

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université A. Mira de Béjaïa

*Faculté des Sciences Exactes*

*Département de Recherche Opérationnelle*



MÉMOIRE DE FIN DE CYCLE

en vue de l'obtention du diplôme de Master en Mathématiques Appliquées

Spécialité : Mathématique Financière

Thème

---

Optimisation du placement des conteneurs à l'entreprise BMT : application des méthodes  
d'apprentissage automatique

---

**Présenté par :**

✓ M<sup>lle</sup>. Boucetta Lydia

✓ M<sup>lle</sup>. Ghalem Wrida

**Devant le jury composé de :**

Président	M <sup>F</sup> Abbas K.	Prof	U. A. Mira Béjaïa
Promoteur	M <sup>F</sup> Aissani D.	Prof	U. A. Mira Béjaïa
Co-Promoteur	M <sup>me</sup> Outamazirt A.	MCB	U. A. Mira Béjaïa
Examineur	M <sup>F</sup> Soufit M.	MCA	U. A. Mira Béjaïa
Examineur	M <sup>F</sup> Soukane M.	Doctorant	U. A. Mira Béjaïa
Examinatrice	M <sup>lle</sup> Cherchour A.	Doctorante	U. A. Mira Béjaïa
Invité	M <sup>F</sup> Zidane M.	Chef Dépt. Opérationnel	BMT

---

\*\*\* Béjaïa 2025 \*\*\*

---

## Remerciements

*À tous ceux qui ont illuminé notre chemin pendant cette aventure académique, on dépose ces mots comme autant de marques de gratitude...*

*À Monsieur Aissani Djamil, Pour sa guidance patiente, ses conseils qui ont éclairé notre doutes, Et sa présence, toujours une ancre dans la tempête des idées.*

*À Madame Outamazirt Asiya, Pour son regard exigeant mais bienveillant, Ses remarques précises qui ont sculpté ce travail.*

*À Madame Takhedmit Baya, Pour sa confiance, son engagement sans faille, Et cette énergie qui donne envie de se dépasser.*

*À Madame Bensadi Sabrina et toute l'équipe de BMT, Pour nous avoir ouvert les portes de l'expérience professionnelle, Et montré que la théorie prend vie sur le terrain.*

*À Monsieur Zidane Mbarek, Pour ses orientations techniques, son temps généreux, Et ces discussions qui ont transformé nos perspectives.*

*Aux enseignants du département de Recherche Opérationnelle, Pour avoir semé des connaissances, cultivé notre curiosité, Et fait de chaque cours un défi stimulant.*

*À notre famille, ce rocher invisible, Pour vos silences complices, vos encouragements bruyants, Et cet amour qui ne compte pas les heures passées à écrire.*

*Si ce mémoire est une réussite,  
C'est qu'il porte en lui un peu de vous tous.  
Merci d'avoir marché à notre côtés.*

## Dédicace

*À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mon parcours académique et personnel...*

*À ma chère mère et à mon cher père, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien inestimable tout au long de ce parcours.*

*À ma sœur Tinhinane et à mes frères Lounis-Ouhmanou et Hocine-Aris,*

*À mes cousines Dyna, Aïda, Inès, Hanane, Mina, Anaïs, Farah et Alice,*

À mes amis de cœur : Yamna, Lydia, Omaira, Yasmine, Mehdi, Nassim et Rayan

*À tous les étudiants de Master 2 : MF, SDAD, MOAD, OFRC avec qui j'ai partagé les défis, les longues heures de travail, et les grandes ambitions.*

*À tous les enseignants, sans exception,*

*Merci à vous tous du fond du cœur.*

## Dédicace

*À toutes les personnes qui ont illuminé mon parcours...*

*À mes **chers parents**, Pour votre amour inconditionnel, votre soutien et tous les sacrifices que vous avez faits pour moi. Vous êtes ma source d'inspiration et ma force. Merci du fond du cœur.*

*À ma **chère sœur**, Ma complice, ma confidente, merci d'être toujours là, dans les bons comme dans les moments difficiles.*

*À ma **meilleure amie, Lydia Meddour**, Merci pour ta présence, tes rires et ton amitié précieuse. Tu es bien plus qu'une amie, tu es la sœur que j'ai choisie.*

*À mes **deux frères et leurs familles**, Votre soutien et votre affection m'ont toujours porté. Merci de faire partie de mon chemin.*

*À ma **chère binôme wawa**, Merci pour ton soutien, ta bonne humeur et ton engagement tout au long de cette aventure. Cette expérience n'aurait pas été la même sans toi.*

*À mes **cousines Katia et Tina**, Pour votre complicité et votre joie de vivre, vous illuminez ma vie.*

*À mes **copines, les jumelles (Tinhinane et Cylia) et Houda**, Merci pour les moments inoubliables, les fous rires et votre amitié sincère.*

*Et enfin, à **tous mes autres amis(es)**, Merci pour cette aventure partagée, les échanges enrichissants et les souvenirs que nous avons créés ensemble. Vous avez rendu ce parcours encore plus beau.*

*Cette réussite est aussi la vôtre. Merci d'être là, toujours.*

**Lydia**

---

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Table des Figures</b>	<b>iv</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 L'entreprise BMT et la conteneurisation</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Historique, présentation et situation géographique de la BMT . . . . .	3
1.3 Activités de BMT . . . . .	5
1.4 Les axes maritimes reliant le port de BMT . . . . .	6
1.5 Organisation de BMT . . . . .	6
1.5.1 Direction Générale . . . . .	6
1.6 Objectifs et Acquis de l'entreprise . . . . .	10
1.7 Le terminal à conteneur . . . . .	12
1.7.1 Capacité . . . . .	12
1.8 Les Outils de gestion du terminal . . . . .	15
1.8.1 Le système IPROS . . . . .	15
1.9 Les équipements . . . . .	17
1.9.1 Les équipements de manutention . . . . .	17
1.9.2 Les équipements de transport . . . . .	18
1.10 Processus dans un terminal à Conteneurs . . . . .	19

1.11	La conteneurisation . . . . .	20
1.11.1	Impact du conteneur sur le travail portuaire . . . . .	24
1.12	Position du problème . . . . .	25
1.13	conclusion . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Stratégie de Stockage et Random Forest</b>	<b>27</b>
2.1	Introduction . . . . .	27
2.2	Les différentes stratégies de stockage . . . . .	27
2.2.1	Ségragation et Non-ségragation . . . . .	28
2.2.2	Groupage et Dispersion . . . . .	28
2.2.3	Stockage direct et Stockage indirect . . . . .	29
2.2.4	Priorité aux déchargements et Priorité aux chargements . . . . .	30
2.3	Introduction au Machine Learning . . . . .	31
2.3.1	Le fonctionnement de Machine Learning . . . . .	32
2.3.2	Types de Machine Learning . . . . .	33
2.4	La Méthode Random Forest . . . . .	35
2.4.1	Arbres de décision . . . . .	35
2.4.2	Les Types d'arbre de décision . . . . .	36
2.4.3	Apprentissage avec les arbres de décision . . . . .	36
2.4.4	L'ensemble learning . . . . .	37
2.4.5	Random Forest . . . . .	38
2.4.6	Principe de fonctionnement du Random Forest . . . . .	38
2.5	Avantages et Limites des Random Forest . . . . .	41
2.6	Conclusion . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Modélisation et résolution du problème</b>	<b>42</b>
3.1	Introduction . . . . .	42
3.2	Les hypothèses du modèle . . . . .	42
3.3	La modélisation mathématique . . . . .	43
3.4	Cas d'étude . . . . .	47
3.4.1	Traitement des données . . . . .	47
3.4.2	Génération de données synthétiques . . . . .	48
3.5	Implémentation par Apprentissage Automatique . . . . .	48

3.5.1	Objectif . . . . .	48
3.5.2	Classification avec les Random Forest . . . . .	49
3.5.3	Résultat et Discussion . . . . .	49
3.5.4	Détermination de la Meilleure Position de Stockage à l'Aide du Classifieur	50
3.6	Interprétation des résultats . . . . .	51
3.7	Comparaison entre le système IPROSS et notre modèle prédictif . . . . .	52
3.8	Conclusion . . . . .	53
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>54</b>
	<b>Annexes</b>	<b>59</b>

---

# TABLE DES FIGURES

1.1	Jointe venture creation BMT . . . . .	4
1.2	Localisation de BMT . . . . .	5
1.3	Lignes maritime de BMT . . . . .	6
1.4	Organigramme de BMT . . . . .	11
1.5	Plan de BMT. . . . .	12
1.6	Placement des navires. . . . .	13
1.7	Un bloc . . . . .	14
1.8	L'EDI . . . . .	16
1.9	Système iPROS . . . . .	16
1.10	Les équipements de manutention de la BMT . . . . .	18
1.11	Les équipements de transports de la BMT . . . . .	19
1.12	Le processus de traitement des conteneurs. . . . .	20
1.13	Conteneur Standard . . . . .	22
1.14	Conteneur Open Top . . . . .	23
1.15	Conteneur Frigorifique . . . . .	23
1.16	Conteneur Plat . . . . .	23
1.17	Conteneur Pallet Wide . . . . .	24
1.18	Conteneur Citerne . . . . .	24
1.19	Récupération d'un conteneur cible [21] . . . . .	25
2.1	La relation entre le ML, DL et IA [20] . . . . .	32

2.2	Le fonctionnement de ML [17]	33
2.3	Types de ML [26]	34
2.4	Exemple d'arbre de décision [16]	35
2.5	Fonctionnement de Bagging [18]	37
2.6	Illustration du fonctionnement de la Random Forest	40
3.1	Meilleurs Hyperparamètres	49
3.2	Rapport de classification	49
3.3	Rapport de classification	51
4	Données	59

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

La conteneurisation a profondément transformé le commerce maritime, en facilitant les échanges internationaux et en rendant la logistique plus efficace. Depuis les années 1950, ce système s'est imposé comme un élément central du transport maritime, en permettant le déplacement rapide et standardisé des marchandises à l'échelle mondiale. L'étude de la conteneurisation constitue aujourd'hui un thème de recherche très actuel sur le plan scientifique international, et plusieurs études relatives à l'évaluation de performance du parc à conteneur ont été réalisées voir [28] [4] [5] [8] [24] .

Les terminaux à conteneurs jouent un rôle crucial dans cette organisation, en assurant la transition entre le transport maritime et les autres modes de transport terrestres. Toutefois, leur gestion en particulier l'organisation du stockage des conteneurs demeure un véritable défi pour les ports. Pour faire face à ces problèmes opérationnels, l'entreprise BMT dispose d'un logiciel performant dénommé IPROSS [15]. Ces problèmes se traduisent notamment par des déplacements inutiles, appelés remaniements, qui surviennent lorsqu'un conteneur à retirer est bloqué par d'autres empilés au-dessus de lui. Ces opérations inutiles engendrent des pertes de temps, surchargent les engins de manutention et augmentent les coûts, ce qui réduit l'efficacité et la rentabilité du terminal. Nous réalisons dans le deuxième chapitre une synthèse sur les travaux qui ont porté sur le problème de stockage voir [1] [7] [6] [23] [2].

Ce mémoire a pour but de proposer une solution permettant de mieux organiser le stockage des conteneurs au sein de l'entreprise BMT, en minimisant les remaniements et en réduisant les coûts qu'ils engendrent. Pour cela, nous avons choisi une approche fondée sur l'apprentissage automatique, en utilisant l'algorithme des forêts aléatoires. Ce modèle permettra d'évaluer le

---

risque qu'un conteneur provoque un remaniement, et de proposer les meilleurs emplacements pour le stocker.

Notre travail est structuré en trois chapitres. Le premier est dédié à la présentation de l'entreprise BMT : son histoire, son emplacement, ses missions et ses ambitions. Il décrit également le fonctionnement du terminal à conteneurs, les outils utilisés, les équipements disponibles et la position du problème. Le deuxième est consacré au traitement des méthodes de stockage, introduit les notions fondamentales de l'apprentissage automatique et met l'accent sur l'algorithme des forêts aléatoires. Enfin, le troisième chapitre présente notre modèle dynamique et son application concrète à l'aide de cette méthode.

À travers cette étude, nous montrons comment les technologies d'intelligence artificielle peuvent contribuer à améliorer la gestion logistique dans les ports, en rendant les opérations plus fluides et moins coûteuses. Des pistes d'amélioration sont également envisagées, comme l'utilisation de données en temps réel ou l'exploration d'autres méthodes d'optimisation pour renforcer encore la performance du système.

---

---

# CHAPITRE 1

---

## L'ENTREPRISE BMT ET LA CONTENEURISATION

### 1.1 Introduction

La croissance rapide du trafic de conteneurs constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs pour une gestion et une exploitation efficaces des terminaux à conteneurs. Avec le développement de la conteneurisation, qui a profondément transformé le commerce maritime international en standardisant le transport de marchandises, les ports maritimes ont connu des améliorations significatives dans leurs opérations de manutention. Dans ce contexte, ce chapitre présente l'entreprise BMT (Béjaïa Mediterranean Terminal), son rôle dans le terminal à conteneurs du port de Béjaïa, ainsi que l'évolution de la conteneurisation. Nous y décrivons les équipements de manutention, les outils de gestion utilisés, et les principales étapes du fonctionnement du terminal. L'augmentation du volume de conteneurs rend plus difficile les opérations et impose une optimisation du stockage pour réduire les déplacements inutiles et les coûts associés.

### L'entreprise BMT

### 1.2 Historique, présentation et situation géographique de la BMT

— Historique

## 1.2. HISTORIQUE, PRÉSENTATION ET SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA BMT

---

L'établissement d'un partenariat pour la conception, le financement, l'exploitation et la maintenance d'un terminal à conteneurs au port de Béjaïa était l'une des priorités de l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB) dans son plan de développement 2004-2006.

Dans cette stratégie, l'EPB a entrepris des démarches pour trouver d'éventuels partenaires et a sélectionné le groupe PORTEK, spécialisé dans la gestion des terminaux à conteneurs. Le projet a été soumis en février 2004 au Conseil de participation de l'État (CPE), qui l'a approuvé en mai de la même année.

Selon les directives du gouvernement, la société Béjaïa Méditerranéen Terminal Spa (BMT Spa) a été créée en tant que joint venture entre l'EPB, qui détenait 51% du capital, et la société singapourienne PORTEK, qui en détenait 49%.

**PORTEK** est une entreprise internationale spécialisée dans les équipements portuaires. Elle travaille dans plusieurs ports à travers le monde. En 2011, la société japonaise MITSUI a racheté PORTEK Systems and Equipment.

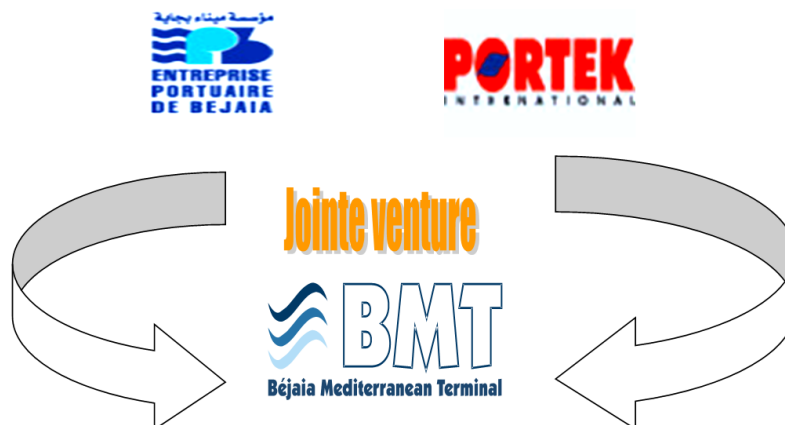


FIGURE 1.1 – Jointe venture creation BMT

### — Présentation

**Béjaïa Méditerranéen Terminal Spa (BMT)** est une société prestataire de services spécialisée dans l'exploitation, la gestion et la valorisation du terminal à conteneurs du port de Béjaïa. Pour atteindre ses objectifs, la société a engagé un personnel qualifié, spécialement formé à la gestion des terminologies des conteneurs.

Elle dispose également d'équipements d'exploitation de pointe qui lui permettent de garantir des opérations de fabrication et d'acconage avec efficacité, fiabilité et rapidité à des prix compétitifs. BMT Spa assure ses services en continu, sept jours sur sept, vingt-quatre heures sur vingt-quatre.

### 1.3. ACTIVITÉS DE BMT

---

Le niveau technologique mis en œuvre, ainsi que le calibre des infrastructures et des équipements fonctionnels (quai et ports empumeurs), font du port de Béjaïa, à travers BMT Spa, le terminal le plus avancé en Algérie doté d'une plateforme portuaire performante.

Sous la forme d'une société par actions, BMT Spa a été créée (Spa). Son capital social est de 500.000.000 DA, dont 51% reviennent à l'Entreprise Portuaire de Béjaïa (EPB) et 49% à PORTEK (groupe Mitsui) [9].

#### — Situation Géographique

**Béjaïa Méditerranéen Terminal Spa (BMT Spa)** est installé au nouveau quai, dans le bassin sud du port de Béjaïa. Ce port est bien relié à l'arrière-pays grâce à de bonnes infrastructures, comme un réseau routier qui connecte les grandes villes du pays, des lignes de train, ainsi que la proximité d'un aéroport international.

Le port de Béjaïa est situé au centre du pays et profite d'une position géographique avantageuse, avec l'une des baies les plus protégées de la Méditerranée. Cela lui permet de bien desservir la région centrale de l'Algérie, ainsi que les Hauts Plateaux.

BMT est tout près de la gare ferroviaire et à seulement quelques minutes de l'aéroport de Béjaïa. Il est aussi directement relié au réseau routier national, ce qui rend plus facile le transport de marchandises en conteneurs vers l'arrière-pays ou vers d'autres régions, comme la banlieue d'Alger.



FIGURE 1.2 – Localisation de BMT

### 1.3 Activités de BMT

L'activité principale de BMT Spa (Béjaïa Mediterranean Terminal) est la gestion et l'exploitation du terminal à conteneurs. Sa mission principale est de réaliser toutes les opérations liées aux conteneurs dans de bonnes conditions de temps, de coût et de sécurité. Pour cela, BMT

#### 1.4. LES AXES MARITIMES RELIANT LE PORT DE BMT

---

travaille avec des équipements modernes et des logiciels efficaces qui aident à mieux gérer le transport et le stockage des conteneurs. Elle veut offrir des services de bonne qualité, rapides et fiables, pour répondre aux besoins de ses clients. Chaque année, beaucoup de navires arrivent au terminal de Béjaïa. BMT gère toutes les étapes du traitement des conteneurs, comme la planification, la manutention et l'ac- conage. Elle assure aussi un bon suivi de chaque opération pour garantir la traçabilité.

#### 1.4 Les axes maritimes reliant le port de BMT

Le port de BMT est relié aux principaux axes maritimes internationaux, assurant ainsi une connectivité stratégique avec les grandes routes commerciales mondiales. Les principales lignes maritimes qui desservent ce port sont présentées dans la figure suivante :



FIGURE 1.3 – Lignes maritime de BMT

#### 1.5 Organisation de BMT

La BMT (Bejaia Mediterranean Terminal) est structurée en plusieurs directions principales, chacune ayant un rôle spécifique dans le fonctionnement du terminal. Ces directions sont :

##### 1.5.1 Direction Générale

Dans le cadre des attributions définies par le Conseil d'Administration de BMT Spa, le Directeur Général assure la gestion de l'entreprise, oriente les différentes structures par ses directives et veille à la coordination entre les diverses directions.

### **Direction des Finances et de Comptabilité**

Veiller à ce que la politique financière de l'entreprise soit conforme à ses objectifs globaux ; coordonner et suivre les relations avec les institutions financières ; assurer les relations avec les banques, les administrations fiscales et les parafiscales ; assurer le recouvrement de toutes les créances ; établir et respecter les budgets et les plans de financement ; élaborer les plans de financement en garantissant leur mise en œuvre et leur exécution ; identifier, localiser et négocier les financements les plus appropriés en relation avec les institutions concernées ; veiller à la bonne application des règles comptables et à la bonne tenue des livres dans la société ; élaborer le budget et les autres états financiers et comptables ; établir et analyser le budget de fin d'année. Elle est constituée de deux services :

- **Finance** : Assure le suivi de l'exécution du budget de la société et de la Comptabilité Analytique et aussi la gestion de la trésorerie.
- **Comptabilité** : Procède au contrôle et à l'enregistrement de toutes les opérations de la société (achat, vente, investissement...).

### **Direction des Opération**

Pendant notre stage, nous avons été affectés à cette direction, qui est composée de deux départements. Elle s'occupe de la planification des escales, de la gestion du personnel et du matériel, ainsi que de l'organisation du terminal à conteneurs. Elle est aussi responsable des opérations de manutention, d'acconage, du traitement des conteneurs spéciaux et de la sécurité du terminal.

### **Département des Opérations**

Il est composé de trois services :

1. **Manutention** : Il représente le centre principal des opérations du terminal à conteneurs. Nous avons pu observer toutes les étapes du processus d'accueil des navires et du débarquement des conteneurs :
  - (a) Réunion préparatoire à l'EPB pour valider les informations d'accostage.
  - (b) Envoi des données EDI (Échange de Données Informatisé) par le consignataire au service de contrôle.
  - (c) Intégration des informations dans le système IPROS par les planificateurs.
  - (d) Organisation des opérations de débarquement et d'embarquement.

## 1.5. ORGANISATION DE BMT

---

- (e) Envoi des instructions aux chefs de bateau via leurs tablettes.
- (f) Attribution des équipements nécessaires par les planificateurs (grues, remorques, etc.).
- (g) Débarquement des conteneurs par les équipes techniques.
- (h) Transport des conteneurs vers les zones de stockage appropriées.

Ce processus montre clairement l'importance de la coordination entre tous les intervenants, ainsi que le besoin d'une planification rigoureuse pour assurer une bonne gestion des opérations.

2. **Acconage** : Après les premières opérations de manutention, il prend le relais pour gérer les aspects commerciaux liés aux conteneurs. Les agents de ce service utilisent également le système IPROS pour créer et gérer les requêtes correspondant aux différentes prestations demandées. Pour répondre aux besoins logistiques et opérationnelles, des grues RTG (Rubber-Tyred Gantry Cranes) sont utilisées pour effectuer plusieurs types d'opérations sur les conteneurs :

- **La visite** : une vérification établie par la douane de l'état général du conteneur et de son contenu.
- **Le pesage** : détermination du poids exact du conteneur.
- **La livraison** : récupération du conteneur par le client.
- **Le dépotage** : déchargement de la marchandise compris dans le conteneur.
- **La mise à disposition** : préparation du conteneur afin qu'il soit prêt à l'emploi.
- **La restitution** : retour du conteneur vide après son utilisation.

Ces opérations sont des étapes clés du processus logistique, et des améliorations peuvent être envisagées, notamment pour optimiser la planification des mouvements des grues et réduire les temps d'attente.

3. **Ressources Humaines** : Il a un rôle important dans la gestion du personnel et dans le bon fonctionnement de l'entreprise. Ses principales tâches sont :

- La gestion administrative des employés
- Le recrutement et l'intégration des nouveaux collaborateurs
- La gestion des salaires et des avantages sociaux
- La planification et le suivi des congés
- L'organisation des formations professionnelles
- L'amélioration des conditions de travail

## 1.5. ORGANISATION DE BMT

---

### Département Logistique

Il est composé d'un seul service

1. **Service Logistique** Le service logistique, que nous avons également pu explorer, joue un rôle stratégique dans la gestion des flux de conteneurs. Il est notamment responsable de :

- La gestion optimisée des flux de conteneurs
- L'organisation du transport interne et externe
- La coordination des opérations de manutention
- Le rapatriement des conteneurs vides depuis la zone extra-portuaire
- La préparation des conteneurs pour le débarquement et leur réutilisation

L'objectif de ce département est d'assurer aux clients du terminal une prestation logistique complète et intégrée, couvrant l'ensemble du processus :

- Empotage et dépotage dans des zones dédiées
- Transport public des marchandises
- Coordination avec le transport ferroviaire
- Gestion de l'entreposage à la Zone Extra-Portuaire
- Traitement spécifique des conteneurs selon les besoins

### Direction Marketing

Responsable de l'élaboration des plans marketing, incluant l'analyse de marché, la définition des cibles, l'élaboration du plan d'actions et le choix des axes publicitaires. Intervient dans plusieurs domaines du marketing, tels que la stratégie, les services et l'opérationnel, et assure la coordination avec tous les acteurs portuaires en conformité avec la politique marketing. Elle se divise en deux service

1. **Service Marketing** : Assure la promotion de l'image de marque de l'entreprise et la mise en œuvre du plan marketing et commercial.
2. **Service Commercial** : Procède à la facturation des prestations fournies et le recouvrement des créances.

### Direction Technique

Assure la maintenance préventive et curative des engins de la société. Elle se décompose en trois services :

## 1.6. OBJECTIFS ET ACQUIS DE L'ENTREPRISE

---

1. **Service engins** : Assure la maintenance des engins de manutention (Reach Stacker, MT Handler, chariots élévateurs et autres engins roulants...)
2. **Service portiques** : Assure la maintenance des portiques de quai et des grues mobiles.
3. **Service méthodes** : Assure la mise en œuvre du plan de maintenance des équipements.

### Direction des Ressources Humaines et Moyens

Mettre en place des systèmes de gestion intégrés à la stratégie de l'entreprise, visant à aligner les impératifs économiques avec les attentes du personnel. L'objectif principal est de rechercher et de conserver les meilleurs talents en leur offrant des conditions de travail optimales, un environnement favorable, ainsi que des opportunités de développement des compétences et de formation appropriée.

La DRHM est constituée de :

- **Département DRHM** : qui assure la coordination et le suivi des services de la DRHM et le suivi des projets. Il se décompose en trois services :
  1. **Le service patrimoine** : Assure la gestion des stocks et des immobilisations.
  2. **Service Moyens Généraux** : Satisfaire les besoins des différentes structures en produits et prestations de services.
  3. **Service Ressources Humaines** : Assure la gestion administrative du personnel et le développement des compétences.

## 1.6 Objectifs et Acquis de l'entreprise

### Objectifs

L'objectif de la BMT est de transformer son terminal à conteneurs en une infrastructure moderne, capable de répondre aux exigences les plus strictes en matière de qualité dans le traitement des conteneurs. Cela inclut l'intégration de nouvelles technologies pour améliorer le traitement des conteneurs pour :

- Augmenter la productivité
- Réduire les coûts d'escale
- Assurer la fiabilité des informations
- Offrir un meilleur service client
- Faire face à la concurrence tant nationale qu'internationale

## 1.6. OBJECTIFS ET ACQUIS DE L'ENTREPRISE

---

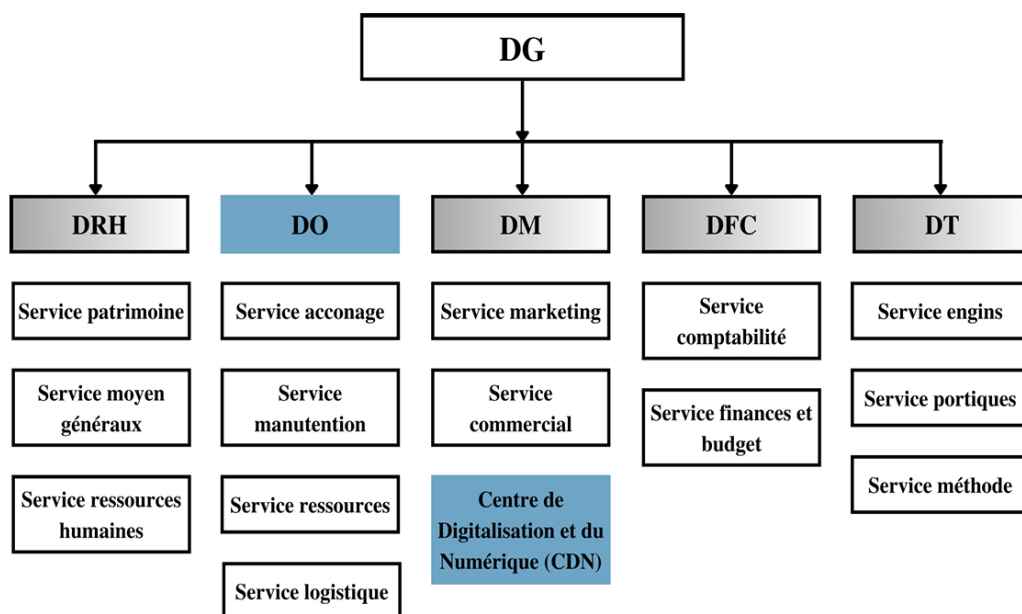


FIGURE 1.4 – Organigramme de BMT

- Positionner le terminal sur le marché international
- Accroître les parts de marché
- Atteindre l'objectif de 150 000 EVP à partir de 2008, avec une part de marché comprise entre 5 % et 10 %
- Accroître la productivité des opérations de manutention
- Développer le transport intégré (bout en bout)
- Améliorer l'efficacité et réduire les temps d'escale
- Mettre en place des procédures de gestion efficaces, tout en offrant un service conforme aux normes internationales
- Assurer une satisfaction totale des clients et des usagers portuaires en matière de transport et de manutention
- Prendre en charge intégralement les préoccupations des consignataires concernant les conteneurs
- S'engager à fournir un service de qualité dans les délais les plus courts
- Offrir un niveau élevé d'efficacité opérationnelle pour les clients
- Améliorer le service en répondant aux besoins des clients
- Atteindre l'excellence dans la gestion des opérations terminales
- Créer de l'emploi

## 1.7. LE TERMINAL À CONTENEUR

### Acquis

Les résultats obtenus depuis que la gestion de la BMT a été confiée à un concessionnaire sont :

- Augmentation du rendement de 8-10 à 25-30 unités de conteneurs par heure
- Croissance du trafic de conteneurs, passant de 100 050 EVP en 2007 à 120 000 EVP
- Réduction significative du temps de séjour des navires à quai, de 25 heures à 12 heures
- Formation du personnel aux nouvelles technologies de manutention et à la gestion du terminal
- Accélération des formalités douanières grâce à l'installation du guichet unique

### 1.7 Le terminal à conteneur

Le terminal à conteneurs de Béjaïa se divise en deux sections capitales, chacune ayant un rôle spécifique dans le processus de gestion et de manutention des conteneurs :

- La zone à quai
- La zone terrestre

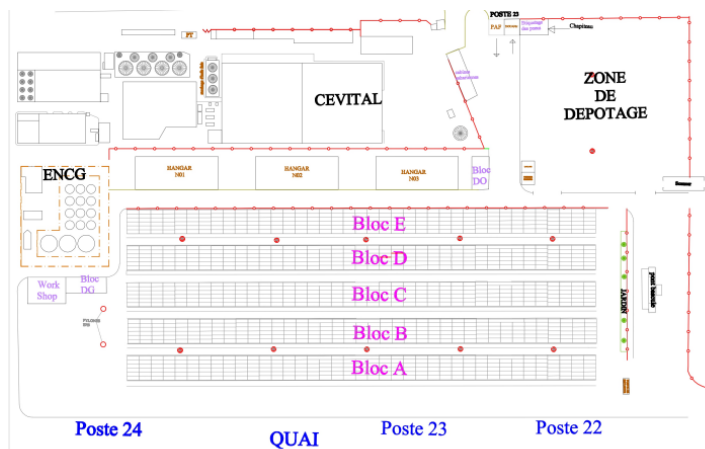


FIGURE 1.5 – Plan de BMT.

#### 1.7.1 Capacité

- La zone à quai

Cette zone joue un rôle essentiel en assurant le transfert des conteneurs entre le terminal et les navires, que ce soit lors des opérations d'embarquement ou de débarquement. La BMT accueille les navires à l'accostage sur les postes 22 et 24, le poste 22 fonctionne

## 1.7. LE TERMINAL À CONTENEUR

selon le système des fenêtres d'accostage, tandis que le poste 24 applique la méthode FIFO (First In, First Out).

Ces principales caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Caractéristiques	Valeurs
Longueur	500 ml
Profondeur	12 m
Superficie du bassin	60 ha
Nombre de postes d'accostage	02

TABLE 1.1 – Capacités du quai d'accostage

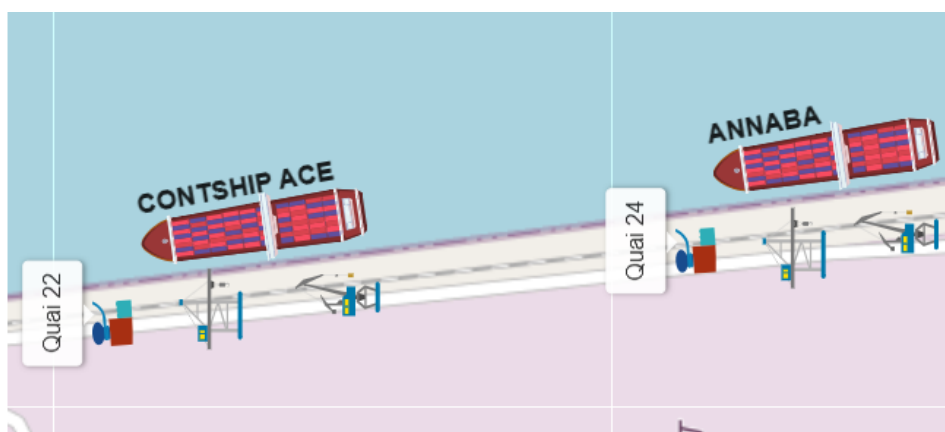


FIGURE 1.6 – Placement des navires.

- (b) **La zone terrestre** La zone terrestre du terminal de la BMT est structurée de manière à optimiser la gestion des conteneurs et le déroulement des opérations logistiques. Elle se décompose en plusieurs zones fonctionnelles, chacune ayant un rôle bien défini dans la chaîne de traitement portuaire.

Nous allons présenter en détail chaque zone, en expliquant son rôle et ses caractéristiques dans le bon fonctionnement du terminal.

- **La zone de stockage :** La zone de stockage du terminal est la zone où sont entreposés les conteneurs lorsqu'ils sont débarqués des navires

Elle est divisé en 5 blocs, identifiés par les lettres d'alphabet **A** , **B** , **C** , **D** et **E** et sont nommé respectivement **Alpha**, **Bravo**, **Charlie**, **Delta** et **Echo** , chaque bloc est constitué de 56 piles (slots) et de 6 ème ligne (rows) et d'un gerbage de 5 niveaux maximum (tier) le 5 ème niveau est souvent laissé pour le shifting des TCs.

## 1.7. LE TERMINAL À CONTENEUR

---

Une partie de bloc E est réservé pour les reefers (500 prises). La superficie du parc est de 78500m<sup>2</sup>.

Afin d'effectuer les manutentions au sein de cette zone on utilise les RTG qui permet de circuler au-dessus de blocs de conteneurs.

Une illustration d'un bloc se trouve ci-dessous :

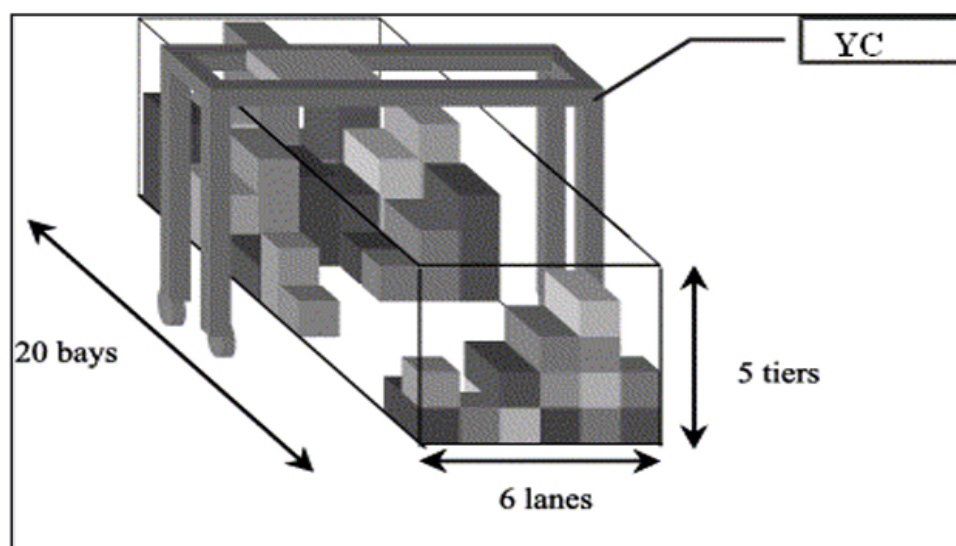


FIGURE 1.7 – Un bloc

- **La zone visite** : la zone de visite est la zone pour les formalités douanières et les inspections de sécurité.

Chaque soir, le service d'acoonage établit la liste des 120 conteneurs à faire visiter le lendemain : seuls ceux des circuits « orange » et « rouge » y sont obligatoirement dirigés, tandis que ceux du circuit « vert » vont directement en livraison.

Dès leur arrivée, les conteneurs sont déchargés un à un (aucun empilement n'est autorisé) et positionnés côte à côte dans la zone visite. Les agents procèdent alors aux vérifications selon la nature de la marchandise . Les douanes peuvent exiger l'ouverture d'un simple échantillon ou, si nécessaire, de l'intégralité du conteneur.

En outre, dans la zone visite on effectue le pesage de chaque conteneur pour confirmer son poids déclaré, ainsi que les opérations de dépôtage (déchargement des marchandises) et, le cas échéant, d'emportage (rechargement après inspection).

Un tableau se trouve ci-dessous, représentant les caractéristiques de ces zones :

## 1.8. LES OUTILS DE GESTION DU TERMINAL

---

Zone	Superficie (m <sup>2</sup> )	Capacité
Zone extra-portuaire (à 3 km du port)	50 000	5 000 EVP
Parc à conteneurs vides	15 200	900 EVP
Zone de stockage	78 500	8 300 EVP
Zone extra-portuaire (pleins Borj Bouararidj)	92 700 m <sup>2</sup>	6 900 EVP
Parc à conteneurs reefers	2 800	500 prises
Zone visite	3 500	600 EVP
Terminal à conteneurs	100 000	10 300 EVP

TABLE 1.2 – Capacités des zones Terrestre

### 1.8 Les Outils de gestion du terminal

Afin d'améliorer la capacité de manutention des conteneurs, la BMT s'est équipée de systèmes informatiques de gestion du terminal, permettant d'assurer une meilleure traçabilité des conteneurs ainsi qu'un haut niveau de sécurité.

#### 1.8.1 Le système IPROS

##### Définition

IPROS (Integrated Port Resource Optimization System) TOS (Terminal Operating System) est un système complet de planification, d'exploitation et de surveillance des ressources qui peut être utilisé dans les terminaux à conteneurs pour générer des plans d'utilisation optimale des ressources (comme les grues, Quai et Yard et les ressources en main-d'œuvre). Le système facilite également la commande et le contrôle en temps réel des opérations et de l'utilisation des ressources au terminal à conteneurs. Le système peut émettre des instructions pour plusieurs milliers de mouvements de conteneurs chaque jour avec un haut niveau de précision et d'efficacité. Il a été utilisé pour la première fois par la BMT en juillet 2024.

##### Fonctions des modules

Les différents composants fonctionnels qui constituent ce système sont chacun axés sur une tâche spécifique. Parmi les plus importantes, on peut citer :

## 1.8. LES OUTILS DE GESTION DU TERMINAL

- **Vessel Services** :il permet la gestion des escales navires, incluant la création des navires, la planification des arrivées, les demandes d'accostage (Berth Application) et la relation client.
- **Container Management** :il est destiné à gérer toutes les données relatives aux conteneurs, qu'il s'agisse de leur localisation, de leur statut ou de leur mouvement à l'intérieur du terminal.
- **EDI Submission** :il centralise la soumission électronique de données essentielles telles que les listes de chargement et de déchargement, les listes de conteneurs frigorifiques, les documents d'exportation, ou encore les demandes d'opérations.

Sender : SEACOS  
 Recipient : CMA  
 Time of preparation : dimanche 6 avril 2025 15:12  
 Control reference : 31034883  
 Communication agreement : CMA CGM

Port	Units	TEU	Total Weight	RF	DRY	Class	Full	Mt	40' - Weight	20' - Weight	55 - Units	55 - Weight
Bejaia (Ex Boup)	500	883	10015,9	1	499	35	500	0	383	7319,5	117	2696,4
Totals o/b	500	883	10015,9	1	499	35	500	0	383	7319,5	117	2696,4

Disch Port	Bay	Slot	Container Id	Size	Weight	Type	Class	Setting	Height	Full	Load Port	Optional F	Carrier	Del Port
(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)	(All)
DZBJA	026	0260208	ECMU6624423	40	13740	PL			00G	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060710	CMAU9739439	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060102	TKUJ7208954	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	032	0320784	TXGU7956280	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060284	CMAU9761129	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	032	0320684	CMAU6658781	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	032	0320484	TXGU7510771	40	28990	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	026	0260682	CMAU9264009	40	29030	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060784	TLLU4537503	40	28870	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060184	CMAU7099975	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	032	0321084	CMAU6588030	40	28400	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060884	FSCU8259574	40	29360	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060310	TLLU7783162	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060384	ECMU4814281	40	28980	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	003	0030104	CMAU2124622	20	21730	GP	8		86	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060686	SXU19611728	40	5000	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	006	0060786	CMAU3364891	40	6000	GP			95	Full	FRMRS		CMA	DZBJA
DZBJA	005	0050608	CMAU3239082	20	7690	GP			86	Full	FRMRS		CMA	DZBJA

Records : 500 From : 500 Weight: 10 015,88 TEUS: 883 Ports : 0

FIGURE 1.8 – L'EDI

- **Request Submission** :il est utilisé pour soumettre toutes les requêtes opérationnelles ou administratives.
- **Train et RoRo** :ils assurent une coordination parfaite avec d'autres formes de transport en permettant la gestion des balances ferroviaires et des navires ferroviaires, respectivement.

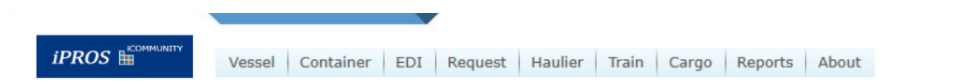


FIGURE 1.9 – Système iPROS

Le système IPROS intègre également plusieurs modules dédiés à la planification. Parmi eux, on retrouve iBIRTH, utilisé pour l'élaboration des plans d'accostage, iSTOW pour la planification

## 1.9. LES ÉQUIPEMENTS

---

des opérations de chargement et de déchargement, ainsi que iSTACK, qui permet de gérer la planification à la fois macro et micro au sein du terminal. Ces outils sont essentiels pour assurer la fluidité et l'efficacité des opérations portuaires.

D'autres modules comme iOperate permettent un suivi en temps réel des activités réalisées par les opérateurs dans les différentes zones du port, telles que le quai, le terminal, la zone réfrigérée (reefer) ou encore la zone visite. En complément, les modules iBILL, iREPORT et iCONTROL-INSTRUCTION sont respectivement dédiés à la gestion de la facturation, à la génération de rapports et à l'annulation ou la modification des opérations en cours.

Grâce à cette architecture modulaire, IPROS offre une traçabilité complète, une centralisation des données opérationnelles et une optimisation globale des processus, contribuant ainsi à améliorer la productivité du terminal et à réduire les délais de traitement.

### 1.9 Les équipements

Les équipements de BMT sont répartis en deux catégories :

#### 1.9.1 Les équipements de manutention

BMT est le seul terminal à conteneurs en Algérie qui possède des équipements spécialisés en manutention. Cela lui permet de réduire les temps d'escale et de répondre aux besoins des opérateurs. Les équipements sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Équipements	Tonnage	Quantité
Portiques de quai sur rail (QC)	40 tonnes	2
Portiques gerbeur sur pneus (RTG)	40 tonnes (Gerbage 6+1)	9
Chariots élévateurs	2.5, 3, 5, 10 tonnes	16
Chariots manipulateurs de vides	11 tonnes	11
Grues mobiles portuaires (MHC)	100 tonnes	3
Stackers	45 tonnes	11

Parmi les équipements essentiels utilisés dans les terminaux à conteneurs, on distingue principalement les grues et les RTG. Pour mieux comprendre leur fonctionnement et leur rôle, voici une définition de chacune.

- **Les grues** : Les grues sont des équipements de manutention utilisés pour l'embarquement et le débarquement des conteneurs des navires. Elles fonctionnent selon un plan de travail

## 1.9. LES ÉQUIPEMENTS

---

précis afin de maintenir l'équilibre du navire pendant les opérations

- **Les RTG** : peuvent se déplacer librement dans la cour de stockage grâce à leur mobilité pour prendre et charger les conteneurs sur des trains ou des camions. Elles sont capables de tourner à 90° pour changer de direction, mais ces mouvements prennent du temps, environ 15 minutes.



(a) *PORTIQUES DE QUAI SUR GERBEUR RAIL (QC)* (b) *PORTIQUES SUR ELEVATEURS PNEUS (RTG)* (c) *CHARIOTS*



(d) *CHARIOTS MANUPILABLES* (e) *GRUES MOBILES PORTUEURS DE VIDES TUAIRES (MHC)* (f) *STACKERS*

FIGURE 1.10 – Les équipements de manutention de la BMT

### 1.9.2 Les équipements de transport

Dans un terminal à conteneurs, plusieurs types de véhicules sont utilisés pour assurer le transport des conteneurs entre les différentes zones du terminal. Les plus courants sont :

- **Remorques routières** : Sont spécialement pour le déplacement des conteneurs (à l'extérieur du terminal,) entre le quai et la zone de stockage. Leur conception est optimisée pour les manœuvres en milieu portuaire
- **Remorques portuaires** : sont des remorques spécialement ( à l'intérieur du terminal) conçues pour recevoir et fixer solidement les conteneurs standards (20 ou 40 pieds). Elles permettent le transport des conteneurs depuis le port vers leur destination (entrepôt, client, plateforme logistique...)



(a) *Remorques routières*      (b) *Remorques portuaires*

FIGURE 1.11 – Les équipements de transports de la BMT

### 1.10 Processus dans un terminal à Conteneurs

Le fonctionnement d'un terminal à conteneurs suit un enchaînement d'étapes visant à assurer la bonne gestion des flux de marchandises, depuis l'arrivée du navire jusqu'à la sortie des conteneurs.

Les opérations des terminaux de conteneurs peuvent être divisées en trois grandes catégories. La première catégorie regroupe les opérations liées au l'embarquement et le débarquement des navires. Ces opérations sont réalisées dans la zone d'opérations portuaires. La seconde catégorie contient l'ensemble des opérations de stockage et de manutention des conteneurs dans la cour. La dernière catégorie d'opérations concerne le transfert des conteneurs vers les modes de transports terrestres. Les opérations de cette catégorie se déroulent dans la zone d'opérations terrestre.

Voici les principales étapes de ce processus :

- **Arrivée du navire** : Lorsqu'un navire porte-conteneurs entre dans le port, il est dirigé vers un poste à quai libre. Un plan d'amarrage est établi, tenant compte de la taille du navire, du nombre de conteneurs à traiter, et de la disponibilité des équipements. Des grues de quai sont attribuées pour les opérations et un plan d'embarquement / débarquement est établi pour assurer la stabilité du navire.
- **Débarquement des conteneurs (import)** : Les grues de quai saisissent les conteneurs du navire et les déposent sur des véhicules de transport interne.
- **Transport interne** : Les conteneurs sont ensuite déplacés vers la zone de stockage à l'intérieur du terminal, en utilisant des Remorques portuaire

## 1.11. LA CONTENEURISATION

---

- **Zone de Stockage** : Les conteneurs sont déposés dans la zone de stockage à l'aide des RTG et cela selon plusieurs critères
- **Traitement en zone visite** : Avant leur sortie, certains conteneurs passent par le contrôle douanier pour validation de la livraison.
- **Sortie du terminal (livraison des conteneurs)** : Enfin les conteneurs sont récupérés pour être livrés au client final Par camion via la porte routière du terminal ou par train depuis la zone ferroviaire du terminal.
- **L'embarquement des conteneurs (export)** : (processus inverse)  
Pour l'export, les conteneurs arrivent via camions ou trains, sont stockés dans la cour, puis transportés et chargés à bord du navire.

Le schéma ci-dessous illustre de manière simple les différentes étapes du processus de traitement des conteneurs au sein d'un terminal.

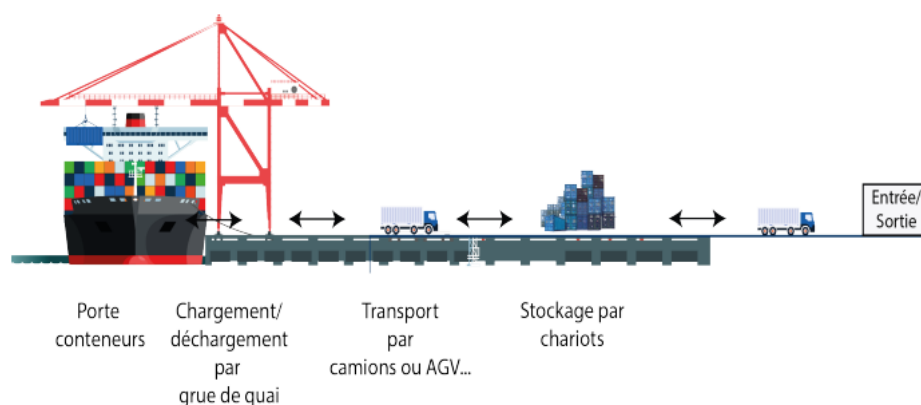


FIGURE 1.12 – Le processus de traitement des conteneurs.

## 1.11 La conteneurisation

### Définitions d'un conteneur maritime

Les conteneurs sont des boîtes métalliques de dimensions normalisées qui sert à accumuler des marchandises sur de longues distances et il est adaptée à plusieurs modes de transport, ayant de multiples caractéristiques :

- Résistant, il permet un usage répété.
- Permanent, il est conçu pour durer de nombreuses années.
- ses dimensions normalisées au niveau international facilitent le transport des marchandises d'un point à un autre sans ruptures de charge.

## 1.11. LA CONTENEURISATION

---

- Multimodal, il peut être utilisé pour un ou plusieurs modes de transport.
- Manipulable, il dispose de pièces de coin permettant de le manutentionner, de le gerber (emilage des conteneurs) ou de l'assujettir facilement.

### Histoire et évolution du conteneur

En 1956, Malcolm McLean invente le conteneur maritime pour pallier la saturation des routes. Il transporte d'abord des remorques entières par bateau, puis optimise l'espace en ne gardant que la caisse. Ce système révolutionne le transport et, dès 1961, des dimensions standard (20 et 40 pieds) sont établies au niveau international.

### Normes dimensionnelles des conteneurs

Il existe plusieurs dimensions de conteneurs maritimes pour transporter des marchandises ou stocker des produits, néanmoins le conteneur le plus courant est le standard de 20 pieds ou 40 pieds. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a normalisé les dimensions des conteneurs.

- Le conteneur de 20 pieds (high cube) est la taille de conteneur d'expédition la plus couramment utilisée. Il mesure 8 pieds de haut, 6 pieds de large et 8 pieds de profondeur, avec une capacité de poids de 7 600 livres (3 400 kg). Cette taille peut contenir l'équivalent du contenu de 10 palettes.
- Le conteneur de 40 pieds (extra high cube) est une version plus grande du conteneur de 20 pieds qui mesure 8 pieds de haut, 6 pieds de large et 12 pieds de profondeur, avec une capacité de poids de 11 200 livres (5 000 kg). Il a une capacité similaire à celle de deux conteneurs de 20 pieds empilés l'un sur l'autre.

Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des normes internationales relatives aux dimensions des différents types de conteneurs maritimes.

## 1.11. LA CONTENEURISATION

---

Caractéristiques	20 pieds	40 pieds	40 pieds High Cube
Dimensions extérieures (pieds)	20' × 8' × 8'6"	40' × 8' × 8'6"	40' × 8' × 9'6"
Dimensions extérieures (mètres)	6,1 × 2,44 × 2,62	12,2 × 2,44 × 2,62	12,2 × 2,44 × 2,93
Longueur intérieure (mm)	5 867	11 998	11 998
Largeur intérieure (mm)	2 330	2 330	2 330
Hauteur intérieure (mm)	2 350	2 350	2 655
Largeur des portes (mm)	2 286	2 286	2 286
Hauteur des portes (mm)	2 261	2 261	2 566
Capacité (m <sup>3</sup> )	32,1	65,7	74,2
Poids brut maximal (kg)	30 480	30 480	30 480
Tare (kg)	2 230	3 740	3 900
Charge utile maximale (kg)	28 250	26 740	26 580

TABLE 1.3 – Caractéristiques générales des conteneurs

### Les différents types des conteneurs

Il existe une grande variété de conteneurs. Parmi eux, on distingue notamment le type que nous allons définir ci-après :

- **Le conteneur standard "dry"** : C'est le modèle le plus courant. Il est utilisé pour transporter des marchandises sèches, non périssables. Il est entièrement fermé et disponible en tailles standardisées de 20 ou 40 pieds.



FIGURE 1.13 – Conteneur Standard

- **Le conteneur "open top"** : Est très similaire au conteneur dry, hormis que leur toit est mobile (remplacé par une bâche). Ces conteneurs sont conçus pour faciliter l'emportage et le dépotage par le haut mais en aucun cas pour charger des marchandises en dépassement de hauteur. Ils peuvent se substituer aux conteneurs "dry".

## 1.11. LA CONTENEURISATION

---



FIGURE 1.14 – Conteneur Open Top

- **Le conteneur frigorifique (reefer)** : Ce type est équipé d'un système de réfrigération pour maintenir une température constante. Il est utilisé pour le transport de denrées périssables comme les aliments, les produits pharmaceutiques ou les fleurs.



FIGURE 1.15 – Conteneur Frigorifique

- **Le conteneur flat rack** : Le conteneur flat (plat) est dépourvu de parois latérales fixes et de toit. Il en existe deux types : le "flat rack fixed end", dont les parois d'extrémités sont fixes, et le "flat collapsible" dont les parois d'extrémités sont rabattables.



FIGURE 1.16 – Conteneur Plat

- **Le conteneur pallet wide** : Le conteneur pallet wide présente une largeur différente des autres, correspondant aux standards des palettes. Ses dimensions intérieures sont prévues pour optimiser le chargement des palettes en limitant au minimum la surface au sol inoccupée. Tout en diminuant la perte d'espace, il permet d'augmenter la stabilité de

## 1.11. LA CONTENEURISATION

---

la marchandise transportée.



FIGURE 1.17 – Conteneur Pallet Wide

- **Le conteneur citerne "Tank"** : Un conteneur de fret qui comprend deux éléments de base, le réservoir et le cadre. Ce type de conteneur est utilisé pour transporter des liquides dangereux ou non dangereux (produits alimentaires).

Il est équipé d'accessoires pour faciliter le remplissage et la vidange et dispose de dispositifs de sécurité.



FIGURE 1.18 – Conteneur Citerne

### 1.11.1 Impact du conteneur sur le travail portuaire

Pour les travailleurs portuaires, les effets de l'utilisation accrue des conteneurs ont été immédiatement visibles car ils ont permis de gagner du temps lors des opérations d'embarquement et de débarquement, ce qui a réduit le besoin de formation en cours d'emploi. Les recherches ont montré que l'adoption des conteneurs a considérablement augmenté la productivité des travailleurs, mesurée par la quantité de marchandises embarquées ou débarquées. Néanmoins, ces changements ont suscité des inquiétudes parmi les voyageurs et les syndicats, ce qui a conduit à des conflits importants entre les dockers (Ouvriers portuaires) et les compagnies maritimes dans les années 1980. En conséquence, le nombre de dockers a considérablement diminué ; par exemple, la côte est des États-Unis a connu une diminution de plus de deux tiers entre 1952 et 1972. Le Royaume-Uni a connu une tendance similaire : entre le début des années 1960 et la fin des années 1980, le nombre de dockers est passé de 70 000 à moins de 10 000. Ces changements

## 1.12. POSITION DU PROBLÈME

---

se sont produits en dépit d'une augmentation de plus des exportations mondiales ont augmenté de 600% entre 1950 et 1973.

### 1.12 Position du problème

Le stockage des conteneurs est l'une des décisions les plus importantes et les plus complexes dans un terminal à conteneurs. BMT rencontre actuellement ce problème .

Lors du stockage, les conteneurs destinés à être récupérés se retrouvent fréquemment enfouis sous d'autres. Pour y accéder, les opérateurs doivent d'abord dégager les emplacements en procédant à des mouvements de conteneurs intermédiaires. Ce problème entraîne :

- Des pertes de temps importantes .
- Des surcoûts opérationnels .
- Un risque accru d'endommagement des engins de manutention .

En conséquence, l'efficacité et la rentabilité du terminal sont fortement compromises.

Pour comprendre concrètement le problème lié au réaménagement des conteneurs, prenons l'exemple suivant :

Soient les conteneurs A, B, C et la séquence d'actions 1, 2, 3.

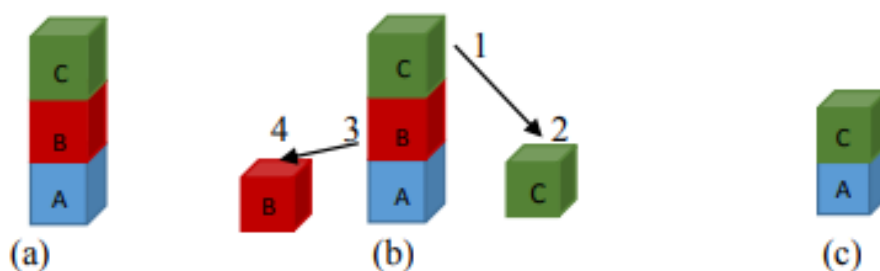


FIGURE 1.19 – Récupération d'un conteneur cible [21]

Dans l'exemple de la figure 2.9, l'extraction du conteneur B nécessite un remaniement du conteneur C. Afin de faire face à cette problématique et d'en proposer une solution efficace, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme Random Forest, dont les principes et l'application seront détaillés dans le chapitre suivant.

### 1.13 conclusion

Les ports modernes sont devenus des plateformes multimodales essentielles, s'appuyant sur des équipements de production performants et des opérations bien coordonnées pour garantir le bon déroulement des transactions. Cependant, en raison de la diversité des conteneurs et du manque d'informations précises, une gestion optimale de ces opérations, en particulier dans la zone de stockage, reste difficile, ce qui constitue un véritable frein à l'augmentation de la productivité portuaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'entreprise BMT, une organisation qui s'efforce de répondre aux besoins de ses clients. Nous avons retracé son historique, décrit son organisation, ses activités, ses objectifs ainsi que ses réalisations. De plus, nous avons détaillé ses équipements de manutention et de transport , ainsi que le processus de fonctionnement de son terminal.

---

---

## CHAPITRE 2

---

# STRATÉGIE DE STOCKAGE ET RANDOM FOREST

### 2.1 Introduction

Dans le contexte de l'optimisation du stockage des conteneurs au sein du terminal portuaire de BMT, l'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle, notamment l'apprentissage automatique, s'avère particulièrement prometteuse. Ce chapitre a pour objectif d'introduire les concepts fondamentaux liés au Machine Learning, avec un focus particulier sur l'algorithme Random Forest. Avant cela, nous présentons les différentes stratégies de stockage existantes dans les terminaux à conteneurs, car une bonne compréhension de ces méthodes est essentielle pour saisir les enjeux de notre problématique.

À travers cette exploration, Nous verrons comment fonctionnent les arbres de décision, pourquoi on les regroupe dans des méthodes d'ensemble, et quels sont les avantages et les limites de l'algorithme de Forêts Aléatoires.

### 2.2 Les différentes stratégies de stockage

Un des avantages de l'utilisation des conteneurs est qu'on peut les mettre les uns sur les autres. Mais cet avantage a aussi des limites, car cela peut provoquer des réorganisations. En effet, ce type de manipulation est souvent nécessaire quand on doit sortir un conteneur qui se

## 2.2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE STOCKAGE

---

trouve en bas d'une pile. Donc, il est très important pour chaque terminal à conteneurs de choisir une bonne méthode de stockage. D'après Saanen et ses collègues [27], les différentes méthodes de stockage qu'on trouve dans la littérature peuvent être classées en quatre catégories, qui sont présentées ci-dessous [25].

### 2.2.1 Ségragation et Non-ségragation

Le stockage avec ségragation signifie qu'on sépare les conteneurs d'exportation (ceux qui sortent du port) et ceux d'importation (ceux qui arrivent au port). Les conteneurs d'exportation arrivent au port sur des camions ou des trains, puis sont envoyés par bateau. Par contre, les conteneurs d'importation arrivent au port par bateau, puis sont transportés vers leur destination finale par camion ou train.

Dans le stockage par ségragation, on organise à l'avance les zones de stockage pour décider où mettre les conteneurs importés et où mettre ceux qui sont en exportation. Il existe trois manières de faire cette séparation [22] .

La première méthode consiste à réserver un bloc entier pour un seul type de conteneur : soit pour l'importation, soit pour l'exportation. La deuxième méthode divise chaque bloc en deux parties (en longueur), une partie pour chaque type de conteneur. La troisième méthode ressemble à la deuxième, mais cette fois la séparation se fait selon les travées (en largeur).

Dans certains cas, on peut même subdiviser l'espace réservé à un seul type de conteneur, par exemple en donnant une zone précise à chaque navire. Cette méthode est souvent utilisée pour les conteneurs qui vont être chargés sur les navires. Elle est utilisée par Ibrahim et ses collègues dans [29] .

La méthode de non-ségragation, elle, ne fait pas de séparation entre les conteneurs. Tous les conteneurs sont stockés ensemble, peu importe s'ils arrivent ou s'ils partent .

### 2.2.2 Groupage et Dispersion

Avec la méthode de stockage par groupe, on donne des emplacements voisins (et non pas des piles entières) à chaque groupe de conteneurs qui ont les mêmes caractéristiques (par exemple : même destination, même taille, même type de contenu, réfrigérés, vides, etc.). Les conteneurs d'un même groupe sont considérés comme équivalents, donc on peut les empiler sans faire attention à leur date de départ [13].

Cette méthode est souvent utilisée dans les terminaux qui ont des grues RTGC, car on essaye de regrouper les conteneurs pour réduire le nombre de grues nécessaires [27].

## 2.2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE STOCKAGE

---

Il existe deux manières de réserver l'espace de stockage [22].

- **Méthode de l'unité pile** : on commence par réserver une pile vide pour chaque groupe, puis on ajoute une autre pile vide quand la première est pleine.
- **Méthode de l'unité travée** : on réserve directement toute une travée vide pour un groupe de conteneurs. Si elle devient pleine, une nouvelle travée vide est réservée automatiquement.

Contrairement à cette stratégie, la méthode du stockage dispersé ne cherche pas à regrouper les conteneurs. Ils sont placés séparément, sans ordre [10]. Un exemple est le stockage aléatoire, où chaque place compatible a la même probabilité d'être choisie .

Voici les étapes du stockage aléatoire :

1. Choisir une rangée au hasard.
2. Choisir un emplacement quelconque dans cette rangée.
3. Vérifier s'il est possible d'y placer le conteneur.
4. Si oui, alors effectuer le stockage.
5. Si non, alors recommencer avec la rangée suivante.

Le stockage aléatoire ne tient pas compte d'informations importantes comme les dates de départ ou la distance. Donc, même s'il donne des solutions possibles, la qualité n'est pas toujours bonne. Il serait mieux de considérer aussi d'autres facteurs pour améliorer l'efficacité du stockage et du déstockage.

### 2.2.3 Stockage direct et Stockage indirect

Dans la plupart des ports, les conteneurs sont directement placés dans la cour de stockage, où ils restent jusqu'à leur départ. Mais dans le cas du stockage indirect, les conteneurs passent d'abord par une zone de placement avant d'être déplacés vers la cour de stockage. Le but de ce système est de réduire le temps d'attente des camions qui livrent les conteneurs, et aussi de rendre le travail des grues plus efficace, en séparant les moments de stockage et les moments de retrait. Ainsi, le transfert des conteneurs depuis la zone de placement vers la cour de stockage se fait pendant les moments où les grues sont libres. Cette méthode est utile surtout dans les ports qui n'ont pas toutes les informations sur les conteneurs au moment de leur arrivée. Les conteneurs sont donc placés temporairement dans la zone de placement , en attendant d'avoir toutes les données nécessaires pour choisir leur place finale dans la cour de stockage. Ces données

## 2.2. LES DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE STOCKAGE

---

peuvent être, par exemple, la date de départ ou le mode de transport (routier ou ferroviaire, dans le cas d'un terminal multimodal).

Une question importante pour les ports qui utilisent cette méthode est de bien organiser l'espace de stockage. Dans l'étude [12], Chen propose une solution : avoir une grande zone d'agencement et une cour de stockage avec des piles très hautes. Cette solution est intéressante pour les ports situés dans des régions où la terre est chère.

D'autres chercheurs proposent de ne pas séparer la zone d'agencement et la cour de stockage. Par exemple, dans l'étude de Castilho et Daganzo [11], les auteurs analysent combien de mouvements inutiles sont nécessaires pour retirer un conteneur qui n'est pas au sommet d'une pile. Une stratégie similaire est utilisée dans [29], où tous les conteneurs qui arrivent dans un bloc sont d'abord placés dans des piles intermédiaires, puis déplacés ensuite à leur position finale.

Malgré ses avantages, le stockage indirect demande beaucoup de déplacements de conteneurs, dont certains ne sont pas nécessaires. Ces mouvements exigent des machines, et aussi du personnel, surtout dans les terminaux qui ne sont pas automatisés.

### 2.2.4 Priorité aux déchargements et Priorité aux chargements

Certaines méthodes de stockage donnent la priorité aux déchargements de conteneurs. Leur objectif est d'améliorer l'efficacité de toutes les activités liées au stockage. La méthode appelée stockage par niveau en est un bon exemple. Elle consiste à placer les conteneurs par couche : on remplit d'abord tous les emplacements au sol avant de superposer les conteneurs. Cette stratégie a été proposée par Duinkerken et ses collègues dans [14]. Elle est facile à comprendre, mais elle n'utilise pas toutes les informations disponibles.

La méthode comprend quatre étapes principales, décrites ci-dessous :

1. Choisir une rangée quelconque qui contient au moins un emplacement libre.
2. Chercher, dans cette rangée, un emplacement libre au sol qui convient.
3. Si un tel emplacement est trouvé, y placer le conteneur.
4. Sinon, chercher un autre emplacement libre et adéquat, situé au niveau le plus bas possible dans la même rangée.

Avec cette méthode, le risque de devoir repositionner les conteneurs (remaniement) est plus faible qu'avec le stockage aléatoire. Ce risque peut même être nul si la cour de stockage n'est pas pleine. Cependant, cette méthode devient moins efficace lorsque le nombre de conteneurs est beaucoup plus grand que le nombre de piles. De plus, elle peut obliger les opérateurs à se déplacer sur de

## 2.3. INTRODUCTION AU MACHINE LEARNING

---

longues distances, ce qui augmente le temps des opérations.

À l'inverse, d'autres méthodes priorisent le chargement des conteneurs, avec comme objectif d'optimiser les retraits. C'est le cas de la méthode qui range les conteneurs en fonction de leurs dates de départ, de la plus tardive à la plus proche [13]. Une version améliorée, appelée stockage par nivellement des dates de départ, a été proposée dans [10] par Borgman et al.

Cette stratégie vise à réduire la surface utilisée, tout en rangeant les conteneurs selon l'ordre décroissant de leur date de départ. Si plusieurs piles sont compatibles, on choisit celle qui est la plus haute. De plus, on essaie de réduire l'écart entre les dates de départ de deux conteneurs placés dans la même pile. Le nivellement ne se fait donc pas par rapport au sol, mais par rapport aux dates de départ.

Le processus de recherche d'un emplacement suit trois étapes :

1. On commence par chercher les piles qui ne sont ni pleines ni vides, et dont le conteneur en haut a une date de départ plus grande que celle du conteneur à stocker. Si c'est le cas, on calcule la différence entre les deux dates et on choisit la pile avec la différence la plus petite.
2. Si on ne trouve pas une telle pile, on choisit parmi les piles vides, celle qui est la plus proche de la sortie prévue pour le conteneur.
3. Si les deux premiers cas ne sont pas possibles, alors on stocke le conteneur dans la pile la plus haute parmi celles qui ne sont pas pleines, pour limiter les futurs remaniements.

D'après Borgman et ses collègues, cette méthode est plus performante que le stockage aléatoire ou le stockage par niveau, car elle limite davantage les remaniements. Cependant, elle cherche à minimiser la surface utilisée, ce qui peut rendre les opérations de stockage ou de retrait plus longues. Cela peut influencer la satisfaction des clients.

## 2.3 Introduction au Machine Learning

Le Machine Learning (ML) est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui vise à donner aux machines la capacité d'apprendre à partir de données, via des modèles mathématiques. Plus précisément, il s'agit du procédé par lequel les informations pertinentes sont tirées d'un ensemble de données.

Cette technologie vise à apprendre aux machines à tirer des enseignements des données et à s'améliorer avec l'expérience, au lieu d'être explicitement programmées pour le faire. Dans le Machine Learning, les algorithmes sont entraînés à trouver des patterns et des corrélations

## 2.3. INTRODUCTION AU MACHINE LEARNING

---

dans de grands ensembles de données, ainsi qu'à prendre les meilleures décisions et à émettre les meilleures prévisions en s'appuyant sur leur analyse. Avec la pratique, les applications du Machine Learning s'améliorent. Et plus le volume de données auxquelles elles ont accès est important, plus elles deviennent précises [3]

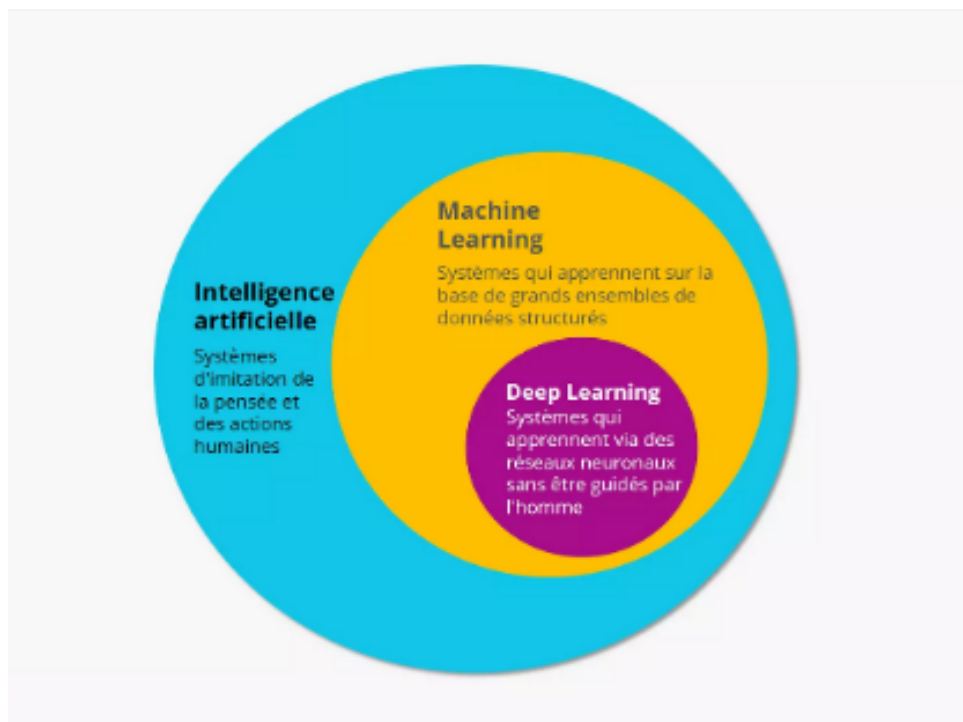


FIGURE 2.1 – La relation entre le ML, DL et IA [20]

### 2.3.1 Le fonctionnement de Machine Learning

Le machine learning, est une méthode qui permet à un ordinateur d'apprendre à partir de données, sans être explicitement programmé pour chaque tâche. Il consiste à entraîner un modèle informatique à reconnaître des schémas ou des relations dans les données, afin de faire des prédictions ou prendre des décisions. Par exemple, en analysant de nombreux exemples, un modèle peut apprendre à reconnaître des images, à prévoir des ventes ou à détecter des anomalies. Plus il reçoit de données pertinentes, plus il devient précis et performant.

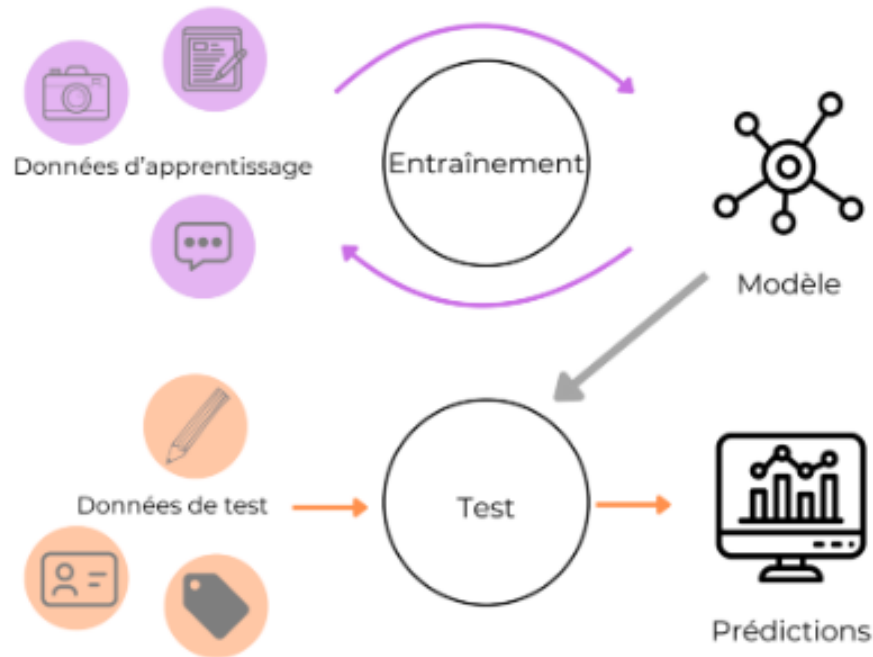


FIGURE 2.2 – Le fonctionnement de ML [17]

### 2.3.2 Types de Machine Learning

Le Machine Learning se décompose en quatre grandes catégories :

1. **Machine Learning supervisé** : Un type d'apprentissage automatique dans lequel le modèle est entraîné sur un ensemble de données étiqueté (c'est-à-dire que la variable cible ou de sortie est connue). L'apprentissage supervisé est généralement utilisé pour l'évaluation des risques, la reconnaissance d'images, l'analyse prédictive et la détection des fraudes, et comprend plusieurs types d'algorithmes [19]
  - **Algorithmes de régression** : prédisent les valeurs de sortie en identifiant des relations linéaires entre des valeurs réelles . Les algorithmes de régression comprennent la régression linéaire, Régression polynomiale, ainsi que d'autres sous-types.
  - **Algorithmes de classification** : prédisent les variables de sortie catégorielles en étiquetant les données d'entrée. Les algorithmes de classification incluent, la régression logistique, les k-plus proches voisins, les machines à vecteurs de support (SVM), Arbres de décision et Random Forest ( .
2. **Machine Learning non supervisé** : Les algorithmes d'apprentissage non supervisé, tirent des conclusions à partir d'ensembles de données non étiquetés, facilitant ainsi l'ana-

## 2.3. INTRODUCTION AU MACHINE LEARNING

lyse exploratoire des données et permettant la reconnaissance de formes et la modélisation prédictive. et comprend plusieurs types d'algorithmes [19].

- Le clustering en k-moyennes
- Clustering hiérarchique
- Réduction de dimensionnalité (PCA, t-SNE)

- 3. Machine Learning autosupervisé :** L'apprentissage autosupervisé consiste à entraîner le modèle sur des données non étiquetées en générant lui-même des étiquettes. Il apprend une partie de l'entrée à partir d'une autre, transformant así le problème non supervisé en un problème supervisé. Cette méthode est particulièrement utile en vision par ordinateur et en langage naturel, où le volume de données étiquetées est souvent insuffisant [19].
- 4. Machine Learning par renforcement :** L'apprentissage par renforcement consiste à entraîner un agent en lui donnant des récompenses ou des punitions en fonction de ses actions. Au fur et à mesure, l'agent apprend la meilleure stratégie pour atteindre son objectif. Cette méthode est notamment utilisée dans les jeux vidéo et la robotique. [19]

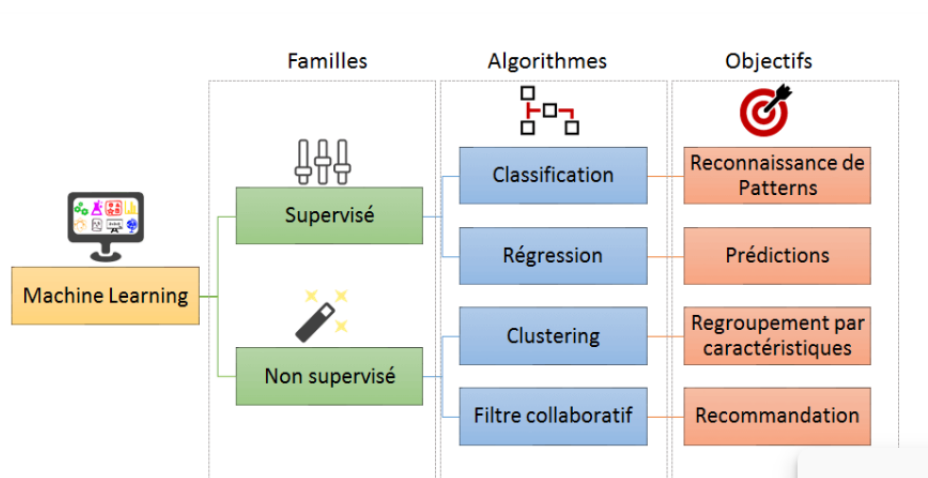


FIGURE 2.3 – Types de ML [26]

## 2.4. LA MÉTHODE RANDOM FOREST

---

Dans le cas de notre problématique , nous avons opté pour une approche d'apprentissage supervisé, plus précisément l'algorithme . Ce choix s'est imposé en raison de la disponibilité de données étiquetées et de la robustesse, de la précision et de la capacité d'adaptation de cette méthode face à des données de nature hétérogène. Ainsi, le Random Forest (forêt aléatoire) apparaît particulièrement pertinent afin d'optimiser l'affectation des conteneurs dans le terminal portuaire et de minimiser le nombre de déplacements inutiles.

### 2.4 La Méthode Random Forest

Pour comprendre la théorie de Random Forest il faut bien comprendre ses deux points :

- L'ensemble learning
- Arbres de décision

#### 2.4.1 Arbres de décision

Les arbres de décision (AD) sont une catégorie d'arbres utilisée dans l'exploration de données et en informatique décisionnelle. Ils emploient une représentation hiérarchique de la structure des données sous forme des séquences de décisions en vue de la prédiction d'un résultat ou d'une classe. Chaque individu , qui doit être attribué à une classe, est décrit par un ensemble de variables qui sont testées dans les nœuds de l'arbre. Les tests s'effectuent dans les nœuds internes et les décisions sont prise dans les nœuds feuille [16]

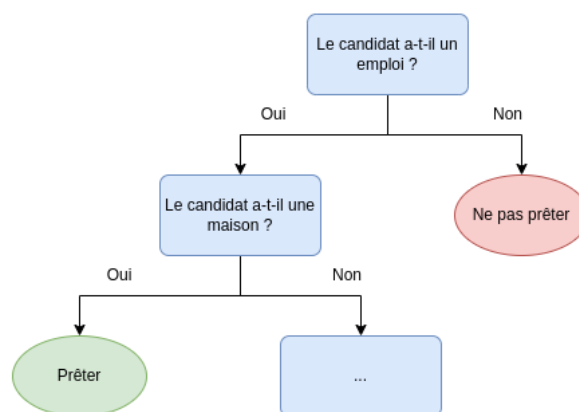


FIGURE 2.4 – Exemple d'arbre de décision [16]

### 2.4.2 Les Types d'arbre de décision

- ID3 : signifie Iterative Dichotomiser 3. c'est un algorithme d'arbre de décision que l'on construit en utilisant l'entropie et le gain d'information afin de trouver le facteur le plus pertinent pour diviser le jeu de données en groupes homogènes.
- C4.5 : est une amélioration d'ID3. Il prend en compte les attributs continus, gère les valeurs manquantes, et s'aide du ratio de gain afin d'améliorer le choix des divisions dans l'arbre de décision.
- CART : signifie Classification And Regression Tree. C'est un algorithme d'arbre de décision applicable tanto à la classification qu'à la régression. Il s'appuie sur l'indice de Gini afin de trouver le split le plus pur.

### 2.4.3 Apprentissage avec les arbres de décision

On considère d'abord le problème de classement. Chaque élément  $x$  de la base de données est représenté par un vecteur multidimensionnel  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  correspondant à l'ensemble de variables descriptives du point. Chaque nœud interne de l'arbre correspond à un test fait sur une des variables  $x_i$  :

- Variable catégorielle : génère une branche (un descendant) par valeur de l'attribut ;
- Variable numérique : test par intervalles (tranches) de valeurs.

Les *feuilles* de l'arbre spécifient les classes.

Une fois l'arbre construit, classer un nouvel candidat se fait par une descente dans l'arbre, de la racine vers une des feuilles (qui encode la décision ou la classe). À chaque niveau de la descente on passe un nœud intermédiaire où une variable  $x_i$  est testée pour décider du chemin (ou sous-arbre) à choisir pour continuer la descente [16].

Les arbres de décision sont simples à entraîner, à utiliser et à interpréter, car ils permettent de connaître facilement les règles de prédiction. Cependant, ils manquent souvent de précision et de capacité de généralisation ils fonctionnent bien sur les données d'entraînement mais donnent de moins bons résultats sur de nouvelles données.

Pour améliorer cela on conduit aux approches de type Bagging et Random Forest . On utilise l'ensemble learning, qui combine plusieurs arbres afin d'obtenir de meilleures performances.

Mais d'abord c'est quoi un ensemble learning

## 2.4. LA MÉTHODE RANDOM FOREST

### 2.4.4 L'ensemble learning

L'apprentissage d'ensemble consiste à combiner plusieurs modèles afin d'améliorer la précision globale, plutôt que d'en utiliser un seul. Il existe deux types de méthodes d'ensemble :

- Hétérogènes : combiner différents algorithmes sur le même jeu de données.
- Homogènes : combiner le même algorithme sur des sous-ensembles de données, de manière aléatoire (bagging) ou adaptative (boosting).

**Bagging** : consiste à combiner plusieurs modèles entraînés en parallèle sur des sous-ensembles de données pris aléatoirement, afin de réduire la variance et d'améliorer la robustesse du modèle final [16]

**Algorithme bagging** :

- On tire au hasard dans la base d'apprentissage  $B$  échantillons avec remise  $z_i$ ,  $i = 1, \dots, B$  (chaque échantillon ayant  $n$  points) appelés échantillons bootstrap ,
- Pour chaque échantillon  $i$  on calcule le modèle  $G_i(x)$
- Régression : agrégation par la moyenne :

$$G(x) = \frac{1}{B} \sum_i G_i(x); \quad (2.1)$$

- Classification : agrégation par vote :

$$G(x) = \text{Vote majoritaire}(G_1(x), \dots, G_B(x)). \quad (2.2)$$

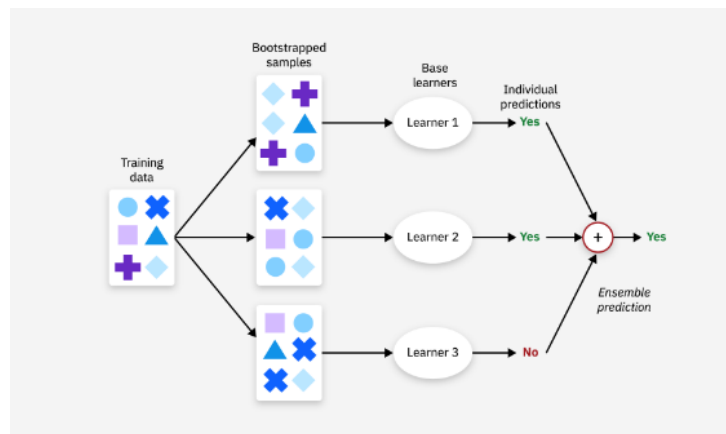


FIGURE 2.5 – Fonctionnement de Bagging [18]

**Boosting** :

Il construit les modèles de manière séquentielle, en donnant plus d'importance aux cas mal classés par le modèle précédent, afin d'en corriger les erreurs [16] .

## 2.4. LA MÉTHODE RANDOM FOREST

---

Nous détaillons à présent les Random Forest

### 2.4.5 Random Forest

Les Random Forest sont une méthode d'apprentissage d'ensemble qui consiste à combiner de nombreux arbres de décision construits de manière aléatoire. Chaque arbre est entraîné sur un sous-ensemble de données choisi aléatoirement (bagging) et n'utilise qu'un nombre limité de variables prises au hasard. Cette approche réduit le surapprentissage, augmente la robustesse du modèle et garantit de meilleures performances de prédiction que l'arbre de décision seul. Les forêts aléatoires sont donc une amélioration du bagging pour les arbres de décision CART dans le but de rendre les arbres utilisés plus indépendants [30],

### 2.4.6 Principe de fonctionnement du Random Forest

Un Random Forest a besoin de trois hyper-paramètres principaux (paramètres fixes), qui doivent être définis avant l'entraînement. Il s'agit notamment de la taille des arbres (le nombre de nœuds maximal), du nombre d'arbres à utiliser et le nombre de caractéristiques échantillonnées (nombre de variables aléatoires choisies à chaque mélange depuis les variables explicatives). À partir de là, le modèle peut être utilisé pour résoudre les problèmes de régression ou de classification [30].

Une fois les hyperparamètres définis, le Random Forest se construit en 3 principales étapes.

- La première étape consiste à appliquer le principe du bagging, c'est-à-dire créer de nombreux sous-échantillons aléatoires de notre ensemble de données avec possibilité de sélectionner la même valeur plusieurs fois.
- Des arbres de décision individuels sont ensuite construits pour chaque échantillon. Chaque arbre est entraîné sur une portion aléatoire afin de recréer une prédiction. Notons bien que ces modèles-là sont très peu corrélés, et chaque arbre de décision fonctionne individuellement et indépendamment des autres.
- Enfin, chaque arbre va prédire un résultat (target). Le résultat avec le plus de votes (le plus fréquent) devient le résultat final de notre modèle. Dans le cas de régression, on prendra la moyenne des votes de tous les arbres.

#### Algorithme des Random Forest

- On tire au hasard dans la base d'apprentissage  $B$  échantillons avec remise  $z_i$ ,  $i = 1, \dots, B$  (chaque échantillon ayant  $n$  points).
- Pour chaque échantillon  $i$  on construit un arbre CART  $G_i(x)$  selon un algorithme légè-

## 2.4. LA MÉTHODE RANDOM FOREST

---

ment modifié : à chaque fois qu'un nœud doit être coupé (étape “split”), on tire au hasard une partie des attributs ( $q$  parmi les  $p$  attributs) et on choisit le meilleur découpage dans ce sous-ensemble.

— Régression : agrégation par la moyenne

$$G(x) = \frac{1}{B} \sum_i G_i(x); \quad (2.3)$$

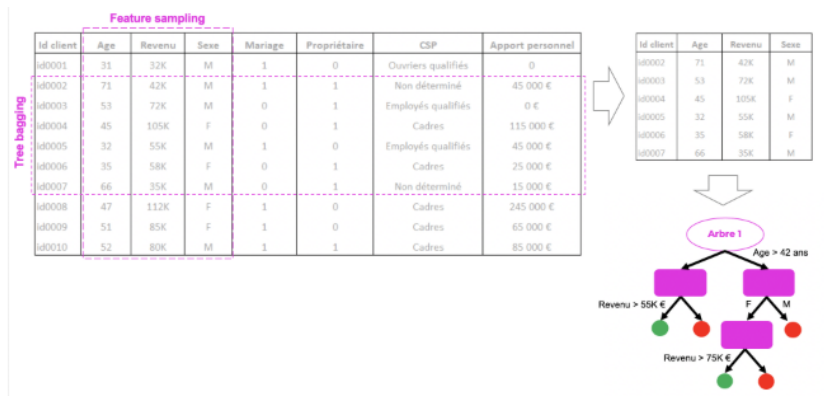
— Classement : agrégation par vote

$$G(x) = \text{Vote majoritaire}(G_1(x), \dots, G_B(x)). \quad (2.4)$$

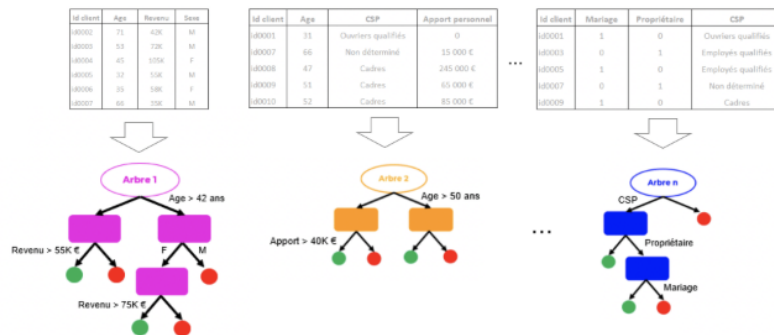
La figure ci-dessous illustre le fonctionnement des Random Forest, en montrant comment sont générés les différents arbres à partir d'échantillons aléatoires de données et de variables.

## 2.4. LA MÉTHODE RANDOM FOREST

### Construction de la première arbre de Random Forest



### Mise on oeuvre d'une Random Forest



### Prédiction de Random Forest

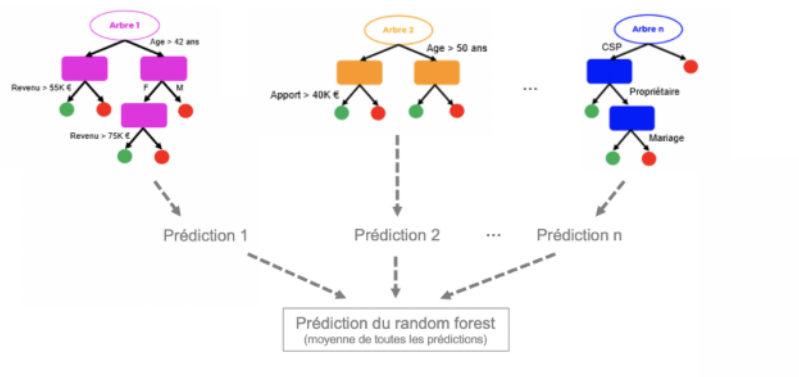


FIGURE 2.6 – Illustration du fonctionnement de la Random Forest

### 2.5 Avantages et Limites des Random Forest

#### Avantages

- Robustesse au surapprentissage grâce à l'agrégation de plusieurs arbres (méthode d'ensemble).
- Haute précision des prédictions pour les tâches de classification et de régression.
- Gère bien les données avec de nombreuses variables (hautement dimensionnelles).
- Flexibilité elles conviennent à de nombreuses tâches (classification binaire, multiclasse, régression,,).

#### Limite

- Complexité computationnelle élevée, surtout avec un grand nombre d'arbres.
- Difficulté d'interprétation : les décisions prises sont moins lisibles qu'un arbre de décision unique.
- Peut mal gérer les classes déséquilibrées si aucune stratégie de rééchantillonnage n'est appliquée.

### 2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la mise en œuvre d'un modèle prédictif fondé sur les Random Forest. Nous avons d'abord analysé les principales stratégies de stockage applicables dans un terminal à conteneurs, puis introduit les fondements du Machine Learning et des modèles d'ensemble. L'algorithme des Random Forest, en raison de sa robustesse, de sa capacité à gérer des données complexes et de son efficacité en classification, constitue un choix pertinent pour notre étude. Cette compréhension approfondie servira de fondement à la modélisation et à l'implémentation que nous aborderons dans le chapitre suivant.

---

---

## CHAPITRE 3

---

# MODÉLISATION ET RÉOLUTION DU PROBLÈME

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le problème de stockage des conteneurs au sein de l'entreprise BMT. Nous avons d'abord formulé les hypothèses fondamentales sur lesquelles repose notre démarche. Par la suite, le problème a été modélisé selon une approche dynamique, afin de mieux représenter les contraintes opérationnelles observées sur le terrain. Pour garantir sa résolution, nous avons appliqué l'algorithme de Random Forest, qui nous a permis de classer les emplacements selon leur probabilité de provoquer des remaniements. Enfin, une analyse des résultats a été réalisée, accompagnée d'améliorations visant à renforcer la pertinence et l'efficacité du modèle élaboré.

### 3.2 Les hypothèses du modèle

1. Les conteneurs sont numérotés par ordre croissant en fonction de leurs ordres d'arrivée croissante.
2. Pour chaque pile, les conteneurs sont stockés dans l'ordre décroissant de leur date de départ.
3. La zone de stockage est formée de 5 blocs.

### 3.3. LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

---

4. Il y a un seul portique de cour dans chaque bloc.
5. La localisation des conteneurs est donnée.
6. Les mouvements non productifs des conteneurs (remaniement) sont pris en compte.
7. Le chargement et le déchargement des conteneurs d'exportation et d'importation.
8. Tous les conteneurs d'une baie sont destinés au même navire.
9. On s'intéresse au type des conteneurs que BMT accueille.
10. On considère qu'une journée est composée de plusieurs périodes de stockage.
11. Les dates d'arrivée et l'ordre de débarquement des conteneurs sont connues avant le début de l'horizon de planification.
12. On suppose que les dates de la récupération des conteneurs par les clients sont connues.
13. On divise les conteneurs en plusieurs catégories. Chaque groupe est constitué de conteneurs qui ont les mêmes dimensions, la même date de départ et qui seront chargées sur le même train ou navire, ou bien qui appartiennent à un même client dans le cas des conteneurs qui sont livrés par des camions.

### 3.3 La modélisation mathématique

Pour la résolution du cas dynamique du problème de stockage de conteneurs, nous proposons le modèle mathématique suivant :

— **Les ensembles**

<b>Ensemble</b>	<b>Description</b>
$C$	Ensemble des conteneurs
$B$	Ensemble des blocs, $B = \{A, B, C, D, E\}$
$N$	Ensemble des slots (emplacements horizontaux) du bloc $b$
$R$	Ensemble des rows (rangs ou lignes de stockage) $ R  = 7$
$L$	Ensemble des tiers (niveaux de hauteur dans une pile) $ L  = 6$
$T$	Horizon de planification

— **Les paramètres**

### 3.3. LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

---

Paramètre	Description
$d_i$	Date de départ du conteneur $i$
$a_i$	blueDate d'arrivée du conteneur $i$
$S_i$	Taille du conteneur $i$
$P_i$	Type du conteneur $i$ (ex : DRY, REEFER, DG, etc.)
$M$	Un grand nombre entier (Big-M)
$K_{\max}$	Nombre maximal de déplacements autorisés
$c_{inlrt}$	Coût de déplacement du conteneur $i$ vers le slot $n$ , row $r$ , tier $l$ à l'instant $t$
$H$	Hauteur maximale des piles (nombre max de tiers)
$W$	Largeur maximale des rows (nombre max de slots par row)
$m_{inlrt}$	Nombre de déplacements inutiles
$\Delta_{\max}$	Délai maximal de stockage (11 jours)

Nous utilisons les deux variables de décision suivantes dans le modèle mathématique que nous proposons.

#### Variables de décision

$$x_{ibnlrt} = \begin{cases} 1 & \text{si le conteneur } i \text{ est placé dans le slot } n, \text{ le row } l, \text{ le tier } r, \text{ et le bloc } b \text{ à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$y_{ijbnlrt} = \begin{cases} 1 & \text{si le conteneur } i \text{ est directement au-dessus de conteneur } j \text{ dans le slot } n, \\ & \text{le row } l, \text{ le tier } r, \text{ et le bloc } b \text{ à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

À partir de ces données, nous construisons le modèle mathématique suivant.

#### Fonction objectif

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} c_{inlrt} \cdot m_{inlrt} \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (3.3)$$

### 3.3. LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

---

L'objectif est de minimiser les déplacements inutiles ainsi que leurs coût de manutention.

#### Contraintes

- **Contrainte logique : unicité de la position**

$$\sum_{b \in B} \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} x_{ibnlrt} = 1 \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (3.4)$$

Chaque conteneur  $i$  à l'instant  $t$  doit être placé à une unique position : un seul bloc, un seul slot, une seule ligne (row), un seul niveau (tier). Cette contrainte assure qu'on ne peut pas "dupliquer" un conteneur ou le placer à plusieurs endroits à la fois.

- **Pas de superposition**

$$\sum_{i \in C} x_{ibnlrt} \leq 1 \quad \forall b \in B, \forall n \in N, \forall r \in R, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (3.5)$$

Un emplacement donné à un instant donné ne peut contenir qu'un seul conteneur. On interdit donc qu'un slot soit occupé par plusieurs conteneurs en même temps.

- **Capacité maximale des piles**

$$\sum_{l \in L} \sum_{i \in C} x_{ibnlrt} \leq H \quad \forall n \in N, r \in R, b \in B, t \in T \quad (3.6)$$

Chaque pile ne peut pas dépasser sa hauteur maximale (nombre de tiers  $H$ ).

- **Largeur maximale des rangées (rows)**

$$\sum_{n \in N} \sum_{i \in C} x_{ibnlrt} \leq W \quad \forall r \in R, b \in B, t \in T \quad (3.7)$$

Assure que le nombre de slots par rangée ne dépasse pas la largeur maximale permise ( $W$ ).

- **Contrainte sur les dates de départ**

$$y_{ijlrbt} = 0 \quad \forall i, j \in C, \forall l \in L, \forall r \in R, b \in B, \forall t \in T \text{ tel que } d_i > d_j \quad (3.8)$$

Un conteneur avec une date de départ plus tardive ne peut pas être empilé au-dessus d'un conteneur avec une date de départ plus proche (pour respecter le principe de minimiser les remaniements).

- **Contrainte FIFO (First In, First Out)**

$$y_{ijlrbt} = 1 \Rightarrow (a_i < a_j \wedge d_i < d_j) \quad \forall i, j \in C, \forall l \in L, \forall r \in R, b \in B, \forall t \in T \quad (3.9)$$

Si le conteneur  $i$  est au-dessus de  $j$ , alors il doit être arrivé avant et partir avant. Cela respecte une gestion logique d'empilement en minimisant les conflits.

### 3.3. LA MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

---

— **Limitation du nombre de remaniements**

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{l \in L} m_{inrlt} \leq K_{\max} \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (3.10)$$

On limite globalement le nombre total de déplacements inutiles autorisés.

— **Contrainte d'empilement**

$$m_{inrlt} \geq d_i - M(1 - y_{ijbnrlt}) \quad \forall i, j \in C, \forall l \in L, \forall n \in N, \forall r \in R, b \in B, \forall t \in T \quad (3.11)$$

Relation logique entre l'existence de l'empilement  $y_{ijbnrlt}$  et le calcul des déplacements inutiles. Si  $y_{ijbnrlt} = 1$ , le déplacement dépend de la différence des dates de départ.

— **Compatibilité des conteneurs**

$$y_{ijbnrlt} = 0 \quad \text{si } P_i \text{ et } P_j \text{ sont incompatibles} \quad (3.12)$$

Certains types de conteneurs ne peuvent pas être empilés ensemble (ex : REEFER et DG (dangereux), DRY et REEFER, etc.).

— **Délai maximum de stockage**

$$\sum_{n \in N} \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} x_{ibnrlt} = 0 \quad \forall t > a_i + \Delta_{\max}, \forall i \in C \quad (3.13)$$

Un conteneur ne peut pas rester plus longtemps qu'une certaine durée maximale de stockage (ici 11 jours).

— **Aucun remaniement inter-bloc**

$$m_{inrlt} = 0 \quad \text{si le conteneur } i \text{ change de bloc entre } t \text{ et } t + 1 \quad (3.14)$$

Les remaniements ne peuvent pas impliquer des transferts inter-blocs (réservé aux remaniements internes dans un même bloc).

— **Stabilité intra-bloc**

$$\sum_{n,r,l} x_{ibnrlt} = 1 \Rightarrow \sum_{n',r',l'} x_{ibnrl(t+1)} \geq 1 \quad \forall i \in C, \forall b \in B, t < T \quad (3.15)$$

Si un conteneur est dans un bloc à un instant  $t$ , il doit rester quelque part (peut changer de position) dans le même bloc à l'instant suivant  $t + 1$ .

— **Non-blocage temporel**

$$y_{ijbnrlt} + y_{ijbnr(t+1)t} \leq 1 \quad \text{si } d_i < d_j \wedge a_i > a_j, \forall i, j \in C, \forall r \in R, \forall l < H, \forall b \in B, \forall t \in T \forall n \in N \quad (3.16)$$

On évite qu'un conteneur bloqué par un autre conteneur soit difficile à extraire si leurs dates d'arrivée et de départ sont contradictoires.

### 3.4. CAS D'ÉTUDE

---

- Conteneurs REEFER au début du bloc E

$$P_i = \text{"REEFER"} \Rightarrow x_{ibnrllt} = 0 \quad \text{si } b \neq E \text{ ou} \quad (3.17)$$

Les conteneurs frigorifiques (REEFER) doivent être placés au début du bloc E dans les slots réservés à cet effet .

- Ensemble des slots accessibles pour le RTG

$$x_{ibnlrt} = 0 \quad \forall n \notin N, \forall i \in C, \forall r \in R, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall b \in B \quad (3.18)$$

Lorsque le planneur annonce le pointage vers un emplacement vide dans un bloc, ce dernier choisit un emplacement où un RTG est disponible afin de permettre au camion de s'y déplacer.

## 3.4 Cas d'étude

### 3.4.1 Traitement des données

Le traitement des données constitue une étape essentielle avant l'entraînement du modèle. Il comprend le nettoyage, la création de nouvelles variables (features), l'équilibrage des classes et la préparation pour l'apprentissage automatique.

**Étape 1 – Chargement et renommage** Les données brutes sont importées depuis un fichier Excel. Certaines colonnes sont renommées pour améliorer la lisibilité et faciliter le traitement :

- `nbr dépla inutile` → `minlrt`
- `arriver, depart` → `arrival_date, departure_date`
- `bloc, slot, tier, row` : renommés sans accents

**Étape 2 – Nettoyage des dates et calculs dérivés** Les dates sont converties au format `datetime` pour calculer la durée de stockage `delta_stock`. Les lignes contenant des dates invalides sont supprimées.

```
df['delta_stock'] = (df['departure_date'] - df['arrival_date']).dt.days
```

**Étape 3 – Variables logiques** Des colonnes booléennes sont créées pour capturer des conditions pertinentes :

- `reefer_ok` : le conteneur frigorifique est dans un bloc adapté,

## 3.5. IMPLÉMENTATION PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

---

- `delta_max_exceed` : durée de stockage supérieure à 11 jours,
- `height_ok` : le niveau du conteneur (`tier`) est  $\leq 6$ .

**Étape 4 – Encodage binaire** Une variable cible `classe_remaniement` est définie comme suit : 1 si  $m_{inlrt} > 0$  (donc il y a eu remaniement), 0 sinon.

$m_{inlrt}$  est une variable continue dans le modèle mathématique. Elle désigne le nombre exact de remaniements prévus pour un conteneur, ce qui en fait une variable discrète (entière positive). Cependant, pour la classification, le but est de prédire la **présence ou non** de remaniements. Nous avons donc redéfini une cible booléenne comme suit :

$$\text{classe\_remaniement} = \begin{cases} 1 & \text{si } m_{inlrt} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Cette transformation rend possible l'utilisation d'algorithmes de classification binaire comme le Random Forest , tout en conservant l'information continue pour la régression.

### 3.4.2 Génération de données synthétiques

Afin de garantir une meilleure représentation des scénarios rares et de renforcer la capacité du modèle à généraliser, des données artificielles ont été simulées. La simulation consiste à créer des cas hypothétiques représentant des configurations optimales ou typiques rarement observées dans les données historiques. Cela répond à plusieurs objectifs :

- **Équilibrer** les classes lors de la classification,
- **Explorer** des cas extrêmes ou idéaux pour améliorer la robustesse du modèle,
- **Fournir** des exemples où les variables de décision sont bien contrôlées (e.g. conteneur bien positionné), afin d'aider le modèle à apprendre les configurations optimales.

Ces données synthétiques sont ensuite concaténées aux données réelles pour l'apprentissage.

## 3.5 Implémentation par Apprentissage Automatique

### 3.5.1 Objectif

L'objectif de cette approche est de développer un système intelligent capable, dans un premier temps, de prédire si un conteneur connaîtra des déplacements inutiles à l'aide d'un modèle de classification. Puis, une fonction d'optimisation basée sur ces prédictions est utilisée pour recommander la meilleure position de stockage possible, dans le but de minimiser les déplacements inutiles et améliorer l'efficacité globale du terminal.

## 3.5. IMPLÉMENTATION PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

### 3.5.2 Classification avec les Random Forest

**Étape 1 – Sélection des variables** On distingue les variables numériques (durée, dimensions, etc.) et catégorielles (`type`, `block`). Les variables catégorielles sont encodées via `OneHotEncoder`.

**Étape 2 – Équilibrage** L'algorithme `SMOTETomek` est appliqué afin d'augmenter la représentation de la classe minoritaire et de réduire les conflits :

```
X_resampled, y_resampled = SMOTETomek().fit_resample(X, y)
```

**Étape 3 – Entraînement** Un classifieur `RandomForestClassifier` est entraîné sur les données `X_resampled`.

**Étape 4 – Hyperparamètres utilisés** Le classifieur Random Forest a été configuré avec les hyperparamètres suivants, optimisés par validation croisée :

```
✔ Meilleurs hyperparamètres : {'max_depth': 15, 'min_samples_leaf': 1, 'n_estimators': 100}
```

FIGURE 3.1 – Meilleurs Hyperparamètres

### 3.5.3 Résultat et Discussion

- **Précision** : proportion de prédictions correctes parmi les éléments prédits comme appartenant à une classe donnée.
- **Rappel** : proportion d'éléments d'une classe correctement détectés par le modèle.
- **F1-score** : moyenne harmonique entre la précision et le rappel, offrant une mesure globale de la performance.

```
📄 Rapport de classification :
      precision    recall  f1-score   support

0         0.93      0.84      0.88       2088
1         0.94      0.97      0.96       5422

 accuracy                0.94       7510
 macro avg              0.93      0.91      0.92       7510
weighted avg              0.94      0.94      0.94       7510

✔ F1-score moyen (cross-validation 5 folds) : 0.8771
```

FIGURE 3.2 – Rapport de classification

### 3.5. IMPLÉMENTATION PAR APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

---

Ces résultats montrent que :

- Le modèle est bien **équilibré**, avec des performances similaires pour les deux classes. La précision atteint 0,93 pour la classe 0 et 0,94 pour la classe 1, traduisant une capacité du modèle à distinguer correctement les deux catégories sans biais notable.
- Le rappel est **plus élevé pour la classe 1** (conteneurs avec remaniement), ce qui est bénéfique car ce sont ces cas que l'on souhaite détecter en priorité.
- Le **F1-score élevé (0.96)** pour la classe 1 confirme une très bonne capacité du modèle à identifier les conteneurs problématiques.
- Le rappel plus faible (0.84) pour la classe 0 indique qu'il reste quelques cas sans remaniement que le modèle classe à tort comme ayant des remaniements, mais ce compromis est acceptable dans une optique de prévention logistique.

**Validation croisée.** Le modèle a également été évalué à l'aide d'une validation croisée à 5 plis (5-fold cross-validation), ce qui permet de vérifier la robustesse du modèle sur différents sous-ensembles du jeu de données.

- Le F1-score moyen obtenu sur les différentes itérations est de **0.8771**.
- Ce résultat confirme que le modèle est **stable et généralisable**, avec de bonnes performances même sur des données non vues lors de l'entraînement.

#### 3.5.4 Détermination de la Meilleure Position de Stockage à l'Aide du Classifieur

Suite à l'entraînement du classifieur forêt aléatoire sur notre jeu de données enrichi et équilibré, une application concrète de ce modèle a été développée pour répondre à un enjeu opérationnel majeur : réduire les remaniements en déterminant la meilleure position initiale pour chaque nouveau conteneur. Nous avons conçu une fonction automatisée nommée

```
meilleure_pos = trouver_meilleure_position(...)
```

qui exploite le modèle de classification pour simuler diverses configurations de stockage possibles (bloc, slot, rangée, niveau) pour un nouveau conteneur tout en respectant les contraintes réelles du terminal (zone frigorifique, hauteur maximale, etc.) . Pour chaque configuration possible, un vecteur de caractéristiques est généré, encodé et soumis au modèle de classification. Ce dernier prédit s'il y aurait un remaniement (`classe_remaniement = 1`) ou non (0).

L'algorithme sélectionne ensuite la configuration qui minimise cette prédiction.

Voici un exemple de position optimale retournée par cette méthode :

### 3.6. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

---

**Exemple de meilleure position prédite** Pour un conteneur DRY de taille 40 arrivant le 15/06/2025 et partant le 22/06/2025, la meilleure position prédite est :

```
size           40
tier           1
row            1
slot_num       1
delta_stock    7
reefer_ok      False
delta_max_exceed False
height_ok      True
type           DRY
block          A
predicted_remaniements 0
```

FIGURE 3.3 – Rapport de classification

### 3.6 Interprétation des résultats

Le modèle de classification par forêt aléatoire a été évalué à l'aide de trois métriques classiques : la précision, le rappel et le F1-score. Ces résultats permettent d'évaluer la capacité du modèle à identifier correctement les conteneurs qui subiront ou non un remaniement.

- **Classe 0 (sans remaniement) :**
  - **Précision = 0.93** : parmi les conteneurs prédits comme « sans remaniement », 93% sont corrects.
  - **Rappel = 0.84** : 84% des conteneurs réellement sans remaniement ont été correctement identifiés.
  - **F1-score = 0.88** : équilibre entre précision et rappel, montrant une bonne performance, bien que certains cas soient encore confondus avec la classe 1.
- **Classe 1 (avec remaniement) :**
  - **Précision = 0.94** : 94% des prédictions « remaniement » sont correctes.
  - **Rappel = 0.97** : le modèle est très efficace pour identifier les conteneurs problématiques (remaniés).
  - **F1-score = 0.96** : excellente performance sur cette classe majoritaire.

### 3.7. COMPARAISON ENTRE LE SYSTÈME IPROSS ET NOTRE MODÈLE PRÉDICTIF

---

- **F1-score moyen = 0.94** : Ce score global élevé indique une très bonne capacité du modèle à généraliser sur des données nouvelles.

Le rappel plus faible sur la classe 0 indique que certains conteneurs non remaniés sont parfois prédits à tort comme remaniés. Cela peut s'expliquer par un déséquilibre initial des classes, ou une ressemblance structurelle entre certains cas. Le recours à SMOTETomek a toutefois bien amélioré cette différenciation.

### 3.7 Comparaison entre le système IPROSS et notre modèle prédictif

Le système actuellement utilisé par l'entreprise BMT, appelé **IPROSS**, fonctionne avec des méthodes de gestion manuelle pour stocker le type et la taille des conteneurs, ainsi que sur les emplacements disponibles. Même si ce système est utile et fonctionne bien, il ne prend pas en compte les conséquences possibles des choix de placement, comme le nombre de remaniements futurs ou les coûts de manutention.

Contrairement à cela, nous avons développé un modèle basé sur l'algorithme **Random Forest**, qui utilise des données historiques pour prédire la probabilité de remaniement associée à chaque position de placement. Cela permet de faire des choix plus pertinents en évitant de placer les conteneurs dans des zones à risque, et donc de réduire les déplacements inutiles et leurs coûts de manutention.

Critère	Système IPROSS	Modèle Proposé
Méthode d'affectation	Règles manuelles ou semi-automatisées	Optimisation intelligente par simulation
Prise en compte des remaniements	Non	Oui, via apprentissage supervisé
Capacité d'auto amélioration	Non	Oui, modèle réentraînable
Personnalisation	Limitée	Très fine (taille, type, durée de stockage, etc.)
Temps de décision	Variable	Stable et rapide
Taux de remaniement observé	Élevé	Réduit selon la simulation

TABLE 3.1 – Comparaison entre le système IPROSS et notre modèle prédictif

Cette comparaison montre clairement que l'utilisation d'un modèle prédictif peut améliorer

### 3.8. CONCLUSION

---

le système existant, en aidant à prendre des décisions plus efficaces et plus économiques.

### 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation claire et structurée du problème de stockage des conteneurs dans le terminal de l'entreprise BMT. En nous appuyant sur des hypothèses réalistes et en tenant compte des contraintes physiques et opérationnelles, basées sur le fonctionnement réel du port, nous avons construit un modèle mathématique dynamique visant à minimiser les déplacements inutiles afin de réduire les coûts de manutention associés.

Nous avons aussi utilisé l'apprentissage automatique, en particulier l'algorithme de Random Forest, pour améliorer notre méthode. Ce modèle prédictif nous a permis de repérer les emplacements qui risquent de causer des remaniements. Les résultats montrent que notre approche est à la fois précise et fiable, surtout pour détecter les situations où des problèmes peuvent apparaître.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail, nous avons abordé le problème complexe du stockage des conteneurs dans le terminal portuaire de l'entreprise BMT, dans un premier temps nous avons analysé le fonctionnement de l'entreprise de ses équipements et la manière dont est géré le parc à conteneurs. En particulier nous avons étudié le système de gestion IPROSS qui considère le processus de stockage.

Pour résoudre ce problème de stockage des conteneurs, nous avons testé une nouvelle méthode en utilisant l'algorithme des forêts aléatoires. On a d'abord décrit le problème avec des outils mathématiques, puis on a utilisé des données réelles de la BMT pour apprendre au modèle à choisir les bonnes positions de stockage. Grâce à cette méthode, nous avons réussi à mieux prévoir où placer les conteneurs, à limiter les déplacements inutiles et rendre le travail plus fluide.

Cela montre que l'intelligence artificielle peut vraiment améliorer la logistique dans les terminaux portuaires. Il ouvre également la voie à des perspectives d'amélioration, notamment en explorant d'autres algorithmes de machine learning ou en intégrant des données en temps réel pour rendre le système encore plus.

Cependant, plusieurs améliorations sont possibles. D'abord, on pourrait ajouter un modèle de régression pour compléter la classification. Cela permettrait d'anticiper le nombre précis de remaniements prévus pour chaque position, offrant ainsi un signal plus exact. De plus, l'utilisation de la fonction `predict_proba` qui fournit les probabilités associées à chaque classe, permettrait de sélectionner l'emplacement présentant le risque le plus faible de remaniement. D'autre part, au lieu d'explorer toutes les positions possibles, il est envisageable d'appliquer des méthodes d'optimisation plus sophistiquées, telles que la recherche tabou ou les algorithmes génétiques.

---

Ces approches pourraient rendre le système plus rapide et plus efficace. Enfin, il est possible de rendre le modèle plus réaliste en intégrant des contraintes du terrain, telles que la disponibilité en temps réel des emplacements ou les priorités des clients. Cela rendra les recommandations plus pertinentes et plus faciles à mettre en œuvre dans les opérations quotidiennes du terminal.

---

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Arzouz and F. Touahri. Influence de l'Opération Livraison sur l'Évaluation des Performances du Terminal à Conteneur BMT – Port de Béjaïa. Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2012. Mémoire d'Ingéniorat, juillet.
- [2] N. Ayache and R. Hidja. Évaluation des Performances du Terminal à Conteneurs BMT (Bejaïa Mediterranean Terminal). Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, n.d. Mémoire d'Ingéniorat.
- [3] C. A. Azencott. Introduction au machine learning. Dunod, 2<sup>e</sup> éd. édition, 2022.
- [4] D. Aïssani, S. Adjabi, M. Cherfaoui, T. Benkhellat, and N. Medjkoune. Forecast of the traffic and performance evaluation of the bmt container terminal (bejaïa's harbor). In Rapid Modelling for Increasing Competitiveness : Tools and Mindset, pages 53–64. Springer Verlag, 2009.
- [5] D. Aïssani, M. Cherfaoui, S. Adjabi, S. Hocine, and Zareb. Optimal management of equipments of the bmt container terminal (bejaïa's harbor). In Rapid Modelling and Quick Response. Integration of Theory and Practice, pages 33–46. Springer Verlag, 2010.
- [6] Y. Ben Abdellah and K. Homrani. Optimisation du Plan d'Affectation des Équipes au niveau de l'entreprise BMT (Bejaïa Mediterranean Terminal). Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2014. Mémoire de Master, juin.
- [7] L. Benkerrou and C. Bendjoudi. Analyse de fiabilité pour l'optimisation de la maintenance préventive : Application aux équipements de manutention de BMT. Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2013. Mémoire de Master, juin.

- 
- [8] N. Bernine. Détermination du Nombre Optimal des Camions Remorqueurs au Niveau du Terminal à Conteneurs BMT. Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2009. Mémoire d'Ingénieur, juin.
- [9] BMT Support Web. BMT Support Web, Apr. 2025. <https://bejaiamed.com/>.
- [10] B. Borgman, E. van Asperen, and R. Dekker. Online rules for container stacking. OR Spectrum, 32 :687–716, 2010.
- [11] B. Castilho and C. F. Daganzo. Handling strategies for import containers at marine terminals. Transportation Research Part B : Methodological, 27 :151–166, 1993.
- [12] T. Chen. Yard operations in the container terminal — a study in the "unproductive" moves. Maritime Policy & Management, 26 :27–38, 1999.
- [13] R. Dekker, P. Voogd, and E. van Asperen. Advanced methods for container stacking. In Container Terminals and Cargo Systems, pages 131–154. 2007.
- [14] M. B. Duinkerken, J. J. M. Evers, and J. A. Ottjes. A simulation model for integrating quay transport and stacking policies on automated container terminals. In Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference, Prague, Czech Republic, 2001.
- [15] Entreprise BMT. Manuel d'utilisation du logiciel IPROS – Système de gestion des opérations portuaires. Bejaia Mediterranean Terminal, 2024. Documentation interne.
- [16] M. Ferecatu. Apprentissage, réseaux de neurones et modèles graphiques (rcp209) : Arbres de décision. <http://cedric.cnam.fr/vertigo/Cours/ml2/>, 2025. Cours, Département Informatique, CNAM, Paris, France.
- [17] A. Géron. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media, 2nd edition, 2019. Consulté le 20 juin 2025.
- [18] IBM. Qu'est-ce que l'apprentissage par ensemble (ensemble learning) ?, 2024. Consulté le 20 juin 2025.
- [19] IBM. Qu'est-ce que le machine learning ?, 2024. Consulté le 19 juin 2025.
- [20] IONOS. Deep learning vs. machine learning : quelles différences ?, 2025. Consulté le 20 juin 2025.
- [21] N. Kasabian. Optimisation du stockage des conteneurs dans un terminal portuaire. Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2022. Infrastructures de transport. NNT : 2022MULH407, tel-04082720.

- [22] Y. Ma and K. H. Kim. A comparative analysis : Various storage rules in container yards and their performances. Industrial Engineering & Management Systems, 11 :276–287, 2012.
- [23] S. Mebarki and M. Zitouni. Évaluation de Performance de la nouvelle zone extra-portuaire ZEP plein et son impact sur la congestion du parc. Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2015. Mémoire de Master, juillet.
- [24] M. A. Moali and L. M. Alem. Influence des RTG et du Call Center dans l'Évaluation des Performances du Terminal à Conteneur BMT – Port de Béjaïa. Université de Béjaïa, Département de Recherche Opérationnelle, 2011. Mémoire d'Ingénieur, juillet.
- [25] F. N. Ndjaye. Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire. PhD thesis, Université du Havre, 2016. Thèse non publiée.
- [26] Olcya. Machine learning : Introduction générale, 2015. Consulté le 20 juin 2025.
- [27] Y. A. Saanen and R. Dekker. Intelligent stacking as way out of congested yards ? part 1. Port Technology International, 31 :87–92, 2007.
- [28] R. Sait, N. Zerrougui, S. Adjabi, and D. Aïssani. Évaluation des performances du parc à conteneurs de l'entreprise portuaire de béjaïa. In Proceedings of the International Conference Sada'07 (Applied Statistics for Development in Africa), Cotonou, Bénin, 2007.
- [29] M. Taleb-Ibrahimi, B. D. Castilho, and C. F. Daganzo. Storage space vs handling work in container terminals. Transportation Research Part B : Methodological, 27 :13–32, 1993.
- [30] Équipe Blent. Random forest : comment ça fonctionne ?, 2022. Publié le 12 janvier 2022. Consulté le 20 juin 2025.

# ANNEXES

L'annexe présente un tableau récapitulatif des vols avec leurs caractéristiques principales, incluant les références intrinsèques, les dates d'arrivée et de départ, les clients concernés, ainsi que les informations logistiques associées à chaque opération.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	nbr dépla inutile	Container No.1	Size	Type	arrivee	depart	client	transit	bloc	slot	tier	row
2	4	AMFU200434-9	20	UT	05/01/2025 09:09	28/01/2025 00:54	SARL HARD MARMI STONE	MIZI	D	36-36	3	1
3	4	AMFU874449-2	40	HC	26/12/2024 20:01	25/01/2025 18:39	SARL LASS PLASTIC	TRANSIBA	D	5-6	5	4
4	4	AMFU883837-5	40	DC	19/09/2024 07:00	14/10/2024 14:35	CONDOR ELECTRONICS SPA	INTRIMEX	P25	13-14	6	2
5	1	AMFU883941-1	40	DC	08/10/2024 08:12	09/11/2024 10:09	EURL BATOT TRADING	GABIS TST	C	37-38	4	7
6	2	AMFU885843-7	40	HC	16/12/2024 10:00	23/01/2025 23:34	SARL TRUST OFFICE TRADING	HAMMACHE DIAMEL	A	40-41	6	7
7	4	AMFU8891949-5	45	DC	01/11/2024 00:00	14/11/2024 23:14	SARL ZABOUB SIWOLUX ELECTRO	HAMMACHE DIAMEL	D	5-6	2	2
8	3	APHU464348-6	45	DC	07/09/2024 04:30	13/10/2024 12:04	SARL MAGIC STAR FABRICATION DE	EL BAHDJAOUI	D	52-53	2	3
9	2	APHU467180-5	45	DC	17/11/2024 01:00	09/12/2024 22:37	EURL GOLDEN HOUSE MIDOU IMPEX	HAMMACHE DIAMEL	D	52-53	4	2
10	5	APHU467614-0	40	DC	08/10/2024 08:12	13/11/2024 10:01	BRASSERIE STAR DALGÉRIE SPA	ISAAD FARIQ	A	50-51	1	3
11	0	APHU658091-5	40	DC	19/09/2024 07:00	13/10/2024 22:27	BLEU TERGUI SARL	TRANSIT TRANSKAMO	A	50-51	4	6
12	3	APHU659798-6	40	DC	30/12/2024 00:00	25/01/2025 10:03	EURL BYS ETOILE IMPORT EXPORT	INTRIMEX	P25	15-16	2	3
13	1	APHU682010-6	40	DC	05/01/2025 23:14	24/01/2025 00:58	EURL ARIS SHOES	GEOTRANS LOGISTICS	C	5-6	5	6
14	3	APHU688520-0	40	DC	08/12/2024 12:01	19/01/2025 21:35	RAM WOOD SARL	IDRES	A	18-19	3	3
15	3	APHU696427-4	40	DC	08/12/2024 12:01	18/12/2024 23:49	CONDOR ELECTRONICS SPA	INTRIMEX	C	44-45	2	1
16	2	APHU700843-7	40	DC	05/01/2025 23:14	27/01/2025 22:16	MOBILYA MENARA SARL	HAMMACHE DIAMEL	A	10-11	1	2
17	4	APHU701505-6	40	DC	20/10/2024 21:00	17/11/2024 15:10	EURL BYS ETOILE IMPORT EXPORT	INTRIMEX	C	17-18	5	4
18	0	APHU707044-9	40	DC	12/12/2024 22:00	07/01/2025 09:07	CEVITAL SPA	SPA CEVITAL	C	44-45	4	2
19	3	APHU721531-0	40	DC	17/11/2024 01:00	03/12/2024 21:12	ELNEGEM LILHASSIR PLASTIQUE EU	INTRIMEX	C	15-16	3	1
20	0	APHU722909-0	40	DC	19/12/2024 17:56	07/01/2025 23:07	SARL FRERES BOUKREDRA	HAMMACHE DIAMEL	C	15-16	3	2
21	3	APHU723340-1	40	DC	05/01/2025 23:14	28/01/2025 22:02	MOBILYA MENARA SARL	HAMMACHE DIAMEL	E	21-22	1	4
22	5	APHU727149-0	40	DC	01/11/2024 00:00	17/11/2024 20:48	SARL ELECTROMEC	INTRIMEX	E	10-11	2	2
23	1	APHU727236-8	40	DC	08/12/2024 12:01	24/12/2024 22:53	SPA CONDOR ENGINEERING	INTRIMEX	D	10-11	4	4
24	0	APHU728850-7	40	DC	20/10/2024 21:00	19/11/2024 10:49	EURL BYS ETOILE IMPORT EXPORT	INTRIMEX	C	37-38	4	2
25	1	APHU729961-0	40	DC	28/11/2024 16:58	12/12/2024 17:45	EURL HIGH STAR IMPORT EXPORT	INTRIMEX	E	14-15	2	1
26	1	APHU732067-7	40	DC	24/01/2025 00:00	02/02/2025 13:25	CONDOR ELECTRONICS SPA	INTRIMEX	C	47-48	1	3
27	3	APHU733519-4	40	DC	18/12/2024 00:14	30/12/2024 01:46	SPA GENERAL EMBALLAGE	OUAHMED	C	28-29	3	3
28	3	APHU733572-2	40	DC	18/12/2024 00:14	04/01/2025 11:46	IBARAR EMBALLAGE	BOURGHIT A KRIM	D	47-48	3	3
29	2	APHU736460-7	40	DC	11/12/2024 09:56	26/12/2024 18:39	PRO LIFE IMPORT EXPORT SARL	SETIMEX	A	54-55	3	1
30	0	APHU738087-1	40	DC	12/12/2024 22:00	25/01/2025 12:17	SARL KDA EMBALLAGE	EL SALEM	A	44-45	3	3
31	3	APHU738241-0	40	DC	01/11/2024 00:00	19/11/2024 12:10	SARL NL KIMYA	GABIS TST	E	16-17	6	2
32	3	APHU738991-9	40	DC	19/12/2024 17:56	08/01/2025 18:59	SARL NEDIMEDINE PLAST	CHEKROUN ET FILS TST	A	54-55	6	6
33	1	APHU739715-4	40	DC	11/12/2024 09:56	26/12/2024 22:41	PRO LIFE IMPORT EXPORT SARL	SETIMEX	D	37-38	5	7

FIGURE 4 – Données

---

# Résumé

---

Le problème de stockage des conteneurs est l'un des plus courants et importants problèmes dans un terminal à conteneurs. L'objectif de ce mémoire est de créer un plan de stockage optimal qui définit l'emplacement idéal pour chaque conteneur tout en tenant compte des contraintes réelles de la zone de stockage.

Pour cela, une approche basée sur l'apprentissage automatique, et plus précisément l'algorithme Random Forest a été adoptée.

Les résultats obtenus montrent une précision satisfaisante du modèle dans la prédiction des emplacements optimaux. Cette approche a permis de réduire les remaniements inutiles et d'améliorer l'efficacité du processus de stockage.

**Mots-clés** : Entreprise BMT, Conteneur, Modélisation Mathématique, Random Forest, Meilleure Position

---

# Abstract

---

The container storage problem is one of the most common and important issues in a container terminal. The objective of this thesis is to create an optimal storage plan that defines the ideal location for each container while taking into account the real constraints of the storage area.

To achieve this, a machine learning-based approach, specifically the Random Forest algorithm, has been adopted.

The results obtained show a satisfactory accuracy of the model in predicting optimal container positions. This approach helped reduce unnecessary reshuffling and improve the efficiency of the storage process.

**keywords** : BMT Company, Container, Mathematical Modeling , Random Forest, Optimal Position.

---