risques d'endommagement d'autres conteneurs;

La résolution a été effectuée à l'aide du problème de Bin Packing après avoir testé la résolution sur les petites instances à travers la méthode de séparation et évaluation.

Pour la résolution de ces types de problème on pourra essayer d'autres méthodes de résolution à savoir : le Job shop, underfitting et l'overfitting

Yard Optimization Problem

Dans une approche d'amélioration des résultats trouvés, nous proposons de rajouter quelques contraintes à notre modèle de base afin de l'enrichir en tenant compte du maximum possible des contraintes de la réalité :

-
- Intégrer la partie de livraison au Gate avec les contraintes qui peuvent se poser ;
 - tolérer les déplacements des grues entre les zones de stockage ;
 - introduire la partie d'optimisation d'accostage en tenant compte de plusieurs navires à la fois ;
 - rajouter la contrainte de la présence des facteurs humains et son impact sur le fonctionnement normal dans le terminal ;

Pour ces problèmes, l'utilisation des méta-heuristiques ou heuristiques de résolution s'avère primordiale. Une hybridation entre les méthodes proposées peut générer des résultats meilleurs que ceux trouvés par les méthodes adaptées.

Nous avons essayé aussi des hybridations entre l'Algorithme Génétique général et le Recuit simulé, à travers l'intégration du RS dans les deux étapes principales de l'AG : la mutation et le croisement.

La première étape consiste à ajouter le RS à l'opérateur de mutation de l'AG. Cette hybridation est une combinaison entre la recherche locale à travers les heuristiques d'exploitation ainsi qu'une exploitation plus profonde des populations prometteuses, le point fort de cette hybridation et qu'elle réussit à explorer les différentes régions en raison de la fonctionnalité de parallélisme implicite.

La deuxième étape à intégrer le RS avec l'opération de croisement de l'AG. Pour l'AG ordinaire, tous les chromosomes sont remplacés par leurs descendants après les procédures du croisement la population utilisée. En raison de la durée de vie extrêmement courte des individus dû principalement à la contrainte du temps d'exécution, les algorithmes de recherche n'explorent pas tout l'espace créé des individus. Pour remédier à ce problème, une hybridation entre l'AG et le RS peut être développée, afin d'explorer le plus grand nombre possible des individus et ceci dans la limite du temps d'exécution toléré.

Le parallélisme est aussi une piste d'amélioration qui consiste à diminuer le temps de traitement des opérations de résolution des problèmes traités. Cette opération vise à lancer le programme sur plusieurs machines (exemple utilisation de 15 processeurs), chacun d'eux traite un sous problème séparément (SSAP, ITCTP, YOP) avec l'utilisation des intégrateurs entre modèle et d'un coordinateur entre les résultats des sous problèmes. Le principal objectif est donc d'améliorer le temps requis pour l'exécution du programme, pour que nous puissions atteindre des meilleurs résultats.

Une autre piste d'amélioration est l'utilisation de la recherche Tabu, peu de travaux qui sont intéressés à cette méthode pour la résolution des problèmes des terminaux portuaires. Une hybridation avec l'algorithme génétique pourra être utilisée par la suite pour l'amélioration des résultats obtenus.

Pour l'amélioration de la partie interface homme machine, un interfaçage automatique avec le TOS pourra être développé afin d'éviter la saisie manuelle de quelques données. Cette amélioration pourra être intégrée dans le TOS avec le rajout d'un module spécifique dédiée à la partie de la simulation développée dans le dernier chapitre aussi que la possibilité avec des systèmes d'optimisation ouvert à la simulation.

La notion des séries temporelles combinatoires pour les problèmes combinatoires, pour la prise en compte de la saisonnalité pourra être utilisée aussi. Afin de voir son impact sur la représentation des flux des arrivages en fonction du temps.

La notion de Big Data peut être intégrée dans un travail ultérieur dans le but d'intégrer les informations qui arrivent au moment du traitement des conteneurs dans l'horizon de planification. Cette notion vise à améliorer les résultats obtenus à travers l'intégration de cette notion.

En conclusion, plusieurs voies de recherches s'avèrent possibles et qui peuvent offrir des pistes d'investigation et d'amélioration. Nous espérons que les fruits de notre travail pourront apporter des améliorations pour d'autres ports ainsi que pour d'autres travaux de recherche. Les résultats obtenus montrent l'efficacité des méthodes proposées, qui peuvent être utilisées pour d'autres environnements à travers leurs adaptations à d'autres problèmes dans le monde de la recherche opérationnelle autre que les problèmes portuaires à savoir les problèmes de transfert des véhicules vu que c'est maintenant la tendance de plusieurs industriels.

Bibliographie

- [1] [AFP 2017] AFP study of the Tanger Med Port vol.3, Page 4-5, March, 2017.
- [2] [Almeder 09] Almeder, et al. (2009). “Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions”. *European Journal of Operational Research*, 235(2009), 412–430.
- [3] [Armando 12] Armando, D.-L., F.-R. (2012). “Constraint satisfaction technology for stacking problem with ordered constraints”. *Procedia Engineering*, 3317–3321.
- [4] [Bazzazi 17] Bazzazi S. (2017). “Variants of genetic algorithms applied to scheduling problems” *Mag Engineering*, 307–331.
- [5] [Benghalia 14] Benghalia, A., Oudani, M., Boukachour, J., Boudebous, D., & Alaoui, A. E. (2014) « Optimization-Simulation for Maritime Containers Transfer ». *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 5(2), 50-61. doi:10.4018/ijal.2014040104,.
- [6] [Bish 07] Ebru K. Bish, Frank Y. Chen, Yin Thin Leong, Barry L. Nelson, Jonathan Wing Cheong Ng & David Simchi-Levi (2007) “Dispatching vehicles in a mega container terminal”. *OR Spectrum*, vol. 27, pages 491–506.
- [7] [Bish 13] Ebru K. Bish, David Simchi-Levi. *Advanced Technology for Marine Cargo Security* (2013). “The 7th Marine Transportation System Research and Technology Coordination Conference” *The National Academy of Sciences Washington DC*, 16-17.
- [8] [Borgman 10] Borgman M. et Chen V.C.P. (2010) « Performance analysis of conjoined supply chains ». *International Journal of Production Research*. Vol.15, p.3195-3218.
- [9] [Brown 14] Douglass R Brown. (2014) “Advanced Technology for Marine Cargo Security”. *The National Academy of Sciences Washington DC*, p.2-4
- [10] [Bruzzon 10] Bruzon, M.Z. (2010) « Politiques de pilotage de flux dans les chaînes logistiques : impact de l’utilisation des prévisions sur la gestion des stocks ». Thèse de doctorat délivré par l’École Central Paris, p.85-112.
- [11] [Chen 14] Chen, L., & Lu, Z. (2014) “The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal”. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 73–80.
- [12] [Cheung 08] P. Chen, Z. Fu, A. Lim & B. Rodrigues (2008). “Port Yard Optimization Problem”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 1, no. 1, pages 26–37.
- [13] [Chu 08] Raymond K. Cheung, Chung-Lun Li & Wuqin Lin. (2008) “Interblock crane deployment in container terminals”. *Transportation Science*, vol. 36, no. 1, pages 79–93.
- [14] [Chung-Lun 08] Li Chung-Lun & Vairaktarakis George. *Loading and unloading operations in container terminals* (2008). *IIE Transactions*, vol. 36, no. 4, pages 287–297.
- [15] [Con 11] Conteneurisation (2011) « <http://www.ecotra.eu/fr/transport-deconteneurs/quest-ce-quun-conteneur-maritime.html> »
- [16] [Cordeau 15] Cordeau, J.-f., Legato, P., Mary Mazza, R., T, Roberto (2014) «Simulation-based optimization for housekeeping in a container transshipment terminal», *Computers & Operations Research*, pp 81-95.
- [17] [Daganzo 03] Carlos F. Daganzo (2003). “Crane productivity and ship delay in ports”. *Transportation Research Record*, vol. 1400, pages 12–23.
- [18] [de Castillo 05] Bernardo de Castillo & Carlos F. Daganzo (2005) “Handling strategies for import containers at marine terminals”. *Transportation Research Part B : Methodological*, vol. 43, no. 2, pages 21–44.
- [19] [Dekker 07] Dekker J. (2007) “Parameter Setting in EAs a 30 Year Perspective”. *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*, vol.10, p.132-143.

- [20] [Duinkerken 03] Marco D. (2003) “Optimization, learning and natural algorithm Thèse”. Engineering book, vol.3, p.15-21.
- [21] [El-Mihoub 06] Gamal A. Said, M. El-Mihoub (2006) “A Simulation Modeling Approach for Optimization of Storage Space Allocation in Container Terminal” International Journal of Computer and Information Engineering. Vol.10, p.25-33
- [22] [Gazdar 08] Meriam Gazdar (2008) « Optimisation Heuristique Distribuée du Problème de Stockage de Conteneurs dans un Port ». Thèse, p.65-125.
- [23] [Glover 08] Glover, E.U. (2008) “Simulation-based analysis for hierarchical storage assignment policies in a container terminal”. Simulation, 87(6), 523–537.
- [24] [He 10] He J., Alain K., P. Siarry & Taillard E. (2010) « Métaheuristiques pour l’optimisation difficile ». Eyrolles, p.41-53.
- [25] [Hyo 11] Hyo and Ren (2011). “Research on SA-based addressing model of slot in container terminal. Applied Mechanics and Materials”, p.97–98, p.985–989.
- [26] [Ibrahimi 00] Ibrahimi T. (2000). “A General Framework for Scheduling Equipment and Manpower on Container Terminals”. OR Spectrum, vol. 26, pages 51–74.
- [27] [Imai 08] Akio Imai, Etsuko Nishimura & Stratos Papadimitriou (2008). “Berth allocation with service priority part 1”. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 57, no. 7, pages 217–234.
- [28] [Imai 09] Akio Imai, Etsuko Nishimura (2009). “Berth allocation in a container port part 2 : using a continuous location space approach”. Transportation Research Part B : Methodological, vol. 55, no. 8, pages 429 – 451.
- [29] [Jiang 16] Jiang, Y. H., Kim, K. H., Woo, Y. J., & Seo, B. H. (2016). “A simulation study on a workload-based operation planning”. Industrial Engineering & Management Systems, 11(1), 103–113.
- [30] [Juliang 13] Juliang K., Kwang Ryu & Kap Kim (2013). “Determination of Storage Locations for Incoming Containers of Uncertain Weight”. vol. 4031, pages 1159–1168.
- [31] [Kang 16] Kang H.(2016). “A General Framework for Scheduling Equipment and Manpower on Container Terminals”. OR Spectrum, vol. 32, pages 110–117.
- [32] [Kap 07] Kap H. (2007). “Adaptation in natural and artificial system”. Thèse.p.61-95.
- [33] [Kemme 12] Kemme, N. (2012). “Design and Operation of Automated Container Storage Systems, Contributions to Management Science, Springer”, vol.14, p.31-45
- [34] [Khoshnevis 12] Khosnevis, B., Asef-Vaziri, A. (2012), « simulation of automated container terminal and analysis of impact on in land transportation», p.13-21.
- [35] [Kia 03] Kia, M., Shayan, E., Ghotb, F. (2003) «Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation», Computers and Industrial Engineering, vol 42, n° 2-4, pp533-540.
- [36] [Kim 05] Kim K H, Park Y, M (2005) « *Deriving decision rules to locate export containers in container yards*». European Journal of Operational Research, p.129-141.
- [37] [Kim 06] Kim, K. H., Jeon, S. M. (2006) « Deadlock prevention for automated guided vehicles in automated container terminals», vol. 28, p.659-679.
- [38] [Kim 08] Kim, K. H., Kim, H.B. (2008) « The storage space and handling facilities for import containers», Transportation Research Part B: Methodological, vol. 72, p. 511-523.
- [39] [Kim 09] Kim, K H et Moon, K, C. (2009) «Berth scheduling by simulated annealing». Transportation Research Part B : Methodological, vol. 52, no. 10, p.243– 251.
- [40] [Kim 16] Kim, K. H. (2016) « *A dynamic space allocation method for outbound containers*». European Journal of Operational Research. Vol. 52, p.211-221.
- [41] [Kozan 06] Kozan et al., 2006. “A genetic algorithm for the containers scheduling trucks problem”. European Journal of Operational Research. Vol. 12, pp.41-53, 2006.

-
- [42] [Kozan 08] Kozan et al., (2008). “Scheduling trucks in container terminals using a genetic algorithm”. Eng.Optim, p.33–47.
- [43] [Kozan 16] Kaplan R.S., Norton D.P. (2016). « A new scorecard from performance measurement to strategic containers management». Accounting Horizons, p.102–114.
- [44] [Lee 17a] Lee, L. H., Chew, E. P., Tan, K. C., & Han, Y. (2017). “An optimization model for storage yard management in transshipment hubs”. OR Spectrum, 28, 539–561.
- [45] [Lewis 13] Azmi Alazzam and Harold W. Lewis (2013). "A New Optimization Algorithm For Combinatorial Problems", (IJARAI) International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, vol. 2, no.5.
- [46] [Longo 10] Longo, N., & Hadjiconstantinou, E. (2010). “Container assignment and gantry crane deployment in a container terminal: A case study”. Maritime Economics and Logistics, vol.10, p.90–107.
- [47] [Ma 12] Matthieu Lauras M (2012), « Methodes de diagnostic etd’evaluation de performance pour la gestion de chaines logistiques ». Thèse, p. 25-67.
- [48] [Masanobu 09] Patrick Johannes Maria Meersmans (2002). “Optimization of Container Handling Systems”. Thèse à l’université Erasmus Rotterdam, Pays-Bas, p.15-56.
- [49] [Midoro 05] Midoro N., Rosenbluth M. (2005). “Equation of state calculations by fast computing machines”. Journal of Chemical physics : case of study of containers terminal. vol. 11, no. 7, pages 237–252.
- [50] [Moccia 06] Moccia, K. G. (2006). “Gantry crane pools and optimum layouts for storage yards of container terminals. Journal of Industrial and Systems Engineering”, 1(3), 190–199.
- [51] [Moussi 11] Moussi Ryadh, A., & Yassine, T. Galinho. (2011). “Modern methods of combinatorial optimization for solving optimization problems in a containers terminal”. Thesis published in, p.73–79.
- [52] [Nam 08] Nam, B. K., & Kim, K. H. (2008). Optimizing the yard layout in container terminals. OR Spectrum, 35, p.363–398.
- [53] [Ndiaye 15] Ndiaye et al. (2015), « Algorithmes d’optimisation pour la résolution duproblème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire », Thèse, p.11-67
- [54] [Ng 07] Ng, H&Lee, et al. (2007). “A hybrid ant colony and simulated annealing algorithm to solve the container stacking problem at seaport terminal”, p.14–19.
- [55] [Ng 10] Ng, W. C., Mak, K. L., & Li, M. K. (2010). “Yard planning for vessel services with a cyclical calling pattern. Engineering Optimization”, 42(11), p.1039–1054.
- [56] [Nguyen 11] Nguyen Kaveshgar, Nathan Huynh, Saeed Khaleghi Rahimian (2011): An efficient genetic algorithm for solving the quay crane scheduling problem, expert systems with applications. Vol.39-13108-13117. P.7-9.
- [57] [Nishimura 09] Nishimura, E., Imai, A., Janssens, G. K., & Papadimitriou, S. (2009). “ Container storage and transshipment marine terminals”. Transportation Research Part E, 45, p. 771–786.
- [58] [Nishimura 15] Nishimura, E., Imai, A., Janssens, G. K., & Papadimitriou, S. (2015). “Container storage Problem within automated container terminal”. Transportation Research Part E, 13, p. 151–176.
- [59] [Park 17] Park, T., Choe, R., Kim, Y. H., & Ryu, K. R. (2017). “Dynamic adjustment of container stacking policy in an automated container terminal. International”. Journal of Production Economics, 133, p. 385–392.
- [60] [Petering 14] Petering, M. E. H. (2014) «Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals».N° 27, p. 112–123.

- [61] [Persson 10] Persson, F., and Araldi, M. (2010) «The development of a dynamic supply chain analysis tool ». *International Journal of Production Economics*, n°2, p. 574-583.
- [62] [Rashidi 13] Rashidi, H., & Tsang (2013). “Novel constraints satisfaction models for optimization problems”. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6).
- [63] [Razouk 14] Razouk, C., Benadada, Y., Boukachour, J. (2014) "Container stacking problem - Mathematic model and resolution", ILS conference, Castle of Breda (NL), August 24-27 2014, indexed in Scopus.
- [64] [Razouk 15] Chafik Razouk, Youssef Benadada and Jaouad Boukachour (2015), "Stacking policy for solving the container stacking problem at a containers terminal", TALT, 1st International Workshop on Theory and Applications of Logistics and Transport, Tetuan, Morocco.
- [65] [Razouk 16] C. Razouk, Y. Benadada and J. Boukachour (2016) " New approaches for solving the container stacking problem", *IEEE Xplore*: vol. Novembre, INSPEC Accession Number: 16430436. In press.
- [66] [Razouk 16a] Chafik, R., Benadada, Y., Boukachour, J, (2016) "Stacking policy for solving the container stacking problem at a containers terminal ", ILS conference - 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, KEDGE Business School -France, indexed in Scopus.
- [67] [Razouk 17] Chafik, R., Benadada, Y., Boukachour, J, (2017). "A hybrid bin-packing algorithm for solving the yard optimization problem : Non-Deterministic case ", *IEOM Society, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Rabat-Morocco, 11th -13th April.
- [68] [Razouk 19] Razouk, C., Benadada, Y., Boukachour J, (2019) "Adapted Bin-Packing algorithm for the yard optimization problem", In: Talbi EG., Nakib A. (eds) *Bioinspired Heuristics for Optimization. Studies in Computational Intelligence*, vol 774. Springer, Cham (2019)
- [69] [Rouky 18] Rouky, N., Couzin, P., Boukachour, J., Boudebous, D., Alaoui, A., & Alaoui, A. E. H. (2018). “Optimization of Containers Transfer in Le Havre Port: a New Algorithm for the Railway Transportation System”. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1676-1681.
- [70] [Saanen 07] Saanen L. (2007) « Modelisation et à l'analyse de la chaîne logistique : Cas d'import/export ».Thèse, p. 32-78.
- [71] [Sculli 08] Sculli et al., MicroPort (2008): « A general simulation platform for seaport container terminals, *Adv. Eng. Informat.*». Three dimensional stacking of containers. *Omega*, vol. 16, no. 6, pages 585–594.
- [72] [Sammara 07] Sammarra, M., Cordeau, J. F., Laporte, G., & Monaco, M. F. (2007). « A tabu search heuristic for the quay crane scheduling problem”. *Journal of Scheduling*, 10(4-5), p. 327-336.
- [73] [Steenken 04] Steenken, D., Voss, S., & Stahlbock, R. (2004). “Container terminal operation and operations research-a classification and literature review”. *OR spectrum*, 26(1), p. 3-49.
- [74] [Stahlbock 08] Stahlbock, R., & Voss, S. (2008). “Operations research at container terminals: A literature update”. *OR Spectrum*, 30 (1), p. 1-52.
- [75] [Talbi 09] El-Ghazali Talbi (2009). “Metaheuristics from design to implementation. John Wiley and Sons”, Engineering book, p.125-223.
- [76] [Taleb-Ibrahimi 03] Mounira Taleb-Ibrahimi, Bernardo de Castilho (2003). “Storage space management in container terminals”. *Transportation Research* :vol. 15, no. 12, p. 33–41.
- [77] [Vis 03] Iris F.A. Vis & René de Koster (2003). « Transshipment of containers at a container terminal : An overview”. *European Survey*, p. 21-102.

-
- [78] [Wilson 10] I.D. Wilson & P.A. Roach (2010). “Container stowage planning : a methodology for generating computerised solutions”. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 13, no. 12, p. 145–155.
- [79] [Wilson 11] I.D. Wilson, P.A. Roach (2011). “Container stowage pre-planning : using search to generate solutions, a case study”. *Knowledge-Based Systems*, vol. 24, no. 11–15, p. 201–215.
- [80] [Wise 11] Won, Y.Y., Yong, S.C. (1999). «A simulation model for container terminal operation analysis using an object-oriented approach», *International Journal of Production Economics*. vol 59, p. 221–230.
- [81] [Yalaoui 14] ChangHo Yang, YongSeok Choi & TaeYoung Ha (2014). “Simulation-based Performance evaluation of transport vehicle at automated container terminal using simulation”. *OR Spectrum*, vol. 26, no. 2, p. 149–170.
- [82] [Yao 03] Ruiqing Yao, Bolun Yang, Guanxu Cheng, Xianhu Tao & Fanxu Meng (2003). “Kinetics research for the synthesis of branch ether using genetic-simulated annealing algorithm with multi-pattern evolution”. *Chemical Engineering Journal*, vol. 94, no. 2, p. 113–119.
- [83] [Yongbin 14] Zhang Yuxuan (2014). “Scheduling Trucks in Port Container Terminals by a Genetic Algorithm”. Thèse à l’université de Hong Kong, p. 33-50.
- [84] [Zhang 06] Chuqian Zhang, Jiyin Liu & Richard J. (2006). “Deployment Strategy in container storage yards”. *Transportation Research Part B* : vol. 36, no. 6, p. 537–555.
- [85] [Zhang 13] Chuqian Zhang, Yat wah Wan, Jiyin Liu & Richard J. Linn. (2013). Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation*; vol. 22, no. 11, p. 37–48.

Annexe A

Algorithme génétique hybride :

Un nouvel algorithme génétique hybride est proposé, qui résout le MDPVRP tout en conservant les liens forts présents entre les attributs. Les opérateurs génétiques habituels (sélection, crossover et mutation) y sont associés à une éducation des solutions par recherche locale, qui remplace ici la mutation. La représentation de solutions de Prins [4] sans délimiteurs de routes est adaptée aux problèmes considérés, et de nouveaux opérateurs de crossover et d'éducation sont proposés.

Notre méthode s'appuie aussi sur une relaxation particulière du problème, où des solutions pénalisées enfreignant les limites de charge ou de temps de route des camions sont maintenues dans une population secondaire. Ainsi en effectuant des croisements entre individus réalisables et irréalisables, nous cherchons à placer la recherche près des frontières de faisabilité. D'autre part, nous constatons durant la recherche que de nombreuses routes possèdent une charge (ou un temps de route) très proche de la limite autorisée. Relaxer ces contraintes et pénaliser leur violation permet de considérer un plus grand nombre de mouvements de recherche locale lors de l'éducation, et conduit à une meilleure exploration de l'espace de recherche.

Enfin, notre algorithme se démarque du concept de survie du plus fort car l'évaluation d'une solution elle-même est liée à une mesure de contribution à la diversité dans la population. Par analogie avec les mécanismes naturels, nous simulons l'émergence de niches écologiques, qui amènent différentes espèces à coexister sans liens de domination. Notre stratégie permet alors de réduire les risques de convergence prématurée, et résulte-en des performances accrues en comparaison à plusieurs méthodes antérieures, qui géraient la diversité durant l'inclusion d'une nouvelle solution dans la population.

Des expérimentations sur les instances de [Cordeau et al.] couramment utilisées pour le PVRP et le MDVRP montrent que notre algorithme génétique est performant et rapide. Un certain nombre de résultats sont fournis sur de nouvelles instances MDPVRP dérivées des problèmes cités précédemment. Nous envisageons par la suite d'étendre notre approche à d'autres attributs comme les fenêtres de temps et la flotte hétérogène, dans le but d'enrichir la classe de problèmes traités et de progresser vers la résolution de problèmes riches.

Annexe B

Description détaillée du poste de Dispatcher (Dispatcher Handbook)

Le *Dispatcher* doit s'assurer qu'il y'a assez d'équipements de manutention pour subvenir aux besoins des navires prévus (le nombre des conteneurs qui devraient être chargés et déchargés en respectant le délai du navire et la séquence des mouvements des conteneurs planifiés par le planificateur du navire et aussi les locations des conteneurs sur le yard), du "housekeeping", et des opérations de transport au sein du terminal. Il doit aussi s'assurer que tous les équipements sont correctement assignés pour réaliser la meilleure productivité possible, c'est-à-dire il essaie de synchroniser les opérations effectuées par les YCs (charge ou décharge) sur le yard avec les opérations effectuées par les QCs (décharge ou charge) sur le quai. Cela est dans le but de maintenir, les QCs en travail durant toute l'opération (charge/décharge d'un navire), c'est pour cela il essaie d'éviter les retards des opérations au sein des blocs sur le yard.

Dans cette perspective le *Dispatcher* doit :

- Vérifier que toutes les affectations sont effectivement exécutées.
- Affecter tous les appareils de manutention de conteneurs (portique à roues, Reach Stacker, Forklifts and Empty Handlers) au bon point de départ au début de chaque shift.
- S'assurer que l'équipement inactif reste dans les groupes non affectés.
- S'assurer que toutes les opérations se déroulent sans heurt et de manière sûre et efficace.
- Surveiller constamment les portiques à roues et ajuster pro activement leur tâche si cela s'avère nécessaire.
- Vérifier que les camions affectés à chaque portique de quai travaillent dans le groupement correspondant.
- Affecter de nouveaux équipements si nécessaire.
- Eviter le maximum possible les déplacements des YC entre les zones, c'est-à-dire maintenir les YCs à travailler le maximum possible dans une seule zone (A, B, C,..., M)
- Demander au planificateur du navire de changer la planification de chargement dans le cas où la panne d'une YC bloque la circulation des autres YCs. Ou bien demander au planificateur du yard de changer les destinations des conteneurs.
- Remplacer la YC rompue par une autre YC disponible dans le cas où la panne de YC ne fait pas obstacle face aux déplacements des autres YCs.
- Eviter le travail de deux YCs dans le même bloc dans le but de respecter les mesures de sécurité.
- Donner l'ordre de Mettre en fonction et de démarrer les YCs (en parking) les plus proches des zones qui vont recevoir la plupart des mouvements de l'opération (charge/décharge du navire).

En outre, il surveille constamment et en temps réel le déroulement des opérations (planification dynamique) pour :

- S'assurer que les opérations sont effectuées réellement en accord avec les plans.
- Gérer les événements inattendus et appliquer des mesures correctives immédiatement.

-
- Prévoir les défis qui pourraient subvenir par rapport aux plans préétablis.

Annexe C

Stratégie de stockage :

Assignation d'espace de stockage pour un groupe de conteneurs et pour des conteneurs individuels :

L'idée principale de la recherche associée est de proposer des méthodes pour affecter des groupes de conteneurs aux emplacements de stockage, où les groupes sont, par exemple, identifiés par le navire de destination, l'EDT et le type de conteneur. Une heuristique basée sur le recuit simulé pour ce problème est proposée par Huang et al. [Huang 10] qui nécessite l'énumération de toutes les permutations d'affectation possibles pour trois groupes de conteneurs import. Jeong et al. [Jeong 12] définissent une méthode pour affecter à chaque bloc un nombre de conteneurs import basée sur la destination de chaque conteneur. Nishimura et al. [Nishimura 12] proposent un nouveau MIP et utilisent une nouvelle heuristique pour minimiser le temps de traitement total des conteneurs en affectant des sous-ensemble des conteneurs à un ensemble de baies.

Cette méthode de stockage par groupe est utilisée par les ports non automatisés qui utilisent des YCCs. L'objectif est de pouvoir économiser les ressources matérielles (YCC par bloc) et les ressources humaines utilisées, le groupement des conteneurs est fait de telle sorte à minimiser le nombre des ressources utilisées [Saaneen 07]. Selon Ma et al. [MA 12] il existe deux méthodes de réservation d'emplacements de stockage pour la stratégie de groupage. La première s'appuie sur l'utilisation des piles vides pour le stockage d'un sous ensemble du groupe de conteneurs. Elle commence par une seule pile vide et désignera d'autres piles vides une fois la première est remplie jusqu'au stockage complet des conteneurs du groupe, cette méthode est appelée « unité pile ». La deuxième méthode utilise le même principe mais cette fois-ci pour les baies. Elle réserve au début de l'opération une baie vide à chaque sous-groupe des conteneurs, une fois la baie remplie, elle désignera une autre baie vide pour stocker les autres conteneurs de ce même sous-groupe. Cette méthode est nommée « unité baie ».

Contrairement à la stratégie de groupage, on trouve la stratégie de dispersion, comme son nom l'indique cette stratégie n'essaie pas de regrouper les conteneurs. L'idée principale de ce type de stratégie est d'abord d'affecter des conteneurs à des blocs et ensuite à des emplacements spécifiques dans le bloc sélectionné. Guldogan et al. [Guldogan 10] considèrent une politique intégrée prenant en compte la balance du travail, le nombre de camions utilisés et les distances parcourues, le but de la nouvelle stratégie est de sélectionner les conteneurs en fonction de leur date de départ, le poids et le type des conteneurs ne sont pas pris en compte. Park et al. [Park 11] choisissent d'abord des blocs pour équilibrer la charge de travail des grues de cour, et deuxièmement, ils ont désigné le lieu de stockage spécifique en fonction de l'utilisation de l'espace de stockage et de la disponibilité des grues de cour. Ng et al. [Ng 10] ont utilisé une nouvelle heuristique pour le problème de stockage des conteneurs d'importation en

proposant des schémas d'appel cycliques, d'autres caractéristiques des conteneurs n'étant pas prises en compte.

L'algorithme ci-dessous montre les étapes de validation et d'affectation d'un sous ensemble de conteneurs à une baie :

1 : Sélectionner un ensemble de conteneurs ayant la même destination

2 : Choisir aléatoirement une rangée dans l'espace de stockage (ensemble de piles)

3 : Choisir un emplacement quelconque dans cette rangée de stockage

4 : Vérifier si c'est possible d'assigner un conteneur à cette rangée

5 : Si oui, stocker le conteneur et choisir le suivant dans le groupe associé

6 : Si non, essayer avec la rangée suivante.

7 : Sectionner un ensemble de conteneurs ayant la même destination

Comme il est montré dans l'algorithme ci-dessus, toutes caractéristiques détaillées des conteneurs ne sont pas prises en compte dans les stratégies citées ci-dessus (par exemple : EDT, dimensions, types, poids, destinations, etc.). Donc cet algorithme peut générer des solutions réalisables mais qui ne sont pas optimales. Il s'avère donc qu'il est intéressant de prendre en considération d'autres caractéristiques et paramètres pour élaborer des stratégies de stockage et de déstockage plus efficace.

Zone Tampon et Stockage direct

Dans des travaux antérieurs à 2000, quelques auteurs ont essayé de résoudre ce type de problème en proposant quelques nouvelles configurations qui peuvent être utilisées par les terminaux à conteneurs :

- Réserver un espace assez intéressant pour la zone tampon, et opter plutôt pour une zone de stockage moins vaste avec des piles très hautes. Cette solution présente des limitations surtout pour les ports qui ont des niveaux de stockage prédéfinis (quatre niveaux par exemple).
- À l'intérieur de chaque bloc, réserver un ensemble de baies pour le stockage temporaire. La cour de stockage et la zone tampon ne sont pas séparées dans ce type de configuration.
- Même principe que la deuxième configuration, sauf que cette fois le stockage temporaire des conteneurs se fait dans des piles intermédiaires dans chaque bloc avant d'être transférés vers leur emplacement finale dans la zone de stockage.

La stratégie de stockage indirect nécessite plusieurs mouvements au sein de la zone de stockage, ceci implique l'utilisation des moyens matériels et humains pour établir une configuration optimale, d'où l'intérêt d'utiliser le stockage direct qui présente plusieurs avantages en dépit de ses difficultés.

Priorité au stockage et au déstockage

1: Sélectionner un conteneur quelconque

2 : Sélectionner une rangée de même dimension que le conteneur sélectionné et qui a au moins une pile vide

3 : Trouver dans cette rangée, un emplacement libre et qui est au sol

4 : S'il existe : stocker le conteneur sélectionné

5 : S'il n'existe pas, Répéter l'opération sur toutes les rangées du bloc, revenir à l'étape 3

6 : S'il n'existe toujours pas : trouver dans cette rangée, un emplacement libre au plus bas niveau possible

Stratégie de stockage dans les piles :

1 : Sélectionner un conteneur qui a l'EDT le plus élevé dans le navire

2 : Recenser toutes les piles qui ont des emplacements vides, et qui ont, à leur sommet, des conteneurs qui ont des EDTs supérieures à celle du conteneur sélectionné

3 : Calculer, pour chaque sommet, la différence entre l'EDT du conteneur sélectionné et l'EDT du conteneur au sommet de la pile

4 : Trier cette différence en ordre croissant, et choisir la pile qui conduit à la plus petite différence

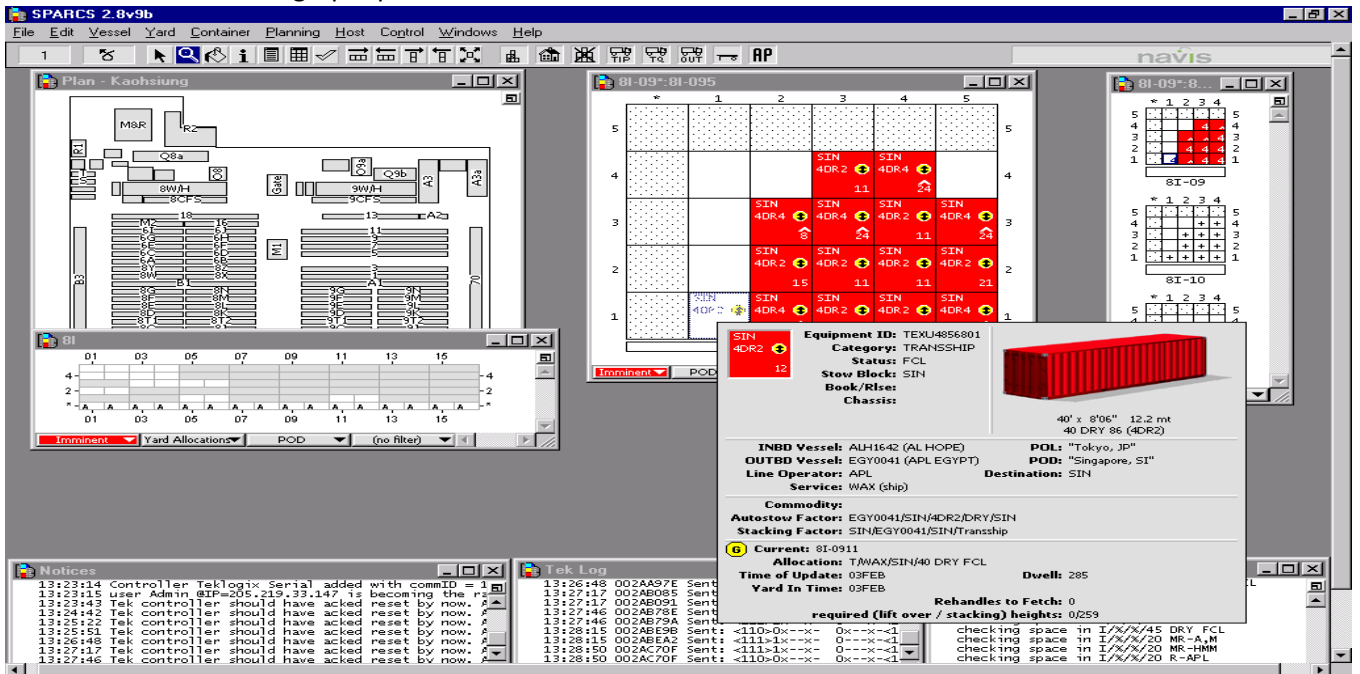
5 : Si aucune pile ne satisfait cette contrainte, alors on choisit une parmi les piles vides, qui sera la plus proche au point de livraison du conteneur (*)

6 : Si aucune pile ne satisfait les étapes, revenir à l'étape 2 pour trier les piles à nouveau

Annexe D

Aperçu du système d'information maritime :

- Interface graphique facile à utiliser.



- Précision de la modélisation géométrique du navire.

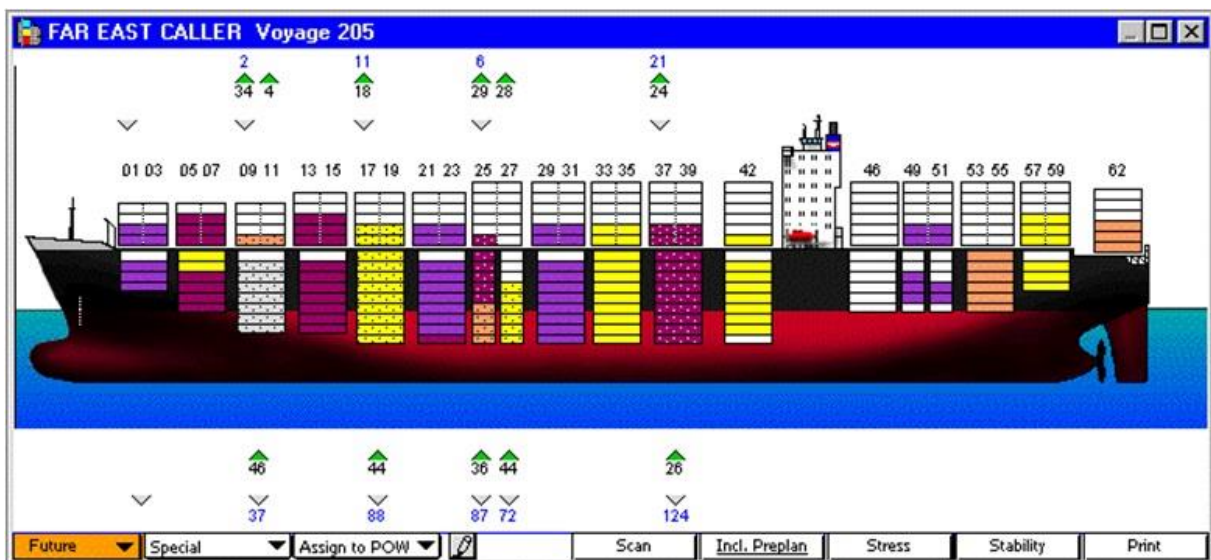


Figure 68 : Vision transversale d'un navire à conteneurs

Modélisation détaillée de yard.

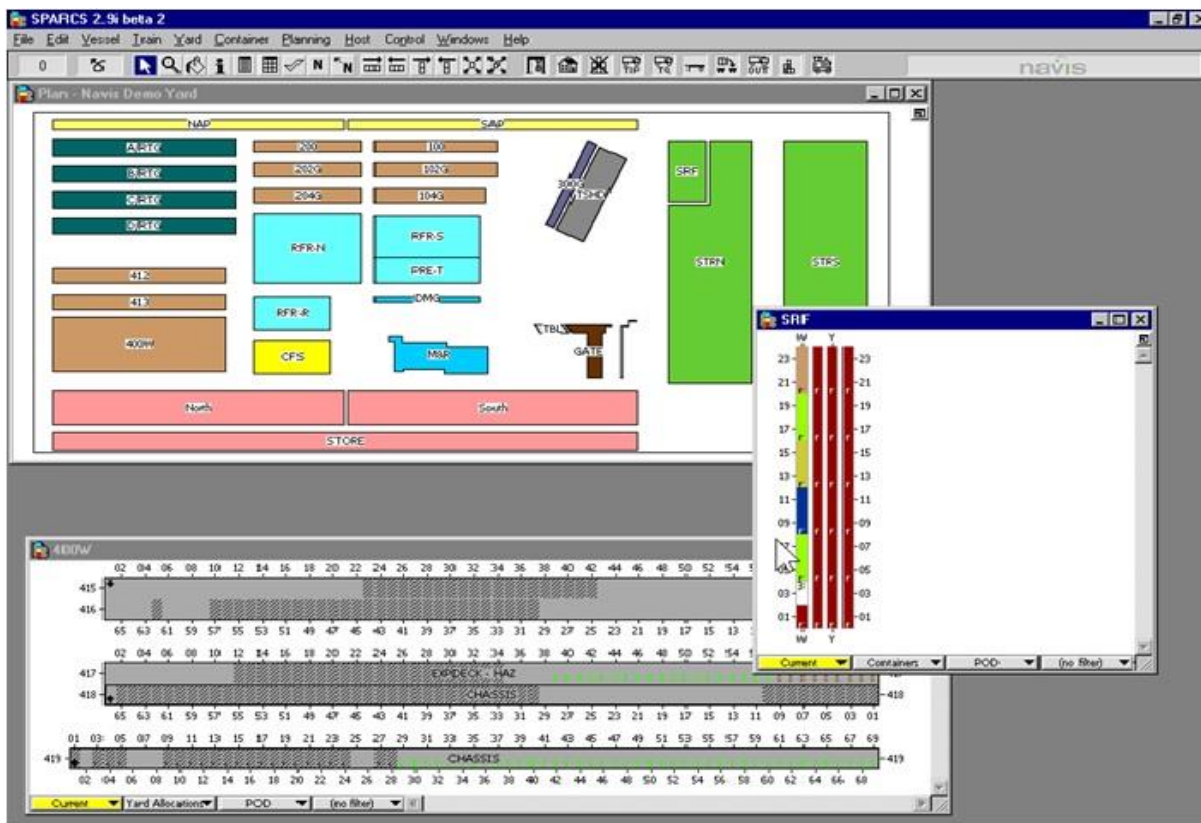


Figure 69 : Vision détaillée de yard

- Équipement de contrôle.
- Gestion automatisée des terminaux à conteneurs.

Avantages :

- Augmenter le débit des opérations des terminaux à conteneurs.
- Augmenter l'utilisation de yard.
- Automatiser les opérations de quai.
- Améliorer la planification des navires.
- Réduire les coûts du travail et des équipements.
- Accroître la productivité du terminal à conteneurs (Augmenter le GMPH).
- Rationaliser les opérations de terminal à conteneurs

OPTIMISATION ET SIMULATION DES OPERATIONS PORTUAIRES DANS UN TERMINAL A CONTENEURS

Résumé : Tout au long de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur les problèmes de gestion portuaire qui impactent légèrement la productivité d'un terminal à conteneurs. L'étude que nous avons menée se base sur l'historique des travaux existants dans la littérature, soit en utilisant les données réelles de notre port d'étude, ou encore en utilisant une base de données qui contient l'historique des arrivés/départs des navires, ce qui nous a conduit à sélectionner trois problèmes majeurs dans un terminal à conteneurs : le problème de transfert des conteneurs par les véhicules de transfert interne des conteneurs, le problème d'allocation d'espace de stockage et le problème de la gestion de la cour de stockage, pour lequel nous avons fait appel aux deux premiers problèmes étudiés. Pour les trois problèmes traités, nous avons profité des mesures faites sur le terrain, aussi bien que des données issues de la base de données de notre port d'étude. Par ailleurs, l'utilisation des nouvelles plateformes existantes s'avère aussi intéressante pour la validation du modèle mathématique proposé. Nous avons réalisé une étude approfondie de la littérature afin de proposer une nouvelle modélisation mathématique, et des approches de résolution. Enfin les solutions ont été validées grâce au couplage de l'optimisation et de la simulation. Les objectifs de cette thèse consistent à offrir un plan de stockage optimisé pour aider les planificateurs de zones de stockage dans leurs tâches, et ensuite améliorer la productivité d'un terminal maritime, en rationalisant l'utilisation des équipements que ça soit les véhicules de transport interne ou les grues de cour, et finalement définir des itinéraires optimaux pour chaque véhicule pour la réussite des missions qui lui sont affectées.

Mots clés : Optimisation, Allocation d'espace de stockage, transfert des conteneurs, Historique des données, couplage de la simulation et optimisation, Méta-heuristiques et heuristiques de résolution

Abstract: Throughout this thesis, we focus our work on port management issues that slightly affect the productivity of a container terminal. Either our study was based on the history of existing work in the literature, by using actual data from our port of study, or by using a database, that contains the history of arrivals / departures of vessels. Which led us to select three major problems in a container terminal: the problem of container transfer by internal container transfer vehicles, the problem of allocation of storage space and the problem of management of the Yard. For this last one, we were facing reference to the first two problems studied. For the three problems treated, we used the data from theoretical field measurements, so we took advantage of existing data histories as well as existing new platforms to validate our proposed mathematical model (Marine management system, Marin Traffic ...). We realized a detailed state of the art of literature in order to propose a new mathematical modeling, and resolution approaches. Finally, the solutions has been validated thanks to the coupling of optimization and simulation. The main objectives of this thesis are : provide an optimized storage plan to assist storage area planners in their tasks; then, improve the productivity of a containers terminal, by rationalizing the use of equipment whether it be transport vehicles internal or yard cranes, and ultimately define optimal routes for each vehicle for the successful completion of the containers assignment to the storage area.

Keywords: Optimization, Storage Space Allocation, Containers Transfer, Metaheuristics, Data History, Coupling simulation and optimization, Metaheuristics and heuristics of resolution.

