

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa
Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire rédigé en vue d'obtention du Diplôme de Master
en Mathématiques Appliquées
Spécialité :
Optimisation et Fiabilité des Réseaux de Communication

Vers une approche d'optimisation basée sur l'IoT pour la
minimisation des shiftings cas de l'entreprise BMT



Réalisé par :

SOUAGUI Fifi
MERZOUK Emilia

Soutenu le 03/07/2024, devant le jury composé de :

Mr SLIMANI Hachem	Professeur	Président	à l'université de Béjaïa.
Mme BOULFEKHAR Samra	Professeur	Examinatrice	à l'université de Béjaïa
Mme RAHMOUNE Fouzia	Professeur	Examinatrice	à l'université de Béjaïa
Mr ATMANI Mouloud	MCA	Encadrant	à l'université de Béjaïa
Mr BEZOUÏ Madani	Docteur	Co-encadrant	à CESI, NANCY, France.

Année Universitaire 2023 – 2024

Remerciements

En premier lieu, nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné courage, volonté et patience pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements les plus sincères et les plus profonds à nos encadrants **Mr ATMANI Mouloud** et **Mr BEZOUÏ Madani** d'avoir accepté de diriger ce modeste travail avec une grande patience ainsi que beaucoup de soin et de minutie. Nous les remercions encore pour le temps qu'ils nous ont consacré en vue de nous orienter durant la réalisation de notre travail.

Nos remerciements vont également également aux responsables de la BMT pour nous avoir accepté au sein de cette dernière. Nous tenons une place particulière à **Mr BOUMERZOUÏ Moussa**.

Nos vifs remerciements vont également aux **membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Nous souhaitons également remercier l'unité de Recherche **LaMOS (Modélisation et Optimisation des Systèmes)** pour avoir mis à notre disposition les équipements IoT nécessaires pour la réalisation de notre travail.

On n'oublie pas nos **chers parents** pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos **proches et amis**, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quelque soient les termes employés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincères.

À mes parents adorés, ce mémoire est le fruit de votre amour inconditionnel et de votre soutien sans faille. Vos sacrifices, vos conseils avisés, et vos encouragements m'ont permis de croire en moi et de poursuivre mes rêves avec détermination. Vous êtes les piliers de ma vie, toujours présents pour me guider et me réconforter.

À ma chère sœur Imane, ainsi qu'à mes frères adorés Amine et Badis, votre présence et votre soutien ont enrichi ma vie de manière inestimable. Je vous aime infiniment.

À ma meilleure amie Warda, à toi, qui es toujours là avec ton soutien et ton amitié précieuse. Merci d'être toujours à mes côtés.

À ma chère binôme Emilia, avec qui j'ai partagé cette expérience enrichissante. Ta collaboration, ton dévouement et ton esprit d'équipe ont été essentiels pour atteindre nos objectifs communs.

À moi-même, ce travail est dédié à la personne que je suis devenue, forgée par les défis surmontés et les rêves poursuivis avec détermination. À travers les hauts et les bas de ce parcours, je célèbre chaque étape, chaque leçon apprise et chaque victoire obtenue. Que ce modeste travail soit un hommage à ma force intérieure, à ma résilience inébranlable et à ma capacité à croire en moi-même même dans les moments difficiles.

Enfin, je dédie ce modeste travail à tous les gens qui m'ont soutenu de près ou de loin.

SOUAGUI Fifi

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à toutes personnes qui ont joué un rôle crucial dans sa réalisation, ainsi qu'à celles qui m'ont inspiré et soutenu tout au long de ce parcours.

En premier lieu, je remercie infiniment **mes chers parents**. Aucun mot ne pourra exprimer ce que je leur dois. Par leur soutien, leur patience, leur amour et tout ce qu'ils ont fait pour moi, qu'ils veuillent trouver dans ce travail le fruit de leurs sacrifices illimités.

À mon grand frère Amine et son épouse Abir, à mon petit frère Kouçeila sans oublier le chouchou de la maison, Anil, que j'aime énormément .

À la personne qui a été toujours à mes côtés tout au long de mon parcours, je te remercie énormément pour ses conseils, ses encouragements et sa bienveillance.

À mes merveilleuses amies Nada, Nihad, Chaima et bouchra , qui étaient toujours à mes côtés.

À ma très chère binôme Fifi .

La réussite n'est pas instantanée : elle est le fruit d'un travail assidu et d'une persévérance sans faille pour concrétiser vos rêves .

MERZOUK Emilia

Table des matières

Liste des figures	VI
Liste des algorithmes	VII
Liste des tables	VIII
<i>Liste des abréviations</i>	IX
<i>Introduction générale</i>	1
1 Présentation de l'entreprise et position du problème	3
Introduction	4
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil BMT	4
1.1.1 Création de l'entreprise	4
1.1.2 Situation géographique de BMT	5
1.2 Structure de l'entreprise	5
1.2.1 Présentation des services d'accueil	7
1.3 Activité de l'entreprise BMT	7
1.4 Conteneurs	7
1.4.1 C'est quoi un conteneur ?	8
1.4.2 Types des conteneurs	8
1.5 Terminal à conteneur de BMT	12
1.5.1 Plan du terminal	12
1.5.2 Opérations du terminal	13
1.5.3 Outils de gestion du terminal	14
1.5.4 Capacité du terminal	15
1.5.5 Équipements de BMT	16
1.5.6 Procédures import/export de BMT	16
1.6 Position du problème	18
Conclusion	19
2 Fondamentaux de l'IoT et de l'optimisation pour la gestion des terminaux portuaires	20
Introduction	21
2.1 Fondement de l'IoT	21
2.1.1 Évolution de l'internet	21
2.1.2 Définition de l'internet des objets (IoT)	22

2.1.3	Historique d'IoT	23
2.1.4	Notion d'objets connecté	23
2.1.5	Domaines d'applications de l'IoT	25
2.1.6	Architecture de l'IoT	27
2.1.7	Composants d'un réseau IoT	28
2.1.8	Réseaux de capteurs dans le contexte de l'IoT	29
2.2	Généralités sur l'optimisation combinatoire	29
2.2.1	Définition de l'optimisation combinatoire	29
2.2.2	Notions de base sur l'optimisation combinatoire	29
2.2.3	Démarche en optimisation combinatoire	30
2.2.4	Complexité des problèmes	32
2.2.5	Méthodes de résolution	32
2.2.6	Applications de l'optimisation combinatoire	35
2.3	Contexte de l'IoT dans la gestion portuaire des conteneurs	35
2.3.1	Types de capteurs utilisés dans la gestion des conteneurs	36
2.3.2	Importance des capteurs dans la gestion portuaire	38
2.4	Optimisation combinatoire dans la gestion des terminaux portuaires	38
2.4.1	Problèmes d'optimisation Courants	38
2.5	Intégration de l'IoT avec les techniques d'optimisation combinatoire	39
	Conclusion	39
3	Optimisation intelligente des conteneurs : modélisation mathématique et technologie de capteurs	40
	Introduction	41
3.1	Opérations de débarquement au niveau de BMT	41
3.2	Objectifs et principes de notre travail	41
3.3	Hypothèses de travail	42
3.4	Prototype de détection des emplacements vides dans le terminal à conteneurs	43
3.4.1	Importance de la détection des emplacements vides	43
3.4.2	Processus de détection des emplacements vides	43
3.5	Affectation des conteneurs dans un terminal maritime	45
3.5.1	Construction du modèle mathématique	45
3.6	Vers un système de booking efficient	47
3.6.1	Paramètres de réservation	47
3.6.2	Génération des dates et heures de sortie avec réservation	47
3.6.3	Algorithme pour générer les dates et heures de Sortie	49
3.7	Optimisation des shifting	50
3.7.1	Approche heuristique	50
3.7.2	Approche heuristique pour la gestion des conteneurs	51

4	Implémentation, tests et résultats	53
	Introduction	53
4.1	Environnements utilisés	54
4.1.1	Anaconda, Python	54
4.1.2	IBM ILOG CPLEX	54
4.1.3	Le langage OPL	55
4.1.4	Arduino IDE	56
4.2	Scénario d'implémentation	56
4.3	Présentation des résultats	58
4.3.1	Paramètres de simulation	58
4.3.2	Détection des emplacements vides	58
4.3.3	Pré-affectation des conteneurs au sein du terminal	63
4.3.4	Génération des dates de sorties des conteneurs	66
4.3.5	Optimisation des shiftings	69
	Conclusion	71
	Conclusion et perspectives	73
	Bibliographie	77
	Résumé	77

Table des figures

1.1	Création de BMT [21]	4
1.2	Situation géographique de BMT [35].	5
1.3	Organigramme de l'entreprise [20].	6
1.4	Conteneur standard.	9
1.5	Conteneur toit ouvert.	9
1.6	Conteneur à plateaux.	10
1.7	Conteneur frigorifique.	10
1.8	Conteneur citerne.	11
1.9	Conteneur ventilé.	11
1.10	Plan du terminal de BMT .	12
1.11	Procédure BMT [23].	18
2.1	Évolution de l'internet [5]	22
2.2	Dimension IOT [39].	22
2.3	Fonctions d'un objet connecté [34]	24
2.4	Ville intelligente.	25
2.5	Maison intelligente.	26
2.6	Iot industriel.	26
2.7	Port intelligent.	27
2.8	Architecture IoT [5].	28
2.9	Composants d'un système IoT [34].	28
2.10	Démarche de résolution d'un problème d'optimisation combinatoire [44].	30
2.11	Méthode de résolution d'un problème d'optimisation combinatoire	33
2.12	Capteur infrarouge.	37
2.13	Capteurs de Température et d'humidité.	37
2.14	Capteur de positionnement GPS.	37
3.1	Diagramme illustrant la détection des emplacements vides.	44
4.1	Jupyter notebook.	54
4.2	Ibm Cplex .	55
4.3	Arduino.	56
4.4	Diagramme illustrant le scénario d'implémentation .	57
4.5	Carte Arduino [33].	59

4.6	Cable USB.	59
4.7	Capteur infrarouge.	59
4.8	Breadboard [28].	60
4.9	écran LCD.	60
4.10	implémentation sur arduino.	61
4.11	Prototype de détection des emplacements vides	61
4.12	Résultats du code Arduino	62
4.13	Détection des emplacements vides	62
4.14	Schéma de modèle	63
4.15	Fenêtre des options de modèle	64
4.16	Schéma d'exécution de modèle	65
4.17	Affectation initiale des conteneurs	66
4.18	Bibliothèques nécessaires	67
4.19	Paramètres	67
4.20	Génération des dates de sorties	67
4.21	dates de sorties générées	68
4.22	Histogramme de distribution des conteneurs	69
4.23	Affectation finale des conteneurs	71

Liste des Algorithmes

1	Génération des dates de sortie des conteneurs	49
2	Trier et sélectionner des activités	51
3	Algorithme heuristique pour minimiser les shiftings	51

Liste des tableaux

1.1	La capacité du terminal[18].	15
1.2	Les équipements du terminal [19].	16
4.1	Paramètres de simulation	58

Liste des abréviations

- **API** : application programming interface.
- **ARPANET** : Advanced Research Projects Agency Network
- **BMT** : Béjaia Mediterranean Terminal.
- **CDN** : Centre de Digitalisation et du Numérique.
- **CDO** : Container Delivery Order.
- **CMR** : Container Movement Reques.
- **CPE** : Conseil des Participations de Béjaia.
- **CRM** : Container Request Movement.
- **CTMS** : Container Terminal Management System.
- **CSV** : comma-separated values.
- **DFC** : Direction des Finances et comptabilité.
- **DG** : Direction Générale.
- **DM** : Direction Marketing.
- **DO** : Direction des opérations.
- **DRH** : Direction des ressources humaine.
- **DT** : Direction technique.
- **EPB** : Entreprise Portuaire de Béjaia.
- **GPS** : Global Positioning System.
- **IdO** : Internet des objets.
- **IOT** : Internet of things.
- **IR** : Capteur infrarouge.
- **ISO** : Organisation internationale de normalisation.
- **LCD** : Liquid crystal display.
- **MHC** : Grues mobiles portuaires.
- **NFC** : Near Field Communication.
- **NP** : Non-deterministic Polynomial.
- **OC** : Optimisation combinatoire.

- **OCR** : Optical Character Recognition.
- **OPL** : Programming Language.
- **PDS** : Position Determining System.
- **PL** : Programmation linéaire.
- **PLNE** : Programmation linéaire en nombre entier.
- **PSE** : PORTEK Systems and Equipment.
- **QCs** : Quay Crane.
- **RCSF** : Réseaux de capteurs sans fil.
- **RDS** : Radio Data System.
- **RFID** : Radio Frequency Identification.
- **RTG** : Rubber Type Gantry.
- **TSP** : Traveling-Salesman Problem.
- **UIT** : Union Internationale des Télécommunication.
- **WWW** : World Wide Web.
- **ZEP** : Zone Extra Portuaire.

Introduction générale

La gestion des conteneurs dans les ports est devenue un enjeu crucial pour le commerce international, particulièrement avec l'augmentation constante du volume des échanges mondiaux. Les terminaux portuaires, véritables points névralgiques, voient transiter chaque jour des milliers de conteneurs nécessitant une organisation méticuleuse pour garantir une gestion efficace et fluide. Une gestion optimale permet de réduire les coûts, d'accélérer les délais de traitement, d'améliorer la sécurité et de garantir la traçabilité des marchandises. Cependant, cette tâche se complexifie avec l'accroissement des volumes à traiter et la diversité des opérations à coordonner.

Les terminaux doivent gérer des flux massifs de données en temps réel et coordonner diverses opérations telles que le déchargement, le stockage et l'expédition, tout en optimisant l'utilisation des ressources disponibles comme l'espace et les équipements. La complexité de ces tâches augmente avec la taille et l'activité du port, rendant impératif le recours à des solutions innovantes pour maintenir la compétitivité et l'efficacité des opérations. Parmi les défis les plus pressants figurent la détection des emplacements vides, l'affectation optimale des conteneurs et la planification efficace des opérations de débarquement et d'embarquement.

L'Internet des Objets (IoT) offre une solution prometteuse pour surmonter ces défis. Grâce à l'intégration de capteurs et de dispositifs connectés, il est possible de collecter et d'analyser des données en temps réel, permettant ainsi une gestion proactive et optimisée des opérations portuaires. Les capteurs peuvent suivre les mouvements des conteneurs, détecter les emplacements disponibles et surveiller les conditions environnementales. En parallèle, l'application de modèles mathématiques et de techniques d'optimisation combinatoire permet de résoudre des problèmes complexes liés à l'affectation des conteneurs, à la gestion des emplacements vides et à la planification des opérations. Ces techniques, en traitant de grands ensembles de données, produisent des solutions efficaces pour améliorer la performance globale du terminal.

Ce mémoire, réalisé au sein du Département de Recherche Opérationnelle de l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, se concentre sur l'application de l'IoT et des méthodes d'optimisation combinatoire pour améliorer la gestion des conteneurs dans un terminal portuaire. Il explore comment ces technologies peuvent être combinées pour offrir des solutions innovantes et intelligentes, transformant ainsi la gestion des ressources et des opérations portuaires.

Notre travail se compose de quatre chapitres :

- Le premier chapitre introduit l'entreprise BMT. Il décrit également les activités de l'entreprise, en particulier celles liées aux conteneurs, et présente le terminal à conteneurs de BMT, ses opérations, et ses équipements. Enfin, il définit la problématique à laquelle cette étude répond.
- Le deuxième chapitre est composé de deux parties : la 1ère explore les bases de l'internet des Objets (IoT), son évolution. Il couvre aussi l'architecture et les composants des réseaux IoT, et examine les réseaux de capteurs. En parallèle, il introduit dans la deuxième partie les principes de l'optimisation combinatoire, ses méthodes de résolution, et ses applications, en particulier dans le contexte de la gestion portuaire des conteneurs.
- Le troisième chapitre propose un prototype pour la détection des emplacements vides dans le terminal à conteneurs et décrit le processus de détection. Il inclut également une modélisation mathématique pour l'affectation des conteneurs et présente un système de réservation efficient pour la gestion des dates et heures de sortie des conteneurs.
- Et enfin le quatrième chapitre présente le scénario d'implémentation et les résultats obtenus, y compris les paramètres de simulation, la détection des emplacements vides, la pré-affectation des conteneurs, et l'optimisation des opérations de déplacement des conteneurs (shiftings).

1

Présentation de l'entreprise et position du problème

Sommaire

Introduction	4
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil BMT	4
1.2 Structure de l'entreprise	5
1.3 Activité de l'entreprise BMT	7
1.4 Conteneurs	7
1.5 Terminal à conteneur de BMT	12
1.6 Position du problème	18
Conclusion	19

Introduction

Avec l'évolution du phénomène de conteneurisation, le transport maritime a connu de grands développements, au cours des quatre dernières décennies et devient de nos jours de plus en plus important et représente une alternative crédible et intéressante au transport terrestre et aérien. Le conteneur comme partie essentielle du concept d'unité de chargement a réalisé une importance incontestable dans le transport maritime international.

BMT (Bejaia Mediterranean Terminal) est le premier terminal de ce type dans notre pays, elle dispose de plusieurs engins qui assurent les différentes opérations liées à son fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la présentation détaillée de l'entreprise BMT notamment à la gestion des conteneurs. Par la suite, nous allons essayer de dégager une problématique.

1.1 Présentation de l'organisme d'accueil BMT

1.1.1 Création de l'entreprise

BMT a été créée sur décision du Conseil des Participations de l'Etat (CPE) en Mai 2004. C'est une jointe venture entre l'Entreprise Portuaire de Béjaia (EPB) et PORTEK Systems and Equipment (PSE), une société singapourienne comme la figure 1.1 l'indique. BMT est spécialisée dans la gestion et l'exploitation du terminal à conteneurs du port de Béjaia [21].



FIGURE 1.1 – Création de BMT [21]

1.1.2 Situation géographique de BMT

Implanté au centre du pays, au cœur de la méditerranée dans le nord du continent africain, le port de Bejaia occupe une situation géographique stratégique. Il dessert un hinterland (arrière-pays) important et très vaste. La ville, le port et le terminal à conteneurs de Bejaia disposent de ce fait de voies de communication reliant l'ensemble des routes du pays, des voies ferroviaires et à proximité d'un aéroport international.

Position GPS : l'attitude nord : $36^{\circ} 45' 24$ et position est : $05^{\circ} 50' 5$

La figure ci-dessous montre la position géographique de BMT, mettant en évidence son emplacement stratégique.

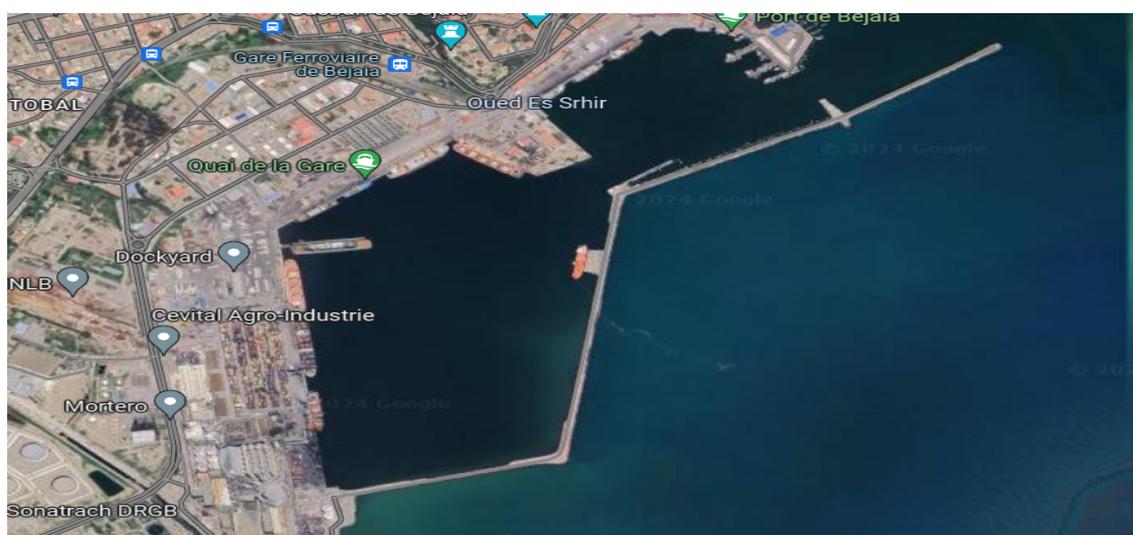


FIGURE 1.2 – Situation géographique de BMT [35].

1.2 Structure de l'entreprise

L'entreprise BMT est composée de 5 directions importantes [20] :

1. **Direction Générale (DG) :** le directeur général est le pilier central de l'entreprise. Il exerce le pouvoir de décision, d'administration et de détermination des orientations pour les différentes entités. Il assure également la liaison entre les différentes directions de l'entreprise.
2. **Direction des ressources humaines (DRH) :** elle est chargée de mettre en place des systèmes de gestion intégrés qui s'alignent avec la stratégie de BMT, visant ainsi à atteindre ses objectifs tout en assurant une adéquation entre les exigences économiques et les attentes du personnel.
3. **Direction des finances et comptabilité :** elle assure l'enregistrement de toutes les opérations effectuées par l'entreprise tout au long de l'année. Cette fonction est répartie entre deux services distincts.

- **Service des finances** : il est responsable à la fois du règlement de toutes les factures de l'entreprise et de l'encaissement de toutes les créances émises au niveau de la banque.
 - **Service de comptabilité** : il est chargé de contrôler et d'enregistrer toutes les factures d'achat, de prestation et d'investissement de l'entreprise.
4. **Direction technique** : elle est chargée d'assurer à la fois la maintenance préventive et corrective des engins présents dans le parc à conteneurs.
 5. **Direction des opérations** : elle est responsable de planifier les escales au parc à conteneurs ainsi que de planifier les ressources nécessaires. De plus, elle gère les opérations de manutention telles que la réception des navires porte-conteneurs, ainsi que le chargement et le déchargement des conteneurs. En outre, elle supervise les opérations d'aconage, comprenant le suivi des livraisons, le dépotage, la mise à disposition des conteneurs vides, le traitement des conteneurs frigorifiques et la sécurité au sein du terminal.
 6. **Direction marketing** : elle est restructurée récemment après la jonction des trois départements (commercial, marketing et informatique).

La figure 2.3 ci-dessous présente l'organigramme de l'entreprise, mettant en évidence la structure hiérarchique de BMT :

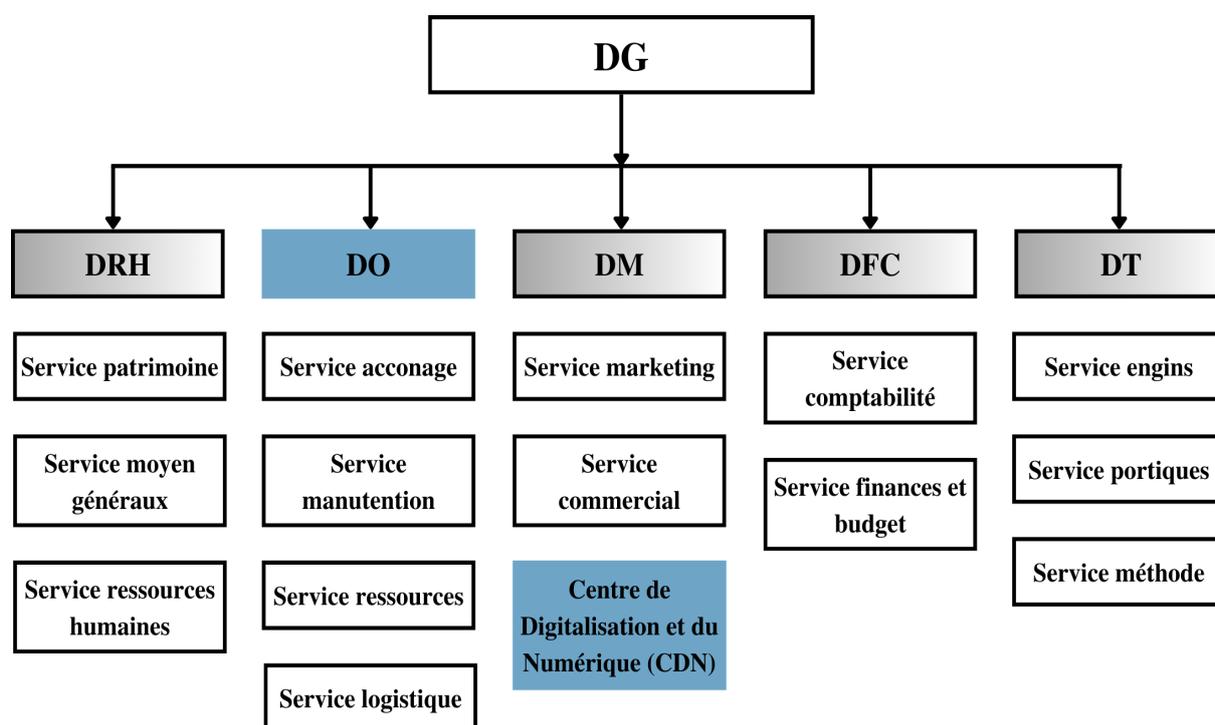


FIGURE 1.3 – Organigramme de l'entreprise [20].

1.2.1 Présentation des services d'accueil

Pour bien cerner notre travail, nous avons été accueillies au sein de deux services :

Centre de digitalisation et du numérique (CDN)

Il s'occupe de la gestion et l'amélioration des systèmes du port, mise en place d'une plate-forme d'échange de données, dématérialisée et interactive entièrement dédiée à la fluidification des passages portuaires et à la facilitation du commerce, et d'offrir un service global au profit des acteurs portuaires. Ce service assure plusieurs fonctions telles que :

- La maintenance du parc informatique de l'entreprise ;
- Audit et amélioration du système d'information ;
- Développement de nouvelles applications aux différentes structures ;
- Sauvegarde et contrôle des données de l'entreprise.

Direction des opérations

La direction des opérations joue un rôle très important dans le fonctionnement des prestations transitaires afin de satisfaire les besoins des clients en qualité et en temps, incluant la logistique, les ressources et les tâches d'acconage et de manutention des conteneurs.

1.3 Activité de l'entreprise BMT

L'activité principale de BMT est la gestion et l'exploitation du terminal à conteneurs.

- Traiter dans les meilleures conditions de délais, de coûts et de sécurité, l'ensemble des opérations qui ont un rapport avec le conteneur ;
- La manutention sur navire implique à la fois le chargement et le déchargement des conteneurs, ainsi que leur entreposage dans les zones de stockage ;
- Le service d'acconage comprend la manipulation des marchandises dans les zones spécialisées ainsi que leur livraison ;

Pour cela, elle dispose d'équipements performants et d'un système informatisé (CTMS) dédié à la logistique. Cela lui permet non seulement d'offrir des services de haute qualité, mais aussi de garantir l'efficacité et la fiabilité afin de répondre aux divers besoins des clients[21].

1.4 Conteneurs

La conteneurisation est un concept clé dans le domaine du transport maritime et de la logistique. Il s'agit de la pratique consistant à transporter des marchandises dans des conteneurs standardisés, tels que les conteneurs métalliques de dimensions réglementées (comme les conteneurs standards de 20 pieds ou de 40 pieds) et de différentes catégories (frigorifique, toit ouvrant, plateaux, citerne, ventilé).

La conteneurisation a révolutionné le transport de marchandises à l'échelle mondiale au cours du 20ème siècle. Initialement développée par Malcolm McLean dans les années 1950, elle a standardisé le processus de chargement et de déchargement des cargaisons grâce à l'utilisation de conteneurs standardisés, le conteneur devient dès le milieu des années 60 une boîte nommée dont les standards sont définitivement fixés en 1974 par l'ISO (Organisation internationale de normalisation).

Aujourd'hui, elle demeure le pilier du commerce mondial, facilitant les échanges commerciaux entre les nations et contribuant à la croissance économique mondiale [15].

1.4.1 C'est quoi un conteneur ?

Le conteneur est un engin de transport ayant de multiples caractéristiques :

- Résistant, il permet un usage répété ;
- Permanent, il est conçu pour durer de nombreuses années ;
- Standardisé, ses dimensions normalisées au niveau international facilitent le transport des marchandises d'un point à un autre sans ruptures de charge ;
- Multimodal, il peut être utilisé pour un ou plusieurs modes de transport ;
- Manipulable, il dispose de pièces de coin permettant de le manutentionner, de le gerber (empilage des conteneurs) ou de l'assujettir facilement ;
- Adaptable, il permet de transporter tous types de cargaisons, y compris des engins très volumineux ou des denrées périssables [48] ;

Le conteneur se distingue comme le moyen de transport idéal, offrant un impact significatif sur l'intégrité des marchandises. Grâce à sa structure robuste et sécurisée, il assure une protection optimale contre les chocs, les intempéries et d'autres facteurs environnementaux. Ainsi, les marchandises restent préservées et intactes tout au long de leur transit [48].

1.4.2 Types des conteneurs

Il existe divers types de conteneurs, on en cite :

Conteneur standard (Dry)

Un conteneur est une unité de chargement métallique de forme parallélépipède. Il se présente comme une boîte fermée, équipée d'un plancher, de parois latérales, de parois d'extrémités et d'un toit rigide. Au moins l'une des parois d'extrémités est munie de portes. Le conteneur le plus courant est celui destiné à un usage général, souvent appelé conteneur "dry". Il est conçu pour transporter des marchandises dites "sèches", telles que des cartons, des caisses, des sacs ou des palettes.

Les conteneurs "dry" sont soumis à des normes internationales. Les trois tailles les plus répandues sont le 20 pieds (20'), le 40 pieds (40') et le 40 pieds high cube (40' HC), qui présente une hauteur augmentée [40].



FIGURE 1.4 – Conteneur standard.

Conteneur toit ouvert (Open top)

Les conteneurs open top sont identiques aux conteneurs à usage général, hormis que leur toit est mobile (remplacé par une bâche). Ces conteneurs sont conçus pour faciliter l’empotage et le dépotage par le haut mais en aucun cas pour charger des marchandises en dépassement de hauteur. Ils peuvent se substituer aux conteneurs “dry”.

Les conteneurs OPEN TOP demi hauteur basculant sont spécialement conçus pour le transport de minerais en vrac.



FIGURE 1.5 – Conteneur toit ouvert.

Conteneur à plateaux (Flat rack)

Les conteneurs Flat Racks peuvent être équipés de parois rigides aux deux extrémités ou être ouverts. Leur principal but est de transporter des marchandises volumineuses, lourdes ou non standard. Les Flat Racks avec des extrémités rabattables permettent également de charger des cargaisons extra-longues. Leur plancher est conçu pour supporter des colis

lourds et, lorsqu'ils sont vides, ils peuvent être empilés pour faciliter leur repositionnement.



FIGURE 1.6 – Conteneur à plateaux.

Conteneur frigorifique(Reefer)

Le conteneur frigorifique, également appelé en Anglais "reefer", est spécialement conçu pour transporter des marchandises sous température contrôlée. Il est équipé d'un système de maintien de la température et nécessite une alimentation électrique constante, que ce soit à quai, sur un navire, un camion ou un train. Lors du chargement, il est crucial de respecter certaines règles pour garantir une circulation d'air optimale et une répartition homogène de la marchandise, favorisant ainsi le maintien de la température et l'élimination des gaz indésirables.



FIGURE 1.7 – Conteneur frigorifique.

Conteneur citerne(tank citerne)

Un conteneur maritime se compose de deux parties : la citerne et le cadre. Ce type de conteneur, appelé conteneur-citerne, est spécialement conçu pour le transport de liquides, qu'ils soient dangereux ou non, y compris les produits alimentaires. Ces conteneurs sont équipés d'accessoires destinés à faciliter le chargement et le déchargement du contenu, ainsi que de dispositifs de sécurité pour assurer une manipulation sûre.



FIGURE 1.8 – Conteneur citerne.

Conteneur ventilé

Les conteneurs ventilés sont des conteneurs spécialement conçus pour permettre une circulation d'air contrôlée à l'intérieur. Ils sont utilisés pour le transport de marchandises sensibles à l'humidité, à la chaleur ou à d'autres conditions environnementales spécifiques. Ces conteneurs peuvent être équipés de systèmes de ventilation intégrés ou de dispositifs permettant de réguler le flux d'air, garantissant ainsi des conditions optimales pour le transport de produits tels que des fruits et légumes frais, des produits pharmaceutiques sensibles, ou des marchandises nécessitant une ventilation constante.



FIGURE 1.9 – Conteneur ventilé.

1.5 Terminal à conteneur de BMT

Cette section aborde les divers aspects du terminal à conteneurs, incluant le plan du terminal, sa capacité, les opérations effectuées, les équipements et outils de gestion utilisés, ainsi que les procédures d'importation et d'exportation.

1.5.1 Plan du terminal

la figure suivante 1.10 représente le plan du terminal :

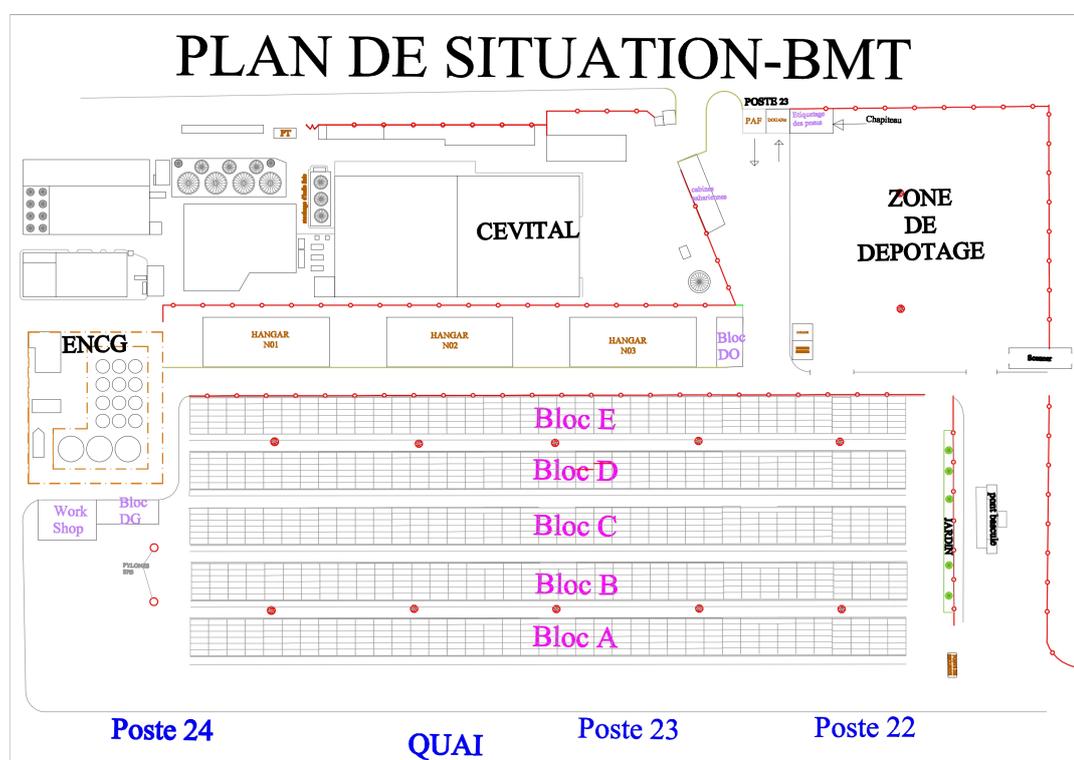


FIGURE 1.10 – Plan du terminal de BMT .

Le terminal à conteneurs se décompose en deux grandes zones :

La partie quai

Le rôle de cette zone est de servir de point de transfert des conteneurs entre le terminal et les navires.

La partie terrestre

Cette partie est subdivisée en quatre (04) zones :

- **Parc à conteneurs pleins (importés)** : dans cette cour sont entreposées temporairement les conteneurs déchargés des navires et destinés à être livrés aux clients par voie ferroviaire ou routière. Cette zone est répartie en cinq (05) blocs (A, B, C, D, E) disposés parallèlement au quai, chaque bloc est constitué de six (06) tronçons adjacents horizontaux formant les rangées et de 54 tronçons adjacents verticaux formant les travées, de plus les conteneurs sont stockés en pile de six (06) niveaux.

La classification des conteneurs se fait en fonction de leur taille standard de 20 pieds ou de 40 pieds, ainsi que de leur catégorie ou type spécifique. Cependant, il est important de noter que cette classification est aléatoire en raison des limitations d'espace au sein du terminal. Néanmoins, il existe des exceptions pour certains types de conteneurs, comme ceux transportant des marchandises dangereuses qui ont des emplacements dédiés dans le parc à feu, et les conteneurs frigorifiques qui sont stockés dans une zone spécifique, désignée par la zone E.

- **Zone visite** : dans cette zone s'effectue le contrôle des marchandises portées dans les conteneurs (service vétérinaire, phytosanitaire, ...etc.), les conteneurs ayant fait la visite seront soit transférés à la zone de stockage soit livrés à leur propriétaire.
- **Zone de dépotage-empotage** : dans cette zone s'effectue les opérations de dépotage et d'empotage tels que :
 1. **Empotage** : c'est l'opération de chargement des marchandises à l'intérieur d'un conteneur, il peut être effectué soit dans les locaux du client soit à l'intérieur du terminal.
 2. **Dépotage** : c'est l'opération de déchargement d'un conteneur de son contenu. Les marchandises dépotées sont livrées à leur propriétaire et les conteneurs vides sont transférés vers la ZEP (Zone Extra Portuaire) là où ils sont stockés temporairement avant d'être réclamés
- **Parc à conteneurs vides et empotés** : dans cette zone située près du quai sont stockés les conteneurs vides et empotés destinés à l'exportation. Tous les conteneurs vides sont stockés après leur restitution dans la ZEP située à trois kilomètres du port. Ceux qui sont réclamés par leur propriétaire sont rapprochés au terminal à l'aide des camions routiers et temporairement stockés dans cette zone avant qu'ils soient embarqués.

1.5.2 Opérations du terminal

Chaque année, BMT accueille un nombre important de navires pour lesquels il gère les opérations de planification, de manutention et d'acconage, en assurant un suivi précis et une traçabilité complète de toutes les opérations réalisées[22].

Opérations de planification :

- Planification des escales ;
- Planification déchargement/chargement ;
- Planification du parc à conteneurs ;
- Planification des ressources : équipes et moyens matériels.

Opérations de manutention :

- La réception des navires porte conteneurs ;
- Le déchargement des conteneurs du navire ;
- La préparation des conteneurs à embarquer ;
- Le chargement des conteneurs du navire ;
- Shifting de conteneurs ;
- Shifting de calles.

Opérations d'acconage :

- Transfert des conteneurs vers les zones d'entreposage ;
- Mise à disposition des conteneurs aux services de contrôle aux frontières ;
- Mise à disposition des conteneurs vides pour empotage ;
- Suivi des livraisons et des dépotages ;
- Gestion des conteneurs dans les zones de stockages ;
- Sécurité absolue sur le terminal.

1.5.3 Outils de gestion du terminal

Le CTMS (Container Terminal Management System) :

BMT dispose d'un système logiciel de gestion du Terminal à conteneurs moderne (CTMS) qui a pour objectif d'effectuer des activités en temps réel, d'assurer une bonne planification du Terminal, d'offrir un niveau élevé de l'efficacité opérationnelle pour ses clients, d'améliorer le service et s'adapter aux besoins des clients. Le CTMS assure plusieurs tâches telles que [43] :

- Le suivi du processus d'importation et d'exportation ;
- La gestion de retour des conteneurs vides au terminal ;
- La gestion des restitution de conteneur (vides ou pleins) ;
- Le suivi de dépotage des conteneurs ;
- Planification des navires et du parc à conteneur.

PDS (Position Determining System) :

Autrement dit le système de détection de positionnement, il permet de détecter tous les mouvements du conteneur en fournissant la position des appareils de manutention lorsque le conteneur est manipulé en employant le GPS (Gestion de Position par Satellite) [43].

RDS (Radio Data System) :

C'est un système qui englobe tous les éléments de transmission de données par radio fréquence. Il consiste à contrôler en temps réel les équipements de manutention de conteneurs et à assurer des cadences de chargement et déchargement plus rapides. Le RDS fonctionne sur une la base de transmission de données sans fil via les signaux hertzien numérique, opérant à une fréquence déterminée. La transmission sans fil maintient une liaison radio bilatéral entre un terminal mobile au niveau d'un poste de travail (au niveau des parcs à conteneur ou sur le quai) et le serveur principal sur lequel tourne le CTMS [43] .

Le OCR (Optical Character Recognition) :

C'est un système basé sur la reconnaissance des caractères, il est conçu pour identifier en temps réel tous les conteneurs entrant dans le terminal ou sortants. Il est doté d'une caméra à balayage linéaire ultra rapide et à haut résolution permettant de reconnaître l'image vidéo de chaque numéro d'identification inscrit sur les conteneurs entrants ou sortants du terminal et transmettant ce dernier au CTMS [43].

1.5.4 Capacité du terminal

Quais pour Accostage	longueur profondeur superficie du bassin nombre de postes	500m 12m 60h 04
Parc à Conteneurs Vides	capacité superficie	900 EPV 15200 m^2
Parc à Conteneurs pleins	capacité superficie	8300 EPV 78500 m^2
Parc à Conteneurs Reefers	capacité superficie	500 prises 2800 m^2
Zone empotage/ dépotage	capacité superficie	600 EPV 3500 m^2
Le parc à conteneurs	capacité superficie	10300 EPV 100000 m^2
Zone extra portuaire (à 3Km du port)	capacité superficie	5000 EPV 50000 m^2

TABLE 1.1 – La capacité du terminal[18].

1.5.5 Équipements de BMT

Le terminal à conteneurs BMT est le seul en Algérie à être suffisamment équipé en moyens et matériels spécialisés de manutention et de levage, ce qui réduit les temps d'escale et répond aux attentes ainsi qu'aux exigences des opérateurs.

Portiques de quai sur rail (QC)	Nombre Tonnage Type	02 40 tonnes Panamax
Portiques gerbeur sur pneus (RTG)	Nombre Tonnage Gerbage	09 40 tonnes 6 + 1
Remorques portuaires	Nombre Tonnage	16 40 tonnes
Chariots manipulateurs de vides	Nombre Tonnage	11 11 tonnes
Grues mobiles portuaires (MHC)	Nombre Tonnages	02 100 tonnes
Stackers	Nombre Tonnages	11 EPV 45 tonnes
Remorques routiers	Nombre Tonnage	40 36 tonnes
Chariots élévateurs	Nombre Tonnage	16 2.5, 3, 5, 10 tonnes

TABLE 1.2 – Les équipements du terminal [19].

1.5.6 Procédures import/export de BMT

À l'import

1. **La visite** : afin de garantir un suivi efficace des visites de conteneurs, le transitaire doit fournir certains documents au service des opérations pour les formalités administratives. Ensuite, l'agent de BMT établira une liste exhaustive des conteneurs à préparer pour les visites du lendemain, qu'il remettra ensuite au chef de la section exploitation. Ce dernier doit ensuite confirmer la disponibilité des conteneurs en zone de visite pour le lendemain.
2. **Le pesée** : le client est chargé de fournir les documents requis au service des Opérations. À ce stade, l'agent de BMT supervise le chargement du conteneur sur un camion-remorque afin de procéder à la pesée.
3. **La livraison** : afin d'assurer un suivi précis des livraisons, le transitaire doit fournir un dossier complet. Par la suite, l'agent en charge des opérations commerciales doit

vérifier la conformité du dossier pour établir le CDO (Container Delivery Order) et le saisir dans le fichier électronique dédié au suivi des livraisons.

4. **Le dépotage** : le transitaire doit fournir à l'agent de BMT chargé des dépotages un dossier spécifique pour l'opération. Ensuite, l'agent de BMT prépare le Container Movement Request (CMR), un document nécessaire pour le dépotage, qu'il remet au pointeur affecté à la zone de dépotage. Avant cela, l'agent chargé des opérations commerciales remettra au chef de section exploitation une liste de tous les conteneurs à préparer pour le lendemain. Après chaque confirmation de fin de dépotage, l'agent doit s'assurer que la lettre de dépotage soit signée par le responsable de section pour clôturer le dossier.

À l'export

1. **La restitution** : afin d'assurer un suivi précis des restitutions, l'agent responsable de BMT doit demander quotidiennement au pointeur une liste des conteneurs restitués, accompagnée de leurs positions au terminal. Il doit ensuite comparer les bons reçus avec le nombre total de conteneurs figurant sur la liste pour garantir l'exactitude des informations.
2. **Suivi des mises à quai** : l'agent responsable des restitutions est chargé de cette opération et doit garantir son bon déroulement en maintenant un fichier électronique à jour, où il enregistre les restitutions journalières. Il collabore avec le pointeur désigné pour le suivi des restitutions, et ensemble, ils assurent la mise à jour du fichier à la fin de chaque journée. La signature des mises à quai est effectuée par le chef de section.
3. **Mise à disposition** : le suivi des mises à disposition est de la responsabilité de l'agent chargé des opérations commerciales, en charge des mises à disposition. Il est donc chargé de maintenir un fichier électronique dédié aux conteneurs mis à disposition.
4. **Empotage** : le client a la liberté d'effectuer cette opération soit à l'intérieur du terminal à conteneurs (empotage à quai), soit à l'extérieur (empotage externe) dans ses propres locaux.

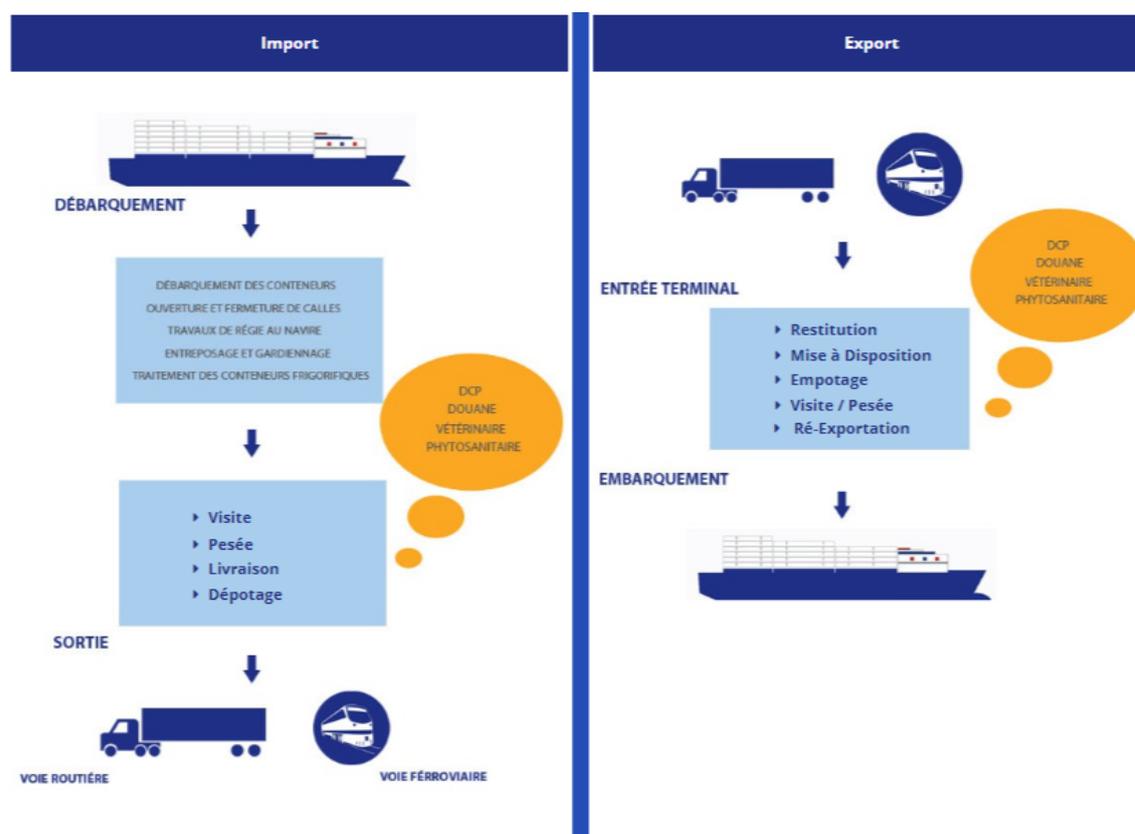


FIGURE 1.11 – Procédure BMT [23].

1.6 Position du problème

BMT, à l'instar de nombreux acteurs portuaires, est confrontée à des défis logistiques complexes liés à la gestion des conteneurs. Chaque jour, des centaines de conteneurs doivent être manœuvrés et placés dans des emplacements spécifiques au sein du terminal, cette tâche doit être planifiée car chaque conteneur doit être positionné en fonction de sa taille et de sa catégorie.

Dans les terminaux portuaires, des opérations efficaces de gestion des conteneurs sont essentielles pour réduire les coûts, augmenter la productivité et minimiser les délais de livraison. L'un des principaux défis est la gestion du mouvement des conteneurs, qui se produit lorsqu'un conteneur doit être déplacé plusieurs fois pour accéder à d'autres conteneurs. Généralement, cette tâche est très fastidieuse et gourmande en temps et en énergie.

Le principal problème à résoudre est de minimiser le nombre de mouvements de conteneurs nécessaires pour accéder à un conteneur spécifique dans un terminal portuaire. Ce phénomène, appelé « shifting », entraîne une augmentation des coûts d'exploitation, une augmentation des délais d'attente et un risque d'endommagement des conteneurs.

Conclusion

Ce chapitre a permis de faire un tour d'horizon de l'entreprise BMT, en mettant en oeuvre sa création, sa structure organisationnelle, et ses activités principales.

Nous avons également indiqué l'importance de la conteneurisation dans le secteur du transport maritime, ainsi que les divers types de conteneurs utilisés par l'entreprise BMT.

L'exposition de la problématique pose les bases essentielles pour les analyses et recommandations futures. Cela nous permet d'identifier les axes d'amélioration et les stratégies à mettre en oeuvre pour optimiser la gestion et l'exploitation du Terminal à conteneurs de Béjaia.

Dans ce qui suit, en se contentant de l'application des méthodes de la recherche opérationnelle et de l'informatique, nous allons résoudre le problème, ce qui offre de nombreux avantages pour BMT, tels que la réduction des coûts opérationnels, l'amélioration de la productivité, la diminution des délais de livraison et la réduction des risques de dommages aux conteneurs.

2

Fondamentaux de l’IoT et de l’optimisation pour la gestion des terminaux portuaires

Sommaire

Introduction	21
2.1 Fondement de l’IoT	21
2.2 Généralités sur l’optimisation combinatoire	29
2.3 Contexte de l’IoT dans la gestion portuaire des conteneurs .	35
2.4 Optimisation combinatoire dans la gestion des terminaux portuaires	38
2.5 Intégration de l’IoT avec les techniques d’optimisation combinatoire	39
Conclusion	39

Introduction

La gestion des terminaux portuaires représente un défi complexe, en raison de la nécessité d'optimiser la gestion des déplacements des conteneurs (shifting) et de garantir des délais de traitement rapides. Avec l'augmentation constante du volume de marchandises transitant par les terminaux portuaires, il devient impératif d'adopter des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité et la performance des opérations portuaires. Dans ce contexte, l'internet des objets (IoT) et l'optimisation combinatoire émergent comme des outils puissants et complémentaires pour relever ces défis.

Dans ce chapitre, nous explorerons les fondements de l'IoT et ses applications spécifiques dans la gestion des conteneurs portuaires, ainsi que les principes de l'optimisation combinatoire et comment ils peuvent être appliqués pour résoudre les problèmes complexes de gestion des terminaux.

2.1 Fondement de l'IoT

2.1.1 Évolution de l'internet

Avant l'avènement d'internet, la communication et le partage d'informations étaient limités par des moyens plus traditionnels et locaux (téléphone fixe, SMS).

La vie quotidienne de millions de personnes a été bouleversée par l'Internet, qui nous relie les uns aux autres. Internet a parcouru un long chemin depuis sa création dans les années 1960 sous le nom d'ARPANET. Depuis lors, de nombreux nouveaux protocoles ont vu le jour et leur déclin, et de nombreuses nouvelles utilisations et capacités de ce que nous pouvons faire avec cette technologie ont été explorées, dans sa deuxième phase le World Wide Web (WWW) a été introduit, facilitant l'accès et la navigation sur l'internet (Google, Wikipedia, Gmail, etc). Lors de la troisième étape de l'évolution on parle du Web 2.0, les données statiques sont devenues transactionnelles. L'achat et la vente de produits, ainsi que la prestation de services, ont vu le jour. Cette phase a été marquée par l'essor d'entreprises telles qu'eBay et Amazon.com. La quatrième étape correspond au Web « social ». Des sociétés telles que Facebook, Twitter et Viber sont devenues extrêmement populaires et lucratives en donnant aux internautes des moyens de communiquer, de rester en contact et de partager des informations (textes, photos et vidéos) avec leurs amis, leur famille et leurs collègues [12].

Aujourd'hui, Internet retrouve une nouvelle utilisation très répandue sous le nom d'Internet des objets.

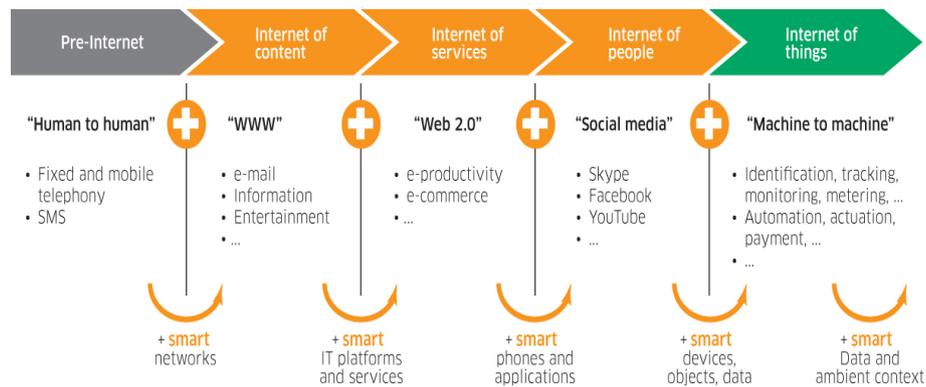


FIGURE 2.1 – Évolution de l'internet [5]

2.1.2 Définition de l'internet des objets (IoT)

L'internet des objets ou bien « Internet of Things (IoT) » en anglais est « **un réseau qui relie et combine les objets avec l'Internet, en suivant les protocoles qui assurent leurs communications et échange d'informations à travers une variété de dispositifs [32]** ».

l'IoT peut se définir selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), l'Internet of Things (IoT) comme une :

"infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution [39]".

L'internet des objets a introduit une nouvelle dimension 2.2 aux technologies de l'information et de la communication comme le montre la figure : en plus des deux dimensions temporelle et spatiale qui permettent aux personnes de se connecter de n'importe où à n'importe quel moment, nous aurons une nouvelle dimension "objet" qui leur permettra de se connecter à n'importe quel objet.[39]

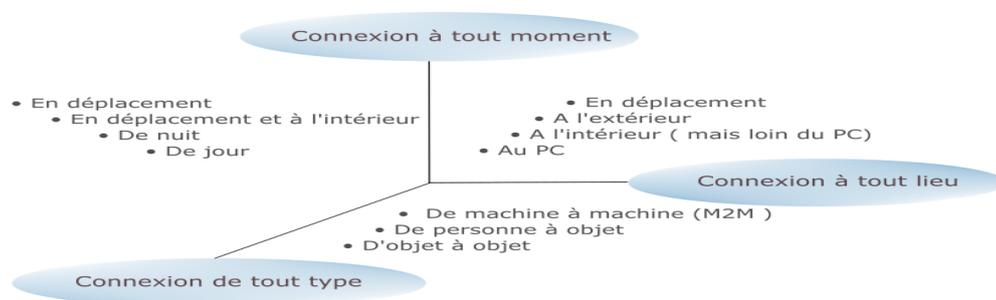


FIGURE 2.2 – Dimension IOT [39].

2.1.3 Historique d'IoT

Le premier objet connecté était un distributeur de coca-cola à l'université de Carnegie Mellon en 1980, lorsque un étudiant : David Nichols a voulu suivre à distance l'état de stock du distributeur pour ne pas se déplacer lorsque c'est vide [24].

Le terme 'Internet des objets' a été utilisé pour la 1ere fois en 1999 par Kevin Ashton [50], alors qu'il travaillait chez Procter & Gamble, a proposé d'installer des puces d'identification par radiofréquence (RFID) sur les produits pour les suivre tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

Il promet désormais de changer nos vies grâce aux objets connectés. Ce développement est un concept réalisant la vision de l'informatique ubiquitaire, ou la technologie deviendra active dans l'environnement des utilisateurs, intégrée naturellement à l'intérieur des objets du quotidien, elle se présente sous la forme d'appareils spécialisés et simples d'emploi, capables de communiquer au travers de plusieurs types de réseaux sans fil : liseuses numériques, télévisions et montres connectées, ordinateurs de bord, téléphones intelligents, etc.

2.1.4 Notion d'objets connecté

L'IoT repose avant tout sur les objets connectés. Un objet connecté est un objet capable de communiquer diverses informations à un autre objet via Internet [41].

Le concept d'objet connecté va du simple capteur à l'objet intelligent. C'est-à-dire que l'objet peut avoir des fonctionnalités simples (Capturer, transmettre des données), telles que la détection de la lumière ou la mesure de la température, jusqu'au traitement des données pour aider les utilisateurs à la prise de décision et initier une action de manière autonome.

Dans l'IoT, un objet peut aussi bien être un véhicule qu'une machine industrielle ou encore une place de parking.

Caractéristiques d'un objet connecté

Un objet a plusieurs caractéristiques qui le rendent identifiable et capable de fonctionner dans son environnement sans intervention humaine, à savoir :

Identifiable : chaque objet connecté possède une identité unique ;

Dynamique & Auto-adaptatif : les objets connectés peuvent avoir la capacité de s'adapter aux changements de contexte et prendre des décisions basées sur les conditions de fonctionnement ;

Auto-configurable : les objets connectés peuvent avoir des capacités d'auto-configuration pour permettre à un nombre large d'objets de fonctionner ensemble afin de fournir un service ;

Interopérable : les objets connectés sont des objets hétérogènes basés sur des plateformes ; matérielles différentes et peuvent communiquer ensemble et avec l'infrastructure de déploiement.

Fonctions d'un objet connecté

L'objet connecté a pour fonction de collecter des données de capteurs, de traiter ces données et de les communiquer à l'aide de moyens de connectivité. Par ailleurs, il peut recevoir des instructions pour exécuter une action à l'aide des actionneurs comme illustré dans la Figure 2.3. Généralement, ces fonctions de l'objet connecté nécessitent une source d'énergie, surtout quand les données sont pré-traitées directement au niveau de l'objet ou dans des environnements inaccessibles [34].

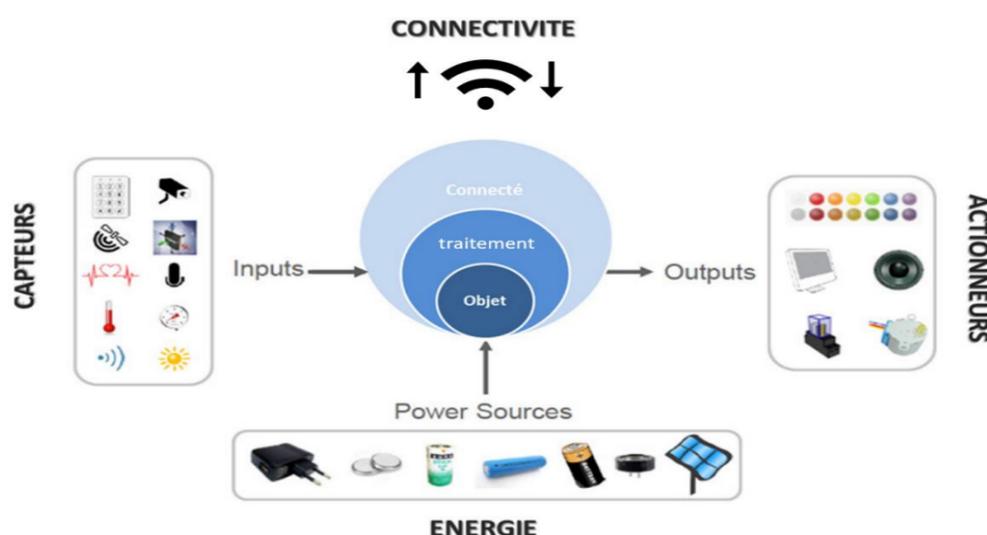


FIGURE 2.3 – Fonctions d'un objet connecté [34] .

Un objet assure ses fonctions grâce aux [34] :

Capteurs : ce sont des dispositifs capables de transposer une mesure physique (température, mouvement...) en une donnée digitale. Les capteurs ont pour vocation de recueillir les informations.

Actionneurs : ce sont des dispositifs qui transforment une donnée digitale en phénomène physique pour créer une action, ils sont en quelque sorte l'inverse du capteur. Exemple d'actionneurs : Afficheurs, Alarmes, Caméras, Haut-parleurs, Interrupteurs, Lampes, Moteurs, Pompes, Serrures, Vannes, Ventilateur, Vérins, ...

Sources d'énergie elles peuvent être sous forme d'alimentation électrique, batterie ou piles, capteurs d'énergie (comme le photovoltaïque) ou les objets passifs sans piles qui sont alimentés par les ondes électromagnétiques des lecteurs (RFID, NFC...).

Connectivité : c'est l'élément différenciant et principal d'un objet connecté. Elle permet de relier l'objet à une infrastructure ou à un autre objet connecté via un canal de communication. L'objet connecté intègre un ou plusieurs réseaux IoT. Pour transmettre les données collectées, les objets connectés utilisent différentes technologies de communication



FIGURE 2.5 – Maison intelligente.

L'industrie

Dans le contexte de l'industrie, l'Internet des objets (IoT) a un impact significatif sur la manière dont les entreprises opèrent et optimisent leurs processus. Voici quelques applications de l'IoT dans l'industrie, également connue sous le nom d'Industrie 4.0 [3] :

- **Maintenance prédictive** : Utilisation de capteurs pour surveiller l'état des équipements industriels en temps réel.
- **Suivi de la chaîne d'approvisionnement** : Utilisation de capteurs pour surveiller la localisation des produits tout au long de la chaîne d'approvisionnement.
- **Sécurité industrielle** : Systèmes d'alerte automatisés en cas d'incidents potentiels.
- **La température** : Contrôle de la température à l'intérieur des chambres froides industrielles et médicales contenant des marchandises sensibles

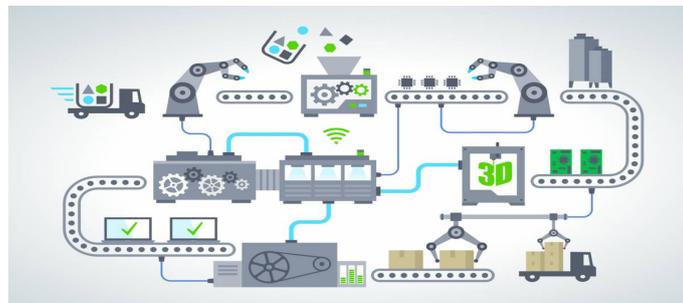


FIGURE 2.6 – Iot industriel.

Port intelligent(Smart port)

Est une version modernisée d'un port traditionnel qui intègre les technologies de l'Internet des objets (IoT), de l'automatisation, et d'autres innovations numériques pour améliorer l'efficacité opérationnelle, la sécurité et la durabilité. Voici quelques aspects et applications clés d'un smart port :

- **Gestion des stocks et des entrepôts** : systèmes automatisés de suivi des stocks pour optimiser l'utilisation des espaces d'entreposage.
- **Suivi des conteneurs en temps réel** : utilisation de capteurs RFID, de balises GPS et de technologies de communication sans fil pour surveiller en temps réel la localisation des conteneurs dans le terminal.
- **Optimisation des mouvements de conteneurs** : réduction des temps d'attente des conteneurs et amélioration de l'efficacité du déplacement.
- **Sécurité du terminal** : systèmes IoT pour la surveillance en temps réel des zones sensibles, avec des alertes automatisées en cas d'incident.

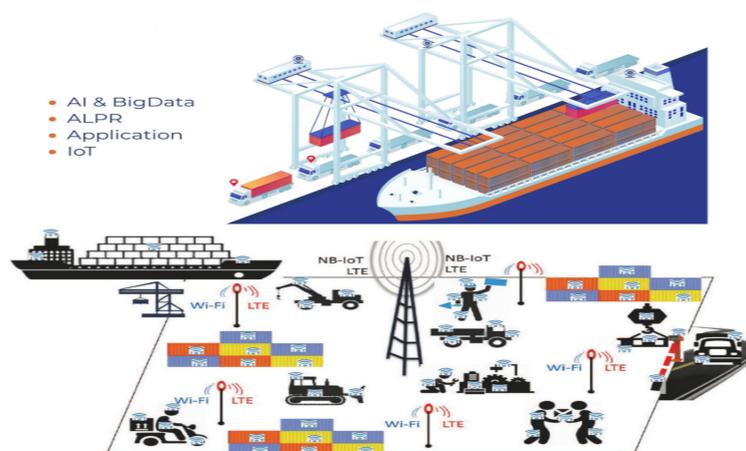


FIGURE 2.7 – Port intelligent.

2.1.6 Architecture de l'IoT

Architecture de base

L'architecture de base de l'IdO est composée de trois couches : une couche de perception (objets), une couche réseau (transport et traitement) et la couche application (services et applications). [5]

- **La couche perception** : possède des capteurs et actionneurs qui détectent et recueillent des informations sur l'environnement.
- **La couche réseau** : elle est responsable de la connexion, du transport et du traitement des données issues des capteurs et actionneurs.
- **La couche application** : elle est chargée de fournir à l'utilisateur des services spécifiques et applications intelligentes.

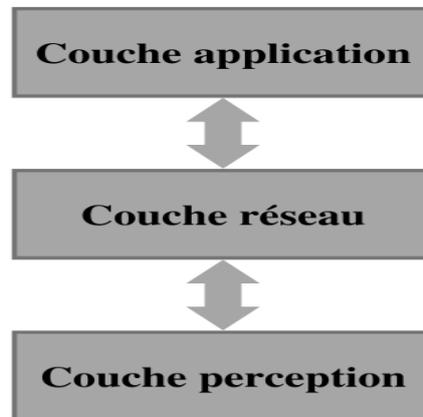


FIGURE 2.8 – Architecture IoT [5].

2.1.7 Composants d'un réseau IoT

Un système IoT est composé :

- d'un réseau d'objets connectés ;
- de passerelles et réseaux de communication sans fil (Wifi et Bluetooth notamment) ;
- de protocoles réseau ;
- d'API et de plateformes pour collecter et traiter les données ;
- d'hébergeur ou de fournisseurs de cloud computing pour stocker les informations ;
- de logiciels et applications pour visualiser, trier et afficher plus facilement les données ;
- d'une informatique en périphérie (Edge Computing) pour déplacer si nécessaire le traitement et l'analyse de données près de l'utilisateur final afin de réduire toute latence [34].

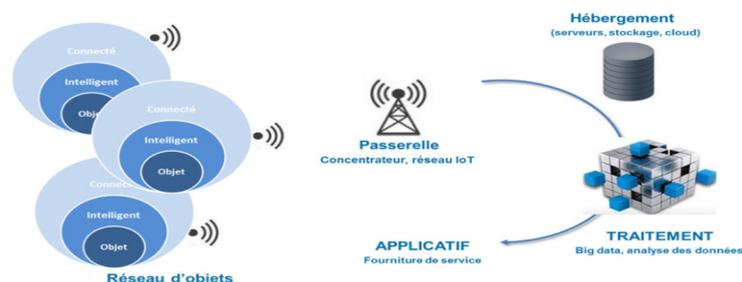


FIGURE 2.9 – Composants d'un système IoT [34].

2.1.8 Réseaux de capteurs dans le contexte de l'IoT

L'IoT repose sur un écosystème technologique comprenant diverses technologies telles que les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), le Cloud Computing, l'analyse Big Data, les protocoles de communication et les services web.

Les RCSF, par exemple, sont une composante essentielle à l'IoT. Ils sont constitués de nombreux nœuds capteurs capables de collecter, traiter et transmettre des données provenant de l'environnement physique. Ces capteurs peuvent mesurer une gamme variée de paramètres comme la température, l'humidité, la pression, la géolocalisation, et bien d'autres encore.

2.2 Généralités sur l'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est une branche des mathématiques appliquées qui propose un cadre structuré pour aborder une variété de problèmes rencontrés dans l'industrie, la finance et la vie quotidienne. Elle permet de représenter, d'analyser et de résoudre de manière analytique ou numérique des problématiques qui visent à déterminer la solution ou les solutions satisfaisant un objectif quantitatif, tout en tenant compte d'éventuelles contraintes.

2.2.1 Définition de l'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire concerne l'étude de problèmes d'optimisation discrets impliquant des contraintes d'intégrité et de choix discrets plutôt que des contraintes continues. Les problèmes d'optimisation combinatoire consistent à trouver un objet à partir d'un ensemble fini ou dénombrable d'objets potentiels, avec certaines contraintes supplémentaires [8].

Un problème d'optimisation combinatoire (OC) consiste à déterminer un plus grand ou plus petit élément dans un ensemble fini valué. En d'autres termes, étant donné une famille \mathcal{F} de sous-ensembles d'un ensemble fini $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ et un système de poids $W = (w_{e_1}, \dots, w_{e_n})$ associé aux éléments de E , un problème d'optimisation consiste à trouver un ensemble $F \in \mathcal{F}$ de poids $w(F) = \sum_{e \in F} w(e)$ maximum (ou minimum),

$$\max \text{ ou } \min \{w(F) \mid F \in \mathcal{F}\}$$

La famille \mathcal{F} désigne les solutions potentielles du problème, pouvant constituer un ensemble de taille considérable. Ces solutions ne sont souvent identifiables que par leurs descriptions ou leurs propriétés théoriques, rendant difficile leur énumération directe.

2.2.2 Notions de base sur l'optimisation combinatoire

Extremum d'une fonction

Soit $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction définie sur un intervalle I et soit $a \in I$. On dit que f admet un **maximum** en a si, pour tout $x \in I$, $f(x) \leq f(a)$. On dit que f admet

un **minimum** en a si, pour tout $x \in I$, $f(x) \geq f(a)$. On parle parfois de maximum ou de minimum global de la fonction, et on dit que $f(a)$ est le maximum (resp. le minimum) de f sur I . On dit aussi que m est un extremum de f si c'est un maximum ou un minimum.

On dit que f admet un **maximum local** (ou relatif) en a s'il existe un intervalle ouvert J contenant a tel que, pour tout $x \in J \cap I$, on a $f(x) \leq f(a)$. On définit de même un minimum local en inversant le sens de l'inégalité. Un extremum local est un maximum ou un minimum local [13].

Voisinage :

le voisinage, noté N , est une fonction qui associe à chaque solution s un sous-ensemble de S . Les voisins de s sont représentés par $s' \in N(s)$.

Les problèmes d'optimisation avec ou sans contraintes :

Il est crucial de faire une distinction claire entre les problèmes comportant des contraintes sur les variables de décision. Ces contraintes peuvent varier de simples bornes à un ensemble d'équations de type égalité ou inégalité. Dans certains cas, il est envisageable d'éliminer une contrainte d'égalité en la substituant dans la fonction objectif [44].

Problème de décision

Un problème de décision est un problème possédant des entrées (les instances) et une question concernant l'entrée dont la réponse est **Oui** ou Non en fonction de l'entrée [11].

2.2.3 Démarche en optimisation combinatoire

L'optimisation suit les mêmes démarches de travail de la Recherche Opérationnelle :



FIGURE 2.10 – Démarche de résolution d'un problème d'optimisation combinatoire [44].

Identification

Il est crucial de définir clairement le problème à résoudre. Cela implique de déterminer les objectifs à atteindre, les contraintes à respecter et les variables à optimiser [44].

Variables de décision : identification des variables du problème d'optimisation.

Critère : définition d'une fonction objectif permettant d'évaluer l'état du système ainsi que le besoin de maximisation ou de minimisation (ex : rendement, performance, coût...).

Contraintes : description des contraintes imposées aux variables de décision.

Modélisation

Une fois le problème défini, on procède à sa description mathématique. La modélisation peut être mathématique (linéaire et non linéaire), graphique (sous formes de graphes, arbres bipartis, ect) [44].

$$\begin{array}{l} \text{maximiser } f(x) \\ \text{s.c } \left\{ \begin{array}{l} g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ x \in X. \end{array} \right. \end{array}$$

Où :

- $X \subset \mathbb{R}^n$ est l'espace de recherche et n est la dimension du problème.
- $x \in X$ est le vecteur de variables de décision.
- $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ est la fonction objectif.
- $g_i : X \rightarrow \mathbb{R}, \quad i = 1, \dots, m$ sont les m égalités et inégalités qui représentent les contraintes du problème [44].

En fonction de la nature de l'ensemble X , on distingue les programmes mathématiques continus et discrets. Lorsque la fonction objectif f et les fonctions contraintes g sont toutes linéaires, on parle alors de Programme Linéaire (PL) [44].

Résolution

La troisième étape consiste à résoudre le problème modélisé. Il existe deux grandes classes de méthodes pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire [44] :

- **Méthodes exactes** : ces méthodes garantissent de trouver la solution optimale, mais elles peuvent être très coûteuses en temps de calcul pour des problèmes de grande taille.
- **Méthodes approchées** : ces méthodes ne garantissent pas de trouver la solution optimale, mais elles sont généralement beaucoup plus rapides que les méthodes exactes.

Implementation

Une fois la solution établie (via une méthode de résolution) est validée, l'implémentation du système peut être concrétisée [44].

2.2.4 Complexité des problèmes

Dans le domaine de l'optimisation, il est bien connu que certains problèmes sont plus simples à résoudre que d'autres. Pour formaliser cette notion, une théorie de la complexité a été développée, permettant de classer mathématiquement les problèmes en deux catégories : les problèmes de classe P et ceux de classe NP [14].

La classe P (Polynomiale) : les problèmes appartenant à la classe P sont ceux dont le problème de décision correspondant peut être résolu à l'optimum, à l'aide d'un algorithme en temps polynomial. C'est en quelque sorte la classe des problèmes dits « facile » [14].

La classe NP (Non-deterministic Polynomial) : cette classe a un nom trompeur, NP ne correspond pas à Non Polynomial, mais à Polynomial Non-déterministe ou en anglais « Non-deterministic Polynomial ». Cette classe est une extension de la classe P, elle représente la classe des problèmes de décision pour lesquels un algorithme non-déterministe peut vérifier en temps polynomial la validité d'une solution du problème traité [14].

Citons la catégorie de certains problèmes classiques [2] :

Problèmes faciles :

- Le problème d'affectation basique ;
- Le problème du flot maximum ;
- Le problème de transport ;

Problèmes difficiles :

- Le problème d'ordonnancement ;
- Le problème de coloration (sommets et arrêtes)
- Le problème du sac à dos ;
- Le problème de voyageurs de commerce (TSP) ;
- La programmation linéaire en nombre entier (PLNE) ;

2.2.5 Méthodes de résolution

Comme mentionné dans la section 2.2.3, il existe deux grandes classes de méthodes pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire :

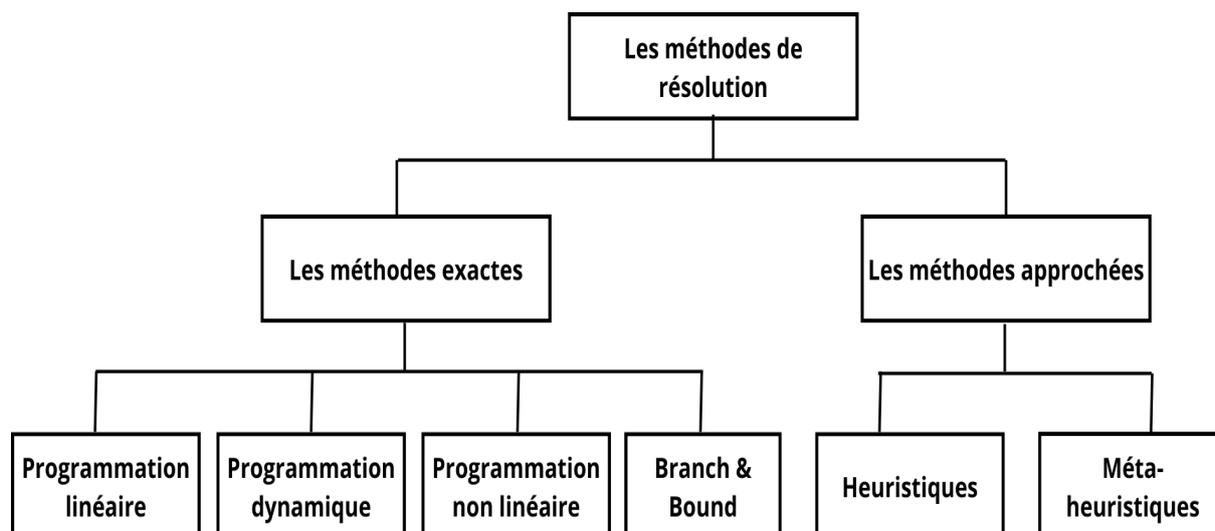


FIGURE 2.11 – Méthode de résolution d'un problème d'optimisation combinatoire

Méthodes approchées

Les méthodes d'optimisation approchées sont des outils utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation lorsque les méthodes exactes ne sont pas réalisables en raison de la taille du problème ou de la complexité de l'espace de recherche .

Il existe deux types de méthodes approchées :

1. **Heuristiques** :L'heuristique est donc de trouver une solution la plus proche possible de celle d'une méthode exacte tout en étant plus rapide. La qualité d'une méthode approchée va donc se calculer par rapport à l'écart obtenu entre sa solution et l'optimale, Une heuristique est spécifique au problème et ne peut pas être généralisée. Dans cette Méthodes on utilise par exemple les algorithmes gloutons [46].
2. **Métaheuristique** :Les métaheuristiques constituent une classe de méthodes qui fournissent des solutions de bonne qualité en temps raisonnable à des problèmes combinatoires réputés difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Leur but est d'atteindre un optimum global tout en échappant les optima locaux [10]. Les métaheuristiques regroupent des méthodes qui peuvent se diviser en deux classes :
 - Métaheuristique à solution unique (recherche taboues et recuit simulé) ;
 - Métaheuristique à population de solutions (comme les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules).

Méthodes exactes

Les méthodes exactes, également appelées complètes, produisent une solution optimale pour une instance donnée d'un problème d'optimisation. Ces méthodes se caractérisent

par un temps de calcul souvent exponentiel, ce qui limite leur utilisation aux problèmes de petite taille en raison de leur coût de calcul élevé(exponentiel).

1. **Méthode de Branch & Bound** : la méthode de séparation et d'évaluation, également connue sous le nom de Branch and Bound (B&B), est largement reconnue comme l'une des méthodes exactes les plus efficaces pour la résolution optimale des problèmes d'optimisation combinatoire. Cette méthode repose sur une énumération implicite et intelligente de l'ensemble des solutions possibles. Son principe est basé sur deux phases distinctes, comme son nom l'indique :
 - **Séparation** : décompose l'ensemble des solutions en plusieurs sous-ensembles qui sont décomposés à leur tour selon une démarche itérative. Ce processus peut se visualiser sous la forme d'un arbre d'énumération où les noeuds de l'arbre correspondent aux sous-ensembles et les feuilles correspondent à des solutions réalisables [16, 45].
 - **Évaluation** : réduit le nombre de solutions explorées en permettant de prouver mathématiquement que l'ensemble des solutions réalisables associées à un des noeuds de l'arbre ne contient pas une solution intéressante pour le problème initial[16, 45].
2. **Programmation Dynamique** : c'est une approche d'optimisation qui fonctionne par phases (Held et Karp, 1962). Son efficacité repose sur le principe d'optimalité de Bellman, qui stipule que « toute politique optimale est composée de sous-politiques optimales » (Cao et Ho, 1990). Cette méthode permet une résolution ascendante, où la solution optimale d'un problème est obtenue à partir des solutions de tous les sous-problèmes [4].

Pour obtenir la solution optimale du problème principal, il suffit de remonter en arrière à travers l'ensemble des décisions prises et de stocker à chaque résolution de sous-problème [45].

3. Programmation Linéaire :

C'est une des techniques classiques de la recherche opérationnelle. Cette méthode se repose sur la méthode simplexe [Korte, et al., 2010][4]. Un Programme Linéaire (PL) est un problème d'optimisation consistant à maximiser (ou minimiser) une fonction objectif linéaire de variables soumises à un ensemble de contraintes exprimées sous forme d'équations linéaires.

La forme générale d'un programme linéaire est la suivante :

$$(P_0) \begin{cases} \text{Max}(\text{Min})Z = c.x & (\text{Fonction} - \text{Objectif}) \\ \text{Sc.} \quad A.x = B & (\text{Contraintes}) \\ x \in R_+ \end{cases} ;$$

Avec :

- $(x = (x_1, \dots, x_n)^T)$, n : nombre de variables ;
- $A = (a_{ij})_{i=1..m}$ Matrice des m contraintes ;

- $c = (c_1, \dots, c_n)$: vecteur ligne des profits (ou gains) ;
- $b = (b_1, \dots, b_m)$: vecteur colonne des seconds membres.

4. **Programmation non linéaire** : lorsque au moins une contrainte ou la fonction objectif n'est pas une combinaison linéaire de variables, on parle de programmation non linéaire. Dans l'article [Kallrath (2005)][4], différentes applications de cette méthode pour la résolution des problèmes de planification, notamment dans l'industrie, sont présentées.

2.2.6 Applications de l'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire a un large éventail d'applications dans de nombreux domaines, notamment :

Logistique : optimisation des itinéraires de livraison, planification des tournées de véhicules, allocation des ressources.

Planification : planification des horaires de travail, planification de la production, planification des projets

Finance : Optimisation des portefeuilles d'investissement, gestion des risques, tarification des options.

Informatique : optimisation des algorithmes, conception de réseaux, répartition des tâches.

L'optimisation combinatoire est un domaine en constante évolution avec de nouvelles applications et de nouveaux développements méthodologiques qui apparaissent tout le temps. C'est un domaine stimulant et intellectuellement enrichissant qui offre de nombreuses opportunités pour faire une différence dans le monde réel.

2.3 Contexte de l'IoT dans la gestion portuaire des conteneurs

L'IoT joue un rôle crucial dans la transformation numérique des industries, y compris dans le secteur de la logistique et du transport maritime. Il permet une connectivité accrue entre les différents acteurs et les équipements, améliorant ainsi l'efficacité opérationnelle et la prise de décision.

Dans le contexte spécifique de la gestion portuaire des conteneurs, les défis sont multiples et complexes, tel-que l'optimisation des opérations de chargement/déchargement, le suivi des conteneurs, la gestion des stocks et la sécurité des opérations.

L'intégration de l'IoT offre des solutions innovantes pour relever ces défis et améliorer les performances des terminaux portuaires.

Voici quelques-unes des applications principales de l'IoT dans ce contexte, offrant ainsi de nombreux avantages et opportunités d'amélioration dans la gestion portuaire des conteneurs.

- **Suivi en temps réel des conteneurs** : les dispositifs IoT intégrés aux conteneurs permettent de suivre leur localisation en temps réel, améliorant la visibilité et la traçabilité des marchandises tout au long de leur parcours dans le terminal portuaire.
- **Surveillance des conditions environnementales** : les capteurs IoT surveillent les conditions internes des conteneurs, comme la température, l'humidité et la pression, garantissant ainsi le bon état des marchandises sensibles pendant le transport et le stockage.
- **Optimisation de l'utilisation des espaces** : les capteurs IoT installés dans les zones de stockage permettent de surveiller l'occupation des espaces, facilitant ainsi une utilisation plus efficace des infrastructures portuaires et réduisant les congestions.
- **Gestion des opérations de manutention** : l'IoT est utilisé pour suivre l'utilisation des équipements de manutention tels que les grues et les chariots élévateurs, optimisant ainsi les flux de travail, réduisant les temps d'attente et minimisant les coûts opérationnels.
- **Sécurité et prévention des pertes** : les dispositifs IoT détectent les mouvements non autorisés des conteneurs, préviennent les vols et les pertes de marchandises, renforçant ainsi la sécurité des opérations portuaires.
- **Gestion des stocks et traçabilité** : les technologies IoT, comme les étiquettes RFID (Radio Frequency Identification), permettent une gestion automatisée des stocks et une traçabilité précise des conteneurs et des marchandises, réduisant les erreurs de comptage et améliorant l'efficacité logistique.
- **Analyse des données et prise de décision** : l'IoT collecte des données en temps réel qui sont analysées pour générer des insights précieux, aidant les gestionnaires portuaires à prendre des décisions éclairées pour optimiser les opérations et anticiper les problèmes potentiels.

En résumé, l'IoT offre des solutions innovantes qui améliorent l'efficacité opérationnelle, la sécurité et la traçabilité dans la gestion des conteneurs portuaires, contribuant ainsi à une gestion plus intelligente et efficace des terminaux portuaires.

2.3.1 Types de capteurs utilisés dans la gestion des conteneurs

Capteur infrarouge

Un capteur infrarouge mesure le rayonnement ambiant de la zone qu'il couvre, il permet de détecter un mouvement dans son champ de vision en se basant sur la lumière infrarouge.

exemple : détection de la présence et de l'absence d'un conteneur dans un emplacement précis, ainsi que l'identification des places vides au sein du terminal.



FIGURE 2.12 – Capteur infrarouge.

Capteurs de température et d'humidité

Dispositifs permettant de mesurer les conditions environnementales.

exemple : le capteur de température permet la gestion des conteneur frigorifique tandis que les capteurs d'humidité surveillent les conditions internes pour garantir que les marchandises sensibles restent dans des conditions optimales.

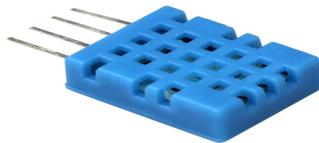


FIGURE 2.13 – Capteurs de Température et d'humidité.

Capteurs de positionnement GPS

Le capteur de position est un dispositif qui permet de recueillir des informations sur la position précise et le mouvement d'un objet. il utilise des signaux satellites pour déterminer la position géographique précise d'un objet.

exemple : le suivi en temps réel des conteneurs en fournissant leurs emplacement précis pour éviter toutes pertes.



FIGURE 2.14 – Capteur de positionnement GPS.

2.3.2 Importance des capteurs dans la gestion portuaire

Les capteurs jouent un rôle fondamental dans la gestion portuaire moderne, apportant des améliorations significatives en termes de sécurité, d'efficacité opérationnelle et de gestion environnementale . La technologie des capteurs sans fil et le développement d'une nouvelle génération de capteurs micro et nano-mécaniques seront à l'aube de changements révolutionnaires dans la surveillance environnementale et la collecte de données.

Citons quelques principales raisons pour lesquelles les capteurs sont importants :

- Optimisations des opérations portuaires soit dans la gestion trafic ou le suivi des conteneurs.
- Sécurité et surveillance (détection des incendie et de mouvements) .
- Maintenance Prédictive et Gestion des Actifs comme la surveillance de l'état des équipements et la gestion des infrastructures.
- Amélioration de la Logistique et de la Chaîne d'approvisionnement qui concerne suivi des expéditions et l'optimisation des routes.

2.4 Optimisation combinatoire dans la gestion des terminaux portuaires

Les techniques d'optimisation acquièrent un rôle crucial dans la promotion de l'efficacité de l'exploitation des terminaux à conteneurs, elle vise à trouver la meilleure solution possible à un problème donné, en minimisant ou maximisant une fonction objectif sous des contraintes spécifiques. Dans les terminaux portuaires, l'optimisation à pour but d'améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts et les délais, et augmenter la satisfaction des clients.

2.4.1 Problèmes d'optimisation Courants

Stockage des conteneurs

Les problèmes de stockage de conteneurs sont parmi les plus courants et les plus fréquents. Le but de ce problème est de créer un plan de stockage optimal qui définit l'emplacement idéal de chaque conteneur tout en tenant compte des limitations pratiques de la zone de stockage [42].

Temps de manutention des conteneurs

L'étude de ce problème concentre la réduction du temps de manutention des conteneurs. Elle se concentre sur l'optimisation de l'ordonnancement des camions transportant des conteneurs déchargés par une grue de quai unique et sur l'organisation des transferts de conteneurs entre un navire et une zone de stockage [7].

Affectation des navire aux post à quai

La solution optimale de ce problème se représente par un plan de service de (chargement/ déchargement) des navires entrants et des durées de séjour de longueurs minimales. Ce temps de séjours des navires dans le port doit être minimal [9].

Déplacement des conteneurs (Shifting)

Ce problème à pour objectif de minimiser les shiftings des conteneurs.

Dans notre travail, nous allons nous concentrer sur le problème de déplacement des conteneurs, communément appelé "shifting".

2.5 Intégration de l'IoT avec les techniques d'optimisation combinatoire

Les technologies actuelles et les approches basées sur l'optimisation combinatoire offrent des solutions pour améliorer la gestion des conteneurs dans les terminaux portuaires . L'IoT, avec sa capacité à connecter des dispositifs variés et à collecter des données en temps réel, permet une surveillance et une gestion précises des opérations. L-optimisation , quant à elle, utilise ces données pour créer des simulations et des analyses prédictives, optimisant ainsi les processus et les décisions stratégiques.

Plusieurs terminaux portuaires à travers le monde ont intégré avec succès des technologies d'optimisation et IoT :

Port de Rotterdam, Pays Bas : le port de Rotterdam a été automatisé en 1993, il a intégré très tôt les technologies numériques « smart » permettant de relever des données sur les conditions météorologiques, la géolocalisation des navires, des camions, des équipements de manutention et des diverses marchandises que comprend l'espace portuaire.[6] Des capteurs et des algorithmes d'optimisation sont utilisés pour surveiller les flux de conteneurs et optimiser les opérations en temps réel .

Terminal de Yangshan, Shanghai, Chine : le plus grand terminal automatisé au monde a démarré son activité à Yangshan, à proximité de Shanghai. Il s'agit du terminal correspondant à la phase IV de l'immense port de Yangshan, sorti de terre en temps record depuis 2005.[6]

Conclusion

En conclusion, l'internet des objets et l'optimisation combinatoire représentent des leviers stratégiques essentiels pour la gestion moderne des terminaux portuaires.

Dans ce qui suit, nous allons explorer deux aspects : d'une part, un modèle mathématique pour minimiser les déplacements des conteneurs (shifting), et d'autre part, la détection des places vides à l'aide de l'IoT en utilisant des capteurs spécifiés .

3

Optimisation intelligente des conteneurs : modélisation mathématique et technologie de capteurs

Sommaire

Introduction	41
3.1 Opérations de débarquement au niveau de BMT	41
3.2 Objectifs et principes de notre travail	41
3.3 Hypothèses de travail	42
3.4 Prototype de détection des emplacements vides dans le terminal à conteneurs	43
3.5 Affectation des conteneurs dans un terminal maritime	45
3.6 Vers un système de booking efficient	47
3.7 Optimisation des shifting	50

Introduction

Dans le contexte de la gestion des conteneurs dans un terminal portuaire, les déplacements des conteneurs, connus sous le nom de shifting, représentent une opération fréquente mais qui peut entraîner des inefficacités si elle n'est pas optimisée. Ces déplacements, nécessaires pour satisfaire une demande précise, peuvent générer des retards opérationnels, des coûts supplémentaires en main-d'œuvre et en ressources, ainsi qu'une utilisation sous-optimale de l'espace de stockage disponible.

Dans ce chapitre, nous abordons la phase essentielle de notre travail en présentant un prototype de détection des emplacements vides et illustré la méthode d'affectation des conteneurs en fonction des paramètres de réservation ainsi que la proposition d'une approche pour minimiser les nombres des shifts.

3.1 Opérations de débarquement au niveau de BMT

Lorsqu'un navire arrive au port de Béjaïa, il est mis en attente dans la zone de mouillage (rade) pendant une durée variable selon chaque navire, en raison de l'occupation des postes à quai, de l'indisponibilité de pilotes ou de remorqueurs, ou pour d'autres raisons. Après cette étape, l'accostage des navires est assuré par les sections opérationnelles de l'EPB, telles que les sections de pilotage et de remorquage.

Les conteneurs sont ensuite déchargés à l'aide de deux grues à quai (QCs) ou de deux grues mobiles (MHC, LHM), puis transportés par des camions remorqueurs vers le parc de stockage. Selon leurs contenus, les conteneurs sont dirigés vers différentes zones : le parc à feu pour les matières dangereuses, la zone des conteneurs frigorifiques pour les reefers, ou le parc plein pour les conteneurs standards de 20 ou 40 pieds.

Les conteneurs déplacés sont rangés, empilés et entreposés dans le parc à conteneurs pour une durée maximale de 15 jours, variant selon les besoins de chaque conteneur, jusqu'à ce que le client dédouane le conteneur et le réclame. La livraison des conteneurs pleins se fait directement par les RTGs sur les camions des clients ou par dépotage manuel ou mécanique après transport vers la zone de dépotage.

Il arrive qu'un conteneur doit être déplacé à une autre place, notamment lorsque le client demande un conteneur situé en première position dans une pile. Dans ce cas, il est nécessaire de déplacer (shifter) les conteneurs situés au-dessus pour accéder à celui demandé.

3.2 Objectifs et principes de notre travail

Dans le contexte de la gestion des conteneurs dans un terminal portuaire, les déplacements des conteneurs, connu sous le nom de shifting, est une opération fréquente mais qui peut entraîner des inefficacités si elle n'est pas optimisée. Lorsqu'un client demande un conteneur spécifique situé en première position dans une pile, cela peut nécessiter le déplacement de plusieurs autres conteneurs au-dessus pour y accéder. Ces déplacements,

nécessaires pour satisfaire une demande précise, peuvent générer des retards opérationnels, des coûts supplémentaires en main-d'œuvre et en ressources, ainsi qu'une utilisation sous-optimale de l'espace de stockage disponible.

Dans le cadre de notre travail, notre objectif fondamental est de minimiser ces shiftings en développant des stratégies et des méthodes efficaces pour gérer les conteneurs de manière optimale. Pour y parvenir, nous nous appuyons sur les avancées technologiques de l'Internet des Objets (IoT) pour mettre en place un système de détection des emplacements vides en temps réel au sein du parc à conteneurs. Grâce à des capteurs IoT sophistiqués, notamment des capteurs infrarouges, nous sommes en mesure d'identifier de manière précise et rapide les emplacements disponibles, afin d'affecter les conteneurs lors de leurs arrivées.

En tenant compte du système de réservation envisagé par BMT pour les sorties de conteneurs, nous générons des dates de sortie des conteneurs en utilisant des prévisions, que nous considérons comme un système de booking pour simuler les délais de sortie. En utilisant une approche heuristique, nous minimisons les shiftings en donnant la priorité au placement des conteneurs qui doivent sortir en premier, notamment dans les niveaux supérieurs du parc à conteneurs.

Cette combinaison de la détection des emplacements vides, de l'affectation initiale des conteneurs, et de la minimisation des shiftings vise à améliorer l'efficacité opérationnelle du terminal portuaire, à réduire les coûts et les délais, et à optimiser l'utilisation de l'espace disponible, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et rentable de l'ensemble du processus de gestion des conteneurs.

3.3 Hypothèses de travail

Pour élaborer notre travail qui a pour but minimiser les déplacements des conteneurs (shifting) dans un terminal portuaire, il faut prendre en compte certaines hypothèses. Ces dernières vont être intégrées d'une façon ou d'une autre dans la modélisation. Les hypothèses qu'on considère sont les suivantes :

- Tous les conteneurs ont la même largeur et la même hauteur.
- On s'intéresse aux conteneurs de 40 pieds.
- On s'intéresse aux opérations de déchargement des conteneurs (conteneurs importés).
- Une zone d'entreposage est formée de plusieurs blocs adjacents.
- On s'intéresse aux opérations dans un seul bloc.
- Les conteneurs sont numérotés suivant leurs ordre de déchargement.
- La localisation des conteneurs est donnée.
- Chaque conteneur a un emplacement unique définie dans le terminal.
- La durée de séjour de chaque conteneur dans le terminal est de 15 jours maximum.
- La durée moyenne de séjour des conteneurs dans le terminal est de 13 jours.
- Les dates d'arrivée des conteneurs sont connues à l'avance.
- Les dates de sorties des conteneurs seront générés par des prévisions.
- Chaque jour, un minimum de 250 conteneurs sort du terminal.

- Les conteneurs sont sortis en fonction de leur date de sortie prévue, déterminée par leur durée de séjour et leur date d'arrivée.
- La capacité maximale du terminal en termes de nombre de conteneurs est limitée par le nombre de lignes, colonnes et niveaux disponibles.
- Un déplacement (shifting) est nécessaire lorsqu'un conteneur au-dessus de celui à retirer doit être déplacé.

3.4 Prototype de détection des emplacements vides dans le terminal à conteneurs

La détection des emplacements vides au sein d'un terminal portuaire est un défi crucial pour optimiser la gestion des conteneurs.

L'internet des Objets (IoT) offre une solution efficace à ce problème en utilisant des capteurs infrarouges pour surveiller et signaler les emplacements disponibles en temps réel.

3.4.1 Importance de la détection des emplacements vides

Chaque jour, des centaines de conteneurs arrivent dans les ports maritimes, nécessitant un placement rapide et efficace dans leurs emplacements respectifs pour assurer une livraison ponctuelle.

L'entreprise BMT utilise la méthode traditionnelle généralement pour identifier les emplacements vides. Cette approche, bien qu'efficace dans certaines situations, présente des limitations en termes de rapidité et de précision.

Dans le cadre de notre travail, nous avons proposé une solution innovante visant à améliorer et faciliter la détection des emplacements vides. Cette solution repose sur l'utilisation de capteurs infrarouges, qui permettent de surveiller en temps réel l'état des espaces de stockage. En intégrant ces capteurs à un réseau IoT, nous pouvons obtenir des données instantanées sur la disponibilité des emplacements, optimisant ainsi les mouvements des conteneurs et augmentant l'efficacité globale des opérations portuaires.

3.4.2 Processus de détection des emplacements vides

Le processus de détection des emplacements vides est illustré dans ce diagramme (voir la figure 3.1) et se compose des étapes suivantes :

Étape 1 : Acquisition des données de présence des conteneurs : Un capteur infrarouge (IR) est utilisé pour détecter la présence ou l'absence des conteneurs dans les emplacements. Les données collectées par le capteur IR sont envoyées à une carte Arduino pour traitement.

Étape 2 : Compter le nombre et identifier les places vides : La carte Arduino reçoit les données du capteur IR et les analyse pour compter le nombre total de conteneurs présents et identifier les emplacements vides.

Étape 3 : Transmission des données vers le programme d'optimisation : Les informations sur les emplacements vides sont ensuite transmises via une connexion USB ou Wifi.

Ce processus est un cycle continu qui permet de surveiller et de gérer dynamiquement les emplacements des conteneurs en temps réel. Si des emplacements vides sont détectés, les informations sont affichées sur un écran LCD, sinon si aucun emplacement vide n'est détecté, une action de "Libération des conteneurs" est initiée.

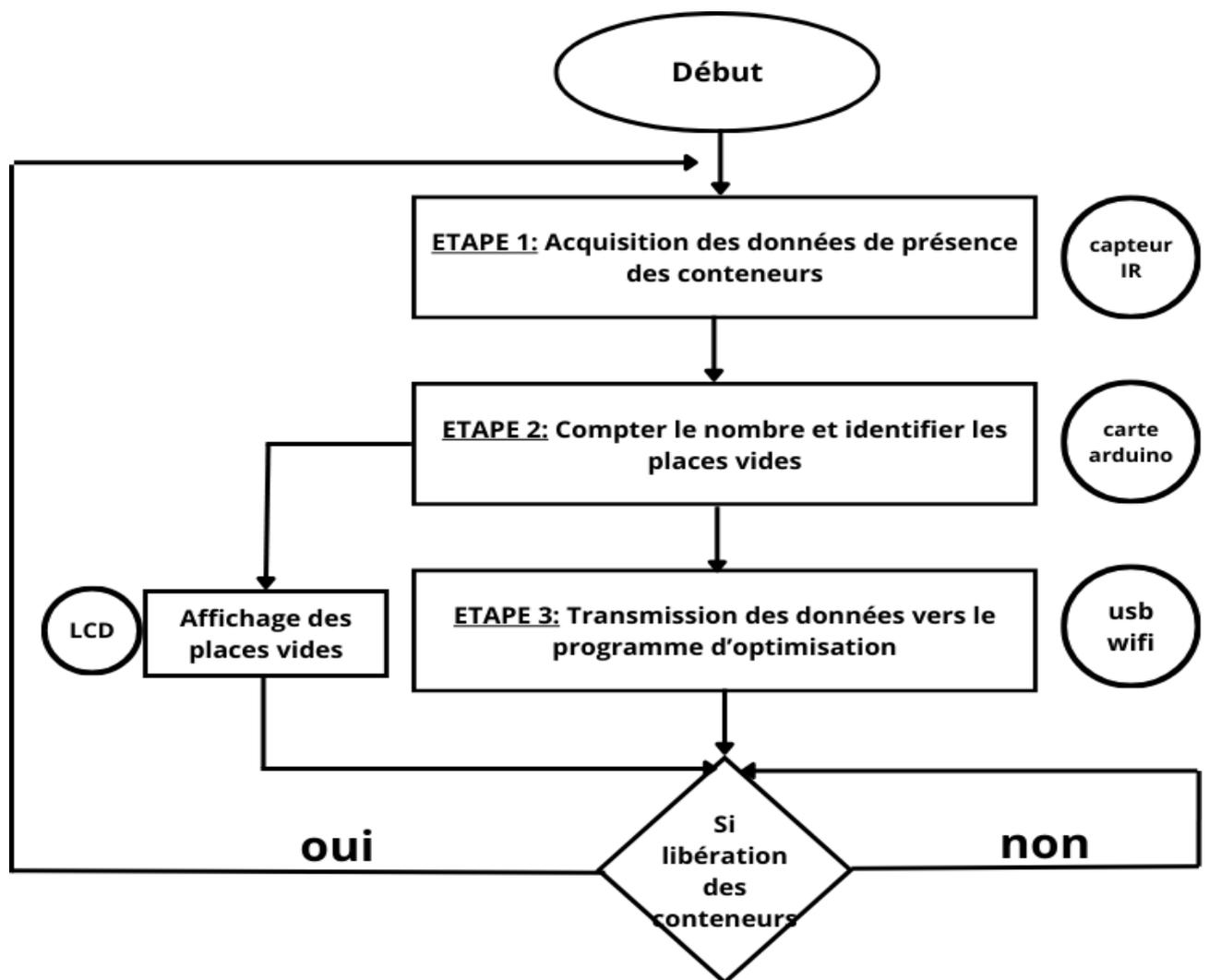


FIGURE 3.1 – Diagramme illustrant la détection des emplacements vides.

3.5 Affectation des conteneurs dans un terminal maritime

L'affectation des conteneurs dans un terminal portuaire est une tâche cruciale pour assurer un fonctionnement efficace et optimal des opérations logistiques. Cette affectation consiste à attribuer à chaque conteneur une place spécifique parmi les emplacements disponibles dans le terminal.

En résumé, dans notre travail, nous cherchons à affecter tous les conteneurs à des emplacements spécifiques dans un entrepôt tout en respectant les capacités des emplacements, le remplissage des niveaux, et en garantissant qu'un seul conteneur est affecté à chaque emplacement et niveau. Cette affectation se fait de manière méthodique en empilant les conteneurs pile par pile, assurant ainsi une organisation optimale et une gestion efficace de l'espace disponible dans le terminal.

3.5.1 Construction du modèle mathématique

Paramètres du modèle

Indices

- **i** : i ème conteneur ;
- **j** : j ème emplacement ;
- **k** : k ème niveau ;

Ensembles

- **C** : Ensemble de conteneurs, tel que $C = \{1, \dots, N\}$;
- **E** : Ensemble de emplacement tel que : $E = \{1, \dots, M\}$;
- **L** : Ensemble de niveaux, tel que $L = \{1, \dots, 6\}$;

Données

- V_j : est le nombre de niveaux restant sur l'emplacement j .
- α : est un paramètre estimé à la moyenne donné de manière itérative lors de la résolution. $\alpha = 3, 2, 4, \dots$

Variable de décision

- X_{ijk} : Indicateur de positionnement du conteneur i à l'emplacement j au niveau k .

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si le conteneur est affecté à la position } i, j, k ; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Contraintes

Voici les contraintes que nous avons intégrées dans notre modèle mathématique pour garantir sa précision et son efficacité :

1. Un conteneur est affecté à une et une seule place :

$$\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^6 X_{ijk} = 1, \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Cette contrainte garantit que chaque conteneur i est affecté à un emplacement j et à un niveau k unique.

2. Chaque emplacement ne doit pas dépasser le niveau V_j :

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^6 X_{ijk} \leq V_j, \forall j \in \{1, \dots, M\}$$

Où V_j est le nombre de niveaux restant sur l'emplacement j . Pour la partie initial, nous supposons que $V_j = 6, \forall j \in \{1, \dots, E\}$, ensuite, nous calculons $V_j = 6 - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^6 X_{ijk}$.

3. Un emplacement ne peut contenir qu'un seul conteneur au même niveau :

$$\sum_{i=1}^N X_{ijk} \leq 1, \forall j \in \{1, \dots, M\}, \quad k \in \{1, \dots, 6\}$$

Cette contrainte garantit que chaque emplacement j et chaque niveau k ne peut contenir qu'un seul conteneur à la fois. Cela assure l'unicité de l'affectation des conteneurs, évitant ainsi les conflits et les doublons dans l'assignation des emplacements et des niveaux.

4. Le remplissage du niveau $k-1$ avant le niveau k :

$$\sum_{k=1}^6 X_{ij(k-1)} \geq \sum_{k=1}^6 X_{ijk}, \forall i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\}, \forall k \in \{2, \dots, 6\}$$

Cette contrainte assure que pour chaque emplacement j , le niveau $k-1$ doit être complètement rempli avant de commencer à remplir le niveau k d'où on garanti un empilement ordonné des conteneurs.

Fonction objectif

Cette fonction objectif a pour but d'affecter chaque conteneur a son emplacement précis

$$\text{minimize } \sum_{i \in \{1, \dots, N\}} \sum_{j \in \{1, \dots, M\}} \sum_{k \in \{1, \dots, 6\}} (X_{ijk} - \alpha)^2$$

Modèle mathématique

Le modèle final est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize} \quad \sum_{i \in \{1, \dots, N\}} \sum_{j \in \{1, \dots, M\}} \sum_{k \in \{1, \dots, 6\}} (X_{ijk} - \alpha)^2, \quad X_{ijk} \in \{0, 1\} \\ \\ Sc. \quad \begin{array}{ll} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^6 X_{ijk} = 1, & \forall i \in \{1, \dots, N\} \\ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^6 X_{ijk} \leq V_j, & \forall j \in \{1, \dots, M\} \\ \sum_{i=1}^N X_{ijk} \leq 1, & \forall j \in \{1, \dots, M\}, \quad k \in \{1, \dots, 6\} \\ \sum_{k=1}^6 X_{ij(k-1)} \geq \sum_{k=1}^6 X_{ijk}, & \forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad k \in \{2, \dots, 6\} \end{array} \end{array} \right.$$

3.6 Vers un système de booking efficient

L'introduction d'un système de booking dans les terminaux à conteneurs est essentiel pour assurer un flux efficace des conteneurs et améliorer les opérations portuaires, ce système permet aux entreprises de transport et de logistique de réserver des créneaux horaires pour le dépôt et le retrait de conteneurs.

Dans ce contexte BMT envisage d'adopter ce système dans le futur pour optimiser ses activités. Notre approche vise à garantir que cette transition vers le système de booking soit bénéfique et optimisée pour répondre aux besoins opérationnels spécifiques de BMT. Voici comment nous procédons pour assurer l'efficacité de cette transition et de l'utilisation du système de booking dans les terminaux à conteneurs :

3.6.1 Paramètres de réservation

Pour simuler un système de réservation, nous devons définir trois paramètres :

Nombre de conteneurs arrivant chaque jour N : Cela permet de modéliser l'arrivée des conteneurs dans le système.

Moyenne μ et intervalle de la durée de stockage I : Utilisés pour générer des prévisions de la durée pendant laquelle les conteneurs resteront stockés.

Fenêtre de réservation W : Période pendant laquelle les dates de sortie peuvent être réservées.

t_0 : Date d'arrivée des conteneurs.

3.6.2 Génération des dates et heures de sortie avec réservation

La génération des dates et heures de sortie repose sur une distribution normale pour modéliser les durées de stockage. Ensuite, un système de réservation ajuste ces dates pour respecter une fenêtre de réservation définie.

Loi normale

La loi normale ou de Gauss est une distribution de probabilité continue[31], représentée par l'ensemble des valeurs qu'elle prend n'est pas dénombrable (un intervalle). Elle est caractérisée par deux paramètres qui sont la moyenne μ et l'écart type σ . [25]

La fonction de densité de probabilité de la distribution de la loi normal est [31] :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

où :

- x est la variable aléatoire continue,
- μ est la moyenne de la distribution,
- σ est l'écart-type de la distribution,
- \exp est la fonction exponentielle,
- π est la constante mathématique pi.

Les propriétés d'une distribution normale sont [1] :

- La fonction de densité de probabilités de la loi normale a la forme d'une courbe en cloche symétrique.
- la moyenne et la médiane sont égales ; la courbe est centrée sur la moyenne.
- L'axe des abscisses est une asymptote, σ représente la différence des abscisses entre le sommet de la courbe et le point d'inflexion.
- **La règle empirique** : La règle empirique (ou règle 68 – 95 – 99,7) décrit la distribution des données dans une distribution normale. Selon cette règle (environ)
 - 68% des observations sont comprises dans un intervalle de $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ l'écart-type autour de la moyenne.
 - 95% des observations sont comprises dans un intervalle de $[2\mu - 2\sigma, 2\mu + 2\sigma]$ l'écart-type autour de la moyenne.
 - 99.7% des observations sont comprises dans un intervalle de $[3\mu - 3\sigma, 3\mu + 3\sigma]$ l'écart-type autour de la moyenne.

Pour générer des données suivant une distribution normale, nous utilisons des méthodes de simulation numérique.

La fonction Clip

La fonction Clip extrait les données entre deux points temporels dans une série temporelle et renvoie une nouvelle série temporelle contenant ces données. On peut extraire des périodes d'intérêt d'une série temporelle volumineuse puis les stocker ou les exploiter séparément de celle-ci. Les fonctions Clip prennent toutes une série temporelle, un point de début et un point final pour la plage. [37]

Pour une valeur x , Clip est défini comme :

$$x' = \text{clip}(x, \min, \max) = \max(\min, \min(x, \max))$$

Cette opération garantit que x' se situe toujours entre min et max.

3.6.3 Algorithme pour générer les dates et heures de Sortie

- pour générer les dates et heures de sortie :
- Supposons que nous voulons que la plupart des durées de stockage générées (99.7%) soient comprises dans un intervalle donné I .
 - Pour cela nous choisissons l'intervalle de $[3\mu - 3\sigma, 3\mu + 3\sigma]$.
 - Ainsi, I couvre 6σ , (car 3σ de chaque côté de la moyenne).

Algorithme 1 : Génération des dates de sortie des conteneurs

```

1 Paramètres :  $N, \mu, I, t_0, W$ 
2 Début
  Calculer écart type  $\sigma$  :
   $\sigma = \frac{I}{6}$ 
  pour  $i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
    Générer des durées de stockage  $D_i$  pour chaque conteneur  $i$ 
     $D_i \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 
  fin pour
  pour  $i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
    Clippage des durées de stockage pour les limiter à l'intervalle  $[0, I]$ 
     $D_i = \min(\max(D_i, 0), I)$ 
  fin pour
  pour  $i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
    Calculer les dates de sortie  $t_i$ 
     $t_i = t_0 + D_i$ 
  fin pour
  pour  $t_i \quad i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
    Générer  $t'_i \sim \mathcal{U}(t_0, t_0 + W)$ 
  fin pour
3 pour  $t_i \quad i \leftarrow 1$  à  $N$  faire
  Générer les heures aléatoires  $h_i \sim \mathcal{U}[0, 23]$ 
  Générer les minutes  $m_i \sim \mathcal{U}[0, 59]$ 
  Générer les secondes  $s_i \sim \mathcal{U}[0, 59]$ 
   $t'_i = t'_i + \text{heure}(h_i) + \text{minute}(m_i) + \text{seconde}(s_i)$ 
  fin pour
4 fin

```

Après avoir établi le processus de génération des dates de sortie des conteneurs, en tenant compte des contraintes temporelles et de réservation, nous pouvons maintenant aborder la phase cruciale qui est la minimisation des shiftings.

3.7 Optimisation des shifting

L'optimisation des "shiftings" dans la gestion des conteneurs est une étape cruciale pour garantir une efficacité opérationnelle et minimiser les coûts. Cette phase consiste à réduire le nombre de déplacements de conteneurs, ce qui peut être réalisé en planifiant judicieusement l'emplacement initial des conteneurs lors de leurs arrivées au terminal.

Après avoir proposé une approche pour générer les dates de sortie des conteneurs en tenant compte des contraintes de temps et de réservation, nous pouvons maintenant aborder la phase cruciale de minimisation des shiftings.

Pour résoudre ce problème, différentes approches peuvent être envisagées, notamment les méthodes exactes, les heuristiques et les méta-heuristiques. Les heuristiques, offrent un bon compromis entre qualité de solution et temps de calcul, ce qui les rend particulièrement adaptées à notre problème. Pour notre problème de minimisation des shiftings, nous proposons d'utiliser une heuristique gloutonne. Cette approche consiste à trier les conteneurs par date de sortie et à les placer dans les niveaux supérieurs, de manière à ce que ceux avec des dates de sortie plus proches soient plus facilement accessibles en remplissant pile par pile allant de la gauche vers la droite.

3.7.1 Approche heuristique

Dans notre approche pour résoudre notre problème, on a utilisé l'algorithme Glouton qui est une approche efficace pour résoudre ce problème, car il permet de prendre des décisions optimales à chaque étape sans nécessiter de calculs complexes ou de retour en arrière.

Algorithme Glouton

Un algorithme glouton est un algorithme qui effectue à chaque instant, le meilleur choix possible sur le moment, sans retour en arrière ni anticipation des étapes suivantes, dans l'objectif d'atteindre au final un résultat optimal [17].

Son principe consiste à choisir la solution optimale qui se présente à chaque instant, sans se préoccuper, ni du passé ni de l'avenir. Il répète cette même stratégie à chaque étape jusqu'à avoir entièrement résolu le problème. Il consiste à faire un choix localement optimal dans l'espoir que ce choix mènera à la solution globalement optimale.[17]

Exemple : problème de choix d'activités

Le problème de sélection d'activités est un exemple classique d'algorithme glouton. Le but est de sélectionner le maximum d'activités non chevauchantes à partir d'un ensemble d'activités, chacune ayant une heure de début et de fin. Les étapes de l'algorithme sont les suivantes [30] :

L'algorithme de tri d'activités sert de référence pour notre approche car il illustre la simplicité et l'efficacité des algorithmes gloutons pour résoudre des problèmes de sélection et d'ordonnement.

Algorithme 2 : Trier et sélectionner des activités

```

1 SelectActivities
2 Trier les activités par leurs heures de fin
3 Sélectionner la première activité
  pour  $i \leftarrow 2$  à  $N$  faire
    Pour toutes les autres activités
    si Début de l'activité  $i >$  Fin de l'activité précédemment sélectionnée  $i - 1$  alors
      Sélectionner l'activité  $i$ ;
    Fin si
  Fin pour

```

3.7.2 Approche heuristique pour la gestion des conteneurs

Inspirés par l'algorithme de tri d'activités, nous avons développé une approche gloutonne pour optimiser la gestion des conteneurs en port terminal. Notre objectif est de minimiser les shiftings en plaçant les conteneurs destinés à sortir en premier dans les niveaux supérieurs, de manière à libérer colonne par colonne. Voici notre algorithme :

Algorithme 3 : Algorithme heuristique pour minimiser les shiftings

```

1 Paramètres : nombre de conteneur, moyenne, intervalle,
  Début
  Algorithme génération des dates de sortie 1
  Afficher les dates de sortie pour chaque conteneur ;
  Importer les résultats de fichiers en fichier .csv ;
  Afficher la matrice d'affectation ;
  Trier les conteneurs par date de sortie ;
  Organisation des conteneurs :
  pour Level de 1 à max level faire
  pour Localosation de 1 à max localisation faire
    Ajouter (level, localisation ) à positions ;
  Fin pour
  Fin pour
  Trier les positions des conteneurs ;
  Assigner les positions triées par date de sortie ;
  Afficher la matrice des nouvelles positions ;
  fin

```

Explication

Cet algorithme simule le processus de gestion des conteneurs dans un terminal. Il commence par générer aléatoirement les dates de sortie pour un groupe de conteneurs arrivant au jour 0, en prenant en compte une moyenne de durée de stockage et un intervalle de temps maximal. Ces dates de sortie sont ensuite réservées avec des heures aléatoires, reproduisant ainsi un système de réservation réaliste.

Après avoir chargé les affectations initiales des conteneurs depuis un fichier CSV, l'algorithme les organise sous forme de matrice pour une meilleure visualisation de leur position dans le terminal. Pour une représentation plus naturelle, il inverse l'ordre des niveaux dans la matrice, de sorte que le niveau supérieur soit en haut de la représentation visuelle.

Le tri des conteneurs par date de sortie est une étape clé pour optimiser leur positionnement dans le terminal. Les positions sont attribuées en fonction de ces dates, en libérant progressivement les emplacements colonne par colonne, en partant de la gauche vers la droite. Cela permet une meilleure utilisation de l'espace en optimisant le placement des conteneurs.

Enfin, la visualisation de la nouvelle matrice montre comment les conteneurs sont réorganisés en fonction de leurs dates de sortie, avec une stratégie visant à placer les conteneurs ayant des dates de sortie proches en haut de la pile, dans les niveaux supérieurs de la matrice. Cette approche vise à minimiser les déplacements de conteneurs, réduisant ainsi les coûts opérationnels et améliorant l'efficacité globale du terminal.

Conclusion

La combinaison de la détection des emplacements vides, de l'affectation initiale des conteneurs, et de la minimisation des shiftings vise à améliorer l'efficacité opérationnelle du terminal portuaire, à réduire les coûts et les délais, et à optimiser l'utilisation de l'espace disponible. En appliquant des méthodes heuristiques pour la gestion des conteneurs et en intégrant un système de réservation anticipée pour les sorties de conteneurs, nous avons montré que ces stratégies peuvent significativement réduire les déplacements inutiles des conteneurs. Cette approche contribue ainsi à une gestion plus efficace et rentable de l'ensemble du processus de gestion des conteneurs, permettant une utilisation optimale des ressources disponibles et une meilleure satisfaction des clients du terminal.

Le chapitre suivant représente les résultats obtenus à partir de nos propositions et méthodes de gestion des conteneurs.

4

Implémentation, tests et résultats

Sommaire

Introduction	53
4.1 Environnements utilisés	54
4.2 Scénario d'implémentation	56
4.3 Présentation des résultats	58
Conclusion	71

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'implémentation, aux tests et à l'évaluation des résultats de notre modèle d'optimisation des conteneurs dans un terminal portuaire. Après avoir élaboré les concepts théoriques et les modèles mathématiques dans les chapitres précédents, nous passons ici à la phase pratique.

4.1 Environnements utilisés

Pour la résolution de notre problématique, nous avons utilisé trois outils principaux : Jupyter(python), CPLEX et Arduino. Chacun de ces outils a joué un rôle essentiel et complémentaire dans la mise en œuvre de notre solution, apportant des capacités spécifiques nécessaires à chaque étape du processus.

4.1.1 Anaconda, Python

Anaconda est une plate-forme open source qui rassemble les meilleurs outils pour les professionnels de la science des données avec plus de 100 packages populaires prenant en charge les langages Python, Scala et R [49].

Jupyter notebook

Les notebooks Jupyter sont des applications Web exécutées localement qui permettent d'intégrer du code en direct, des équations, des graphiques interactifs et du texte en Markdown. Bien que Python soit le langage standard, les notebooks Jupyter prennent en charge une variété d'alternatives, y compris l'autre langage majeur utilisé en science des données [51],



FIGURE 4.1 – Jupyter notebook.

4.1.2 IBM ILOG CPLEX

CPLEX, développé par une société bien connue dans le domaine de la technologie, est un logiciel performant largement employé dans divers secteurs pour résoudre des problèmes

complexes d'optimisation. Il est utilisé dans des domaines tels que : la recherche opérationnelle, l'ingénierie et la gestion. Il excelle dans la résolution de problèmes variés, notamment la programmation linéaire, quadratique, entière mixte, par contraintes, ... etc

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio regroupe un ensemble d'outils pour la programmation mathématique et la programmation par contraintes. Il associe :

- Un environnement de développement intégré (Integrated Development Environment - IDE) nommé Cplex Studio IDE (sous Windows)
- Un langage de modélisation : le langage OPL (Optimization Programming Language).
- Deux solveurs : IBM ILOG CPLEX pour la programmation mathématique (résolution de programmes linéaires en nombres fractionnaires, mixtes ou entiers et de programmes quadratiques) et IBM ILOG CP Optimizer pour la programmation par contraintes

Le solveur Cplex s'active par défaut, Il offre également des fonctionnalités avancées telles que la parallélisation pour accélérer la résolution de problèmes sur des systèmes informatiques à haute performance, ainsi que des interfaces conviviales pour différents langages de programmation tels que Python, Java, C et C++ [38] .

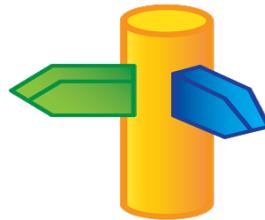


FIGURE 4.2 – Ibm Cplex .

4.1.3 Le langage OPL

Le langage utilisé dans IBM ILOG CPLEX est le langage OPL (Optimization Programming Language), c'est un langage de modélisation qui simplifie l'écriture de programmes linéaires (ou quadratiques) en utilisant une syntaxe proche des formules mathématiques. De plus, il permet à l'utilisateur de séparer le modèle des données, ce qui facilite les tests avec différents ensembles de données sans avoir à modifier le modèle lui-même [38].

OPL fonctionne par projets : pour résoudre un modèle l'utilisateur doit créer un projet OPL dans Cplex Studio IDE qui doit contenir au minimum un fichier "modèle" et un fichier de "configuration d'exécution". En effet chaque projet est constitué de plusieurs types de fichiers :

- un fichier modèle (.mod) qui contient le modèle à résoudre ;
- un fichier de données (facultatif) qui contient les données pour un modèle ;

- un fichier de paramètres (.ops) (facultatif) qui permet de paramétrer le solveur CPLEX ;
- un fichier de configuration d'exécution (.oplproject) qui indique à l'IDE ce qu'il doit faire quand l'utilisateur demande l'exécution du projet. C'est à dire quel est le modèle à résoudre et quels sont les paramètres et les données (s'il y en a) [38] ;

4.1.4 Arduino IDE

L'Arduino IDE est un environnement fournit par les créateurs d'Arduino qui permet d'écrire du code en C/C++, de compiler en langage machine adapté et de transférer un programme vers une carte Arduino [33] et de le téléverser via USB pour une exécution directe. . Il offre un environnement convivial avec éditeur de texte, gestion des bibliothèques, moniteur série pour le débogage, et support multiplateforme (Windows, macOS, Linux), facilitant ainsi le développement de projets interactifs et personnalisés.



FIGURE 4.3 – Arduino.

4.2 Scénario d'implémentation

Pour implémenter le scénario décrit dans l'organigramme, nous devons suivre les étapes mentionnées tout en intégrant différentes technologies à chaque étape clé du processus. Voici un aperçu détaillé de l'implémentation :

Étape 1 : Récupération des emplacements vides (IoT) : Dans cette étape, nous utilisons des capteurs IoT (Internet des Objets) pour identifier et récupérer les emplacements vides dans le dépôt. Ces capteurs collectent des données en temps réel sur l'état des emplacements, indiquant ceux qui sont disponibles pour accueillir de nouveaux conteneurs.

Étape 2 : Vérification du modèle et affectation des conteneurs aux emplacements vides : Une fois les emplacements vides identifiés, nous utilisons Cplex, pour vérifier le modèle et affecter les conteneurs de manière initial d'une manière que chaque conteneur va avoir son emplacement précis.

Étape 3 : Optimisation des emplacements des conteneurs et minimisation du nombre de shifting : Dans la dernière étape, un script Python est utilisé pour affiner les affectations initiales et optimiser les emplacements des conteneurs. Python

permet de visualiser les positions des conteneurs et d'ajuster les emplacements afin de minimiser les déplacements futurs. Les conteneurs dont la date de sortie est la plus proche sont placés en haut des piles, facilitant ainsi leur extraction et réduisant le temps et les coûts de manutention

Le processus est conçu pour fonctionner en continu, vérifiant périodiquement l'arrivée de nouveaux conteneurs. Si de nouveaux conteneurs arrivent, le processus recommence à partir de l'étape 1 pour maintenir une gestion optimale du dépôt. Ci-dessous le diagramme illustrant ce processus (voir la figure 4.4) :

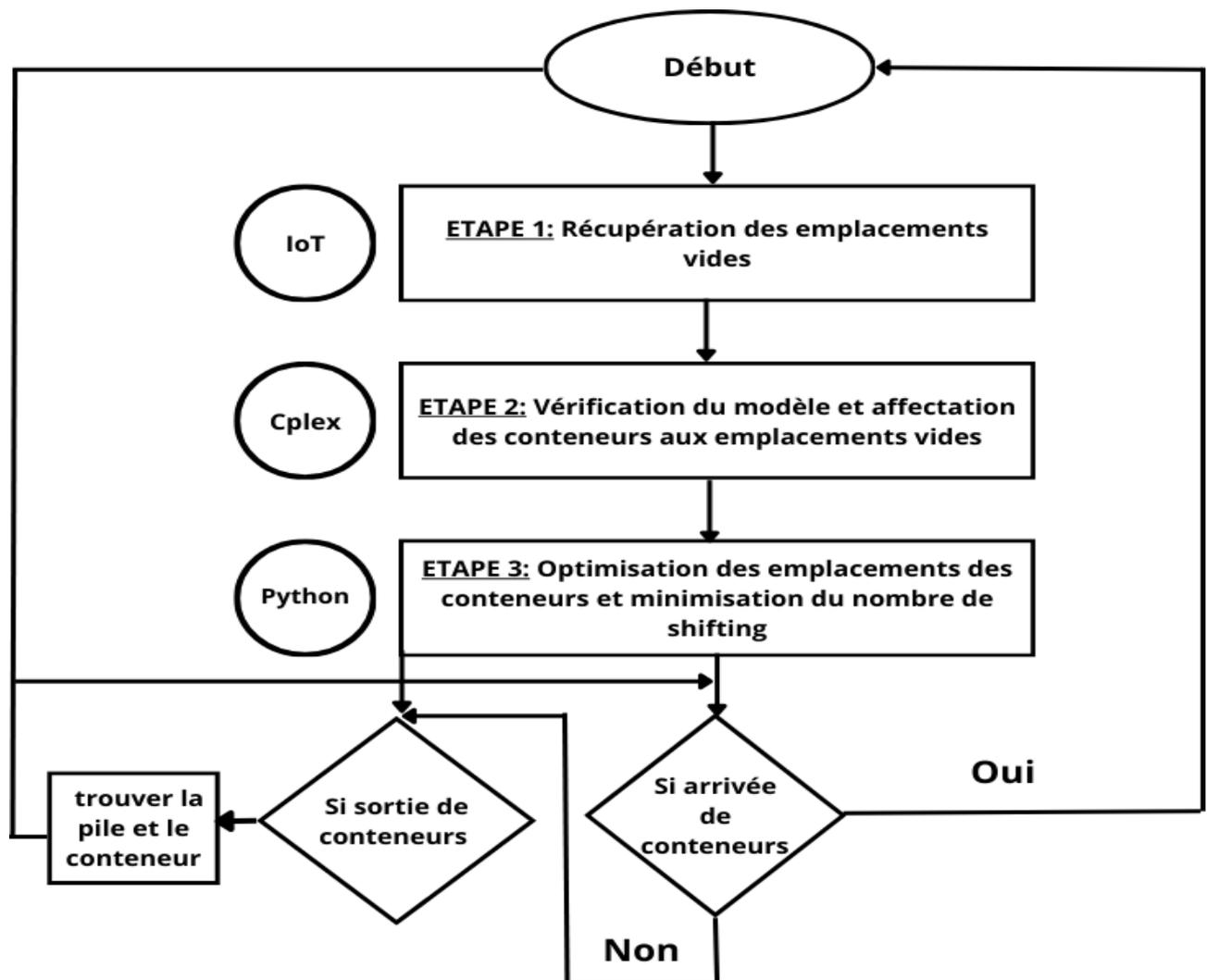


FIGURE 4.4 – Diagramme illustrant le scénario d'implémentation

4.3 Présentation des résultats

Dans cette section, nous allons présenter les résultats obtenus à chaque étape du processus décrit dans l'organigramme. Nous commencerons par la récupération des emplacements vides à l'aide de la technologie IoT, suivie de la vérification du modèle et de l'affectation des conteneurs à l'aide de Cplex. Enfin, nous démontrerons l'optimisation des emplacements des conteneurs à l'aide de Python, en minimisant le nombre de déplacements nécessaires.

4.3.1 Paramètres de simulation

Voici les paramètres utilisés lors de la résolution de notre problème :

Description des paramètres	Valeurs
Nombre total des conteneurs	$C = 30$
Nombre d'emplacements	$E = 10$
Nombre total de niveaux	$N = 6$
Paramètre important à la moyenne donnée de manière itérative lors de la réception	$\alpha = 3$
Moyenne de séjours des conteneurs dans le terminal	$\mu = 13$
Durée de stockage	$I = 15$ jours
Fenêtre de réservation	$W = 30$ jours
Date d'arrivée des conteneurs	$t_0 = 01/06/2024$

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

4.3.2 Détection des emplacements vides

Équipements utilisés

Pour assurer un suivi précis et efficace des emplacements vides des conteneurs, un ensemble de dispositifs technologiques est mis en œuvre. Ces équipements collaborent pour détecter la présence des conteneurs, traiter les données recueillies et afficher les résultats de manière accessible. Voici un aperçu détaillé de chaque composant essentiel du système :

- **Carte arduino** : c'est une carte électronique qui est un croisement entre un ordinateur très simplifié et un automate programmable. En clair, une carte prête à l'emploi et qui peut être programmée pour piloter tout ce que l'on souhaite.

La carte Arduino se compose de sept éléments principaux : le micro-contrôleur, le port d'alimentation de la carte et de téléversement, le port d'alimentation externe, les trois LED, les connectiques digitales, analogiques et "power" [36].



FIGURE 4.5 – Carte Arduino [33].

- **Cable USB** : un câble utilisé pour connecter une carte Arduino à un ordinateur ou à d'autres dispositifs électroniques. Ce câble sert principalement à programmer la carte, transférer des données et fournir de l'alimentation.



FIGURE 4.6 – Cable USB.

- **Capteurs infrarouge** : un capteur infrarouge est un dispositif électronique qui détecte et mesure les rayonnements infrarouges émis par des objets, convertissant ces rayonnements en un signal électrique. Utilisé dans la détection de mouvement, la mesure de température sans contact, le suivi des objets et la communication optique, il peut être actif (émettant son propre rayonnement) ou passif (détectant le rayonnement naturel des objets).



FIGURE 4.7 – Capteur infrarouge.

- **Platine de prototypage (La breadboard)** : Une plateforme de prototypage électronique avec deux rangées verticales colorées (+ rouge, - bleu) de chaque côté, divisées en lignes horizontales. Les circuits intégrés se placent au centre, traversant

les rangées horizontales. Des câbles Dupont mâles sont utilisés pour connecter les composants, assurant une configuration flexible et modulaire des circuits électroniques [26].

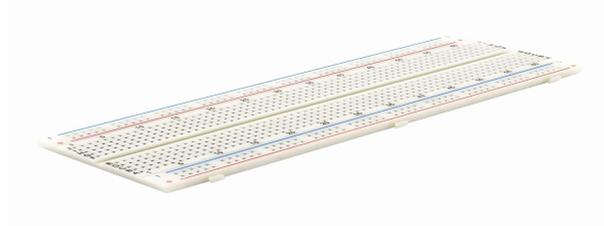


FIGURE 4.8 – Breadboard [28].

- **Écran LCD** : L'écran LCD est un type de technologie d'affichage à écran plat utilisé dans divers appareils électroniques.

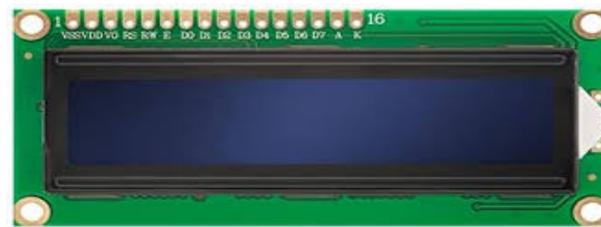


FIGURE 4.9 – écran LCD.

Implémentation et illustration des résultats

Pour implémenter un système de détection des emplacements vides, nous utiliserons un capteur infrarouge (IR), une carte Arduino pour le traitement des données, et une communication USB pour transmettre les informations. Dans ce système, l'écran LCD affichera l'état de chaque emplacement (occupé ou vide) ainsi que le nombre de places vides. Le capteur IR détecte la présence ou l'absence d'un conteneur, et l'Arduino traite cette information pour la transmettre via USB et l'afficher sur l'écran LCD. Ce processus permet de surveiller efficacement les emplacements et de transmettre les données en temps réel pour une gestion optimisée des ressources. Notre proposition d'implémentation sur arduino est donnée comme suit (figure 4.10) :

```

1  /* This code is developed to manage the free space of the container stacks using Infrared sensors Authors: SOUKGUI Fifi, MERZOUK Emilia, Dr ATMANI Rouloud and Dr BEZOUJ Madani Copyright 2024
2  */
3  #include<LiquidCrystal.h>
4  int nbr_cont = 0;
5  LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); /*définir les Pins utilisés dans l'Arduino*/
6  void setup() {
7  /*----- Définir les variables du LCD -----*/
8  lcd.begin(16,2); /*Initialiser le type de l'écran LCD*/
9  /*----- Les entrées des capteurs infrarouges sont branchés sur les pins 6-10 de l'Arduino -----*/
10 pinMode(6,INPUT); // entrée
11 pinMode(7,INPUT);
12 pinMode(8,INPUT);
13 pinMode(9,INPUT);
14 pinMode(10,INPUT);
15 Serial.begin(9600);
16 lcd.setCursor(0,0); /*Positionner le curseur à la ligne 0 et à gauche*/
17 lcd.print("Nb Places Vide"); /*Ecrire un commentaire sur cette ligne*/
18 }
19 void loop() {
20 nbr_cont = 5;
21 /*----- Manipuler les capteurs Infrarouges -----*/
22 Serial.println("-----");
23 for (int i=6; i<=10; i++){
24 if (digitalRead(i)==LOW){ /*S'il y a un obstacle (conteneur)*/
25 nbr_cont = nbr_cont - 1; /*Augmenter le nombre de conteneurs*/
26 Serial.print("L'emplacement");
27 Serial.print(i-5);
28 Serial.println(" contient un conteneur. ");
29 }else{
30 Serial.print("L'emplacement");
31 Serial.print(i-5);
32 Serial.println(" est vide. ");
33 }
34 }/*----- Manipuler l'écran LCD -----*/
35 Serial.println(nbr_cont);
36 lcd.setCursor(0,1); /*Positionner le curseur à la ligne 1 et à gauche*/
37 lcd.print(nbr_cont); /*Afficher le nombre de conteneurs vides*/
38 delay(3000);

```

FIGURE 4.10 – implémentation sur arduino.

Pour concevoir un prototype de détection des emplacements vides sur 5 niveaux et afficher les résultats sur un écran LCD, nous utiliserons plusieurs capteurs infrarouges (IR), chaque niveau avec son capteur, une carte Arduino pour le traitement des données et un écran LCD pour l'affichage des résultats. Ci-joint le prototype proposé (figure 4.11) :



FIGURE 4.11 – Prototype de détection des emplacements vides

Après avoir mis en œuvre et testé notre prototype , nous avons obtenu des résultats significatifs. Ces résultats sont basés sur les lectures effectuées par les capteurs infrarouges et l'affichage sur l'écran LCD. On donne un exemple par rapport aux niveaux 4 et 5 :

- Les niveaux 4 et 5 sont vides Les résultats obtenus lors de l'exécution du code sont présentés ci-dessous :

```

COM4
|
L'emplacement2 contient un conteneur.
L'emplacement3 contient un conteneur.
L'emplacement4 est vide.
L'emplacement5 est vide.
Le nombre de places vides dans la ligne 1 du parc à conteneurs est: 2
-----
L'emplacement1 contient un conteneur.
L'emplacement2 contient un conteneur.
L'emplacement3 contient un conteneur.
L'emplacement4 est vide.
L'emplacement5 est vide.
Le nombre de places vides dans la ligne 1 du parc à conteneurs est: 2
-----
L'emplacement1 contient un conteneur.
L'emplacement2 contient un conteneur.
L'emplacement3 contient un conteneur.
L'emplacement4 est vide.
L'emplacement5 est vide.
Le nombre de places vides dans la ligne 1 du parc à conteneurs est: 2
-----
L'emplacement1 contient un conteneur.
L'emplacement2 contient un conteneur.
L'emplacement3 contient un conteneur.
L'emplacement4 est vide.
L'emplacement5 est vide.
Le nombre de places vides dans la ligne 1 du parc à conteneurs est: 2

```

FIGURE 4.12 – Résultats du code Arduino

Les tests effectués sur le prototype ont confirmé les résultats obtenus par le code.

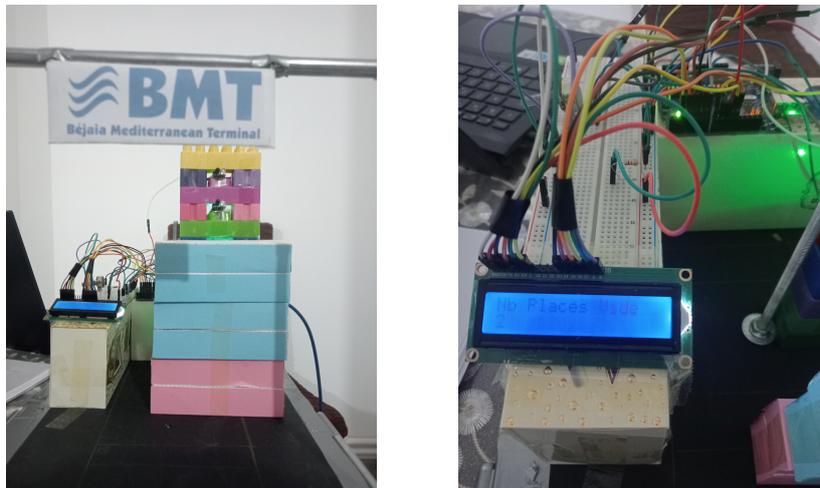


FIGURE 4.13 – Détection des emplacements vides

Les résultats obtenus montrent que notre prototype est capable de détecter efficacement les emplacements vides dans le terminal de conteneurs.

4.3.3 Pré-affectation des conteneurs au sein du terminal

L'affectation initiale des conteneurs aux emplacements vides détectés est réalisée en utilisant une approche de modélisation mathématique avec des contraintes spécifiques . Ce modèle permet de placer les conteneurs dans des emplacements précis. Pour implémenter et résoudre ce modèle sur CPLEX, il faut suivre une série d'étapes précises.

Application du modèle

ÉTAPE 1

- Tout d'abord il faut créer un projet OPL dans lequel on pourra définir notre modèle. Pour cela dans Cplex Studio il faut cliquer sur : *Fichier* → *Nouveau* → *ProjetOPL*.

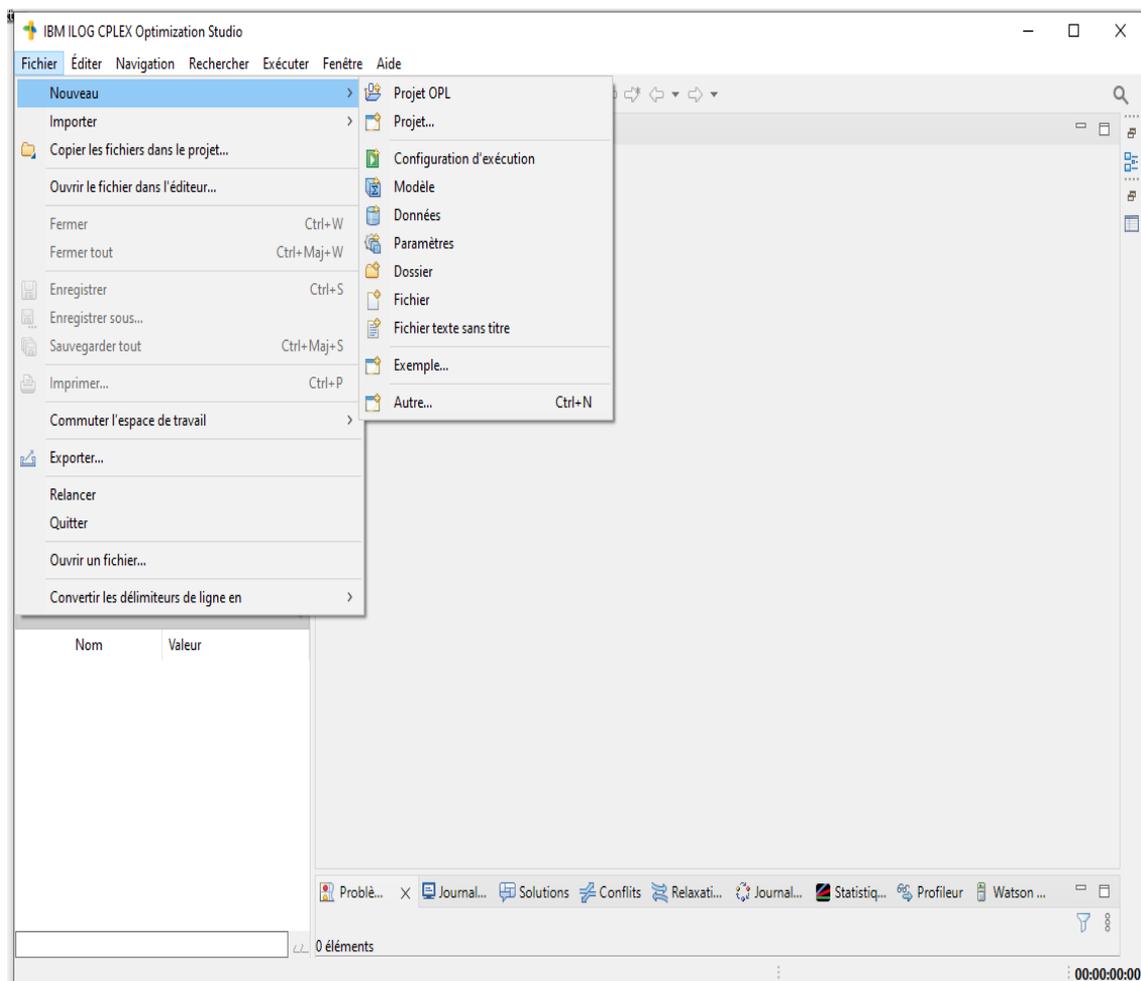


FIGURE 4.14 – Schéma de modèle

- Une fois la fenêtre s'ouvre entrez un nom de projet, choisissez son emplacement (dossier parent) et cochez "Création d'un modèle" ainsi que "ajouter une configuration d'exécution par défaut".

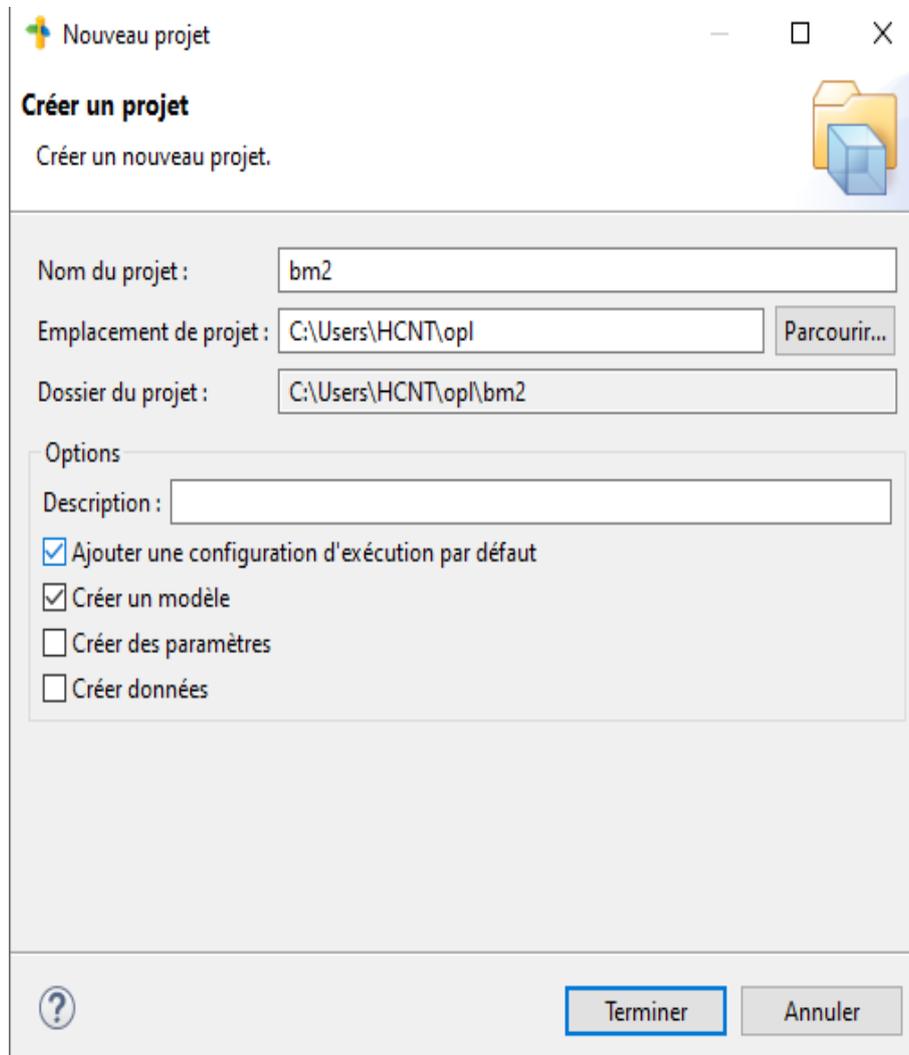


FIGURE 4.15 – Fenêtre des options de modèle

Étape 2

- On a fait insérer les constantes, les variables de décision, les contraintes et la fonction objectif de notre problème d'optimisation en fichier (.mod).
- Dans le fichier (.dat), on fournit les valeurs des constantes déclaré en fichier (.mod) qui sont suivis par le symbole ' . . . ' .

Étape 3

Dans cette étape on fait exécuter notre modèle de la manière suivante :

- On clique sur le bouton d'exécution.
- Configuration d'exécution → Exécuter → Configuration d'exécution par défaut

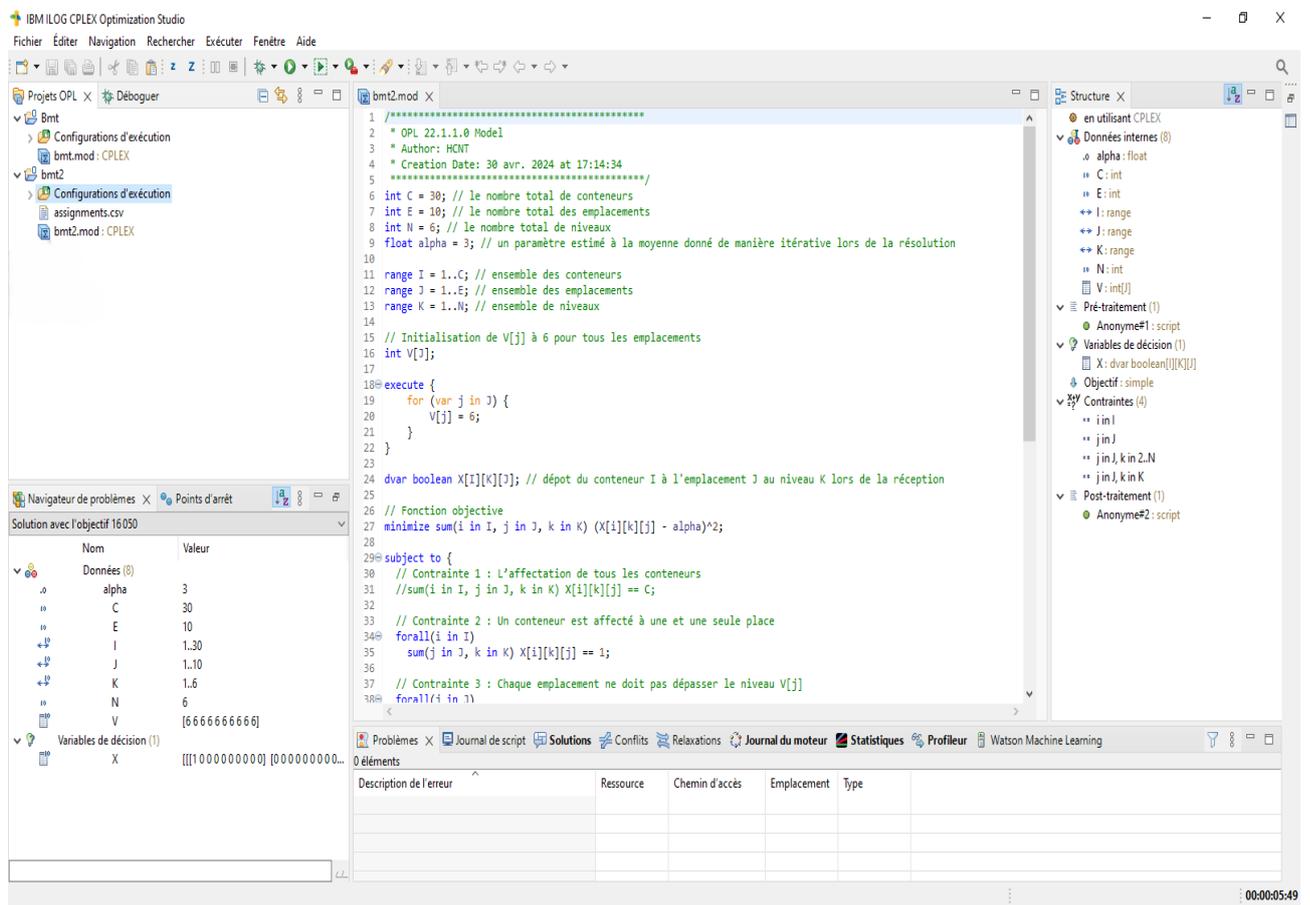


FIGURE 4.16 – Schéma d'exécution de modèle

Résultats

La solution obtenue avec le solveur CPLEX, nous a permis d'avoir l'affectation initiale des conteneurs.

Cette affectation est illustrée par le diagramme suivant (voir la figure 4.23 :)

Pour obtenir ce diagramme, nous avons exporté les résultats de CPLEX sous format CSV, puis les avons importés dans Python pour générer la visualisation.

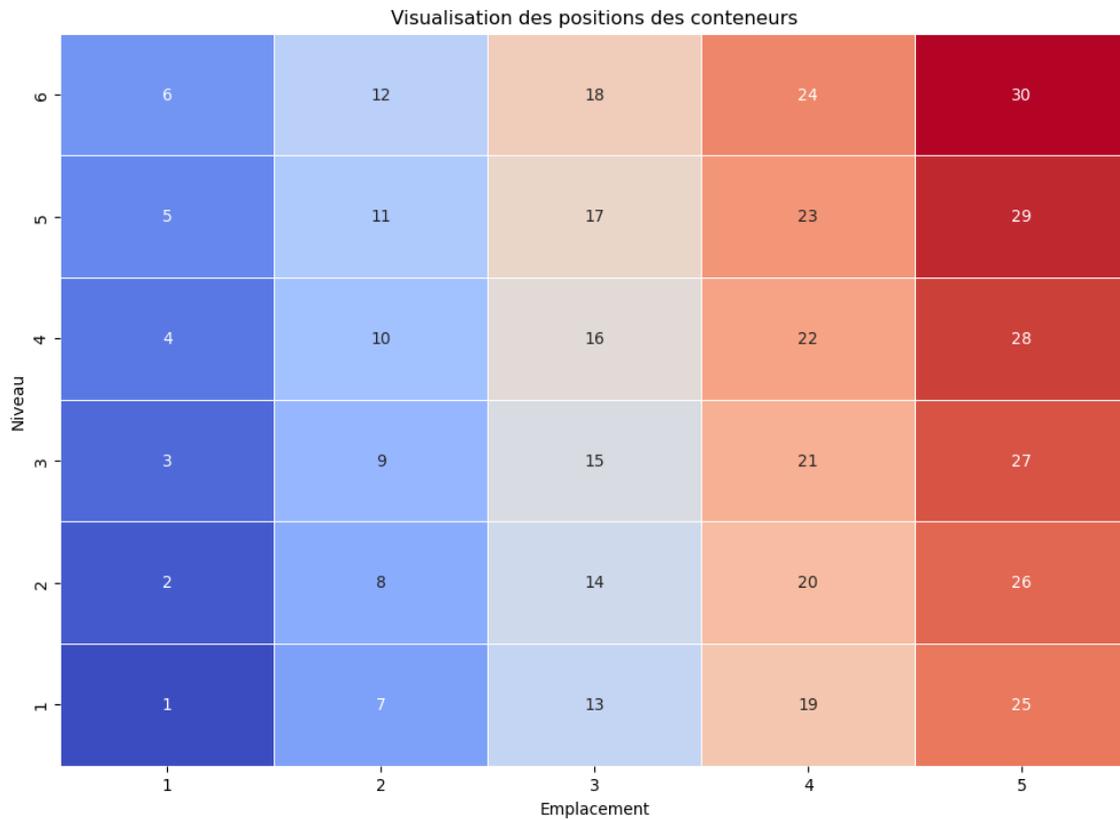


FIGURE 4.17 – Affectation initiale des conteneurs

4.3.4 Génération des dates de sorties des conteneurs

Avant d'entamer la minimisation des "shifting" (déplacements des conteneurs), nous proposons un système qui génère les dates de sortie des conteneurs. Ce système remplace un système de réservation (booking) et constitue un socle essentiel pour la minimisation des "shifting". Le système proposé génère des dates de sortie pour chaque conteneur en utilisant une distribution normale centrée autour d'une moyenne prédéfinie, avec un intervalle de temps maximum. Ce processus inclut également l'ajout d'une heure aléatoire pour chaque date de sortie, simulant ainsi un système de réservation réaliste.

Implémentation de l'algorithme

Pour concrétiser notre proposition et démontrer l'efficacité du système de génération des dates de sortie des conteneurs, nous allons maintenant passer à l'implémentation de ce système sur Python.

- **Importation des bibliothèques nécessaires :**

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sn
```

FIGURE 4.18 – Bibliothèques nécessaires

- **Identifications des paramètres**

```
n_conteneurs = 30
moyenne = 13
intervalle = 15
```

FIGURE 4.19 – Paramètres

- **Génération des dates de sortie qu'on utilise comme un système de réservation** : Nous définissons une fonction qui génère les dates de sortie des conteneurs en utilisant une distribution normale et ajoute une composante horaire aléatoire pour simuler un système de réservation.

```
def generer_dates_sortie_reservation(n, date_arrivee, moyenne, intervalle):
    # Générer des durées de stockage avec une distribution normale
    dates_sortie = np.random.normal(loc=moyenne, scale=intervalle/6, size=n)
    # Limiter les valeurs générées entre 0 et l'intervalle (15 jours)
    dates_sortie = np.clip(dates_sortie, 0, intervalle)
    # Convertir les durées en dates de sortie réelles
    dates_sortie = date_arrivee + pd.to_timedelta(dates_sortie, unit='D')

    # Simuler le système de réservation
    dates_sortie_reservees = []
    for date in dates_sortie:
        # Générer une heure aléatoire pour la date de sortie
        heure = np.random.randint(8, 16)
        minute = np.random.randint(0, 60)
        seconde = np.random.randint(0, 60)
        date_reservee = date + pd.Timedelta(hours=heure, minutes=minute, seconds=seconde)

        dates_sortie_reservees.append(date_reservee)

    return pd.to_datetime(dates_sortie_reservees)
```

FIGURE 4.20 – Génération des dates de sorties

- **Génération des dates de sortie pour les conteneurs arrivant le jour t_0 :**
Nous utilisons la fonction définie précédemment pour générer les dates de sortie pour les conteneurs arrivant le jour $t_0 = 01/06/2024$.

Résultats de l'implémentation

Après l'implémentation en Python, nous avons obtenu des dates de sortie générées que nous représentons dans le tableau ci-dessous :

Conteneur	date de sortie
1	2024-06-14 01 :35
2	2024-06-15 12 :16
3	2024-06-13 04 :36
4	2024-06-11 10 :23
5	2024-06-12 03 :25
6	2024-06-09 07 :29
7	2024-06-13 02 :30
8	2024-06-15 10 :45
9	2024-06-14 02 :19
10	2024-06-13 07 :50
11	2024-06-11 21 :13
12	2024-06-16 08 :34
13	2024-06-16 08 :33
14	14 2024-06-15 18
15	2024-06-13 18 :23
16	16/06/2024 12 :00
17	2024-06-14 08 :07
18	2024-06-14 03 :48
19	2024-06-14 11 :27
20	2024-06-16 14 :01
21	2024-06-16 02 :31
22	2024-06-16 13 :10
23	2024-06-15 01 :02
24	2024-06-16 13 :05
25	2024-06-14 10 :42
26	2024-06-13 02 :15
27	2024-06-11 21 :04
28	11/06/2024 20 :50
29	2024-06-16 11 :24
30	30 2024-06-16 15

FIGURE 4.21 – dates de sorties générées .

Ainsi que la distribution des dates de sortie des conteneurs est illustré comme suit (voir la figure 4.22 :)

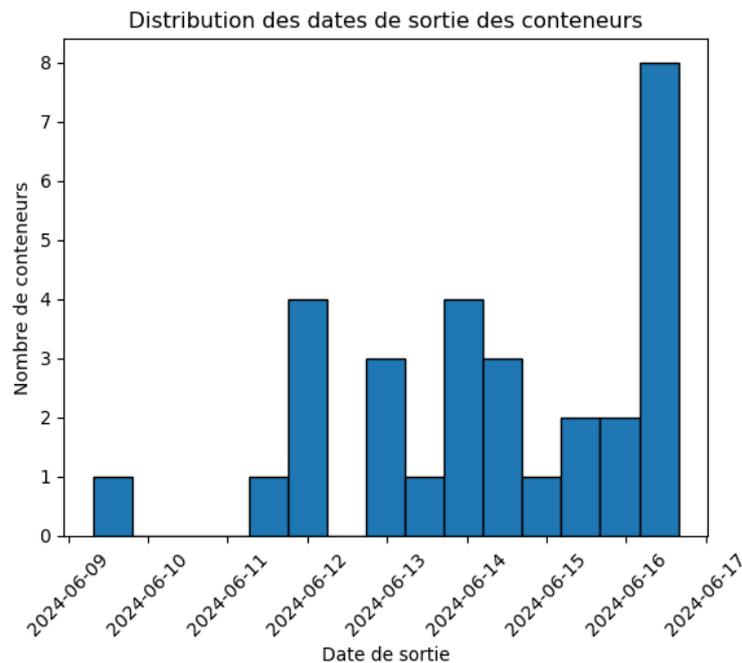


FIGURE 4.22 – Histogramme de distribution des conteneurs

4.3.5 Optimisation des shiftings

Après avoir effectué l'affectation des conteneurs, la génération des dates de sorties des conteneurs on se concentre principalement sur une phase cruciale : la minimisation des déplacements de conteneurs, utilisant pour cela un algorithme heuristique. Voici les étapes d'implémentation détaillées que nous suivons pour atteindre cet objectif :

1 . Importation des bibliothèques nécessaire

Les bibliothèques utilisées dans notre algorithmes sont :

- **Numpy** : utilisée pour les calculs numériques.
- **Pandas** : utilisée pour la manipulation de données.
- **Matplotlib et seaborn** : utilisées pour la visualisation .

2. Définir la fonction pour générer les dates et heures de sortie avec réservation

Dans cette étape on génère des dates de sortie pour les conteneurs en utilisant une distribution normale, puis ajoute des heures, minutes et secondes aléatoires pour simuler un système de réservation en appliquant l'algorithme 1, puis générer les dates de sortie pour les conteneurs arrivant le jour indiquer qui est le 01/06/2024 et les combinant dans une seule liste après avoir Organiser les dates de sortie dans une structure de données

(DataFrame) pour faciliter l'analyse et la manipulation, et enfin afficher la liste des dates obtenues.

Voici les résultats obtenue dans notre exemple :

3. Visualiser la distribution des dates de sortie

Après l'affichage de la liste des dates, on créer un histogramme pour montrer comment les dates de sortie des conteneurs sont distribuées comme la figure 4.21 indique .

4. Importation de la liste d'affectation

Dans cette étape on importe les données existantes sur la position initiale des conteneurs obtenues sur cplex à partir d'un fichier CSV.

Après l'importation on affiche les premières lignes des données importées pour s'assurer qu'elles ont été lues correctement et que la structure est appropriée en utilisant la commande `data.head()`.

En suite passant a la création de matrice pour visualiser les numéros du conteneur :

`data.pivot` : utilisé pour Crée une table pivot pour organiser les conteneurs par niveau (Level) et emplacement (Location).

`matrix.iloc[: :-1 :]` pour inverse l'ordre des niveaux pour que le niveau 1 soit en bas de la visualisation.

`sns.heatmap()` : créer pour visualiser les positions initiales des conteneurs dans le terminal.

5. Trier les conteneurs par date de sortie

Le tri des conteneurs se fait par les dates de sortie qu'on a obtenue dans la 2ème partie. Le conteneur avec les dates les plus proches étant placés en premier, en utilisant :

`df_dates.sort _ values` : Trie le DataFrame en fonction des dates de sortie.

`reset _ index(drop=True)` : Réinitialise les index du DataFrame après le tri.

Ensuite créer une liste vide appelé **position** pour stocker les nouvelles positions (niveau, emplacement) obtenue apres avoir parcourir les emplacement, et parcourir les niveaux du plus élevé au plus bas pour libérer colonne par colonne en utilisant la boucle **for**.

6. Réorganisation des conteneurs en fonction des dates de sortie

Premièrement, on doit assigner de nouvelles positions aux conteneurs en fonction de leurs dates de sortie, en utilisant les positions préparées à l'étape précédente et cela en utilisant :

`new _ assignments` : Liste pour stocker les nouvelles affectations (conteneur, emplacement, niveau).

`for i in range(len(df _ dates))` : Parcourt les conteneurs triés.

`new_assignments.append` : Ajoute les nouvelles affectations à la liste.

Deuxièmement, on crée un nouveau DataFrame pour organiser les nouvelles affectation de conteneurs pour une analyse et une manipulation ultérieures.

Troisièmement, on crée une nouvelle matrice pour visualiser les nouvelles affectations, en s'assurant que les niveaux sont affichés dans le bon ordre.

7. Afficher la nouvelle matrice avec les numéros des conteneurs

Pour l'affichage de la nouvelle matrice, on crée une nouvelle carte thermique (heatmap) pour visualiser les nouvelles positions des conteneurs après réaffectation basée sur les dates de sortie.

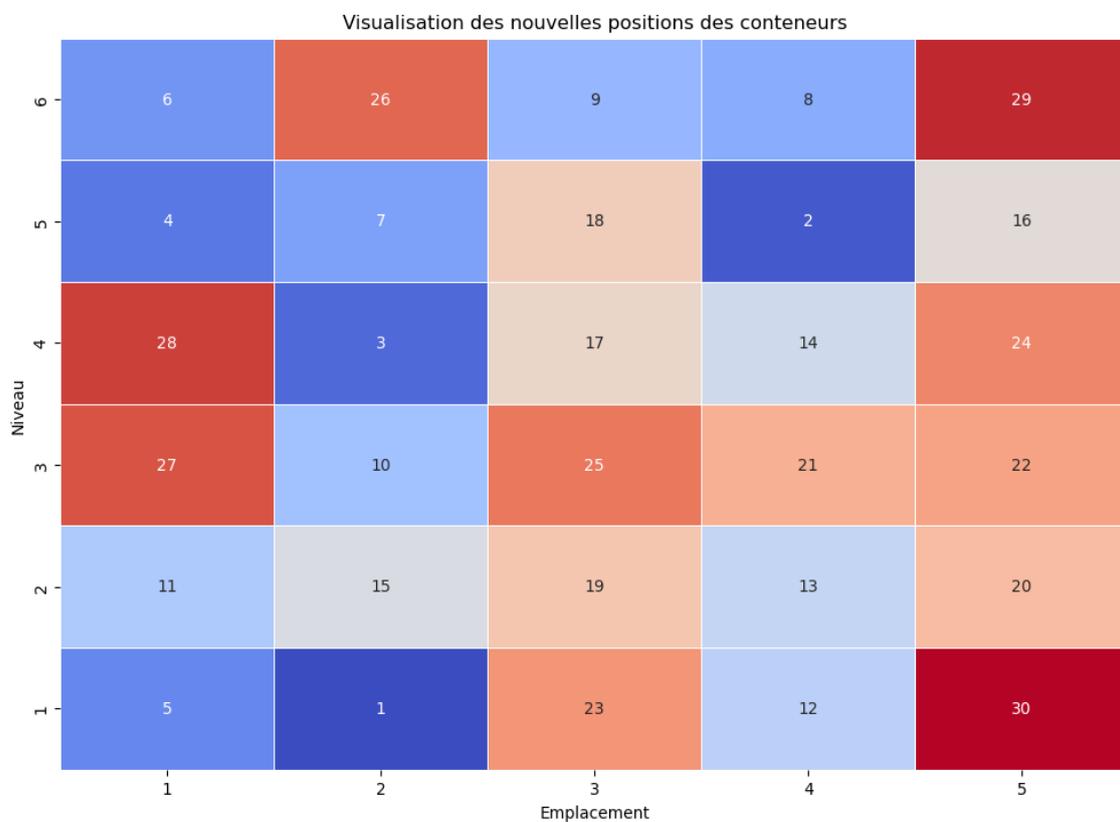


FIGURE 4.23 – Affectation finale des conteneurs

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le processus d'implémentation et les tests réalisés pour valider notre modèle d'optimisation des conteneurs dans un terminal portuaire. En utilisant divers outils et environnements comme Anaconda, Python, IBM ILOG CPLEX,

OPL et Arduino IDE, nous avons pu développer et tester nos algorithmes de détection des emplacements vides, de pré-affectation des conteneurs, de génération des dates de sortie et d'optimisation des shifting. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative de l'efficacité opérationnelle du terminal, démontrant ainsi la pertinence et l'efficacité de notre approche basée sur l'IoT et les techniques d'optimisation combinatoire.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire a permis de démontrer l'impact significatif que peuvent avoir les technologies de l'internet des Objets (IoT) et les méthodes d'optimisation combinatoire sur la gestion des terminaux portuaires. En particulier, l'intégration de capteurs IoT pour la détection des emplacements vides et l'utilisation d'algorithmes d'optimisation pour l'affectation des conteneurs ont montré des améliorations notables en termes d'efficacité opérationnelle et de gestion des ressources.

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que l'application des capteurs IoT permet une surveillance en temps réel des infrastructures portuaires, ce qui facilite la gestion proactive des emplacements et des mouvements des conteneurs.

La modélisation mathématique et les algorithmes d'optimisation développés contribuent à réduire les coûts opérationnels et à maximiser l'utilisation des capacités du terminal.

Ce mémoire met également en lumière l'importance des approches combinant la technologie et les mathématiques pour résoudre des problèmes complexes dans le secteur de la logistique et du transport. Les perspectives de recherche futures incluent l'amélioration des modèles et des algorithmes présentés, ainsi que l'exploration de nouvelles applications des technologies IoT dans d'autres domaines de la gestion des infrastructures.

Le travail réalisé prouve que l'innovation technologique et l'optimisation combinatoire peuvent significativement améliorer la gestion des terminaux portuaires, ouvrant la voie à des ports plus intelligents, plus efficaces et mieux préparés pour les défis du commerce international moderne.

Pour nos perspectives de recherche futures, nous recommandons d'améliorer les modèles et les algorithmes présentés afin d'optimiser encore davantage la gestion des terminaux portuaires. Cela pourrait inclure des ajustements pour une plus grande précision et une adaptation à des contextes spécifiques de l'industrie. Nous envisageons également d'explorer de nouvelles applications des technologies IoT dans d'autres domaines de la gestion des infrastructures. Concernant l'utilisation du système de booking, l'adoption de la stratégie "first out, first in" permettra de rationaliser les mouvements de conteneurs en priorisant ceux qui doivent sortir du terminal en premier. Cette approche aidera à réduire les délais d'attente et les coûts associés. En ce qui concerne l'IoT, nous recommandons d'explorer des méthodes avancées d'identification des conteneurs pour limiter les pertes et améliorer la traçabilité. Nous prévoyons également d'étendre le système proposé pour la détection des emplacements vides pour envoyer les données vers une interface utilisateur plus sophistiquée ou une base de données, permettant ainsi un suivi à long terme et une analyse approfondie des performances du terminal.

En conclusion, l'innovation technologique et l'optimisation combinatoire offrent des opportunités significatives pour transformer les terminaux portuaires en installations plus intelligentes, efficaces et adaptées aux défis du commerce international moderne. Ces avancements peuvent non seulement améliorer l'efficacité opérationnelle mais aussi renforcer la compétitivité des ports dans un environnement économique mondial de plus en plus exigeant.

Bibliographie

- [1] ACADEMY, K. Normal distributions review. <https://fr.khanacademy.org/math/seconde-seconde2h2> (novembre 2022).
- [2] ALLEK, S., AND ZOUAR, H. Minimisation du temps d'attente des navires conventionnels cas du port de béjaia. Master's thesis, UNIVERSITÉ DE Bejaia, Algérie, 2015.
- [3] BELHADJ, N., AND ABBAD, A. La sécurité de l'internet des objets (iot). Master's thesis, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [4] BENCHEIKH, G. *Planification conjointe des activités de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources*. PhD thesis, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP), 23 janvier 2020.
- [5] BENHADJI, H. Prida track 1 (t1). les fondamentaux de l'iot, 24/08/2020. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Africa/Documents/PRIDA>
- [6] BOULDJENNET, Y. Smart port city : le port du futur. Master's thesis, UNIVERSITÉ de Aix MARSEILLE, 2018.
- [7] CHIROUAL, Y., AND HADDOUCHE, R. Optimisation des temps de manutention des conteneurs au niveau de bmt. Master's thesis, UNIVERSITÉ DE Bejaia, 2022.
- [8] CHRISTOS, H., AND STEIGLITZ, K. "*Optimisation combinatoire : Théorie et algorithmes*". Prentice-Hall, 01/1982. Page 3.
- [9] DAI, D., AND FERTAS, R. Modélisation et optimisation du temps de manutention au niveau de bmt. Master's thesis, UNIVERSITÉ DE Bejaia, Algérie, 2017.
- [10] DAOUDI, M. *Approches de résolution par les métaheuristiques de problèmes d'optimisation combinatoire NP-Difficiles*. PhD thesis, Université de science et technologie HOUARI BOUMEDIAN, 2012.
- [11] DIMITRI, W. Support de cours théorie de la complexité. École nationale supérieure d'informatique pour l'industrie et l'entreprise (ensiie), 2022.
- [12] EVANS, D. The internet of things. *How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything, Whitepaper, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), page 1 à 12* (2011).
- [13] EXO7. *Livre d'analyse, cours de mathématiques, Extremums*. page 77 - 78.

- [14] FLIPO-DHAENENS, C. *Optimisation d'un réseau de production et de distribution*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1998.
- [15] FRÉMONT, A. *Livre Le monde en boites - Conteneurisation et mondialisation synthese N 53 page 23*. Le patrimoine scientifique de l'ifsttar, 2007.
- [16] GEORGE, D., RAY, F., AND SELMER. *Solution of a large-scale traveling-salesman problem*. Journal of the operations research society of America, 1954.
- [17] HEMMAK, A. Support de cours : Initiation a l'optimisation combinatoire, mai 2023.
- [18] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/CAPACITES/](https://BEJAIAMED.COM/CAPACITES/). Capacités (bmt), 2024.
- [19] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/EQUIPEMENTS/](https://BEJAIAMED.COM/EQUIPEMENTS/). Equipements de l'entreprise bmt, 2024.
- [20] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/ORGANISATION/](https://BEJAIAMED.COM/ORGANISATION/). Organisation de bmt, 2024.
- [21] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/PRESENTATION-DU PARTENARIAT/](https://BEJAIAMED.COM/PRESENTATION-DU-PARTENARIAT/). Présentation du partenariat de bmt, 2024.
- [22] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/SERVICES/](https://BEJAIAMED.COM/SERVICES/). Services de bmt, 2024.
- [23] [HTTPS://BEJAIAMED.COM/SERVICES/IMPORT](https://BEJAIAMED.COM/SERVICES/IMPORT). Procédures de bmt, 2024.
- [24] [HTTPS://BIGMEDIA.BPIFRANCE.FR/NEWS](https://BIGMEDIA.BPIFRANCE.FR/NEWS). Trois choses à savoir sur l'internet des objets (iot), 2022.
- [25] [HTTPS://FMEDECINE.UNIV-SETIF.DZ/COURS/5](https://FMEDECINE.UNIV-SETIF.DZ/COURS/5). COUR DE LA LOI NORMALE.
- [26] [HTTPS://FR.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PLATINE_dlad_finition_dubreadboard](https://FR.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/PLATINE_d_lad_finition_dubreadboard).
- [27] [HTTPS://FR.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/R_RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE](https://FR.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/R_RÉSISTANCE_ÉLECTRIQUE).
- [28] [HTTPS://MAKERSELECTRONICS.COM/PRODUCT/BREADBOARD 830-POINT](https://MAKERSELECTRONICS.COM/PRODUCT/BREADBOARD-830-POINT). MARKERS WE MAKE THE FUTURE.
- [29] [HTTPS://PCSI1-SAINT-LOUIS.OVH/SITE](https://PCSI1-SAINT-LOUIS.OVH/SITE). CHAPITRE 8 : ALGORITHMES GLOUTONS, 2023.
- [30] [HTTPS://PCSI1-SAINT-LOUIS.OVH/SITE/IMAGES/DOC2122/CH8_GLOUTONS.PDF](https://PCSI1-SAINT-LOUIS.OVH/SITE/IMAGES/DOC2122/CH8_GLOUTONS.PDF).
- [31] [HTTPS://TECFAETU.UNIGE.CH/STAF/STAF D/MERINO/UDO/TH](https://TECFAETU.UNIGE.CH/STAF/STAF-D/MERINO/UDO/TH). DISTRIBUTION NORMAL.
- [32] [HTTPS://WIKIMEMOIRES.NET/2019/09/DOMAINES-D-APPLICATIONS-DE-L IOT/](https://WIKIMEMOIRES.NET/2019/09/DOMAINES-D-APPLICATIONS-DE-L-IOT/). DOMAINE D'APPLICATION DE L'IOT, TRAVAUX ET RISQUES.
- [33] [HTTPS://WWW.ARDUINO.CC/EN/SOFTWARE](https://WWW.ARDUINO.CC/EN/SOFTWARE). ARDUINO KNOWLEDGE.
- [34] [HTTPS://WWW.CONNECTWAVE.FR/TECHNO-APPLI IOT](https://WWW.CONNECTWAVE.FR/TECHNO-APPLI-IOT). FONCTIONS D'UN OBJETS CONNECTÉ, RÉSEAUX ET INFRASTRUCTURES IOT .
- [35] [HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/MAPS](https://WWW.GOOGLE.COM/MAPS). LOCALISATION DE L'ENTREPRISE BMT, 2024.
- [36] [HTTPS://WWW.GOTRONIC.FR/ART-MODULE-ARDUINO-UNO-27744.HTM](https://WWW.GOTRONIC.FR/ART-MODULE-ARDUINO-UNO-27744.HTM)COMPLTE DESC. ARDUINO-UNO.
- [37] [HTTPS://WWW.IBM.COM/DOCS/FR/INFORMIX-SERVERS/12.10?TOPIC=ROUTINES-CLIP FUNCTION](https://WWW.IBM.COM/DOCS/FR/INFORMIX-SERVERS/12.10?TOPIC=ROUTINES-CLIP-FUNCTION). LA FONCTION CLIP.

- [38] IMB. IBM ILOG CPLEX OPTIMIZATION STUDIO OPL LANGUAGE REFERENCE MANUAL. [HTTPS://WWW.IBM.COM/DOCS.PDF](https://www.ibm.com/docs.pdf).
- [39] INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS, U. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'INTERNET DES OBJETS. *SÉRIE Y : INFRASTRUCTURE MONDIALE DE L'INFORMATION, PROTOCOLE INTERNET ET RÉSEAUX DE PROCHAINE GÉNÉRATION* (JUIN 2012).
- [40] JEXPORT. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CONTENEURS MARITIMES. [HTTPS://WWW.JEXPORT.CO/FR/BLOG](https://www.jexport.co/fr/blog). (22/04/2022).
- [41] JOURNEY, I. OBJET CONNECTÉ. [HTTPS://IOTJOURNEY.ORANGE.COM/FR-FR/EXPLORER/LES-SOLUTIONS-IOT/OBJET-CONNECTE](https://iotjourney.orange.com/fr/fr/explorer/les-solutions-iot/objet-connecte) (2020).
- [42] KASSABIAN, N. *OPTIMISATION DU STOCKAGE DES CONTENEURS DANS UN TERMINAL PORTUAIRE*. PHD THESIS, UNIVERSITÉ DE HAUTE ALSACE-MULHOUSE, 2022.
- [43] KHAMIS, A., AND LACHI, L. MODÉLISATION DU STOCKAGE DES CONTENEURS AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE BMT. MASTER'S THESIS, UNIVERSITÉ DE BEJAIA, ALGÉRIE, 2015/2016.
- [44] KHERICI, N. COURS « EXEMPLE DE PROBLÈMES D'OPTIMISATION COMBINATOIRE », OPTITIMISATION COMBINATOIRE, M1 GADM, UBMA, 2020/2, 02/2020.
- [45] LARIBI, I. *RÉSOLUTION DE PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT DE TYPE FLOW-SHOP DE PERMUTATION EN PRÉSENCE DE CONTRAINTES DE RESSOURCES NON-RENOUVELABLES*. PHD THESIS, THÈSE DOCTORAT, UNIVERSITÉ DE TLEMCEM, ALGÉRIE, DÉCEMBRE 2018.
- [46] MILLE, B. MÉTHODES APPROCHÉES POUR LA RÉOLUTION D'UN PROBLÈME D'ORDONNANCEMENT AVEC TRAVAUX INTERFÉRANTS. MASTER'S THESIS, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE TOURS FRANCE, 5 MAI 2014.
- [47] OZTURK, M., JABER, M., AND A.IMRAN, M. ENERGY-AWARE SMART CONNECTIVITY FOR IOT NETWORKS : ENABLING SMART PORTS. *HINDAWI* (2018).
- [48] QUALITAIRSEA. FRET MARITIME : QU'EST-CE QU'UN CONTENEUR MARITIME. [HTTPS://WWW.QUALITAIRSEA.COM/NEWSROOM/GUIDE-DU-TRANSPORT-INTERNATIONAL/ARTICLES/FRET-MARITIME-QU-EST-CE-QU-UN-CONTENEUR-MARITIME](https://www.qualitairsea.com/newsroom/guide-du-transport-international/articles/fret-maritime-qu-est-ce-qu-un-conteneur-maritime) (03/06/2020).
- [49] RIVAS, J. A. *ANACONDA : THE SECRET LIFE OF THE WORLD'S LARGEST SNAKE*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, USA, 2020.
- [50] SYNOX. INTERNET DES OBJETS (IOT) : QU'EST-CE QUE C'EST ? [HTTPS://WWW.SYNOX.IO/ACTUALITES-SECTORIELLE](https://www.synox.io/actualites-sectorielle). (2020).
- [51] TOOMEY, D. JUPYTER FOR DATA SCIENCE : EXPLORATORY ANALYSIS, STATISTICAL MODELING, MACHINE LEARNING, AND DATA VISUALIZATION WITH JUPYTER.

Résumé

Résumé : Ce mémoire explore l'optimisation de la gestion des conteneurs dans les terminaux portuaires en utilisant des approches mathématiques et des technologies IoT. L'objectif principal est de réduire les déplacements inutiles des conteneurs (shiftings) pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire les coûts.

Nous proposons une méthode innovante qui combine un système de réservation des dates de sortie des conteneurs avec une approche heuristique pour optimiser leur placement. Les conteneurs sont initialement alloués en fonction de prévisions basées sur une distribution normale, et les dates de sortie sont générées pour maximiser l'efficacité du terminal. Ensuite, une heuristique gloutonne est utilisée pour minimiser les shiftings en plaçant les conteneurs aux dates de sortie proches dans les niveaux supérieurs des piles.

Le mémoire inclut une modélisation mathématique complète du problème, intégrant les contraintes de remplissage des niveaux et l'objectif de minimisation des mouvements. Les simulations montrent une amélioration significative des performances opérationnelles du terminal.

Mots clés : Optimisation, internet des objets, modélisation mathématique.

Abstract : This end of study dissertation explores optimizing container management in port terminals using mathematical approaches and IoT technologies. The primary objective is to reduce unnecessary container movements (shiftings) to improve operational efficiency and reduce costs.

We propose an innovative method that combines a reservation system for container exit dates with a heuristic approach to optimize their placement. Containers are initially allocated based on forecasts using a normal distribution, and the exit dates are generated to maximize terminal efficiency. Subsequently, a greedy heuristic is used to minimize shiftings by placing containers with close exit dates in the upper levels of the stacks.

The thesis includes comprehensive mathematical modeling of the problem, incorporating level-filling constraints and the objective of minimizing movements. Simulations show significant improvements in the terminal's operational performance.

Keywords : Optimization, Internet of Things, Mathematical model .