

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA DE BÉJAÏA



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES  
DÉPARTEMENT DE RECHERCHE OPÉRATIONNELLE  
MÉMOIRE DE MASTER EN MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES  
OPTION : MODÉLISATION, OPTIMISATION ET AIDE À LA DÉCISION

**Thème**

**OPTIMISATION DES OPÉRATIONS DE  
DÉCHARGEMENT D'UN NAVIRE : CAS  
DE BMT BÉJAÏA**

**Présenté par :**

ALLOUACHE Amel & ABDALI Thiziri

**Soutenu le 09/07/2024 devant le jury :**

<b>Président</b>	Mr. ASLI Larbi	MCA	U. A/Mira Béjaïa
<b>Rapporteur</b>	Mr. BRAHMI Belkacem	MCA	U. A/Mira Béjaïa
<b>Examinatrice</b>	Mme. KARA-KENDI Salima	MCB	U. A/Mira Béjaïa
<b>Examinatrice</b>	Mlle. AOUDIA Zohra	MAA	U. A/Mira Béjaïa

2023 – 2024

# Remerciements

**Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.**

**En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur, Dr. Brahmi Belkacem, pour ces précieux conseils et son aide constant durant toute la période de réalisation de ce mémoire.**

**On tient à remercier aussi Mr. Moussa Boumerzoug et Mr. Lamine Zoubiri de nous avoir encadré à la BMT Béjaia, ainsi que pour leurs conseils constructifs.**

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

**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

*A Dieu source de toute connaissance  
Je dédie ce travail à mes chers parents*

*À Ma mère **MEHAOUED DALILA***

*Vous m'avez donné la vie ,la tendresse et le courage Pour réussir  
Toute ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance je  
vous porte.j'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui me guide vers  
le chemin de ma réussite .C'est vous que je dois mon succès En témoignage .Je  
vous offre ce modeste travail pour vous remercier de vos sacrifices consentis et  
pour l'affection dont vous m'avez toujours témoignée.*

*À Mon père **ALLOUACHE REDA***

*L'épaule solide ,l'oeil attentif compréhensif et la plus digne de mon estime et de  
mon respect Merci pour chaque sourire ,chaque conseil et chaque moment  
partagé Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments,que  
dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie .*

*À mon cher frère **LOUANES***

*Mon complice de toujours,je vous envoie tout mon amour et ma gratitude Nos  
liens sont plus forts que les mots ne peuvent l'exprimer . Vous êtes mon pilier , et  
je vous aime plus que tout au monde.*

*À mes soeurs bien aimée*

***MERIEM et SELENA***

*Vous êtes la lumière qui éclaire mes journées sombres et la source de mes plus  
beaux souvenirs.Avec gratitude et amour , je vous dédie ces mots pour vous dire  
combien votre présence est précieuse pour moi.*

---

*À ma chère binôme  
Sans oublier mon binôme "THIZIRI" pour son soutien moral, sa patience et sa  
compréhension tous au long de ce projet . A vous cher lecteur  
A tous ceux qui me connaissent  
j'espère qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de ma gratitude  
Aimablement...*

***Allouache Amel***

# Dédicace

*Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance , je dédie ma remise de diplome et ma joie*

*À ma chère mère **Djaghmoune Nassima** qui a toujours été mon pilier. Ton amour inconditionnel et ta sagesse m'ont guidée et soutenue dans les moments les plus difficiles.*

*À mon père **Abdali Bachir** dont la patience et les encouragements m'ont permis de persévérer et de croire en mes capacités. Ta confiance en moi a été une source d'inspiration constante. que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie .*

*À mon mari **Sayad Mustapha** pour ta patience, ta compréhension et ton soutien indéfectible. Ton amour et ton encouragement m'ont donné la force de surmonter les défis.*

*À mes sœurs et ma grande mère **Ferroudja, Amina et Yasmine** pour votre amour, votre soutien et vos précieux conseils. Chacune de vous m'a inspirée de différentes manières et a contribué à ma réussite.*

*À mon frère **Massil** pour ta camaraderie et ton soutien constant. Ton optimisme et ta bonne humeur ont été une source de motivation et de joie.*

*À ma tante **Mameri Djida***

---

*pour ta bienveillance et ton soutien sans faille. Ta présence et tes conseils ont été précieux tout au long de ce parcours.*

*Et enfin, à mon binôme **Allouache Amel** pour ton travail acharné, ton dévouement et notre collaboration fructueuse. Ton esprit de coopération et ta détermination ont rendu cette expérience mémorable.*

***ABDALI Thiziri***

# Table des matières

<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Présentation de l'entreprise BMT Béjaia</b>	<b>3</b>
1.1 Présentation de BMT . . . . .	3
1.1.1 Création . . . . .	3
1.1.2 Création de BMT . . . . .	3
1.1.3 Position géographique . . . . .	4
1.2 Activités principales de BMT et ses missions . . . . .	5
1.2.1 Missions de BMT . . . . .	5
1.2.2 Opérations du terminal . . . . .	5
1.3 La Capacité . . . . .	6
1.4 Equipements de la productivité de BMT . . . . .	7
1.5 Système d'échange de données informatisées (EDI) dans les entreprises portuaires	10
1.6 Objectifs et Atouts de l'entreprise . . . . .	11
1.7 Organisation de l'entreprise BMT . . . . .	12
1.7.1 Direction Générale (DG) . . . . .	12
1.7.2 Direction des Ressources Humaines et Moyens (DRHM) . . . . .	13
1.7.3 Direction des opérations . . . . .	13
1.7.4 Direction Technique . . . . .	14
1.7.5 Direction des Finances et Comptabilité . . . . .	14
1.7.6 Direction Marketing(DM) . . . . .	14
1.8 Procédures d'import et d'export de BMT . . . . .	15
1.8.1 Importation . . . . .	15
1.8.2 Exportation . . . . .	16
1.9 LA CONTENEURISATION . . . . .	18
1.9.1 Définition d'un conteneur . . . . .	18
1.9.2 Types Des Conteneurs . . . . .	19

1.9.2.1	Conteneurs dry Standard . . . . .	19
1.9.2.2	Conteneur open top à toit ouvrant . . . . .	21
1.9.2.3	Conteneur Flat Rack . . . . .	22
1.9.2.4	Conteneurs Frigorifiques . . . . .	22
1.9.2.5	Conteneurs Citernes . . . . .	23
1.9.2.6	Conteneur Pallet Wide . . . . .	23
1.9.2.7	Conteneurs ventilés . . . . .	24
1.9.3	Dimensions normalisées des conteneurs . . . . .	24
1.9.3.1	L'unité de mesure EVP . . . . .	25
1.9.3.2	Les dimensions . . . . .	25
1.9.4	Identification internationale des conteneurs . . . . .	26
1.9.5	Les normes de construction . . . . .	27
1.9.6	Les avantages et les inconvénients de la conteneurisation . . . . .	28
1.10	Position du Problème . . . . .	29
1.11	Conclusion . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Introduction aux problèmes d'optimisation combinatoire</b>	<b>31</b>
2.1	C'est quoi l'optimisation? . . . . .	31
2.1.1	Optimum global/ Optimum local . . . . .	32
2.2	Exemples des problèmes d'optimisation combinatoire . . . . .	32
2.2.1	Programmation linéaire . . . . .	32
2.2.2	Programmation linéaire en nombres entiers . . . . .	33
2.2.3	Théorie des graphes . . . . .	34
2.3	Complexité des problèmes . . . . .	35
2.4	Problèmes classiques d'optimisation combinatoire . . . . .	36
2.4.1	Problème de transport . . . . .	36
2.4.2	Problème d'affectation . . . . .	37
2.4.3	Problème d'ordonnancement . . . . .	39
2.5	Généralités sur l'ordonnancement . . . . .	40
2.5.1	Notion de projet . . . . .	40
2.5.2	Les éléments d'un problème d'ordonnancement . . . . .	41
2.5.2.1	Tâches . . . . .	41
2.5.2.2	Ressources . . . . .	41
2.5.2.3	Contraintes . . . . .	43
2.5.2.4	Critères . . . . .	43
2.5.3	Méthode PERT . . . . .	44
2.5.4	Diagramme de Gantt . . . . .	48
2.6	Méthodes de résolution . . . . .	50
2.6.1	Méthodes exactes . . . . .	50
2.6.1.1	Méthode séparation et évaluation (Branch and Bound) . . . . .	50
2.6.1.2	Méthode Branch and Cut . . . . .	50

## TABLE DES MATIÈRES

---

2.6.1.3	Méthode de la génération de colonnes . . . . .	51
2.6.1.4	Programmation dynamique . . . . .	51
2.6.2	Méthodes approchées . . . . .	52
2.7	Conclusion . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Modélisation de la Gestion des Ressources pour le Débarquement</b>	<b>53</b>
3.1	Description du problème . . . . .	53
3.2	Modélisation du problème . . . . .	54
3.2.1	Identification des paramètres . . . . .	54
3.2.2	Variables de décision . . . . .	55
3.2.3	Modélisation du problème mixte (PLNE) . . . . .	55
3.3	Exemple numérique illustratif . . . . .	57
3.3.1	Codage utilisé pour notre algorithme . . . . .	58
3.4	Analyse et interprétation des résultats . . . . .	63
3.5	Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT . . . . .	63
3.5.1	Contexte du problème . . . . .	63
3.5.2	Résolution du problème avec B&B . . . . .	67
3.5.3	Analyse et interprétation des résultats . . . . .	69
3.6	Interprétation des résultats . . . . .	70
3.7	Conclusion . . . . .	70
	<b>Conclusion générale</b>	<b>71</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>72</b>

# Table des figures

1.1	Jointe venture . . . . .	4
1.2	Position Géographique de la BMT Béjaia . . . . .	4
1.3	Equipements de manutention de BMT . . . . .	10
1.4	Electronic Data Interchange de BMT . . . . .	11
1.5	Structure d'organisation de la BMT . . . . .	13
1.6	processus import/export. . . . .	17
1.7	Composition d'un Container Maritime . . . . .	19
1.8	Marquage des conteneurs. . . . .	27
2.1	Représentation graphique d'un problème d'affectation . . . . .	38
2.2	Caractéristiques d'une tâche faisant référence à l'exécution d'une opération. . . . .	42
2.3	Décomposition des ressources. . . . .	42
2.4	Représentation d'un sommet dans un réseau PERT . . . . .	45
2.5	Représentation d'une tâche fictive. . . . .	45
2.6	Fonction d'une tâche fictive dans PERT. . . . .	45
2.7	Commencement du réseau PERT. . . . .	46
2.8	Insertion des tâches B et C. . . . .	46
2.9	Réseau associé à la méthode PERT. . . . .	47
2.10	Graphe Pert . . . . .	49
2.11	Diagramme de Gantt au plus tôt . . . . .	49
3.1	Disposition et structure des (09) conteneurs sur un bateau . . . . .	57
3.2	les tâches de déchargement des conteneurs . . . . .	57
3.3	La durée totale de projet = 24 min . . . . .	60
3.4	Réseau de Pert sans la gestion des ressources . . . . .	60
3.5	Équilibrage des Tâches entre Deux Machines . . . . .	61
3.6	Équilibrage des Tâches entre Deux Machines . . . . .	62
3.7	Exemple illustre la disposition de 16 conteneurs différentes lignes et colonnes . . . . .	64
3.8	La disposition des conteneurs 20' et 40' . . . . .	64

*TABLE DES FIGURES*

---

3.9 les tâches de déchargement des conteneurs . . . . .	65
3.10 Équilibrage des tâches entre deux machines . . . . .	66
3.11 Équilibrage des Tâches entre Deux Machines . . . . .	67
3.12 Résultats de fin de projet le $C_{\max} = 40$ min . . . . .	69

# Liste des tableaux

1.1	Les caractéristiques des équipements de manutention de BMT. . . . .	9
1.2	20' conteneur Dry. . . . .	20
1.3	40' Conteneur Dry. . . . .	21
1.4	40' conteneur "cube élevé". . . . .	21
1.5	Dimensions extérieures maximales d'un conteneur. . . . .	25
1.6	Dimensions intérieures minimales d'un conteneur. . . . .	26
1.7	Ouverture minimum des portes d'un conteneur. . . . .	26
3.1	Description des tâches du projet et leurs caractéristiques . . . . .	58
3.2	Algorithme de Branch and Bound . . . . .	59
3.3	Instants de début et de fin des tâches . . . . .	61
3.4	Début et fin des Tâches . . . . .	62
3.5	Liste des tâches avec durée, précedence et type de conteneur . . . . .	65
3.6	Affectation des taches sur les machines 1 et 2 . . . . .	66

# Liste des Abréviations

- **BMT** : Bejaia Mediteranean Terminal.
- **CTMS** : Container Terminal Management System.
- **DG** : Direction Générale.
- **DM** : Direction Marketing.
- **DO** : Direction des opérations.
- **DRH** : Direction des ressources humaine.
- **DT** : Direction technique.
- **EDI** : échange de données informatisé.
- **EPB** : Entreprise Portuaire de Bejaia.
- **EVP** : Equivalent Vingt Pieds.
- **OCR** : Optical Character Recognition.
- **PDS** : Position Determining System.
- **QC** : Quai-crane.
- **RDS** : Radio Data System.
- **RMG** : Rail-Monted Gantry.
- **RTG** : Rubber-Tyred Grantry.
- **SPA** : Société Par Action.
- **TC** : Conteneur.

# Introduction générale

Le transport maritime est crucial pour le commerce mondial, représentant environ 90

Depuis l'Antiquité, les navires ont évolué, devenant plus grands et plus sophistiqués. La conteneurisation, introduite dans les années 1950 par Malcolm McLean, a révolutionné ce secteur. Elle utilise des conteneurs standardisés pour transporter des marchandises, facilitant leur transfert entre navires, trains et camions sans déchargement intermédiaire.

La conteneurisation présente plusieurs avantages : rapidité des opérations portuaires, réduction des risques de vol et de dommages, diminution des coûts de manutention et compatibilité intermodale.

L'impact économique est significatif, avec des ports à conteneurs devenus des centres névralgiques du commerce international. Cependant, le secteur fait face à des défis comme la congestion portuaire et les impacts environnementaux. Des initiatives pour réduire les émissions de carbone et adopter des technologies plus vertes sont en cours.[10].

Le terminal à conteneurs de port de Bejaia, géré avec les Singapouriens de Portek dans le cadre de la société mixte, Bejaia Mediterranean Terminal, est une ouverture vers le partenariat étranger stratégique car elle vise à réhabiliter les ports. Cette joint-venture a enregistré en 2015, pour sa part, une hausse de 30% de son trafic avec un volume de plus de 151 000 EVP (Equivalent Vingt Pieds) et une part de marché en hausse à hauteur de 13% pour ce type de trafic [2].

Dans le cadre de la gestion des opérations portuaires, le problème d'ordonnancement du débarquement des conteneurs revêt une importance cruciale pour optimiser l'utilisation des infrastructures et minimiser les temps d'attente des navires. Nous considérons ici un scénario spécifique où un port dispose d'un seul quai permettant l'accostage d'un seul navire à la fois. Ce navire transporte une variété de conteneurs disposés selon une structure prédéterminée appelée EDI (Electronic Data Interchange).

Notre travail, vise à modéliser, puis appliquer des méthodes d'ordonnancement qui permette de minimiser la date du fin de déchargement des conteneurs ( $C_{max}$ ), en tenant compte de la gestion optimale des grues disponibles et des spécificités des conteneurs. Cette méthode devra assurer une utilisation efficace des grues tout en respectant les contraintes opérationnelles, afin de proposer une solution optimisée pour le débarquement des conteneurs du port de Béjaia.

En optimisant cette allocation des ressources, nous visons à améliorer la fluidité des opérations portuaires, à réduire les temps d'attente des navires et à garantir une gestion plus efficace des flux de marchandises.

### **Organisation du document :**

Ce mémoire est composé :

- D'une introduction générale ou l'idée générale du sujet à traiter est exposée.
- **le premier chapitre** , s'intéresse à la présentation de BMT, ses structures, ses moyens et ses services,et aussi nous exposons les différents aspects techniques et pratiques de la conteneurisation.
- Le **deuxième chapitre** , s'intéresse à une description de l'optimisation combinatoire et une description des principales méthodes d'optimisation utilisées dans la littérature et les différents méthodes de résolution.
- Dans le **troisième chapitre** , nous dégagerons le modèle retenu pour modéliser le mouvement du débarquement des conteneurs et nous avons utilisées les méthodes de gestion de projet et ainsi la méthode de branch and bound.
- D'une conclusion générale qui donne un bilan de notre travail et une idée sur les perspectives envisagées.

# Chapitre 1

## Présentation de l'entreprise BMT Béjaia

### 1.1 Présentation de BMT

#### 1.1.1 Création

Dans son plan de développement 2004-2006, l'entreprise portuaire de Béjaia avait inscrit à l'ordre du jour le besoin d'établir un partenariat pour la conception, le financement et l'exploitation d'un terminal à conteneurs au port de Béjaia [22].

L'EPB (Entreprise Portuaire de Béjaia) a entrepris de trouver des partenaires potentiels et a sélectionné le groupe PORTEK, spécialisé dans la gestion des terminaux à conteneurs. Le projet a été soumis au conseil de la participation de l'État (CPE) en février 2004, et ce dernier l'a approuvé en mai 2004.

Avec l'approbation du gouvernement, **Béjaia Mediterranean Terminal (BMT)** a été établi grâce à une coopération entre l'*Entreprise Portuaire de Béjaia (EPB)* détenant une participation majoritaire de 51% et *PORTEK*, une société singapourienne, détenant 49%. PORTEK est un spécialiste des équipements portuaires et opère dans de nombreux ports à travers le monde, spécialisé dans la rénovation des équipements portuaires [15].

#### 1.1.2 Création de BMT

BMT est créée comme une société par action. C'est une entreprise prestataire de service spécialisée dans le fonctionnement, l'exploitation, et la gestion du terminal à conteneur. Pour atteindre ses objectifs, elle dispose d'une équipe compétente spécialement formée dans les opérations de gestion portuaire. Elle dispose d'équipement d'exploitation les plus perfectionnés de qualité, d'efficacité et de fiabilité en des temps record et à des coûts compétitifs. BMT offre ses prestations sur la base de 24h/7j[3].



FIGURE 1.1 – Jointe venture

### 1.1.3 Position géographique

La BMT est implantée au centre du pays, au coeur de la méditerranée dans le nord du continent africain et plus précisément au Port de Béjaia, occupe une situation géographique stratégique. Elle se situe à une attitude de  $36^{\circ}45'24''$  et une longitude de  $5^{\circ}05'05''$ . Elle dessert un hinterland important et très vaste. La ville, le Port et le terminal à conteneurs de Béjaia 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 [12].



FIGURE 1.2 – Position Géographique de la BMT Béjaia

## **1.2 Activités principales de BMT et ses missions**

### **1.2.1 Missions de BMT**

L'activité principale de la BMT est le suivi, la gestion et l'exploitation du terminal à conteneur. BMT a pour mission principale de :

- Traiter dans les meilleures conditions de délais, de coûts et de sécurité, l'ensemble des navires porte conteneurs et des conteneurs.
- La manutention sur navire aussi bien le chargement et le déchargement des conteneurs et leurs entreposages dans les zones de stockage.
- Le service d'acconage sur les aires spécialisées ainsi que leurs livraisons.
- Le déchargement des céréales selon les capacités de la BMT.

Pour cela, elle est équipée de technologies de pointe et d'un système informatisé (CTMS) dédié à la logistique, lui permettant d'offrir des services de qualité avec efficacité et fiabilité, tout en répondant aux divers besoins des clients[12].

### **1.2.2 Opérations du terminal**

Bejaia Mediterranean Terminal reçoit annuellement un grand nombre de navires pour les quels elle assure les opérations de planification, de manutention et d'acconage avec un suivi et une traçabilité des opérations[?].

#### **a- Opération planifications**

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

#### **b- Opération 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.

### c- Opération d'acconage

- Transfert des conteneurs vers les zones d'entreposage;
- Transfert des conteneurs frigorifiques vers les zones "reefers";
- Suivi des visites du conteneur par les services concernés;
- Changement de position des conteneurs;
- Suivi des livraisons et des dépotages;
- Suivi des restitutions et des mises à quai;
- Mise à disposition des conteneurs vides pour empotage.

## 1.3 La Capacité

### Quais pour Accostage

<b>longueur</b>	500 m
<b>profondeur</b>	12 m
<b>superficie</b>	60 h
<b>Nombre de postes</b>	04

### Parc à Conteneurs Vides

<b>Capacité</b>	900 EVP
<b>Superficie</b>	15 200 $m^2$

### Parc à Conteneurs Reefers

<b>Capacité</b>	500 Prises
<b>Superficie</b>	2 800 $m^2$

### Parc à Conteneurs Pleins

<b>Capacité</b>	8 300 EVP
<b>Superficie</b>	78 500 $m^2$

### Zone Pour Empotage et Dépotage

<b>Capacité</b>	600 EVP
<b>Superficie</b>	3 500 $m^2$

### Le Parc à Conteneurs

<b>Capacité</b>	10 300 EVP
<b>Superficie</b>	100 000 $m^2$

### Zone Extra-Portuaire (à 3 Km du Port)

<b>Capacité</b>	5 000 EVP
<b>Superficie</b>	50 000 $m^2$

## 1.4 Equipements de la productivité de BMT

La BMT avait entrepris la définition et l'acquisition de produits, équipements et systèmes de gestion pour le terminal, visant à améliorer considérablement la productivité et l'efficacité des opérations de traitement des conteneurs. Les systèmes de gestion du terminal comprenaient notamment :

Système de Communication des Données de Terrain en Temps Réel :

### 1. Système de Communication des Données de Terrain en Temps Réel :

- Ce système révolutionnaire permet une transmission instantanée et sécurisée des données provenant des différentes zones du terminal.
- En utilisant des technologies sans fil avancées, il assure une connectivité fiable entre les opérateurs sur le terrain et le centre de contrôle, facilitant ainsi la prise de décision en temps réel.
- Sa capacité à intégrer des capteurs et des dispositifs IoT permet une surveillance continue des conditions environnementales et opérationnelles, garantissant une réactivité accrue face aux événements imprévus.

### 2. Système de Positionnement des Transporteurs et de Conducteurs :

- Ce système utilise des technologies de géolocalisation pour suivre en temps réel la position des transporteurs et des conducteurs à l'intérieur du terminal.
- En fournissant des informations précises sur les itinéraires et les temps de transit, il permet une planification logistique efficace et une utilisation optimale des ressources.

- Sa capacité à identifier les goulots d'étranglement et à proposer des itinéraires alternatifs contribue à réduire les temps d'attente et à améliorer la fluidité des opérations de transport[17].

### **3. Système de Supervision des Équipements et des Infrastructures :**

- Ce système centralisé offre une surveillance en temps réel des équipements et des infrastructures critiques du terminal.
- En intégrant des capteurs de performance et des alertes automatisées, il permet une détection précoce des défaillances potentielles et une intervention rapide pour éviter les interruptions de service.
- Sa capacité à générer des rapports d'état et des analyses de tendances aide la BMT Algérie à optimiser la maintenance préventive et à prolonger la durée de vie utile de ses actifs.

### **4. Télésurveillance du Parc et de ses Périmètres :**

- Ce système de sécurité avancé assure une surveillance 24/7 du parc et de ses environs, garantissant la protection des biens et la sécurité du personnel.
- En utilisant des caméras haute résolution et des technologies de détection d'intrusion, il permet une identification rapide des incidents et une réponse appropriée aux situations d'urgence.
- Sa capacité à être intégré au système de gestion de la sécurité global de la BMT Algérie renforce la coordination des mesures de sécurité et permet une gestion proactive des risques[17].

Le terminal à conteneurs de la BMT en Algérie se distingue par son équipement spécialisé en manutention et levage (quai grue, RTG, etc.), réduisant les temps d'escale et répondant ainsi aux attentes et exigences des opérateurs maritimes grâce à son infrastructure complète et moderne[17].

#### 1.4 Equipements de la productivité de BMT

---

<b>Les Equipements</b>	<b>Les caractéristiques</b>
PORTIQUES DE QUAIS SUR RAIL (QC)	Nombre :02 Tonnage :40 tonnes Type :Panamaux
REMRQUES PORTUAIRES	Nombre :16 Tonnage :40 tonnes Type :MOLS
PORTIQUES GERBEUR SUR PNEUS (RTG)	Nombre :09 Tonnage :40 tonnes Gerbage :6+1 Type : Ruber Type Gantry
CHARIOTS MANUPILATEURS DE VIDES	Nombre :11 Tonnage :11 tonnes
CHARIOTS ELEVATEURS	Nombre :16 Tonnage :2.5,3,5,10 tonnes Type : Forklift
GRUES MOBILES PORTUAIRES (MHC)	Nombre :02 Tonnage :100 tonnes
REMRQUES ROUTIERES	Nombre :40 Tonnage :36 tonnes Type : 24 MAN 6, DEWOO
STACKERS	Nombre :11 Tonnage :45 tonnes Type : Reache steaker
SPREADER	Nombre :10 Tonnage :10 tonnes Type : Empty container

TABLEAU 1.1 – Les caractéristiques des équipements de manutention de BMT.

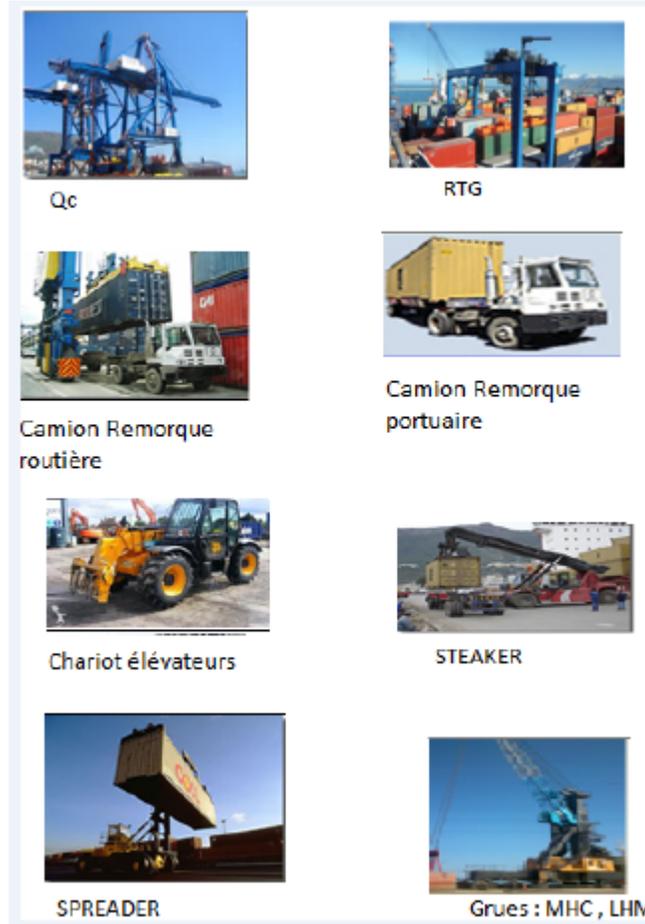


FIGURE 1.3 – Equipements de manutention de BMT

## 1.5 Système d'échange de données informatisées (EDI) dans les entreprises portuaires

### Qui signifie EDI?

L'EDI (Electronic Data Interchange) est un processus réalisé entre deux systèmes informatiques, il permet à deux entreprises d'échanger des informations commerciales (bons de commande, factures, avis d'expédition, etc.). La technologie EDI s'appuie sur des messages standard et des protocoles de communication spécifiques, et permet la suppression de toute intervention manuelle humaine dans les échanges.

Les caractéristiques de l'EDI en font un outil indispensable aux entreprises pour automatiser leurs transactions et l'échange d'informations critiques. L'EDI s'applique aux processus com-

merciaux, logistiques ou fiscaux, les rendant ainsi sécurisés, confidentiels et instantanés [1].

### Les avantages de l'EDI pour le secteur maritime

- Réduire les temps d'attente pour les marchandises (navire, terminaux, douanes).
- Réduire les temps d'escale pour les navires.
- Rationaliser et sécuriser les formalités administratives.
- Intégrer toutes les opérations intermodales : Mer - Port - Terre dans le même flux de communication.
- Être capable d'adapter la structure des messages émis aux évolutions législatives et techniques du secteur.

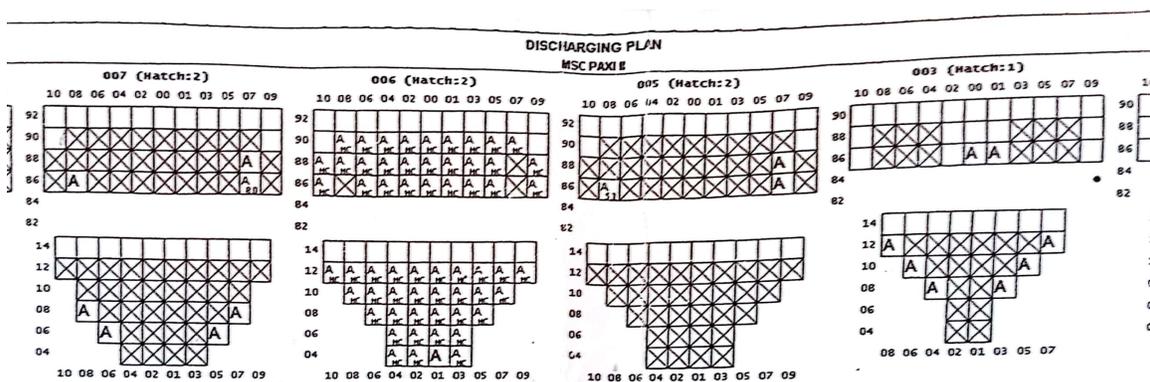


FIGURE 1.4 – Electronic Data Interchange de BMT

## 1.6 Objectifs et Atouts de l'entreprise

### Objectifs

La BMT se concentre sur la gestion efficace et sécurisée de son terminal à conteneurs, en mettant l'accent sur la qualité des services, l'innovation et la satisfaction client. Grâce à des équipements modernes et des systèmes informatiques performants, elle vise à optimiser sa productivité et à répondre aux attentes en termes de performance et de coûts [17].

### Atouts

La BMT offre à ses clients une expertise technologique pour garantir :

- Une rade et un port sans congestion.
- Un tirant d'eau minimum de 12 mètres.
- Des quais spécialisés pour les conteneurs.
- Un personnel hautement qualifié et motivé.
- Des équipements modernes pour une productivité optimale.
- Des délais d'escale réduits.
- Un guichet unique pour simplifier les procédures douanières.
- Une traçabilité des conteneurs pour des enlèvements rapides.
- Un service clientèle courtois et de qualité.
- Une gestion complète du transport des conteneurs.
- Une capacité de stockage importante.
- Des installations spécialisées pour les conteneurs réfrigérés et les produits dangereux.
- Un terminal sécurisé contre le vol et les intrusions.
- Une connexion directe avec les consignataires et les transitaires via EDI[17].

## 1.7 Organisation de l'entreprise BMT

L'organisation de la BMT comprend une direction générale définissant la stratégie. Les opérations et la logistique sont gérées par un département dédié. Les fonctions commerciales, administratives et de ressources humaines sont également distinctes pour assurer un fonctionnement fluide [17].

### 1.7.1 Direction Générale (DG)

Le directeur général est en charge de la gestion de l'entreprise, possédant le pouvoir de décision et assurant l'administration globale. Il émet des directives pour les différentes structures et assure la liaison entre les différentes directions de l'entreprise.

- **Unité d'Audit et Gestion des Contrôles :** Garantit la surveillance et l'audit des procédures ainsi que la conformité réglementaire.
- **Unité de Sécurité :** Veille à la sécurité des marchandises, du parc à conteneurs et à la propreté de l'entreprise et de son environnement.
- **Unité QHSE :** Supervise la mise en œuvre et le suivi du plan QHSE de l'entreprise.

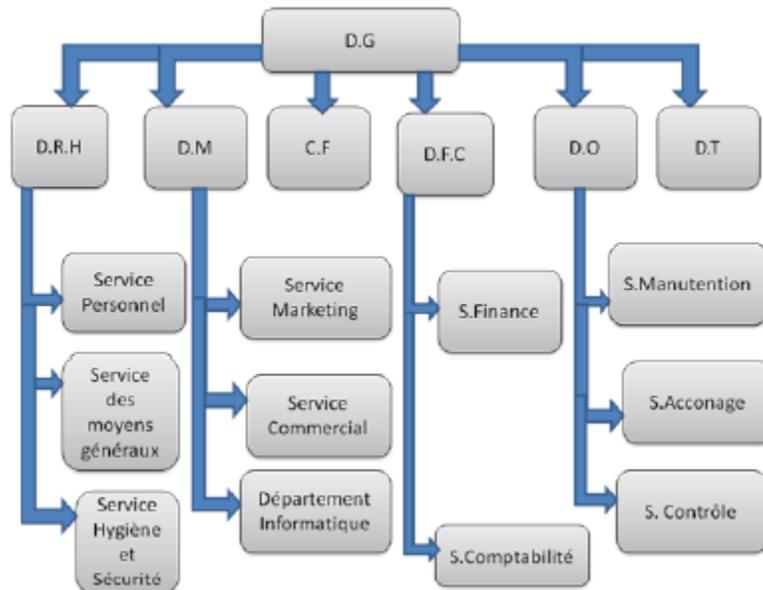


FIGURE 1.5 – Structure d'organisation de la BMT

### 1.7.2 Direction des Ressources Humaines et Moyens (DRHM)

- **Département des Ressources Humaines :** Implémentation de systèmes de gestion alignés sur la stratégie d'entreprise, équilibrant les exigences économiques et les besoins du personnel. Son rôle clé réside dans l'identification et la rétention des talents, en leur offrant des conditions optimales (salaire, environnement de travail) et en favorisant leur développement grâce à des formations.
- **Service des Achats et Projets Généraux :** Responsable des achats et de la gestion des stocks de l'entreprise.
- **Service du Patrimoine :** Gère les stocks et les immobilisations de l'entreprise.

### 1.7.3 Direction des opérations

Le département de planification coordonne les escales, l'aire de stockage des conteneurs et les ressources en personnel et équipements. Il supervise les opérations de manutention, y compris le chargement et le déchargement des navires, ainsi que les activités connexes comme le suivi des livraisons et la sécurité.

1. Service Aconage.
2. Service Manutention.
3. Service Ressources.
4. Service Logistique.

### 1.7.4 Direction Technique

Direction Technique (DT) a pour mission de veiller à la maintenance préventive et corrective des engins utilisés Dans le parc à conteneurs. Elle est constituée des services suivants

- **Service des Engins** : garantit la maintenance impeccable des véhicules lourds.
- **Service des Portiques** : assure la maintenance experte des portiques et de la grue mobile.
- **Service des Méthodes** : assure la mise en œuvre pro-active du plan de maintenance des équipements, assurant ainsi leur performance optimale.

### 1.7.5 Direction des Finances et Comptabilité

L'entreprise garantit une gestion méticuleuse de l'ensemble de ses activités tout au long de l'année grâce à la collaboration de deux services spécialisés :

- **Le Service des Finances** :qui gère avec efficacité le règlement de toutes les factures et veille à l'encaissement des créances émises auprès de la banque.
- **Le Service de Comptabilité** : qui exerce un contrôle minutieux et enregistre avec précision toutes les factures d'achat, de prestation et d'investissement.

### 1.7.6 Direction Marketing(DM)

La Direction du Marketing incarne le gardien zélé de la réputation et de l'identité de l'entreprise, en entretenant des relations perpétuelles avec sa clientèle. Son objectif premier est de partager avec les clients les missions, les programmes, les orientations et les succès de l'entreprise. Elle éclaire l'environnement externe sur l'importance capitale des efforts déployés pour enrichir et améliorer la qualité des services fournis.

- **Le Service Marketing** : Se porte garant de la valorisation de l'image de marque de l'entreprise et assure la mise en œuvre opérationnelle du plan d'action.

- **Le Service Commercial** : Assure un suivi rigoureux de la facturation, de la gestion des comptes clients ainsi que du recouvrement des créances.
- **Le Service informatique** : prend en charge la fiabilité du système CTMS, assure la maintenance du parc informatique de l'entreprise et innove en développant de nouvelles applications adaptées aux diverses entités de l'organisation[16].

## 1.8 Procédures d'import et d'export de BMT

L'import et l'export sont des activités commerciales qui ont pour objet l'acquisition des produits en provenance de l'étranger et la vente des produits nationaux à l'étranger.

### 1.8.1 Importation

Cette procédure est subdivisée en 4 étapes :

**1-La visite** : Pour assurer un suivi efficace des visites de conteneurs, le transitaire doit fournir les documents suivants au service des opérations :

1. Copie du connaissement avec mention de prestation requise;
2. Bon à délivrer;
3. Bon de commande.

Ensuite, l'agent de BMT établira une liste exhaustive des conteneurs à préparer pour la visite du lendemain, laquelle sera remise au chef de section exploitation. Ce dernier devra à son tour confirmer la mise à disposition des conteneurs en zone de visite pour le lendemain.

**2- La pesée** :Le client est invité à présenter au service des Opérations les documents suivants :

1. Bon de commande (avec visa du service commercial de recouvrements);
2. Copie du connaissement;
3. Bon à délivrer.

A ce moment là, l'agent de l'entreprise de gestion des conteneurs fait charger les conteneurs sur un camion remorque pour effectuer la pesée.

**3- la livraison** :Pour permettre un suivi rigoureux des livraisons, le transitaire doit remettre un dossier complet, devant contenir :

1. Bon à délivrer (apuré par la douane);
2. Mise à quai en triple exemplaires;

3. Copie du connaissement;
4. Bon de commande (avec précision de la nature de prestation) visé par le service commercial (recouvrement).

En conséquence, l'agent en charge des opérations commerciales devrait vérifier l'exactitude du dossier afin de créer le Bon de Livraison de Conteneur, et enregistrer les données de l'entreprise dans un fichier électronique dédié au suivi des livraisons.

**4- Le dépotage :**Le transitaire doit remettre à l'agent chargé des dépotages un dossier complet devant contenir :

1. Bon de commande;
2. Bon à délivrer (apuré par la douane);
3. Lettre de dépotage (apuré par la douane);
4. Copie du connaissement avant 16h00.

Ensuite, l'agent de l'entreprise de gestion des conteneurs prépare les Demandes de Mouvement de Conteneurs pour le déchargement, tandis que l'agent des opérations commerciales transmet une liste au chef de section exploitation des conteneurs à préparer pour le lendemain. Après chaque déchargement confirmé, l'agent doit obtenir la signature du responsable de section pour clôturer le dossier.

### 1.8.2 Exportation

Cette procédure est subdivisée en 5 étapes :

**1- La restitution :**Afin d'assurer un suivi précis des restitutions, l'agent responsable doit demander quotidiennement au pointeur une liste des conteneurs restitués, accompagnée de leur position au terminal. Il doit également vérifier que les bons reçus correspondent au nombre total de conteneurs figurant sur la liste.

**2- Suivi des mises à quai :**Cette opération est assurée par l'agent responsable des restitutions, qui doit s'en assurer du bon suivi grâce à la tenue d'un fichier électronique mis à jour avec la saisie des restitutions journalières, et ce avec le concours du pointeur désigné à charge pour le suivi des restitutions conjointement avec l'agent responsable des restitutions à la fin de la journée. La signature des mises à quai est assurée par le chef de section.

**3- Mise à disposition :**La responsabilité du suivi des mises à disposition doit être confiée à l'agent en charge des opérations commerciales concernant ces mises à disposition. Ce dernier devrait maintenir un fichier électronique dédié spécifiquement aux conteneurs mis à disposition. Les documents nécessaires pour une mise à disposition comprennent :

1. Demande de mise à disposition du consignataire dûment signée par la douane;
2. Un bon de commande;

## 1.8 Procédures d'import et d'export de BMT

3. Lettre empotage (en cas d'empotage à quai) dûment signée par la douane ;
4. Bon d'embarquement qui nous permettra d'effectuer l'embarquement en route régulière.

**4- L'empotage :**Le client a le choix d'effectuer cette opération soit à l'intérieur du terminal à conteneurs, soit à l'extérieur, dans les magasins.

**5- Visite/Pesée :**Le transitaire ou le client final doit remettre au service des opérations le document suivant :

1. Bon de commande ;
2. Copie de connaissance ;
3. bon a délivré.

Après BMT établira une liste complète des conteneurs préparés pour la visite et pesées et la mise à disposition de ces conteneurs dans la zone de visite.

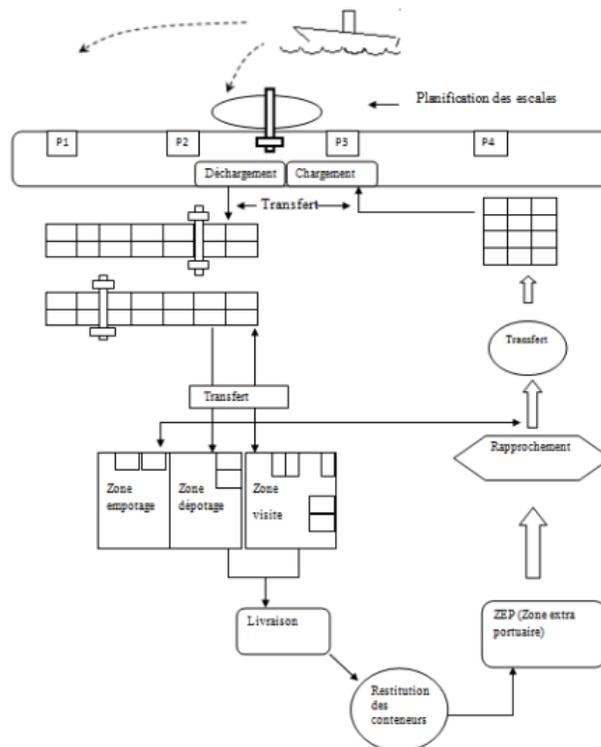


FIGURE 1.6 – processus import/export.

## 1.9 LA CONTENEURISATION

### 1.9.1 Définition d'un conteneur

La CSC définit le conteneur comme étant un engin de transport permanent, assez résistant pour permettre un usage répété, spécialement conçu pour faciliter le transport des marchandises, sans rupture de charge, pour un ou plusieurs modes de transport et conçu pour être assujéti et manipulé, des pièces de coin étant prévues à cet effet[11].

### La structure des conteneurs

#### 1. Composition et matériaux

La structure de base d'un conteneur est formée de traverses en acier, recouvertes d'un plancher en bois exotique appelé "L'api tong". Toutefois, dans une optique de développement durable, il est également envisagé d'utiliser du bambou pour le plancher. L'api tong reste largement prédominant en raison de ses caractéristiques techniques remarquables. Originaire du sud-est asiatique, ce bois est réputé pour sa résistance aux écarts de température, à l'humidité et aux attaques d'insectes[11].

Certains modèles de conteneurs sont également équipés d'un passage de fourche afin de permettre leur manipulation par des chariots élévateurs.

#### 2. Caractéristiques

Les montants, les parois latérales et les portes assurent la liaison entre la structure inférieure et la partie supérieure du conteneur. Les parois sont constituées de tôles ondulées, ce qui renforce la solidité de l'ensemble. La structure supérieure est composée de quatre longerons et de quatre coins ISO, également appelés "Coin Casting". Contrairement à la partie inférieure, il n'y a ni traverses ni plancher dans cette section. Le toit est quant à lui constitué de tôles.

Les coins ISO sont des cubes en acier perforés en trois endroits, permettant ainsi un déplacement ou un arrimage facile du conteneur. Ces coins facilitent son fixation sur un navire, avec d'autres conteneurs, sur un châssis, ou son déplacement à l'aide de chariots élévateurs, de portiques ou de cavaliers. Huit coins ISO sont répartis aux huit coins du conteneur maritime.

Les portes se situent à l'arrière du conteneur et s'ouvrent à 270 degrés, ce qui facilite le chargement et le déchargement sans obstruction. De plus, l'étanchéité est assurée par la présence d'un joint autour de la porte[11].

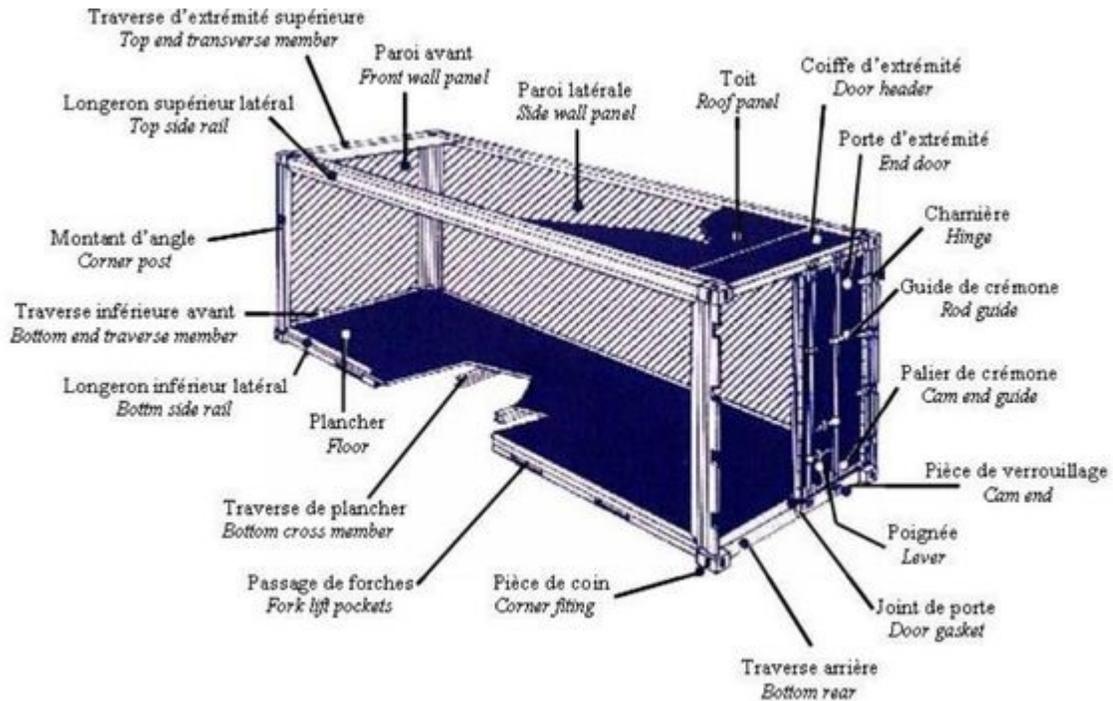


FIGURE 1.7 – Composition d'un Container Maritime

### 1.9.2 Types Des Conteneurs

#### 1.9.2.1 Conteneurs dry Standard

Un conteneur maritime totalement cloisonné et étanche aux intempéries, avec un toit, des parois latérales et un plancher rigides comportant au moins une de ses parois équipée d'une porte et construit aux fins de transporter tous types de marchandise. il s'agit du conteneur le plus courant, capable de transporter la plupart des marchandises "sèches". Moyennant certains ajustements intérieure et à condition de disposer des équipements nécessaires au chargement/-déchargement, ce type de conteneur peut être utilisé pour le transport de certaines types de marchandises en vrac[11].

## 1.9 LA CONTENEURISATION

<b>Dimension</b>	<b>Longueur</b>	<b>Largeur</b>	<b>Hauteur</b>
<b>Externe</b>	6096mm	2362mm	2590mm
<b>Interne</b>	5944mm	2337mm	2388mm
<b>Les portes ouvertes</b>		2337mm	2286mm
<b>Poids</b>	<b>Brut</b> 24000kg	<b>maxi- vide</b> 2080kg	<b>Charge maxi- male</b> 21920kg
<b>Capacité</b> 33.9cub.m	/	/	/

TABLEAU 1.2 – 20' conteneur Dry.



## 1.9 LA CONTENEURISATION

---

<b>Dimension</b>	<b>Longueur</b>	<b>Largeur</b>	<b>Hauteur</b>
<b>Externe</b>	12192mm	2438mm	2591mm
<b>Interne</b>	12014mm	2286mm	2388mm
<b>Les portes ouvertes</b>		2337mm	2286mm
<b>Poids</b>	<b>Brut maximum</b> 30480kg	<b>Poids vide</b> 3900kg	<b>Charge maximale</b> 26580kg
<b>Capacité</b> 67.7cub.m	/	/	/

TABLEAU 1.3 – 40' Conteneur Dry.

<b>Dimension</b>	<b>Longueur</b>	<b>Largeur</b>	<b>Hauteur</b>
<b>Externe</b>	12192mm	2438mm	2896mm
<b>Interne</b>	12014mm	2362mm	2692mm
<b>Les portes ouvertes</b>		2286mm	2591mm
<b>Poids</b>	<b>Brut maximum</b> 30480kg	<b>Poids vide</b> 4150kg	<b>Charge maximale</b> 26330kg
<b>Capacité</b> 76.4cub.m	/	/	/

TABLEAU 1.4 – 40' conteneur "cube élevé".

### 1.9.2.2 Conteneur open top à toit ouvrant

Le conteneur open top est reconnaissable par son toit amovible, spécialement conçu pour faciliter le chargement d'objets encombrants ou de produits lourds par le haut, notamment à l'aide de grues, sans nécessiter de démontage. Son utilisation s'avère nettement plus pratique dans ces circonstances[11].



### Caractéristiques diverses du conteneur open top

- Absence de toit en acier (toit ouvert),
- Protection du haut par bâche ou couverture amovible,
- Grosses anses métalliques amovibles,
- Portes montées sur des gonds,
- Poutres transversales détachables au-dessus de chaque porte,
- Similitudes avec d'autres caractéristiques du conteneur dry.

### 1.9.2.3 Conteneur Flat Rack

Le conteneur à rack se caractérise par ses extrémités repliables sur le plancher. Il est utilisé pour transporter des charges encombrantes comme des véhicules. Son plancher est conçu pour supporter des charges lourdes en toute sécurité. De plus, il est pliable pour faciliter le stockage à plat ou le rangement, avec les parois se rabattant sur le plancher.



### 1.9.2.4 Conteneurs Frigorifiques

Ce sont des conteneurs thermiques équipés de systèmes de réfrigération et de chauffage intégrés, soit installés par leur propre système, soit par celui du navire ou du terminal.



### 1.9.2.5 Conteneurs Citernes

Ce sont les conteneurs destinés au transport de liquide et substances gazeuses. Ils sont composés de la citerne de l'ossature.



### 1.9.2.6 Conteneur Pallet Wide

Le conteneur Pallet Wide, utilisé par le transporteur CMA CGM, permet de charger jusqu'à 33 euro-palettes, tandis qu'un conteneur standard de même taille n'en accepte que 27. Cette différence réduit les coûts de distribution et maximise l'espace, renforçant ainsi la compétitivité dans le transport maritime.

## 1.9 LA CONTENEURISATION

---



### 1.9.2.7 Conteneurs ventilés

Il s'agit de conteneurs polyvalents dont la ventilation naturelle a été améliorée en ajoutant des ouvertures de ventilation dans les logerons. Ils sont utilisés pour le transport d'ail, d'oignons, de cacao,...



### 1.9.3 Dimensions normalisées des conteneurs

L'organisation internationale de normalisation a codifié sous les normes ISO 668 et ISO 1496 la construction des conteneurs. Les dimensions extérieures et intérieures des conteneurs, la largeur, la longueur, la hauteur et la masse maximum sont définis pour rendre le conteneur le plus multimodale possible en offrant le volume maximum. Il faut qu'il puisse passer partout qu'il

puisse être transporté indifféremment par la route, par train ou par bateau. Il doit donc s'intégrer dans les gabarits routiers et ferroviaires[2].

### 1.9.3.1 L'unité de mesure EVP

Du fait de l'existence de différents standards, l'unité de mesure de la conteneurisation est devenue l'EVP (équivalent vingt pieds). Les conteneurs des dimensions sont ramenés, par équivalence, à des conteneurs de 20 pieds. Ainsi, un conteneur de 20 pieds correspond à 1 EVP, un conteneur de 40 pieds correspond à 2 EVP et un pied correspond à 304,8 mm.

### 1.9.3.2 Les dimensions

L'ISO facilite la standardisation des dimensions des conteneurs utilisés à travers le monde. Bien que plusieurs types soient toujours en utilisation, certaines catégories tendent à disparaître, laissant principalement la place aux conteneurs de 20 et 40 pieds. On peut également rencontrer des conteneurs répondant à des normes supérieures, tels que [11] :

- Les "high cubes" de hauteur de 2896 mm ;
- Moins fréquemment rencontrés, les "palets wide" sont des conteneurs légèrement plus larges d'un centimètre que les conteneurs classiques. Ils peuvent être disposés en quinconce avec d'autres conteneurs classiques à bord ;
- Des 45 pieds qui ne pourront être mis qu'en pontée et en troisième plan de porte conteneurs.

Les dimensions des conteneurs 20 et 40 pieds seront résumées dans les tableaux table 1.5 et table 1.6, et l'ouverture minimums des portes dans la table 1.7 : 1 pied(ft)= 304 :8mm et 1 inch (pouce)= 25 :4 mm.

<b>type</b>	<b>longueur</b> (mm) (ft)	<b>largeur</b> (mm) (ft)	<b>hauteur</b> (mm) (ft)
20 pieds	6058 19ft et 10.5inch	2438 8ft	2591 8ft et 6inch
40 pieds	12192 40ft	2438 8ft	2438 8ft et 6inch

TABEAU 1.5 – Dimensions extérieures maximales d'un conteneur.

type	longueur (mm)	largeur (mm)	hauteur (mm)
20 pieds	5867	2330	2350
40 pieds	11998	2330	2350

TABLEAU 1.6 – Dimensions intérieures minimales d'un conteneur.

type	longueur (mm)	largeur (mm)
20 pieds	2286	2261
40 pieds	2286	2261

TABLEAU 1.7 – Ouverture minimum des portes d'un conteneur.

#### 1.9.4 Identification internationale des conteneurs

Il existe une numérotation systématique de tous les conteneurs pour le transport des marchandises, ce système de condition comprend des chiffres et des lettres qui sont indiqués sur la porte du conteneur.

Le Bureau International des conteneurs et du Transport Intermodal (BIC) a proposé dès 1969 un code d'identification internationale. Ce code a été normalisé par l'ISO sous la dénomination de ISO 6346-conteneurs pour le transport de marchandises-codage, identification et marquage[1].

##### Exemple de code ISO[6]

Chaque conteneur est identifié par un numéro unique qui lui est attribué tout au long de sa durée de vie. Ce numéro est composé de :

- **Code de propriétaire ou opérateur** :Est composé de quatre lettres majuscules l'alphabet latin, il est recommandé que le dernier soit U qui signifie : Unité.
- **Numérisation de séries** :Il consiste en six chiffres choisis par propriétaire du conteneur, si le nombre de chiffres n'atteint pas six, ils doivent être précédés d'un ou plusieurs zéro, de façons à obtenir un totale de 06 chiffres.
- **Le chiffre d'autocontrôle** :Destiné à validé l'exactitude de l'enregistrement et la transmission de données. Il est inscrit à l'intérieur d'un rectangle.
- **Le code de dimension de type** :Ce code se compose de quatre chiffres indiquant les caractéristiques principales des conteneurs.
- **Le code de pays** :Ce chiffre se compose de deux ou trois lettres majuscules de l'alphabet correspondant au pays ou le code du propriétaire est enregistré.

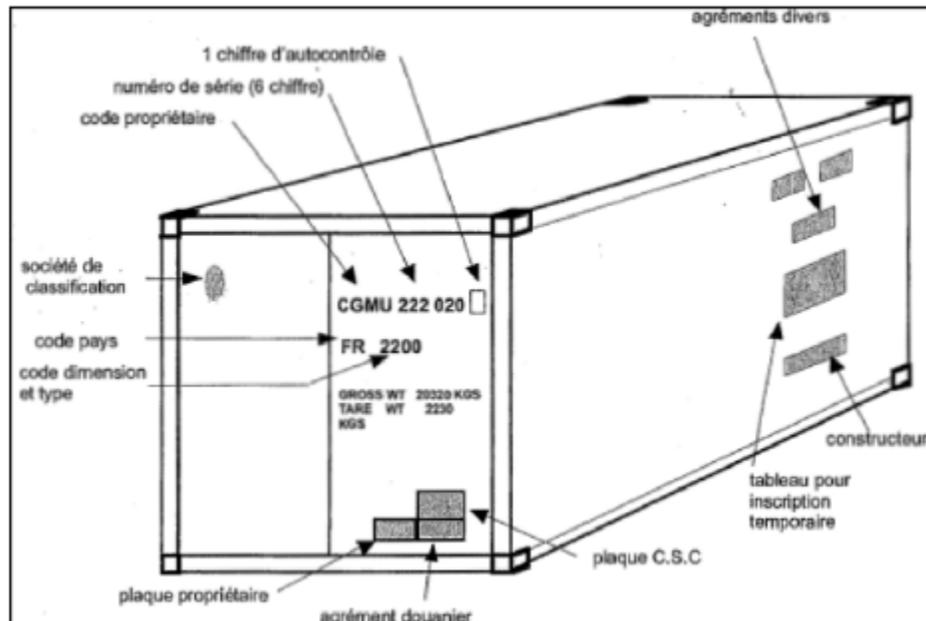


FIGURE 1.8 – Marquage des conteneurs.

### 1.9.5 Les normes de construction

#### Le plancher

En bois d'une épaisseur de 28 mm, résiste au passage de chariots de plus de 5 tonnes[23].

#### L'armature

Fabriquée avec un cadre en acier de 5 mm d'épaisseur, cette structure est conçue pour supporter le poids de cinq autres conteneurs placés au-dessus, totalisant ainsi une charge excédant les 125 tonnes. Cette capacité est assurée uniquement par les quatre coins du conteneur[23].

#### Le toit

En acier, épais de 1.5 mm doit pouvoir supporter une charge de 300 kg sur une surface de 60 cm x 30 cm (soit le poids 3 ou 4 dockers) sans subir aucune altération[23].

#### Les pièces de coin

La spécificité des conteneurs réside dans l'utilisation des pièces d'angle ou coins ISO. Chacun des huit coins du conteneur est équipé d'un cube en acier percé sur trois côtés, ajusté au millimètre près, et dont les dimensions et la position sont uniformes à travers le monde[23].

### 1.9.6 Les avantages et les inconvénients de la conteneurisation

#### Les avantages

##### 1. Du point de vue du transporteur

- Réduction du temps d'escale des navires;
- Limitation des pertes d'espace de navire;
- Réduction des couts de manutention;
- Accroissement du nombre de rotations des navires;
- Limitation des dommages;
- Réduction des couts de l'assurance.

##### 2. Du point de vue chargeur

- Limitation des ruptures de charge;
- Sécurité et confort de la marchandise;
- Réduction des couts de manipulation;
- Limitation des vols et avaries;
- Economise sur l'emballage;
- Réduction des couts de l'assurance;
- Rapidité de livraison;
- Service de porte à porte.

##### 3. Du point de vue de port

- Meilleure organisation portuaire;
- Sécurité de la marchandise;
- Réduction du temps d'escales.

#### Les inconvénients

Le produit doit être sensible aux avantages de la conteneurisation, notamment pour les entreprises confrontées aux risques de casse, de vol, etc. Cependant, ces limites semblent de plus en plus théoriques de nos jours. La seule contrainte pratique réside dans l'adéquation des caractéristiques des marchandises avec celles des conteneurs (poids, volume, dimensions) pour garantir un remplissage optimal. Heureusement, de nombreux fournisseurs ajustent déjà leurs produits et leurs emballages pour s'adapter à la conteneurisation, ou vice versa. Cependant, des précautions doivent être prises pour répondre aux contraintes physiques, que ce soit pour les transports courts ou longue distance[25]. En effet, les températures élevées et la ventilation réduite dans le conteneur peuvent entraîner des dommages considérables s'ils ne sont pas pris en

compte. Par exemple, la chaleur peut dessécher les marchandises (comme le cacao) ou endommager les emballages (carton, bois d'arrimage ou de calage, bois de palettes). De plus, la vapeur d'eau libérée peut se condenser dans les zones les plus froides du conteneur, notamment pendant les changements de température jour-nuit, provoquant ainsi des dommages irréparables, dont les conséquences peuvent être facilement envisageables[6].

### 1.10 Position du Problème

Dans le cadre de la gestion des opérations portuaires, le problème de l'ordonnancement du débarquement des conteneurs revêt une importance cruciale pour optimiser l'utilisation des infrastructures et minimiser les temps d'attente des navires. Nous considérons ici un scénario où un port dispose d'un seul quai permettant l'accostage d'un seul navire à la fois. Ce navire transporte une variété de conteneurs dont la disposition est déterminée par une structure EDI (Electronic Data Interchange).

Deux grues sont disponibles pour le déchargement des conteneurs, opérant en parallèle mais de manière indépendante. Il existe deux types de conteneurs, chacun nécessitant une durée spécifique pour être déchargé. L'objectif principal est de minimiser le temps total de déchargement ( $C_{max}$ ) en affectant les ressources, c'est-à-dire les grues, de manière optimale.

Ce problème implique la prise en compte de plusieurs contraintes, notamment la capacité des grues à ne décharger qu'un seul conteneur à la fois et la nécessité de respecter l'ordre de déchargement imposé par la structure EDI. Il est essentiel de déterminer une planification qui non seulement minimise le temps total de déchargement, mais aussi assure une utilisation efficace des grues et respecte les contraintes opérationnelles liées aux types et aux durées de déchargement des conteneurs.

Ainsi, ce travail vise à modéliser, puis appliquer des méthodes d'ordonnancement pour minimiser la durée totale, notée  $C_{max}$ , de déchargement d'un navire et en tenant compte de la gestion des ressources disponibles et des spécificités des conteneurs. La solution optimale proposée afin de proposer une solution optimisée pour le débarquement des conteneurs dans un port.

### 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés l'entreprise BMT en donnant son historique, sa situation géographique et ses différentes structures et activités. et par suite nous avons évoqué la

## 1.11 Conclusion

---

notion de la conteneurisation en donnant la définition d'un conteneur, les types de conteneurs et l'impact de leur utilisation.

# Chapitre 2

## Introduction aux problèmes d'optimisation combinatoire

La théorie de l'optimisation, basée sur les mathématiques, incarne la recherche de la perfection en scrutant chaque élément à travers des équations et des algorithmes. Elle vise à définir et à atteindre les sommets de performance en exploitant des mécanismes quantitatifs pour s'approcher au plus près des points optimaux, utilisant les méthodes mathématiques comme des outils précis pour améliorer chaque aspect d'un système [8].

### 2.1 C'est quoi l'optimisation ?

L'optimisation est une branche des mathématiques et informatique, en tant que discipline cherche à :

- Modéliser, Analyser et Résoudre de manière analytique ou numérique les problèmes concrets.

Elle consiste à déterminer quelles sont la où les solution(s) inconnues satisfaisant un objectif quantitatif, tout en respectant d'éventuelles contraintes.

Un problème d'optimisation cherche le minimum ou le maximum d'une fonction mathématique donnée dans le cas d'une minimisation (maximisation).

En d'autre termes, résoudre un problème d'optimisation (P) revient à déterminer une solution  $s^* \in S$  minimisant ou maximisant la fonction  $f$  avec  $S$  l'ensemble des solutions où l'espace de recherche et  $f : S \rightarrow Y$  une application ou une fonction d'évaluation qui à chaque configuration  $s$  associe à une valeur  $f(s) \in Y$ .

Il est possible de passer d'un problème de maximisation un problème de minimisation grâce à la propriété suivante :

$$\max f(s) = -\min(f(s)), s \in S$$

Généralement, une solution  $s \in S$  est un vecteur d'un espace à  $N$  dimensions [9].

### 2.1.1 Optimum global/ Optimum local

L'optimum global, est le point dans un espace de recherche où une fonction objectif atteint son maximum (ou minimum) absolu, sans contraintes locales. Il représente la solution la plus favorable parmi toutes les options possibles, sans tenir compte des sous-optimaux. Une solution  $x^* \in S$  est un optimum global d'un problème d'optimisation si et seulement si [9] :

$$\forall s \in S \begin{cases} f(s^*) \leq f(s) \text{ dans le cas de minimisation.} \\ f(s^*) \geq f(s) \text{ dans le cas de maximisation.} \end{cases}$$

Contrairement à l'optimum global, l'optimum local est un point dans un espace de recherche où une fonction objectif atteint son maximum (ou minimum) dans une région spécifique. Soit  $A$  une partie de  $S$ , on dit que  $x^* \in A$  est un optimum local, si et seulement si :

$$\forall x \in A \begin{cases} f(x^*) \leq f(x) \text{ dans le cas de minimisation.} \\ f(x^*) \geq f(x) \text{ dans le cas de maximisation.} \end{cases}$$

## 2.2 Exemples des problèmes d'optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est une branche de la recherche opérationnelle et de l'informatique qui traite de la recherche de solutions optimales parmi un ensemble fini ou dénombrable de solutions possibles. Elle s'applique à des problèmes où l'objectif est de trouver la meilleure solution en fonction de critères spécifiques, souvent sous forme de coûts ou de profits, tout en respectant un ensemble de contraintes. Les problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être modélisés en utilisant [8] :

### 2.2.1 Programmation linéaire

"La programmation linéaire est une technique d'optimisation mathématique dans laquelle on cherche à maximiser ou minimiser une fonction objectif linéaire, sous des contraintes également linéaires. Elle se définit par un ensemble de variables, une fonction objectif à optimiser, et un ensemble de contraintes linéaires qui délimitent l'espace des solutions possibles. La solution optimale est souvent trouvée à l'un des sommets de la région de faisabilité, qui est un polytope convexe dans l'espace des variables" [8].

Un programme linéaire sous forme standard se présente comme suit :

$$(PL) = \begin{cases} \min Z = c'x, \\ Ax \geq b, \\ x \geq 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

où  $A$  est une matrice ( $m \times n$ ), avec  $\text{rang}(A) = m < n$ ,  $b$  un vecteur de dimension  $m$ ,  $c$  un vecteur de dimension  $n$  et  $x$  est un  $n$ -vecteur représentant les variables de décision.

### Méthodes de résolution

- **Méthode graphique** : Utilisée pour résoudre des problèmes à deux variables en traçant les droites correspondant aux contraintes et en identifiant la région faisable et le point optimal.
- **Méthode du simplexe** : Cette méthode est plus complexe mais très efficace pour les problèmes avec plusieurs variables. Elle utilise des itérations pour trouver la solution optimale en déplaçant de manière itérative d'un sommet faisable à un autre jusqu'à atteindre l'optimum.
- **Méthode de la dualité** : Elle permet de vérifier la validité des solutions trouvées et d'obtenir des informations supplémentaires sur le problème initial en examinant un problème dual associé.

### 2.2.2 Programmation linéaire en nombres entiers

La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) est une extension de la programmation linéaire où certaines ou toutes les variables sont contraintes à prendre des valeurs entières. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation où les solutions doivent être entières, ce qui est souvent le cas dans des contextes tels que la planification, la gestion des ressources, et les problèmes de transport. Un programme linéaire en nombres entiers est le suivante : on cherche à maximiser, ou minimiser une fonction de  $n$  variables, lorsque ces variables sont soumises à des contraintes[24] :

$$(PLNE) \begin{cases} \min_x Z = c'x, \\ Ax \leq b, \\ x \in \mathbb{N}^n, \end{cases} \quad (2.2)$$

En programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), une solution optimale est celle qui maximise (ou minimise) la fonction objectif  $c^T x$  tout en respectant les contraintes  $Ax \leq b$  et les exigences d'intégralité  $x \in \mathbb{N}^n$ . Les conditions d'optimalité peuvent être décrites comme suit :

- **Solution Faisable Entière** : La solution  $x$  doit satisfaire toutes les contraintes  $Ax \leq b$  et les variables doivent être entières ( $x \in \mathbb{N}^n$ ).

- **Optimalité de la Relaxation Linéaire** : Si la solution optimale de la relaxation linéaire (où  $x \in \mathbb{R}^n$ ) est entière, alors elle est optimale pour le PLNE.
- **Dominance des Solutions Entières** : Toute solution entière  $x^*$  doit avoir une valeur de la fonction objectif qui n'est pas dépassée par d'autres solutions entières faisables.

### 2.2.3 Théorie des graphes

La théorie des graphes est un outils très puissant de modélisation de la recherche opérationnelle en général, et de l'optimisation combinatoire en particulier. Elle comprend les définitions des différentes structures de graphes connues (chemin, parcours, ensemble stable, etc...), ainsi que les problèmes de décision ou d'optimisation liés à ces structures (plus courts chemin, postier chinois, voyageur de commerce, etc..)[21].

#### Domaines d'application

1. **Informatique** : Utilisée pour modéliser les réseaux de communication, les relations dans les bases de données, et les structures de données comme les arbres et les listes.
2. **Géographie** : Appliquée dans la cartographie et l'analyse des réseaux de transport.
3. **Biologie** : Employée pour étudier les réseaux de neurones, les chaînes alimentaires, et les interactions génétiques.
4. **Ingénierie** : Utile dans la conception de circuits et la planification de projets.
5. **Sociologie** : Permet l'analyse des réseaux sociaux et des relations interpersonnelles.

#### Éléments principaux

- **Sommets (Nœuds)** : Les points de base du graphe.
- **Arêtes (Arcs)** : Les lignes qui connectent les sommets.
- **Graphe Orienté (Digraphe)** : Un graphe où les arêtes ont une direction.
- **Graphe Non Orienté** : Un graphe où les arêtes n'ont pas de direction.
- **Degré d'un Sommet** : Le nombre d'arêtes incidentes à un sommet.
- **Chemin** : Une séquence de sommets où chaque paire consécutive est connectée par une arête.
- **Cycle** : Un chemin qui commence et se termine au même sommet.

#### Types de Graphes

- **Graphes Simples** : Pas de boucles ni d'arêtes multiples entre les mêmes paires de sommets.
- **Graphes Pondérés** : Les arêtes sont associées à des poids.

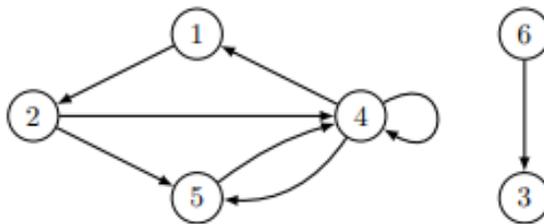
## 2.3 Complexité des problèmes

---

- Graphes Bipartis : Les sommets peuvent être divisés en deux ensembles, et les arêtes ne connectent que des sommets d'ensembles différents.
- Arbres : Un graphe connexe sans cycles[27].
- **Mathématiquement** : généralement un graphe est représenté par un couple de deux ensembles  $G = (X, U)$  où :  $X$  est l'ensemble des nœuds et  $U$  l'ensemble des arcs[19].

### Exemple

Un graphe orienté  $G$  est la donnée d'un couple  $G = (X, U)$  tel que :



représente le graphe orienté  $G = (X, U)$  avec  $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  et  $U = \{(1, 2), (2, 4), (2, 5), (4, 1), (4, 4), (4, 5), (5, 4), (6, 3)\}$ .

## 2.3 Complexité des problèmes

La théorie de la complexité vise à classer les problèmes en fonction de leur difficulté relative à l'algorithme de résolution. On distingue principalement deux grandes catégories de problèmes en termes de complexité [8].

### 1. Les problèmes faciles

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

### 2. Les problèmes difficile

- Le problème d'ordonnement
- 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)

## 2.4 Problèmes classiques d'optimisation combinatoire

### 2.4.1 Problème de transport

Le problème de transport peut être défini comme l'action de transporter des marchandises ou des produits fabriqués par  $m$  origines (ou usines) vers  $n$  destinations (ou clients), d'une manière que le coût total de transport soit minimale. Donc, la résolution d'un problème de transport consiste à organiser le transport de façon à minimiser le coût total de transport

#### Données du Problème

- **Sources (fournisseurs)** :  $m$  sources, chacune avec une capacité  $a_i$  (quantité disponible à la source  $i$ ).
- **Destinations (consommateurs)** :  $n$  destinations, chacune avec une demande  $b_j$  (quantité demandée à la destination  $j$ ).
- **Coûts de transport** : Un coût  $c_{ij}$  pour transporter une unité de la source  $i$  à la destination  $j$  [7].

#### Modélisation

Supposons qu'une entreprise avec  $m$  entrepôts et  $n$  points de vente. Un seul produit doit être transporté des entrepôts aux points de vente. Chaque entrepôt (source) possède un certain stock disponible, et chaque point de vente (destination) a une demande spécifique

#### Variables de décision

$x_{ij}$  La quantité à expédier de l'origine  $i$ ,  $i \in \{1, \dots, m\}$ , vers la destination  $j$ ,  $j = \{1, \dots, n\}$ .

#### Contraintes

1. La disponibilité :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad ; a_i \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, m\}.$$

2. La demande :

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad ; b_j \geq 0, \quad j \in \{1, \dots, n\}.$$

3. Fonction objectif :

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$$

## 2.4 Problèmes classiques d'optimisation combinatoire

---

Il s'agit d'un programme linéaire avec  $m \times n$  variables de décision,  $m + n$  contraintes fonctionnelles et  $m \times n$  contraintes non négatives.

- $m$  : Nombre de sources.
- $n$  : Nombre de destinations.
- $a_i$  : Disponibilité de la  $i$ -ème source.
- $b_j$  : Demande de la  $j$ -ème destination.
- $c_{ij}$  : Coût unitaire de transport de la  $i$ -ème source à la  $j$ -ème destination.
- $x_{ij}$  : Quantité transportée de la  $i$ -ème source à la  $j$ -ème destination.

**Modèle**

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad ; a_i \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, m\} \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad ; b_j \geq 0, \quad j \in \{1, \dots, n\} \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in 1, \dots, m, \quad j \in 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

### 2.4.2 Problème d'affectation

Le problème d'affectation est un type spécifique de problème de transport, où chaque source est attribuée à une seule destination. Il consiste à établir des liens entre les éléments de deux ensembles distincts de manière à minimiser le coût tout en respectant les contraintes d'unicité de lien pour chaque élément. Pour  $n$  tâches et  $n$  ouvriers, chaque ouvrier doit se voir attribuer une seule tâche, et chaque tâche doit être attribuée à un seul ouvrier. Le coût d'affectation d'une tâche  $i$  à un ouvrier  $j$  est  $c_{ij}$ . Le but est de trouver l'affectation minimisant le coût total [24].

### Notions de base

1. **Tâches et ressources** : Ce sont les éléments que l'on souhaite affecter les uns aux autres.
2. **Coût** : Chaque paire tâche-ressource a un coût associé. L'objectif est de minimiser la somme de ces coûts.
3. **Matrice de coût** : Une matrice où chaque élément représente le coût d'affecter une ressource à une tâche.[14]

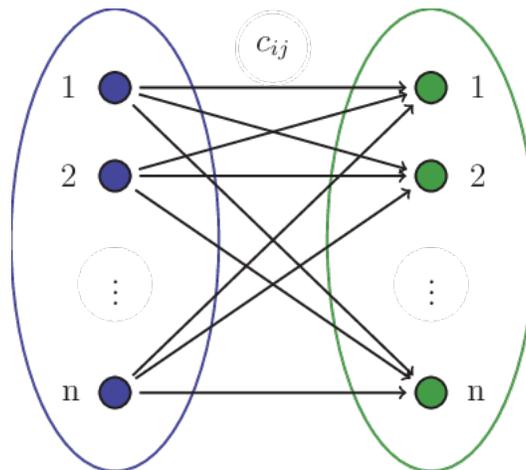


FIGURE 2.1 – Représentation graphique d'un problème d'affectation

### Variables de décisions

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } i \text{ est affectée à l'ouvrier } j. \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

### Contraintes

1. Un seul ouvrier est affecté à la tâche  $i$ .

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i \in \{1, \dots, n\}$$

2. Une et une seule tâche est affectée à l'ouvrier  $j$  :

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j \in \{1, \dots, n\}$$

### Fonction objectif

$$\min_x Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Le modèle mathématique associé à ce problème est le suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_x Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j \in \{1, \dots, n\} \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i \in \{1, \dots, n\} \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in \{1, \dots, n\}. \end{array} \right. \quad (2.4)$$

### 2.4.3 Problème d'ordonnement

L'ordonnement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques, et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation. Le problème d'ordonnement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu des contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînements,...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises pour les tâches, [8] et visant à minimiser (resp maximiser) un certain critère d'optimalité. De manière plus précise, on parle d'ordonnement lorsqu'on parvient à fixer les dates de début et de fin de chacune des activités du projet[9].

#### Formulation du problème

##### 1. Variable de décision

$t_i$  : la date de début d'exécution de la tâche  $i$ .  
 $t_d$  : la date de début du projet.  
 $t_f$  : la date de fin de projet.

##### 2. Fonction objectif

L'objectif principale en gestion est de minimiser la durée du réalisation du projet qui représente l'écart entre la date de fin du projet et sa date de début :

$$\min Z = t_f - t_d = t_f,$$

où  $t_d$  est la date de début de projet que l'on fixe généralement à  $t_d = 0$ .

##### 3. Contraintes

— **Les contraintes de localisation temporelle :** Aucune tâche ne peut commencer avant la date de début de projet :

$$t_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots$$

- **Les contraintes de succession temporelle :** Exprimer que tout tâche  $i$  ne peut pas débiter avant que toutes ses tâches antérieures  $j \in \Gamma^-(i)$  soient complètement achevées :

$$t_j + d_j \leq t_i \quad \forall j \in \Gamma^-(i).$$

- **Les contraintes de fin de projet :** Toutes les tâches du projet doivent terminées avant la date de fin du projet  $t_f$  :

$$t_i + d_i \leq t_f \quad i = 1, \dots, n.$$

Le modèle mathématique formulant le problème courant d'ordonnancement est le programme linéaire (PL) suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } Z = t_f \\ t_j + d_j \leq t \quad \forall j \in \Gamma^-(i) \quad , i = 1, 2, \dots, n \\ t_i + d_i \leq t_f \quad , i = 1, 2, \dots, n, \\ t_i \geq 0 \quad , i = 1, 2, \dots, n. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

## 2.5 Généralités sur l'ordonnancement

### 2.5.1 Notion de projet

Un projet est un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées, ayant des dates de début et de fin, et visant à atteindre un objectif spécifique. Il doit répondre à des exigences précises en termes de délais, de coûts et de ressources. Les projets sont des actions temporaires, impliquant des ressources humaines et matérielles, et nécessitant une budgétisation et un bilan indépendant de l'organisation principale. les exemples de projets :

- Informatisation d'un service Construction d'une route, d'un barrage, d'un bâtiment, d'une école, etc.
- Développement d'un nouveau produit sur le marché
- Conception et développement d'un logiciel
- Organisation d'un mariage, de jeux, etc.

Ordonnancer le fonctionnement d'un système industriel de production consiste à gérer l'allocation des ressources au cours du temps, tout en optimisant au mieux un ensemble de critères. C'est aussi programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et

en fixant leurs dates d'exécution[28][18].

Ordonnancer peut également consister à planifier l'exécution des opérations en leur attribuant les ressources nécessaires et en fixant leurs dates de début de production.

L'ordonnancement se déroule en trois étapes qui sont :

La planification : qui vise à déterminer les différentes opérations à réaliser, les dates correspondantes, et les moyens matériels et humains à y affecter.

L'exécution, qui consiste à mettre en œuvre les différentes opérations définies dans la phase de planification.

Le contrôle, qui consiste à effectuer une comparaison entre planification et exécution, soit au niveau des coûts, soit au niveau des dates de réalisation.

### 2.5.2 Les éléments d'un problème d'ordonnancement

Pour modéliser un problème d'ordonnancement, il est essentiel de définir les tâches et leurs caractéristiques, ainsi que les ressources et les critères d'optimisation. Nous allons maintenant présenter les quatre notions fondamentales impliquées dans un problème d'ordonnancement : les tâches (appelées aussi jobs), les ressources, les objectifs et les contraintes

#### 2.5.2.1 Tâches

Une tâche est une unité élémentaire de travail définie par des dates de début et/ou de fin. Sa réalisation nécessite une certaine durée et elle consomme des ressources. Il existe deux types de tâches. :

les tâches morcelables (préemptives) qui peuvent être exécutées en plusieurs fois, facilitant ainsi la résolution de certains problèmes[?].

les tâches non morcelables (indivisibles) qui doivent être exécutées en une seule fois et ne sont interrompues qu'une fois terminées[24].

#### 2.5.2.2 Ressources

Une ressource est un moyen technique ou humain, destiné à être utilisé pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée. On note en général

$M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$  l'ensemble des ressources. Plusieurs types de ressources sont à distinguer[24]. Une décomposition de type ressource est illustré par la figure (2.2).

##### **Ressources renouvelables**

Une ressource renouvelable est une ressource qui, après avoir été utilisée par une tâche, demeure disponible en même quantité pour les tâches suivantes. Par exemple, les machines et les

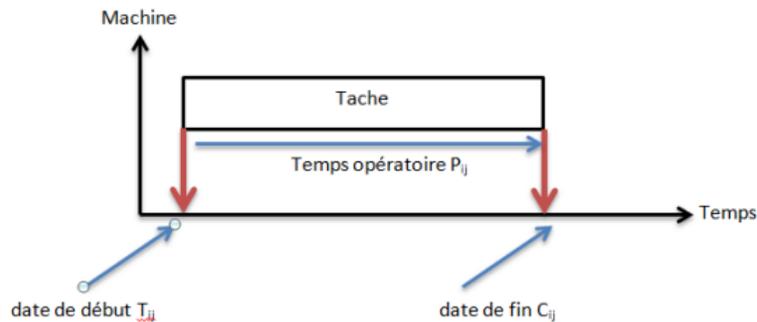


FIGURE 2.2 – Caractéristiques d'une tâche faisant référence à l'exécution d'une opération.

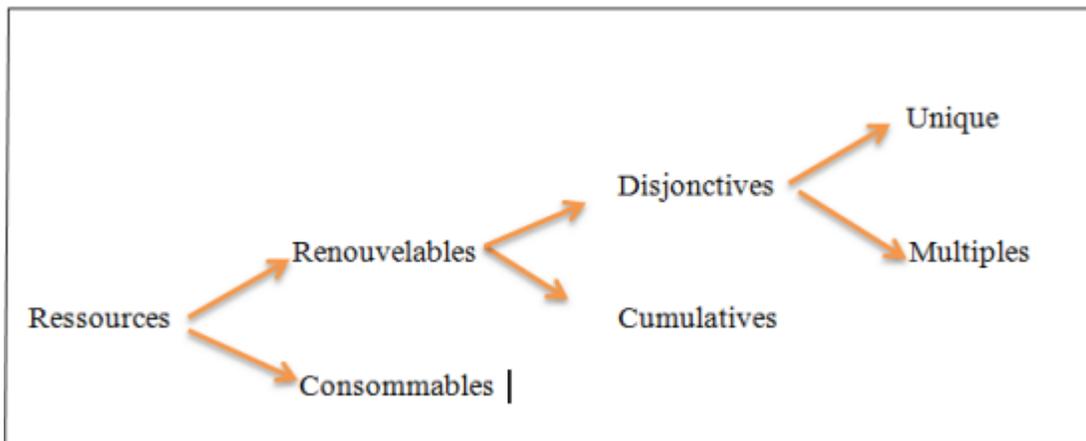


FIGURE 2.3 – Décomposition des ressources.

employés sont des ressources renouvelables.

Ressources disjonctives :

Sont des ressources non partageables, elles exécutent par une seule tâche à la fois,

Ressources cumulatives :

Sont des ressources partageables, elles exécutent par plusieurs tâches simultanément.

### Ressources non renouvelables

Une ressource non renouvelable, ou consommable, est une ressource qui est entièrement utilisée par une tâche au fil du temps, rendant ainsi impossible son utilisation pour les autres tâches restantes. Par exemple, la matière première est une ressource consommable.

### 2.5.2.3 Contraintes

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement les variables représentant les relations qui relient les tâches et les ressources. On distingue les contraintes temporelles et les contraintes de ressources[26].

Les contraintes temporelles intègrent :

Les contraintes de temps alloué, issues généralement d'impératifs de gestion et relatives aux dates limites des tâches (délais de livraison, disponibilité des approvisionnements) ou à la durée totale d'un projet.

Les contraintes d'antériorité et plus généralement les contraintes de cohérence technologique, qui décrivent le positionnement relatif de certaines tâches par rapport à d'autres.

Les contraintes de calendrier liées au respect d'horaires de travail, etc.

### 2.5.2.4 Critères

Lors de la résolution d'un problème d'ordonnancement, on peut distinguer entre deux types de stratégies, visant respectivement à l'optimalité des solutions par rapport à un ou plusieurs critères, ou à leur admissibilité vis-à-vis des contraintes. L'approche par optimisation suppose que les solutions candidates à un problème puissent être ordonnées de manière rationnelle selon un ou plusieurs critères d'évaluation numérique permettant d'apprécier la qualité des solutions [26].

Quelques exemples sont cités ci-dessous [18] :

La minimisation des dates d'achèvement des actions.

La minimisation du maximum des dates d'achèvement des actions.

La minimisation de la moyenne des dates d'achèvement des actions.

La minimisation des retards sur les dates d'achèvement des actions.

La minimisation du maximum des retards sur les dates d'achèvement des actions.

La minimisation des encours.

La minimisation du coût de stockage des matières premières.

L'équilibrage des charges des machines.

L'optimisation des changements d'outils.

La satisfaction de tous les critères à la fois est souvent délicate, car elle conduit souvent à des situations contradictoires et à la recherche de solutions à des problèmes complexes d'optimisation[13].

### 2.5.3 Méthode PERT

Le terme PERT signifie "Program Evaluation and Review Technology" ou "Program Evaluation Research Task". En français, cela se traduit par : Technique d'évaluation et d'examen de programmes. Le planificateur PERT est principalement un outil d'analyse et d'organisation, utilisé pour créer d'autres types de plannings. En raison de l'absence d'échelle de temps et de calendrier, il n'est pas très pratique pour suivre l'évolution quotidienne des opérations. La méthode PERT repose sur une analyse systématique et critique des différentes tâches d'un projet et de leur enchaînement [5].

#### Principe de la méthode

Pour chaque tâche, on spécifie les dates de début et de fin les plus précoces et les plus tardives possibles, ce qui permet d'identifier le chemin critique, déterminant ainsi la durée minimale du projet. La gestion d'un projet implique l'exécution de diverses tâches dans un ordre précis, en tenant compte des relations suivantes entre elles :

Une tâche ne peut être commencée qu'après la fin de la tâche précédente.

Les ressources nécessaires (matériel, main-d'œuvre, etc.) doivent être disponibles simultanément.

Certaines tâches doivent être achevées à des moments précis en raison de contraintes de calendrier[8].

#### Démarches de la méthode

##### Réalisation du réseau PERT

Les tâches à accomplir sont représentées par un graphe qui met en évidence toutes les relations entre elles, de la manière suivante :

- Chaque tâche correspond à un arc du graphe.
- La durée de chaque tâche est indiquée par la valeur de l'arc.
- Les sommets du graphe représentent les relations de succession temporelle ou les étapes. Ainsi, si la tâche j doit suivre la tâche i, l'extrémité terminale de l'arc représentant la tâche i coïncidera avec l'extrémité initiale de l'arc représentant la tâche j[5].

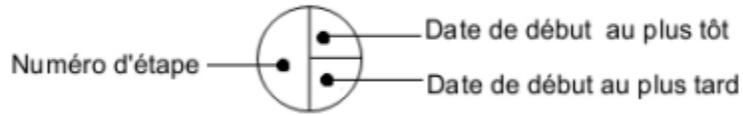


FIGURE 2.4 – Représentation d'un sommet dans un réseau PERT

### Tâches fictives

La méthode PERT utilise une représentation spécifique appelée tâche fictive, symbolisée par une flèche en pointillés. Cette flèche sert à indiquer une relation, par exemple, lorsque plusieurs tâches commencent et se terminent au même moment [8].



FIGURE 2.5 – Représentation d'une tâche fictive.

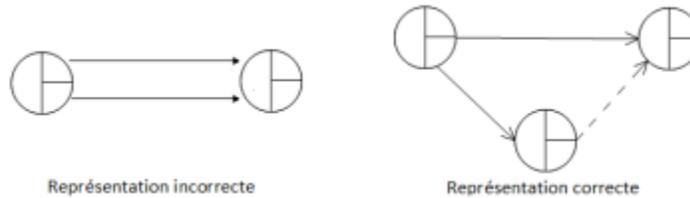


FIGURE 2.6 – Fonction d'une tâche fictive dans PERT.

Il n'y a pas de tâches avant A, elle commence donc à l'étape origine.

## 2.5 Généralités sur l'ordonnement

---

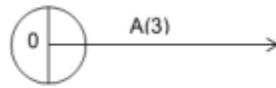


FIGURE 2.7 – Commencement du réseau PERT.

- Les tâches B et C suivent la tâche A.

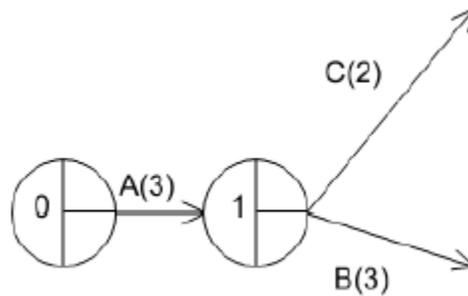


FIGURE 2.8 – Insertion des tâches B et C.

La tâche D suit la tâche C et B, donc nous avons besoin d'une tâche fictive qui peut-être dessiner à partir de B ou C, ainsi que la tâche E suit la tâche D.

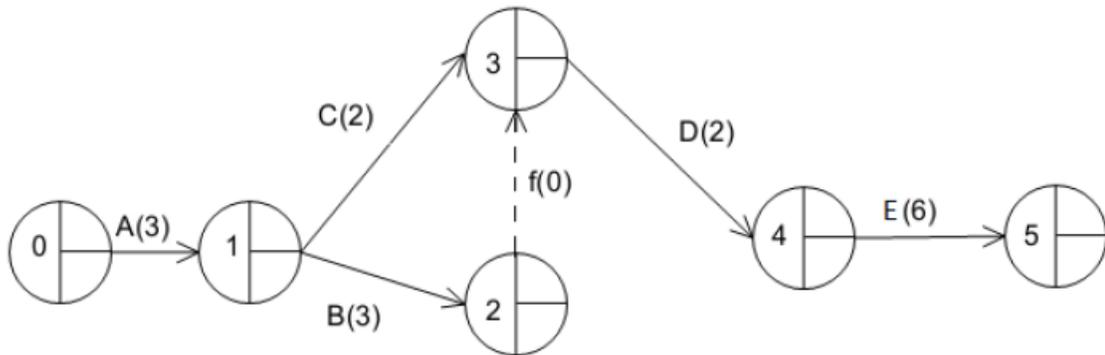


FIGURE 2.9 – Réseau associé à la méthode PERT.

### Calcul de dates

Après avoir tracé le réseau PERT, on peut calculer les dates de début et de fin des tâches.

- **Début au plus tôt** ( $t_i$ ) : Date la plus précoce possible pour commencer une tâche après avoir terminé les précédentes :  $t_i = \max(t_j + d_j)$  pour tous les prédécesseurs  $j$  de  $i$ .
- **Début au plus tard** ( $T_i$ ) : Dernière date possible pour commencer une tâche sans retarder les suivantes :

$$T_i = \min(T_j - d_i)$$

pour tous les successeurs  $j$  de  $i$ .

- **Fin au plus tôt** ( $t_i + d_i$ ) : Date de fin si la tâche commence au plus tôt.
- **Fin au plus tard** ( $d_i + T_i$ ) : Date de fin si la tâche commence au plus tard.

### Les Marges

- **Marge totale** ( $MT_i$ ) : Temps disponible sans affecter la durée du projet. Si épuisée, la tâche devient critique. :

$$MT_i = T_j - (t_i + d_{ij})$$

.

- **Marge libre** ( $ML_i$ ) : Temps disponible sans retarder les tâches suivantes. :

$$ML_i = t_j - (t_i + d_{ij})$$

.

En PERT, les chemins et tâches critiques déterminent la durée minimale du projet. Tout retard sur une tâche critique affecte directement la date finale. Pour respecter les délais, il est crucial de surveiller attentivement les tâches critiques et de les optimiser[5].

### 2.5.4 Diagramme de Gantt

L'élaboration d'un diagramme de Gantt nécessite que toutes les tâches nécessaires à la réalisation de l'objectif soient clairement identifiées, hiérarchisées (en termes de priorités) et quantifiées en termes de durée, de charges, ou de ressources nécessaires (humaines, techniques, financières)[19].

#### Principe

Dans un diagramme de Gantt on représente :

En abscisse les unités de temps (en mois, en semaine ou en jours).

En ordonnées les différentes tâches par des barres dont la longueur est proportionnelle à leur durée.

Ce diagramme permet :

De déterminer les dates de réalisation d'un projet.

D'identifier les marges existantes sur certaines tâches.

De représenter et de visualiser graphiquement l'avancement des travaux du projet.

#### Réalisation du planning de Gantt

Les données utilisées pour dessiner le diagramme PERT servent à créer le planning de Gantt. Chaque tâche y est représentée par une barre dont la longueur est proportionnelle à sa durée. On utilise principalement les dates de début au plus tôt et les dates de début au plus tard. Ainsi, deux cas se distinguent :

1. **Ordonnancement au plus tôt**

Dans ce cas l'origine du segment de chaque tâche est la date de début au plus tôt et l'extrémité du segment représente la fin au plus tôt.

2. **Ordonnancement au plus tard**

Dans ce cas, le début de chaque segment représente la date de début au plus tard, tandis que l'extrémité du segment indique la date de fin au plus tard.

**Exemple 2.1.** Soit le projet suivant :

<i>Tâche</i>	<i>Durée</i>	<i>Antériorité</i>
<i>A</i>	3	-
<i>B</i>	2	<i>A</i>
<i>C</i>	6	<i>B</i>
<i>D</i>	3	<i>A</i>

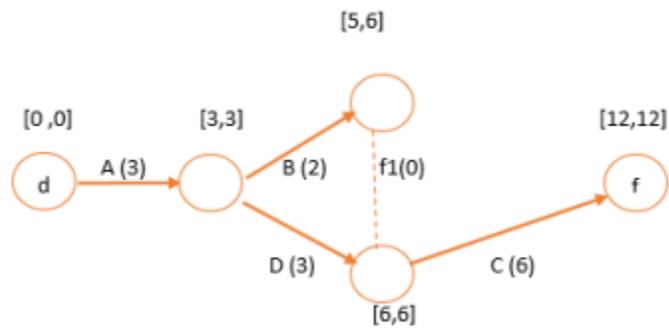


FIGURE 2.10 – Graphe Pert

**Remarque 2.1.**

*Le diagramme de Gantt est utilisé aussi pour le suivi de projet.*

*On l'utilise uniquement pour de petit projet.*

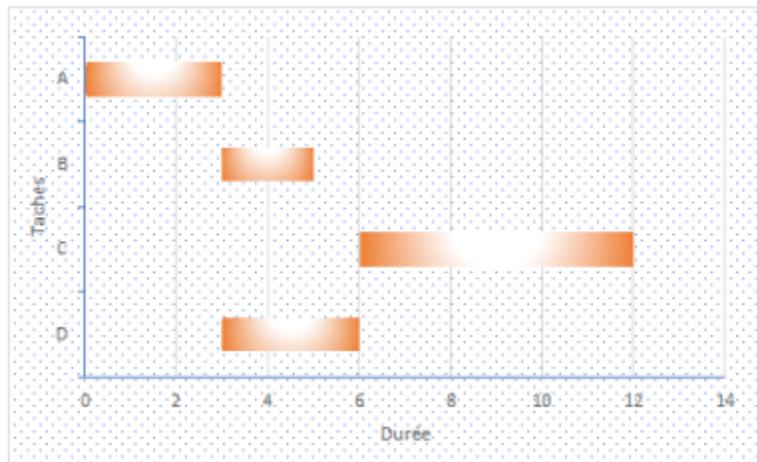


FIGURE 2.11 – Diagramme de Gantt au plus tôt

## 2.6 Méthodes de résolution

Les problèmes d'optimisation sont omniprésents dans divers domaines tels que l'ingénierie, l'économie, la logistique et bien d'autres. Pour les résoudre, plusieurs méthodes peuvent être employées, chacune adaptée à la nature spécifique du problème [4].

### 2.6.1 Méthodes exactes

Nous commençons par présenter quelques méthodes appartenant à la classe des algorithmes complets ou exacts, qui assurent de trouver la solution optimale pour une instance de taille finie en un temps limité et de démontrer son optimalité.

#### 2.6.1.1 Méthode séparation et évaluation (Branch and Bound)

La méthode de branch and bound élimine intelligemment les solutions partielles non viables pour trouver la solution optimale plus rapidement, bien que dans le pire des cas, toutes les solutions doivent être examinées.

Par convenance, on représente l'exécution de la méthode de branch-and-bound à travers une arborescence. La racine de cette arborescence représente l'ensemble de toutes les solutions du problème considéré. Dans ce qui suit, nous résumons la méthode de branch-and-bound sur des problèmes de minimisation.

Pour appliquer la méthode de branch-and-bound, nous devons être en possession :

1. d'un moyen de calcul d'une borne inférieure d'une solution partielle.
2. d'une stratégie de subdiviser l'espace de recherche pour créer des espace de recherche de plus en plus petits.
3. d'un moyen de calcul d'une borne supérieure pour au moins une solution.

La méthode divise le problème initial en sous-problèmes, appliquant des bornes inférieures et supérieures pour trouver la solution optimale. Si une solution optimale est trouvée, les sous-problèmes moins prometteurs sont éliminés. La recherche continue jusqu'à ce que tous les nœuds soient explorés ou éliminés [24].

#### 2.6.1.2 Méthode Branch and Cut

La méthode des coupes planes peut être inefficace pour les problèmes complexes. Bien que l'algorithme "Branch and Bound" soit performant pour certains problèmes, la méthode "Branch and Cut" combine ses avantages avec ceux des coupes planes. Pour résoudre un programme

linéaire en nombres entiers, "Branch and Cut" commence par relâcher le problème, applique les coupes planes, puis divise le problème en sous-problèmes si la solution n'est pas entière. Cela permet de résoudre le problème d'optimisation,

$(\min c^t x : Ax \geq b; x \in \mathbf{R}^n)$  Avec  $A \in \mathbf{R}^{n \times m}$  et  $b \in \mathbf{R}^m$  [4].

### 2.6.1.3 Méthode de la génération de colonnes

La génération de colonnes repose sur l'idée que toutes les variables d'un programme linéaire ne sont pas nécessaires pour atteindre la solution optimale. Cette méthode résout d'abord un problème réduit avec moins de variables, appelé problème restreint, tandis que le problème original est le problème maître. Si les variables du problème restreint ne suffisent pas, des variables supplémentaires sont ajoutées pour améliorer et optimiser la solution du problème maître. Le sous-problème associé au problème maître, ou oracle, vise à trouver la meilleure variable à ajouter au problème restreint, en recherchant celle avec le coût réduit minimum pour améliorer la solution. Ce coût réduit est calculé à partir des variables duales obtenues après avoir résolu le problème restreint. Le point dual utilisé, souvent une solution optimale du dual du problème restreint, est appelé point de séparation. Considérons le programme linéaire continu (LP) suivant [4] :

$$(PL) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{i \in T} c_i x_i \\ \sum_{i \in T} a_{ij} x_i \geq b_j \quad j = 1, \dots, n \\ x_i \geq 0, \forall i \in T \end{array} \right.$$

### 2.6.1.4 Programmation dynamique

La programmation dynamique est une technique algorithmique utilisée pour résoudre certains problèmes d'optimisation sous contraintes. Introduite dans les années 1950 par Richard Bellman, elle s'applique à des problèmes où la fonction objectif est la somme de fonctions monotones non décroissantes des ressources.

Cette méthode est attrayante en raison de sa flexibilité et de sa capacité à résoudre divers problèmes, qu'ils soient déterministes ou non. Cependant, elle ne concerne que les problèmes d'optimisation séquentielle, et il est crucial de vérifier le principe d'optimalité avant de l'utiliser.

Contrairement à la méthode "diviser pour régner", où les sous-problèmes sont indépendants, la programmation dynamique permet aux sous-problèmes de se chevaucher, utilisant ainsi les mêmes sous-problèmes dans différentes solutions. Toutefois, tous les problèmes d'optimisation ne peuvent pas être résolus par cette méthode; le problème doit satisfaire le principe d'optimalité pour garantir une solution optimale [4].

### 2.6.2 Méthodes approchées

#### Heuristiques

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approximatif qui trouve rapidement une solution réalisable en temps polynomial, sans garantir qu'elle soit optimale. Elle accélère la résolution en fournissant une solution approchée. Les heuristiques, adaptées à des problèmes spécifiques sans garantir la qualité de la solution, se divisent en deux catégories.

- **Méthodes constructives** : construisent des solutions en ajoutant progressivement des éléments à partir d'une solution initiale jusqu'à obtenir une solution complète.
- **Méthodes de recherche locale** : partent d'une solution réalisable initiale (facile à obtenir et sous-optimale) et cherchent à l'améliorer en explorant régulièrement les solutions voisines.

#### Métaheuristiques

Le terme métaheuristique provient de deux mots grecs : "méta" et "heuristique". "Méta" est un préfixe signifiant "au-delà" ou "de niveau supérieur". Les métaheuristiques sont des techniques souvent inspirées par la nature. Contrairement aux heuristiques classiques, elles peuvent s'appliquer à divers types de problèmes. On peut donc les considérer comme des heuristiques de nouvelle génération, de niveau supérieur, spécialement conçues pour résoudre des problèmes d'optimisation. Leur objectif est de trouver un optimum global en évitant les pièges des optima locaux.

Les métaheuristiques se divisent en deux grandes catégories [4] :

- **Métaheuristiques à solution unique** : Ces méthodes travaillent sur une seule solution à la fois pour trouver la solution optimale.
- **Métaheuristiques à population de solutions** : Ces méthodes utilisent une population de solutions à chaque itération jusqu'à ce qu'une solution globale soit obtenue.

Le choix de la méthode de résolution dépend du type, de la complexité et des contraintes du problème. Les méthodes analytiques conviennent aux problèmes simples, les méthodes numériques et heuristiques aux problèmes complexes, et les méthodes spécifiques exploitent les caractéristiques particulières des problèmes [4].

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini l'optimisation combinatoire et exploré des problèmes classiques, en particulier celui de l'ordonnancement, qui consiste à planifier les tâches dans le temps. Cette compréhension nous servira à modéliser l'ordonnancement des activités de maintenance dans le chapitre suivant.

# Chapitre 3

## Modélisation de la Gestion des Ressources pour le Débarquement

Dans le cadre de la gestion portuaire, l'optimisation des ressources utilisés lors du déchargement des containers d'un navires est cruciale. Un débarquement efficace des marchandises permet de réduire les coûts opérationnels et de minimiser le temps d'attente des navires, améliorant ainsi la productivité globale du port. Ce chapitre présente une modélisation de la gestion des ressources pour le débarquement, en se basant sur un scénario spécifique où un seul quai et un seul navire sont considérés, avec deux grues opérant en parallèle.

### 3.1 Description du problème

#### Contexte

Le problème de planification des opérations de débarquement des conteneurs d'un navire au sein de la BMT Bejaia est modélisé comme un problème d'ordonnancement avec gestion des ressources. Les opérations de débarquement des conteneurs impliquent plusieurs défis (ou contraintes) et sont énumérés comme suit :

- Un seul quai et un seul navire sont pris en compte (poste 22) .
- Le navire transporte des conteneurs placés selon une structure EDI spécifique, imposant un ordre de déchargement.
- Deux grues sont disponibles pour le débarquement, opérant en parallèle (QC1 et Grue 1).
- Il existe deux types de conteneurs à débarquer, chacun ayant une durée de traitement spécifique en raison de leurs tailles.
- Les conteneurs doivent être débarqués en respectant des contraintes de précédence dictées par leur arrangement sur le navire.

Le modèle doit intégrer :

## 3.2 Modélisation du problème

---

- La durée spécifique de traitement pour chaque type de conteneur.
- L'affectation optimale des grues pour minimiser le temps total de déchargement ( $C_{\max}$ ).
- Les contraintes de précédence et l'ordre de déchargement imposé par la structure EDI du navire.
- Les contraintes d'affectation des ressources doivent être satisfaites : chaque grue ne peut manipuler qu'un seul conteneur à la fois.

### Hypothèses

- Chaque grue peut manipuler tous types de conteneurs.
- Le temps de traitement d'un conteneur dépend uniquement de son type.
- Les conteneurs doivent être déchargés en respectant l'ordre de précédence imposé par la structure EDI.
- Le but est de minimiser le temps total de déchargement.

## 3.2 Modélisation du problème

### Les Données

Supposons un navire transportant  $n$  conteneurs avec deux types différents :

- Conteneur Type 1 : durée de traitement d'un conteneur 20 EVP est  $d_1 = 4$  minutes.
- Conteneur Type 2 : durée de traitement d'un conteneur 40 EVP est  $d_2 = 6$  minutes.

Les précédences des conteneurs sont définies par la structure EDI du navire.

### 3.2.1 Identification des paramètres

- $Q = \{1, 2\}$  : ensemble des grues du quai (deux moyens de débarquement).
- $T$  : ensemble des conteneurs à débarquer .
- $n$  : nombre de conteneurs à débarquer.
- $i, j$  : index de tâche ( $\forall (i, j) \in T$ ).
- $C_j$  : nombre de conteneurs associés à la tâche  $j$ .
- $T_c$  : temps pour décharger un conteneur par une grue .
- $M$  : un très grand nombre (utilisé pour représenter l'infini).
- $t_j$  : l'instant de début du déchargement de la tâche (conteneur)  $j$ .
- $\Gamma^+(j)$  : l'ensemble des conteneurs à débarquer qui peuvent être atteints directement à partir de  $j$ .

### 3.2.2 Variables de décision

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la tâche } j \text{ est manipulée par la grue } i \text{ du quai,} \\ 0, & \text{Sinon,} \quad i \in Q, j \in T. \end{cases}$$

$$z_{jj'} = \begin{cases} 1, & \text{si le déchargement de la tâche } j \text{ termine avant le début du déchargement} \\ & \text{de la tâche } j', \\ 0, & \text{sinon } (j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j)). \end{cases}$$

- $C_{\max}$  : Le makespan représentant la durée minimale de déchargement de tous les conteneurs (projet).
- $M$  : un nombre positif, supposé très grand.

### 3.2.3 Modélisation du problème mixte (PLNE)

#### Objectif

L'objectif principal est de minimiser le temps d'attente des navire sur le quai et ainsi la durée totale,  $C_{\max}$  de déchargement de tous les conteneurs

$$\text{Min } C_{\max}$$

#### Contraintes

1. Chaque tâche doit être assignée à une grue :

$$\sum_{i \in Q} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in T$$

2. Début de la tâche après la fin de la tâche précédente par la même grue :

$$t_j + T_c \leq t_{j'} + M \cdot (1 - x_{ij}), \quad \forall j \in T, j' \in \Gamma^+(j), i \in Q$$

3. Respect des ordres de déchargement :

$$z_{jj'} \leq z_{j'j} \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j)$$

$$t_j + T_c \leq t_{j'} + M \cdot (1 - z_{jj'}) \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j)$$

4. Définition de la date de début :

$$t_j + T_c - M \cdot (1 - x_{ij}) \leq t_{j'} \quad \forall j, j' \in T, j \neq j', i \in Q$$

### 3.2 Modélisation du problème

---

5. Fin de déchargement des conteneurs : L'instant de fin de déchargement de chaque conteneur ne doit pas dépasser  $C_{\max}$ .

$$t_j + T_c \leq C_{\max} \quad \forall j \in T$$

6. Non négativité et bivalence des variables de décision :

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in Q, j \in T$$

$$z_{jj'} \in \{0, 1\} \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j)$$

$$t_j \geq 0, \quad \forall j \in T$$

### Le Modèle

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C_{\max} \\ \sum_{i \in Q} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in T \\ t_j + T_c \leq t_{j'} + M \cdot (1 - x_{ij}) \quad \forall j, j' \in T, j \neq j', i \in Q \\ z_{jj'} \leq z_{j'j} \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j) \\ t_j + T_c \leq t_{j'} + M \cdot (1 - z_{jj'}) \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j) \\ t_j + T_c - M \cdot (1 - x_{ij}) \leq t_{j'} \quad \forall j, j' \in T, j \neq j', i \in Q \\ t_j + T_c \leq C_{\max} \quad \forall j \in T \\ x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Q, j \in T \\ z_{jj'} \in \{0, 1\} \quad \forall j, j' \in T, j' \in \Gamma^+(j) \\ t_j \geq 0 \quad \forall j \in T \end{array} \right.$$

### 3.3 Exemple numérique illustratif

On a utilisés le Python pour son efficacité, avec des bibliothèques comme *numpy* pour les manipulations de données et *heapq* pour la gestion des priorités. Ces outils ont permis de développer un algorithme robuste pour résoudre le problème d’ordonnancement des tâches.

Chaque navire possède une structure spécifique pour le placement des conteneurs, qui est organisée selon des normes et des contraintes de sécurité. Cette structure détermine l’ordre de chargement et de déchargement des conteneurs. En l’occurrence, il existe deux types de conteneurs à bord :

- Les conteneurs de 40 pieds.
- Les conteneurs de 20 pieds.

Les conteneurs de 40 pieds, plus grands, prennent plus de temps à être manipulés par les grues (6min) que les conteneurs de 20 pieds (4min). Nous avons pris ce plan de déchargement Figure 3.1 qui nous permet de savoir le types et l’ordre de chaqu’une.

Nous avons dans ce cas neuf(09) conteneurs ,on utilise deux(02)Grues(Machines) .

20'	20'	40'	20
40'		20'	40'
	40'	20'	

FIGURE 3.1 – Disposition et structure des (09) conteneurs sur un bateau



FIGURE 3.2 – les tâches de déchargement des conteneurs

La Figure 3.2 montre les tâches de déchargement assignées aux grues.

### 3.3 Exemple numérique illustratif

---

Tâche $i$	Durée $d_i$	Antériorités	Type de conteneur
T <sub>1</sub>	4	–	20'
T <sub>2</sub>	4	–	20'
T <sub>3</sub>	6	–	40'
T <sub>4</sub>	4	–	20'
T <sub>5</sub>	6	T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub>	40'
T <sub>6</sub>	4	T <sub>3</sub>	20'
T <sub>7</sub>	6	T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub>	40'
T <sub>8</sub>	6	T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub>	40'
T <sub>9</sub>	4	T <sub>7</sub>	20'

TABLEAU 3.1 – Description des tâches du projet et leurs caractéristiques

Le Tableau 3.1 représente les tâches de déchargement des conteneurs, spécifiant le type de conteneur et les grues assignées à chaque tâche.

#### 3.3.1 Codage utilisé pour notre algorithme

Nous avons utilisé pour l'algorithme de Branch and Bound afin de minimiser  $C_{\max}$  pour l'ordonnancement des tâches sur deux machines.

- **Définir les Tâches** : Nous commençons par définir les tâches avec leurs temps de début (start) et de fin (end).
- **Calculer  $C_{\max}$**  : Nous définissons une fonction pour calculer  $C_{\max}$ , qui est le maximum des temps de fin de chaque machine.
- **Fonction de Branch and Bound** : La fonction branch and bound est définie pour explorer toutes les combinaisons possibles d'assignations de tâches aux deux machines et trouver l'ordonnancement qui minimise  $C_{\max}$ .
- **Trouver l'Ordonnancement Optimal** : Nous appelons la fonction B&B avec la liste des tâches pour trouver l'ordonnancement optimal et le  $C_{\max}$  optimal.
- **Afficher les Résultats** : Enfin, nous affichons l'ordonnancement optimal et le  $C_{\max}$  optimal[20].

### 3.3 Exemple numérique illustratif

---

Étape	Description
1	<b>Initialisation :</b> Définir le meilleur $C_{\max}$ comme étant très grand ( $\infty$ ). Initialiser un planning vide.
2	<b>Branching :</b> Sélectionner une tâche $j$ non encore assignée. Générer deux branches pour chaque machine $i$ : • Assigner la tâche $j$ à la machine $i$ ( $x_{ij} = 1$ ).
3	<b>Bounding :</b> Calculer une borne inférieure pour chaque branche en utilisant les contraintes du modèle. Si la borne inférieure de cette branche est plus grande que le meilleur $C_{\max}$ actuel, abandonner cette branche (coupure).
4	<b>Solution Complète :</b> Si toutes les tâches sont assignées, calculer le $C_{\max}$ pour ce planning. Si ce $C_{\max}$ est meilleur que le meilleur $C_{\max}$ trouvé, mettre à jour le meilleur $C_{\max}$ et le planning optimal.
5	<b>Retour :</b> Si toutes les branches sont explorées ou coupées, retourner le meilleur planning trouvé et le $C_{\max}$ correspondant.

TABLEAU 3.2 – Algorithme de Branch and Bound .

Le tableau 3.2 montre les étapes de l'algorithme branch and bound pour trouver la date de fin de projet  $C_{\max}$  .

### 3.3 Exemple numérique illustratif

D'après l'algorithme utilisé pour résoudre le problème avec les données fournies, les résultats obtenus sont les suivants :

#### Sortie du programme

```
Machine 1 : ['T1', 'T2', 'T5', 'T6', 'T8']  
Machine 2 : ['T3', 'T4', 'T6', 'T7', 'T9']  
max_C_max_Optimal : 24  
  
[Execution complete with exit code 0]
```

FIGURE 3.3 – La durée totale de projet = 24 min

Cette figure 3.3 nous montre la date du fin de projet = 24min, telle que les tâches assigner pour chaque machine.

Le réseau PERT nous a permis de modéliser graphiquement les dépendances entre les tâches de notre projet, il facilite la gestion et l'optimisation des délais. Il aide à identifier les chemine-ments critiques qui impactent la durée totale du projet. Nous avons présentés les valeurs de  $t_i$  (instant de début au plus tôt) et  $T_i$  (instant de fin au plus tard) :

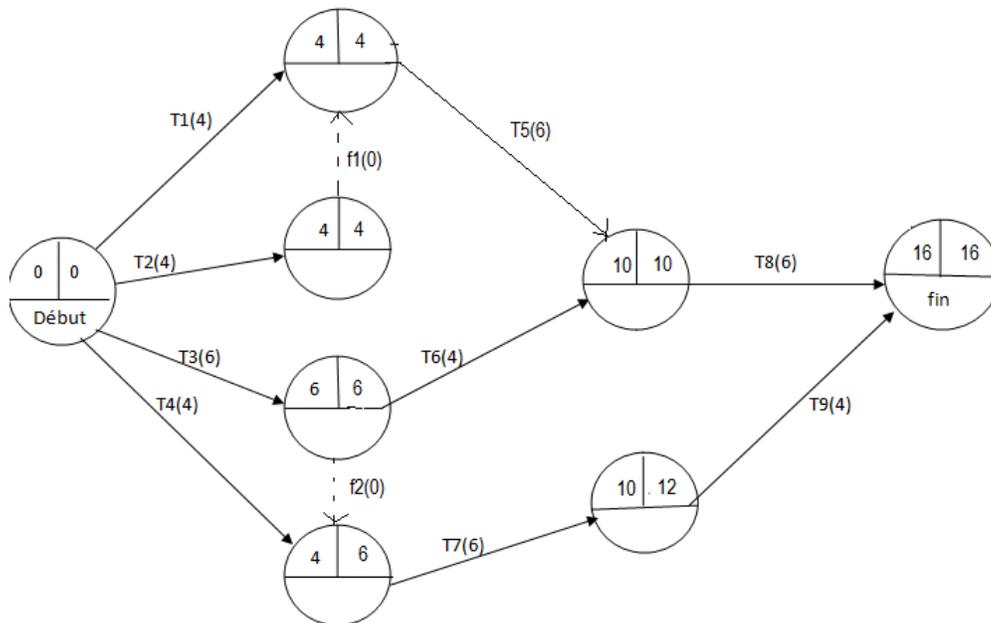


FIGURE 3.4 – Réseau de Pert sans la gestion des ressources

### 3.3 Exemple numérique illustratif

---

Les chemins critiques sont : {T1,T5,T8} ; {T2,T5,T8} ; {T3,T6,T8}

Le chemin critique est la séquence de tâches qui détermine la durée minimale d'un projet qui nécessitent une attention particulière pour éviter des retards.

Nous avons deux structures à suivre pour le déchargement de la Figure 3.1 , à cause de la structure de positionnement du conteneur (T6).

Tâche $i$	Début ( $t_i$ )	Fin ( $t_j$ )
T1	0	4
T2	4	8
T3	4	10
T4	0	4
T5	8	14
T6	14	18
T7	10	16
T8	18	24
T9	16	20

TABLEAU 3.3 – Instants de début et de fin des tâches

Ce tableau 3.3 représente l'ordonnancement optimal des Tâches sur Machines M1 et M2 si la tâche (T6) est réalisée par la Machine 1. Diagramme de Gantt de Figure 3.5 illustre la répar-

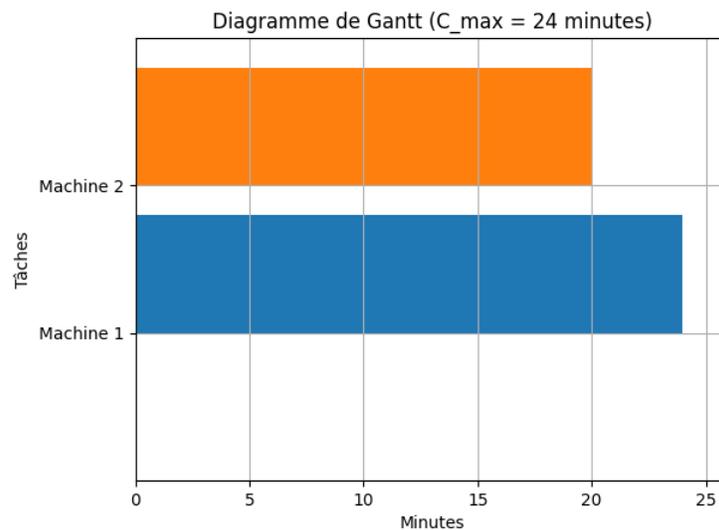


FIGURE 3.5 – Équilibrage des Tâches entre Deux Machines

### 3.3 Exemple numérique illustratif

tition équilibrée des tâches entre Machine 1 et Machine 2, avec une date de fin d'exécution globale ( $C_{max}$ ) de 24 minutes par la machine 1.

Tâche	Début (ti)	Fin (tj)
T1	0	4
T2	4	8
T3	4	10
T4	0	4
T5	8	14
T6	16	20
T7	10	16
T8	14	20
T9	20	24

TABLEAU 3.4 – Début et fin des Tâches

Ce Tableau 3.4 représente l'Ordonnancement Optimal des Tâches sur Machines M1 et M2 si la tâche (T6) est réalisée par la Machine 2.

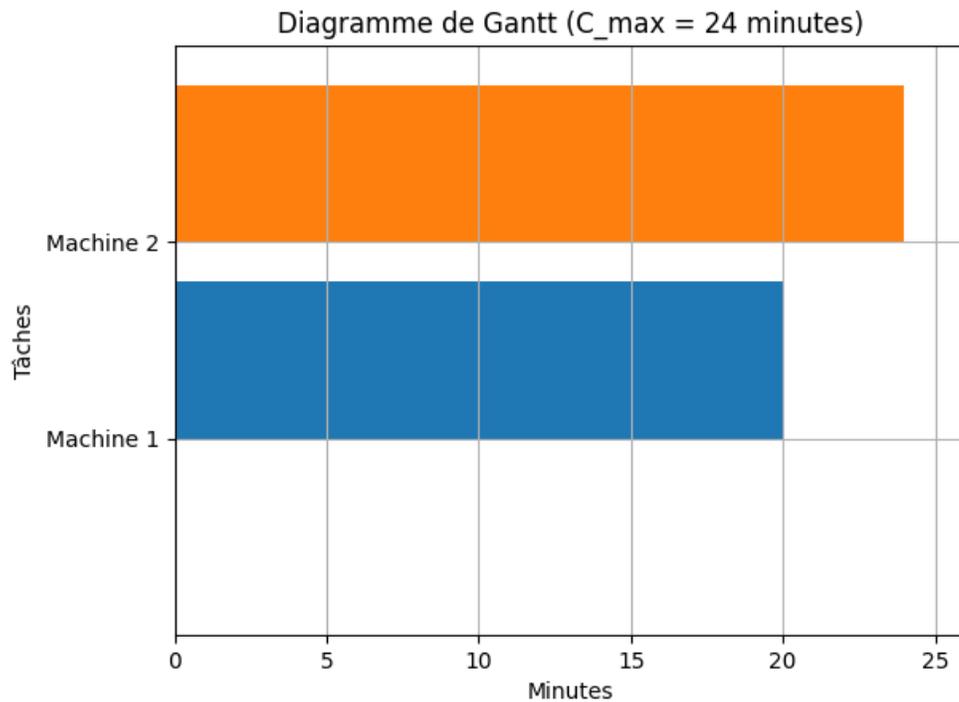


FIGURE 3.6 – Équilibrage des Tâches entre Deux Machines

Diagramme de Gantt de Figure 3.6 illustre la répartition équilibrée des tâches entre Machine 1 et Machine 2, avec une date de fin d'exécution globale ( $C_{max}$ ) de 24 minutes par la machine 2.

## 3.4 Analyse et interprétation des résultats

### Ordonnancement avec T6 sur Machine 1

- Le  $C_{\max}$  est déterminé par la tâche T8 qui se termine à 24 unités de temps.
- Les tâches T6 et T8 sont réalisées successivement sur la Machine 1, ce qui provoque un délai supplémentaire.

### Ordonnancement avec T6 sur Machine 2

- Le  $C_{\max}$  est déterminé par la tâche T9 qui se termine à 24 unités de temps.
- Dans cet ordonnancement, T6 et T8 se chevauchent sur différentes machines, ce qui permet une meilleure distribution des tâches et une utilisation plus efficace des machines.

Pour minimiser le  $C_{\max}$  et optimiser l'ordonnancement des tâches, il est préférable de réaliser la tâche T6 sur la Machine 2. Cela permet de répartir les tâches de manière plus équilibrée entre les machines et de réduire les temps d'attente et les délais de complétion. L'ordonnancement avec T6 sur la Machine 2 utilise les deux machines de manière plus efficace, évitant ainsi la surcharge d'une seule machine et réduisant le temps de complétion maximal global à 24 unités de temps.

## 3.5 Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

### 3.5.1 Contexte du problème

Les conteneurs de 20 pieds et de 40 pieds nécessitent des temps de traitement différents pour être déchargés :

- Déchargement d'un conteneur de 20 pieds : 4 minutes.
- Déchargement d'un conteneur de 40 pieds : 6 minutes.

Pour minimiser le  $C_{\max}$ , nous devons planifier de manière optimale l'attribution des conteneurs aux deux grues, en tenant compte de la disposition et des contraintes de taille.

### Défis

1. Taille et Disposition des Conteneurs : Les différences de taille entre les conteneurs de 20 pieds et de 40 pieds impliquent des durées de traitement distinctes.

### 3.5 Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

2. Contrôle de l'Ordre : Les conteneurs doivent être déchargés en respectant un ordre spécifique selon leur disposition sur le bateau.
3. Minimisation de  $C_{max}$  : Le défi principal est de trouver une solution qui minimise le  $C_{max}$ , en équilibrant la charge de travail entre les deux grues.

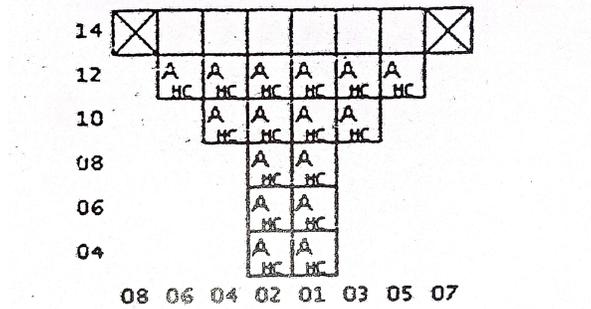


FIGURE 3.7 – Exemple illustre la disposition de 16 conteneurs différentes lignes et colonnes

Cette figure 3.7 montre la disposition de 16 conteneurs sur une surface du bateau

- **Les cases marquées A :** ces cases indiquent des emplacements spécifiques pour des conteneurs particuliers (type, cargaison qui doit être placée à ces endroits).
- **Cases croisées :** ces cases indiquent des emplacements où il n'est pas possible de placer des conteneurs.
- **HC :** sont des conteneurs de types 20' et 40'.

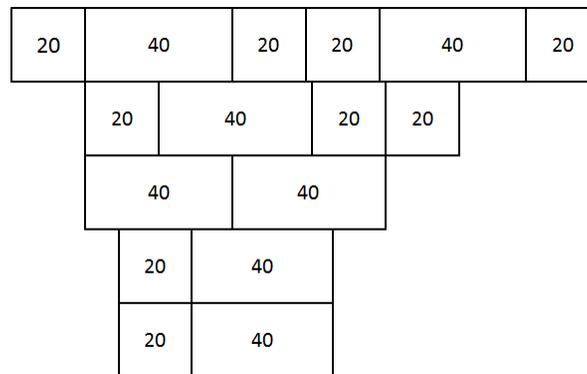


FIGURE 3.8 – La disposition des conteneurs 20' et 40'

Cette structure de 3.8 montre une disposition réfléchie des conteneurs, créant une mosaïque équilibrée visuellement tout en indiquant les positions spécifiques de chaque type de conteneur (20' ou 40').

### 3.5 Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

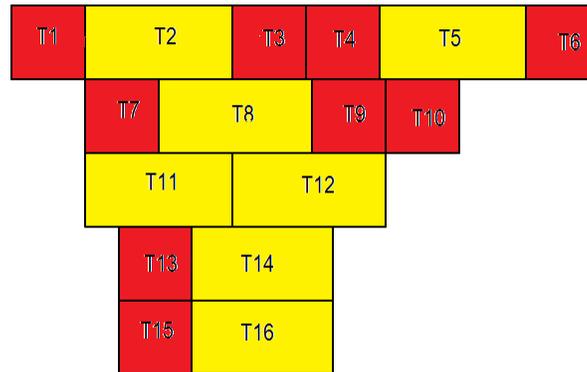


FIGURE 3.9 – les tâches de déchargement des conteneurs

La Figure 3.9 montre les tâches de déchargement des conteneurs.

Tâche i	Durée	Précédence	Type
T <sub>1</sub>	4	–	20'
T <sub>2</sub>	6	–	40'
T <sub>3</sub>	4	–	20'
T <sub>4</sub>	4	–	20'
T <sub>5</sub>	6	–	40'
T <sub>6</sub>	4	–	20'
T <sub>7</sub>	4	T <sub>2</sub>	20'
T <sub>8</sub>	6	T <sub>2</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub>	40'
T <sub>9</sub>	4	T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub>	20'
T <sub>10</sub>	4	T <sub>5</sub>	20'
T <sub>11</sub>	6	T <sub>7</sub> , T <sub>8</sub>	40'
T <sub>12</sub>	6	T <sub>8</sub> , T <sub>9</sub>	40'
T <sub>13</sub>	4	T <sub>11</sub>	20'
T <sub>14</sub>	6	T <sub>12</sub>	40'
T <sub>15</sub>	4	T <sub>13</sub>	20'
T <sub>16</sub>	6	T <sub>14</sub>	40'

TABLEAU 3.5 – Liste des tâches avec durée, précédence et type de conteneur

Le tableau 3.5 présente un ensemble de tâches (désignées par T<sub>i</sub>) avec leurs durées respectives, les tâches qui doivent être réalisées avant elles (précédence), et le type de conteneur (20' ou 40').

Ce tableau 3.6 montre une répartition équilibrée des tâches entre deux machines.

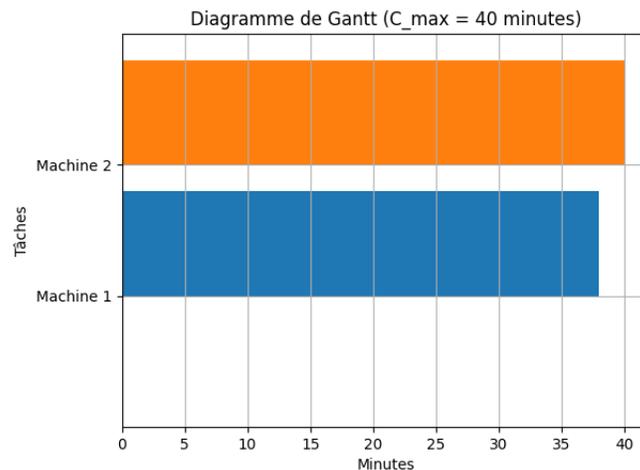
Ce diagramme de Gantt 3.10 illustre la répartition équilibrée des tâches entre Machine 1 et

### 3.5 Ordonnement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

Tâche i	Affectation 1	Affectation 2
T <sub>1</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>2</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>3</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>4</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>5</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>6</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>7</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>8</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>9</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>10</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>11</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>12</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>13</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>14</sub>	Machine 2	Machine 1
T <sub>15</sub>	Machine 1	Machine 2
T <sub>16</sub>	Machine 2	Machine 1

TABLEAU 3.6 – Affectation des tâches sur les machines 1 et 2

...



...

Date de fin d'exécution (C<sub>max</sub>) : 40 minutes

FIGURE 3.10 – Équilibrage des tâches entre deux machines

Machine 2, avec une date de fin d'exécution globale (C<sub>max</sub>) de 40 minutes par la machine 2.

### 3.5 Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

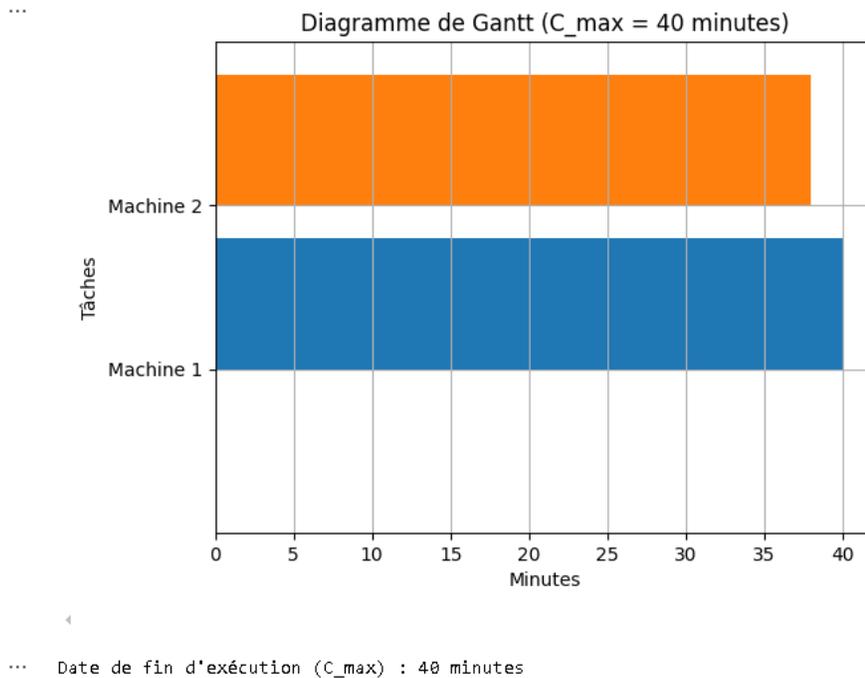


FIGURE 3.11 – Équilibrage des Tâches entre Deux Machines

Ce diagramme de Gantt 3.11 illustre la répartition équilibrée des tâches entre Machine 1 et Machine 2, avec une date de fin d'exécution globale ( $C_{max}$ ) de 40 minutes par la machine 1.

#### 3.5.2 Résolution du problème avec B&B

Nous avons cherché à minimiser le temps total de déchargement ( $C_{max}$ ) de 16 conteneurs de différentes tailles à l'aide de deux grues. Pour y parvenir, nous avons utilisé un algorithme de Branch and Bound qui explore toutes les combinaisons possibles d'attribution des tâches aux grues, afin de trouver la solution qui minimise le  $C_{max}$ .

#### Modélisation mathématique

Pour résoudre notre problème d'ordonnancement de déchargement des conteneurs, nous devons minimiser le temps de complétion total  $C_{max}$  des tâches en les distribuant entre deux grues. Voici la modélisation mathématique et la démarche suivie :

#### Données

Nous avons 16 conteneurs à décharger :

- 9 conteneurs de 20 pieds (temps de déchargement de 4 minutes chacun)

### 3.5 Ordonnancement des opérations de déchargement des conteneurs au niveau du BMT

---

- 7 conteneurs de 40 pieds (temps de déchargement de 6 minutes chacun)

Deux grues  $M_1$  et  $M_2$  pour effectuer le déchargement.

#### Variables

Soit  $T_i$  le  $i$ -ème conteneur avec  $i \in \{1, 2, \dots, 16\}$ . Soit  $t_i$  le temps de traitement (déchargement) du conteneur  $T_i$ .

Les temps de traitement sont :

- $t_i = 4$  minutes pour les conteneurs de 20 pieds
- $t_i = 6$  minutes pour les conteneurs de 40 pieds

#### Fonction Objectif

Notre objectif est de minimiser le temps de complétion total  $C_{\max}$ . Mathématiquement, cela peut être représenté par :

$$\min C_{\max}$$

où  $C_{\max} = \max(C_1, C_2)$ ,  $C_1$  et  $C_2$  représentent les temps de complétion des grues  $M_1$  et  $M_2$  respectivement.

#### Contraintes

- Chaque conteneur doit être attribué à l'une des deux grues.
- Le temps total de déchargement sur chaque grue doit être calculé comme la somme des temps de traitement des conteneurs qui lui sont attribués.

#### Algorithme de B&B

L'algorithme de Branch and Bound est utilisé pour explorer les différentes combinaisons d'attribution des tâches afin de minimiser  $C_{\max}$ . Voici les étapes du processus :

##### 1. Initialisation

Définir les tâches  $T_i$  avec leurs temps de traitement  $t_i$ .

##### 2. Calcul de $C_{\max}$

Pour chaque ordonnancement possible, calculer  $C_1$  et  $C_2$  :

$$C_1 = \sum_{T_i \in M_1} t_i$$

$$C_2 = \sum_{T_i \in M_2} t_i$$

et déterminer :

$$C_{\max} = \max(C_1, C_2)$$

#### 3. Branchement

À chaque étape, choisir une tâche et créer deux nouveaux états en attribuant cette tâche à  $M_1$  ou à  $M_2$ .

#### 4. Évaluation et élagage

Calculer  $C_{\max}$  pour chaque branche. Si  $C_{\max}$  d'une branche est inférieur au meilleur  $C_{\max}$  trouvé jusqu'à présent, mettre à jour le meilleur ordonnancement et continuer l'exploration. Sinon, abandonner cette branche.

En appliquant cette méthode, nous avons réussi à déterminer l'ordonnancement optimal des tâches de déchargement des conteneurs, minimisant ainsi le temps total de déchargement ( $C_{\max}$ ) et optimisant l'utilisation des deux grues.

D'après l'algorithme utilisé pour résoudre le problème avec les données fournies, les résultats obtenus sont les suivants :

#### Sortie du programme

```
Ordonnancement Optimal :  
Machine 1 : ['T1', 'T2', 'T3', 'T4', 'T5', 'T6', 'T7', 'T8']  
Machine 2 : ['T9', 'T10', 'T11', 'T12', 'T13', 'T14', 'T15', 'T16']  
C_max Machine 1 : 38  
C_max Machine 2 : 40  
C_max (fin du projet à minimiser) : 40  
  
[Execution complete with exit code 0]
```

FIGURE 3.12 – Résultats de fin de projet le  $C_{\max} = 40$  min

La figure 3.12 nous montre que la date optimal du fin de projet  $C_{\max}=40$  min.

### 3.5.3 Analyse et interprétation des résultats

#### Ordonnancement optimal

##### Machine 1

- Tâches : T1, T2, T3, T7, T8, T11, T13, T15
- $C_{\max}$  Machine 1 : 38 min

### 3.6 Interprétation des résultats

---

- Explication : La machine 1 termine la dernière tâche (T15) à 38 unités de temps.

#### **Machine 2**

- Tâches : T6, T5, T4, T10, T9, T12, T14, T16
- $C_{\max}$  de Machine 2 = 40 min
- Explication : La machine 2 termine la dernière tâche (T16) à 40 unités de temps

#### **$C_{\max}$ (fin du projet à minimiser )**

- $C_{\max}$  (fin du projet à minimiser) = 40 min
- Explication : Le  $C_{\max}$  représente la fin du projet, qui est déterminée par la machine qui termine en dernier. Dans ce cas, la machine 2 termine à 40 unités de temps, ce qui fixe la fin du projet.

Avec L'approche de Branch and Bound a efficacement nous avons trouvé l'ordonnancement optimal, où le projet se termine à 40 unités de temps (minutes). Cela démontre que toutes les combinaisons de répartition des tâches ont été considérées pour trouver la solution optimale.

## **3.6 Interprétation des résultats**

Le résultat signifie que, pour les tâches données avec leurs durées spécifiques, le projet complet sera achevé dans 40 unités de temps si les tâches sont réparties comme indiqué. Ce  $C_{\max}$  de 40 est donc la durée minimale pour terminer le projet avec cette configuration de tâches. Ce résultat montre une planification efficace et optimisée des tâches entre deux machines, minimisant le temps total nécessaire pour terminer le projet à 40 unités de temps.

## **3.7 Conclusion**

En conclusion, l'application du modèle de résolution au problème du BMT, combinée à une gestion de projet efficace, a permis de minimiser avec succès le temps total de déchargement des conteneurs de différentes tailles. En utilisant l'algorithme de Branch and Bound, nous avons optimisé la répartition des tâches entre les deux grues, atteignant un temps maximal de complétion ( $C_{\max}$ ) de 40 minutes. Cette approche intégrée a non seulement permis de respecter les contraintes de la disposition des conteneurs sur le navire et leurs type (20 ou 40 pieds), mais elle assure aussi une planification optimale des ressources et minimise la durée minimale du projet.

# Conclusion générale

Ce mémoire a exploré les méthodes d'optimisation de l'ordonnancement des tâches en utilisant des approches combinatoires et des algorithmes spécifiques dans le contexte de la gestion portuaire de BMT. L'objectif principal était de démontrer comment une planification stratégique et optimisée des tâches peut améliorer l'efficacité opérationnelle et l'utilisation des ressources dans un environnement portuaire.

Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une méthodologie rigoureuse basée sur l'algorithme de Branch and Bound. Cet algorithme a permis d'explorer de manière exhaustive les différentes combinaisons possibles d'ordonnements de tâches, en utilisant une approche systématique de branchement et d'élagage pour minimiser le temps total d'exécution  $C_{max}$ . Les étapes de l'algorithme comprenaient l'initialisation, l'attribution des tâches, l'évaluation et l'élagage des branches non prometteuses, garantissant ainsi l'identification de l'ordonnement optimal.

L'étude a également mis en évidence l'importance cruciale de la modélisation mathématique et de l'utilisation d'outils de planification, tels que les réseaux PERT et le diagramme de Gantt. Ces outils permettent de visualiser clairement les dépendances entre les différentes tâches, d'identifier les chemins critiques, et de planifier de manière pro-active pour éviter les retards potentiels. Ils offrent une structure organisée et systématique qui est essentielle pour la gestion de projets complexes.

Cette recherche a non seulement confirmé l'efficacité des algorithmes pour organiser les tâches, mais elle a aussi souligné l'importance d'une planification rigoureuse et bien structurée pour améliorer la performance opérationnelle des ports. Les implications pratiques de cette étude peuvent être étendues à d'autres domaines, où la gestion efficace du temps et des ressources est cruciale.

# Bibliographie

- [1] Rapport Annuel et Statistique de port de Bejaia. 2014.
- [2] Rapport Annuel et Statistique de port de Bejaia. 2015.
- [3] Ben abdallah Yassina et Homrani Kahina. Optimisation du plan d'affectation des équipes au niveau de BMT.mémoire fin d'étude. Université Abderrahmane Mira Bejaia, (2014).
- [4] Dr. Dabba Ali. Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques . Module : Optimisation des Réseaux, page 20, 2023 - 2024.
- [5] Dr.brahmi belkacem. Management de projets. Université A/MIRA de Bejaïa Faculté des Sciences Exactes, 2022-2023.
- [6] N. Benoit. Le transport maritime et le développement de la conteneurisation.Mémoire de Master. Université de Havre, 2003.
- [7] Boris Bontoux, C Artigues, and D Feillet. Techniques hybrides de recherche exacte et approchée : application à des problèmes de transport. PhD thesis, Ph. D. thesis, University of Avignon and the Vaucluse, 2008.
- [8] Peter Brucker. Scheduling algorithms. Journal-Operational Research Society, 50 :774–774, 1999.
- [9] Jacques Carlier, Philippe Chrétienne, Jacques Erschler, Claire Hanen, Pierre Lopez, Alix Munier, Eric Pinson, Marie-Claude Portmann, Christian Prins, Christian Proust, et al. Les problèmes d'ordonnancement. RAIRO-Operations Research, 27(1) :77–150, 1993.
- [10] MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU. La securite dans l'exploitation des porte-conteneurs.
- [11] Yahi Faouzi et Azzouz Hicham. Impact du système des fenêtres d'accostage sur les performances du terminal à conteneurs BMT. page 83, 2021.
- [12] BENJOUDI et BENKHRACHI. analyse de fiabilité pour l'optimisation de la maintenance préventive, mémoire fin d'étude. Université Abderrahmane Mira Bejaia, (2003).
- [13] B. Roy et D. Bouyson. Aide multi-critères à la décision : Méthodes et cas. Collection Gestion Série : Production et technologie quantitatives appliquées à la gestion.EditionEconomica, Paris. 1993.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14] Frederick S. Hillier et Gerald J. Lieberman.
- [15] S. Allek et H. Zouar. minimisation du temps d'attente des navires conventionnels Cas du port de Béjaia. Université de Béjaia, 2015.
- [16] Chiroual Yasmine et Haddouche Ryma. Optimisation des temps de manutention des conteneurs au niveau de BMT. page 45, 2021 - 2022.
- [17] Boulghobra Amira et Larbi Sabiha. L'impact de l'extension du port sur les performances du terminal à conteneurs (BMT) via les RdP. page 86, 2016.
- [18] J. Carlier et P. Chrétienne. Problèmes d'ordonnancement, Modélisation, Complexité, Algorithmes. Edition Masson, Paris, 1988.
- [19] IMMOUNE Sofiane et SEKKAI Mohamed. Planification et optimisation du projet Cas : Réalisation d'un pont a poutre qui enjambe oued sibaou. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2014-2015.
- [20] Pierre Fouilhoux. (Rappels) Branchement et Evaluation (Branch-and-Bound). Sorbonne Université, 2021-2022.
- [21] Jean-Loud. Théorie des graphes. Université Laval, page 24.
- [22] l'Entreprise Portuaire de Béjaia. Plan de développement 2004-2006. Béjaia, 2004.
- [23] W. Sana M. Guedjali. Les Réseaux de files d'attente à forme produit. Mémoire de Master.
- [24] Michael L Pinedo. Scheduling, volume 29. Springer, 2012.
- [25] M.Zitouni S. Mebarki. Evaluation des performances de la nouvelle extra portuaire (ZEP-Plein) de BMT et son impact sur la congestion du parc. Mémoire de Master.
- [26] Fatima Benbouzid SITAYEB. Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints Production/Maintenance-Cas du Flowshop. Thèse de doctorat, 2005.
- [27] Richard J. Trudeau. Introduction to Graph Theory. page 240, 1993.
- [28] FA. Rodammeret K. Preston White. « A recent survey of production scheduling ». IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, pages pp. 6–18, 2021 - 2022.

## Résumé

Ce mémoire traite de l'optimisation des opérations de manutention des conteneurs au terminal Bejaia Mediterranean Terminal (BMT), un terminal stratégique géré en partenariat avec Portek de Singapour. L'objectif principal est de réduire les temps de manutention en utilisant des techniques avancées de planification et de gestion des ressources. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie rigoureuse a été adoptée, impliquant l'ordonnancement des tâches de déchargement en utilisant l'algorithme Branch and Bound. Cet algorithme permet d'explorer systématiquement toutes les combinaisons possibles pour trouver l'ordonnancement optimal des tâches, minimisant ainsi le temps total d'exécution. Les résultats obtenus montrent une réduction significative du temps de manutention, illustrant l'efficacité de l'algorithme appliqué. La méthodologie développée offre une approche pratique et efficace pour la gestion des opérations portuaires, contribuant à l'amélioration de la productivité et à la réduction des coûts opérationnels.

**Mots-clés :** Ordonnancement des tâches, optimisation combinatoire, Branch and Bound, gestion portuaire, Bejaia Mediterranean Terminal (BMT).

## Abstract

This thesis addresses the optimization of container handling operations at the Bejaia Mediterranean Terminal (BMT), a strategic terminal managed in partnership with Portek of Singapore. The primary objective is to reduce handling times using advanced planning and resource management techniques. To achieve this goal, a rigorous methodology was adopted, involving the scheduling of unloading tasks using the Branch and Bound algorithm. This algorithm systematically explores all possible combinations to find the optimal task schedule, thereby minimizing the total execution time. The results obtained show a significant reduction in handling time, illustrating the efficiency of the applied algorithm. The developed methodology offers a practical and effective approach for managing port operations, contributing to improved productivity and reduced operational costs.

**Keywords :** Task scheduling, combinatorial optimization, Branch and Bound, port management, Bejaia Mediterranean Terminal (BMT).

