



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et
Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des
Technologies Avancées



Département : Génie Logistique Et Transport
Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

D'INGÉNIEUR D'ÉTAT

-Filière-
Ingénierie des transports
-Spécialité-
Ingénierie des Transports
- Thème -

Développement d'une plateforme de réservation, suivi de conteneurs et prédiction des opérations portuaires

Réalisé par
RAMDANI Dounya et SAHA Louiza Mallek

Les membres du Jury :

Mr. ANNAD Oussamma	Président/MCB
Mr. AGGUINI Chafik	Promoteur/MAB
Mme. REZKI Nafissa	Co-Promotrice/MCB
Mme.TOUMI Manel	Examinatrice/MCB

Alger, le 28 /06/ 2025

Année universitaire 2024–2025

DÉDICACES

*À mes parents,
pour leur amour,
leurs sacrifices et leur soutien constant
qui ont rendu ce parcours possible.*

*À mon frère et ma sœur,
pour leur encouragement
et leur présence réconfortante.*

*À mes amis,
pour avoir rendu ce voyage
plus ludique et moins solitaire.*

*Et enfin à Luna,
pour sa compagnie silencieuse
et sa joie communicative.*

Dounya

DÉDICACES

*À mes parents,
pour leur amour inconditionnel,
leurs sacrifices et leur soutien indéfectible
tout au long de mon parcours.*

*À ma sœur et mon frère,
pour leur affection, leurs encouragements
et leur présence rassurante.*

*À ma tante bien-aimée,
qui a toujours cru en moi
et m'a entourée de tendresse et de conseils.*

*À toute ma famille,
ma grand-mère, mes tantes, mes cousins et cousines,
pour leur amour et leur soutien.*

*À mes amies,
pour leur écoute, leur humour
et les moments de complicité partagés.*

*À toutes les personnes
qui m'ont aidée, inspirée et accompagnée
durant mon cursus académique.*

Mallek

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant universitaire, Monsieur AGGUINI Chafik, pour son accompagnement, ses conseils avisés et son suivi rigoureux tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent également à notre co-encadrante, Madame REZKI Naffisa, pour sa disponibilité, son écoute et son soutien constant.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble du corps professoral qui nous a accompagnés tout au long de notre cursus universitaire. Leur expertise, leur dévouement et la qualité de leur enseignement ont été déterminants dans notre formation et nous ont permis d'acquérir les connaissances et compétences nécessaires à la réalisation de ce projet.

Nous remercions chaleureusement LAOUBI Mohamed Nadjib, HAMADA Hala, nos encadrants au sein de l'entreprise Medagensea, pour leur encadrement et leurs orientations précieuses. Nous exprimons également notre reconnaissance à Monsieur Raouf ainsi qu'à Monsieur Noufel, encadrants au sein de DP World Alger, pour leur collaboration et leur appui tout au long de notre stage.

Nos sincères remerciements vont à toute l'équipe de DP World Alger pour leur accueil, leur professionnalisme et leur soutien, ainsi qu'à l'ensemble de l'équipe de Medagensea pour leur implication et leur esprit de partage.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

في ظل التحول الرقمي المتسارع في قطاع اللوجستيك، يعرض هذا البحث مشروع تطوير منصة إلكترونية تدعى CONTRACK، مخصصة لحجز وتتبع الحاويات البحرية، بالإضافة إلى التنبؤ بالعمليات المينائية. تهدف المنصة إلى تجاوز القيود المرتبطة بالطرق التقليدية اليدوية السائدة في الجزائر. تعتمد المنصة على تقنيات حديثة مثل React و REST Django و XGBoost، وتتيح للمستخدمين تقديم طلبات الحجز، متابعة حالة الحاويات، والحصول على توقعات دقيقة لمواعيد الوصول والتسليم استناداً إلى قاعدة بيانات تاريخية تضم أكثر من 10,000 عملية شحن. تساهم هذه المنصة في تحسين التفاعل بين العملاء وشركات النقل البحري، من خلال تعزيز الشفافية والكفاءة وقابلية التتبع.

الكلمات المفتاحية: لوجستيك، حاويات، حجز، تتبع، تنبؤ، تعلم آلي، منصة إلكترونية

RÉSUMÉ

Dans un contexte de transformation numérique du secteur logistique, ce mémoire présente le développement de CONTRACK : une plateforme web dédiée à la réservation, au suivi des conteneurs maritimes et à la prédiction des opérations portuaires. L'objectif est de répondre aux limites des systèmes traditionnels encore majoritairement manuels en Algérie. En s'appuyant sur des technologies modernes (React, Django REST, XGBoost), cette solution permet aux utilisateurs de réserver des conteneurs, de suivre leur statut opérationnel et d'anticiper les délais logistiques grâce à un module de machine learning entraîné sur plus de 10 000 historiques d'expéditions. L'approche proposée vise à fluidifier les échanges entre clients et compagnies maritimes, tout en améliorant la transparence, l'efficacité et la traçabilité.

Mots-clés : Logistique, conteneurs, réservation, suivi, prédiction, machine learning, web platform.

ABSTRACT

In a context of digital transformation in the logistics sector, this thesis presents the development of CONTRACK : a web platform dedicated to container booking, tracking, and port operation forecasting. The aim is to overcome the limitations of traditional, often manual systems still prevalent in Algeria. Using modern technologies (React, Django REST, XGBoost), the solution enables users to book containers, monitor operational status, and predict logistics delays through a machine learning module trained on over 10,000 shipment records. The proposed system enhances interaction between clients and shipping companies, while promoting transparency, efficiency, and traceability.

Keywords : Logistics, containers, booking, tracking, prediction, machine learning, web platform.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Présentation de l'environnement d'accueil et la logistique	3
1.1 Introduction	4
1.2 Industrie portuaire	4
1.2.1 Présentation de l'industrie portuaire	4
1.2.2 Définition et fonctionnement des ports	5
1.2.3 Organisation et classification des ports	6
1.3 Principaux défis dans la gestion portuaire	7
1.3.1 Congestion portuaire	7
1.3.2 Enjeux environnementaux	7
1.3.3 Autres défis	7
1.4 Rôle des armateurs dans le transport maritime	8
1.5 Présentation de l'environnement d'accueil	8
1.5.1 DP World	8
1.5.3 Présentation de MedAgensea (Représentant de COSCO en Algérie . .	9
1.6 La logistique maritime	10
1.6.1 Définition et rôle dans les chaînes d'approvisionnement	10
1.6.2 La Logistique 4.0	11
1.6.3 Place de la logistique dans le commerce international	11
1.7 Conclusion	13
Chapitre 2 : Cadre théorique et concepts de base	14
2.1 Introduction	15
2.4 Conteneurisation	15
2.4.1 Définition du concept de conteneurisation	15
2.4.2 Objectifs et avantages du transport conteneurisé	15
2.4.3 Origine et invention du conteneur	15
2.4.4 Expansion et standardisation	16
2.4.5 Fonctionnement et chaîne logistique du terminal de conteneur	17
2.5 Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC	17
2.5.1 Acteurs opérationnels	17
2.5.2 Acteurs du transport	18
2.5.3 Acteurs logistiques et commerciaux	18
2.5.4 Collaboration entre acteurs via le numérique	19
2.6 Processus de dédouanement	19
2.7 La conteneurisation face aux défis technologiques	20
2.7.1 Digitalisation et automatisation des conteneurs	20
2.7.2 Rôle de l'Intelligence Artificielle dans la conteneurisation	21
Conclusion	22

Chapitre 3 : État de l'art	23
3.1 Introduction	24
3.2 Technologies utilisées dans la gestion logistique	24
3.2.1 Systèmes d'information logistique	24
3.2.2 Technologies utilisées pour le suivi des conteneurs	25
3.2.3 Modèles d'optimisation et de prédiction	27
3.3 Revue de littérature	36
3.4 Conclusion	39
Chapitre 4 : Développement de la solution	40
4.1 Introduction	41
4.2 Ensemble des principales fonctionnalités	41
4.3 Justification des choix techniques	41
4.4 Conception de la solution	43
4.4.1 Architecture générale	43
4.4.2 Description des acteurs du système	44
4.4.3 Schéma relationnel de la base de données	45
4.4.4 Diagrammes UML - Système de Gestion de Conteneurs	47
4.5 Développement des fonctionnalités	50
4.5.1 Module de prédiction et de suivi des opérations portuaires	50
4.5.2 Réservation de conteneurs	54
4.5.3 Gestion des utilisateurs	57
4.5.4 Interface d'administration	60
4.5.5 Design et ergonomie	62
4.5.6 Sécurité et authentification	62
4.5.7 Difficultés rencontrées et solutions apportées	63
4.6 Conclusion	64
Conclusion générale	66
Bibliographie	69

Liste des tableaux

1.1	Classification des ports selon différents critères - Élaboration propre - . . .	6
3.1	Revue de littérature - Élaboration propre -	38
4.1	Description du jeu de données - Élaboration propre -	51
4.2	Tableau comparatif des modèles - Élaboration propre -	52
4.3	Paramètres collectés via le formulaire	54
4.4	Informations clés de la plateforme	60

Table des figures

1.1	Fonctionnement d'un port maritime	5
1.2	Top 8 armateurs en 2025	8
1.3	Diagramme du Structure organisationnelle - Diagramme extrait de la documentation interne de l'entreprise de stage	9
1.4	Diagramme du Structure organisationnelle -Diagramme extrait de la documentation interne de l'entreprise de stage	10
1.5	Fonctionnement des ports maritimes dans la chaîne logistique - Élaboration propre -	11
2.3	Historique et évolution de la conteneurisation	16
3.3	Types de conteneurs	16
2.5	Fonctionnement du terminal de conteneur	17
2.6	Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC	19
3.1	Facteurs et informations influençant le TAE [41]	25
3.2	Schéma de fonctionnement d'un capteur de position [46]	26
3.3	Suivi des expéditions avec IoT [45]	26
3.4	Principe de fonctionnement de la RFID [34]	27
3.5	Organigramme de la régression par foret aléatoire [39]	29
3.6	Schema structurel de XGBoost [39]	29
3.7	Schéma structurel d'un algorithme d'arbre de décision [39]	30
3.8	L'architecture LSTM [41]	31
3.9	L'architecture de la méthode VATP [41]	31
3.10	Schéma conceptuel de la recherche [42]	33
4.1	Architecture MVC du système	43
4.2	Diagramme de cas d'utilisation -Élaboration propre-	47
4.3	Modèle conceptuel UML - Élaboration propre-	49
4.4	Workflow du module de prédiction -Élaboration propre-	51
4.5	Affichage des prédictions côté client	53
4.6	Formulaire de réservation côté client (vue complète)	55
4.7	Tableau de gestion des réservations dans l'interface admin	55
4.8	Détail d'une réservation côté admin	56
4.9	Exemple d'e-mail de notification reçu par le client après validation	56
4.10	Formulaire d'édition d'un conteneur	57
4.11	Formulaire d'inscription client	58
4.12	E-mail de mise en attente	58
4.13	Détails d'un utilisateur côté admin	59
4.14	E-mail d'envoi des identifiants de connexion	59
4.15	Tableau de bord administrateur	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
AIS	Automatic Identification System
API	Application Programming Interface
BL	Bill of Lading
CNN	Convolutional Neural Networks
CNUCED	Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement
ECH	Empty Container Handler
ERP	Entreprise Resource Planning
EVP	Equivalent Vingt Pieds
ETA	Estimated Time of Arrival
GES	Gas à Effet de Serre
GNL	Gas Naturel Liquéfié
GPS	Global Positioning System
IA	Intelligence Artificielle
IOT	Internet Of Things
IPL	Indice de Performance Logistique
ISO	Organisation for Standardization
ITV	Véhicule de Transport Interne
JWT	JSON Web Token
LSTM	Long Short-Term Memory
MAE	Mean Absolute Error
ML	Machine Learning
MVC	Modèle-Vue-Contrôleur
OMI	Organisation Maritime Internationale
PME	Petite et Moyenne Entreprise
RMSE	Root Mean Squared Error
RFID	Radio Frequency Identification
RF	Random Forest
RL	Reinforcement Learning
RS	Reach Stacker
RTG	Rubbed Tired Gantry cases
STI	Sciences et Technologies de l'Information
STI	Systèmes de Transport Intelligents
TC	Twenty-Foot Container
TMS	Transport Management System
WMS	Warehouse Management System
XGB	Extreme Gradient Boosting

Introduction générale

Introduction générale

Dans un monde où les échanges internationaux s'intensifient à un rythme soutenu, la logistique s'impose comme un levier stratégique de compétitivité pour les entreprises et un maillon essentiel de la fluidité des chaînes d'approvisionnement. Le transport maritime, qui assure plus de 80% du volume du commerce mondial, joue un rôle central dans cette dynamique.

Pourtant, derrière cette puissance logistique se cachent des réalités complexes : la gestion des opérations portuaires implique une multitude d'acteurs : clients, compagnies maritimes, transitaires et souffre souvent d'un manque de coordination, de transparence et d'automatisation, notamment dans la gestion des réservations de conteneurs. Ces inefficacités peuvent entraîner des retards, des surcoûts et une lourde charge administrative.

La transformation numérique, en plein essor, offre des opportunités majeures pour repenser ces processus logistiques. Des outils technologiques innovants émergent, portés par le développement du web, des systèmes intelligents et de l'analyse de données. Cependant, ces solutions sont souvent trop généralistes ou insuffisamment adaptées aux spécificités locales, en particulier pour les petites et moyennes entreprises.

En Algérie, comme dans de nombreux pays en développement, les réservations de conteneurs sont encore largement effectuées de manière manuelle ou à l'aide de systèmes partiellement informatisés. Cette situation engendre des erreurs, des délais de traitement importants et un manque de visibilité sur l'ensemble du processus.

Face à ce constat, il devient impératif de concevoir une solution numérique intelligente, accessible et contextualisée. Une plateforme web capable non seulement de centraliser les demandes de réservation, mais aussi d'en assurer le suivi, d'intégrer des mécanismes de validation administrative, et de proposer des fonctions de prédiction logistique basées sur l'analyse des données historiques.

La problématique principale à laquelle nous souhaitons répondre est la suivante :

Comment concevoir une plateforme web de réservation et de suivi de conteneurs maritimes capable de fluidifier les échanges entre clients et compagnies, tout en intégrant des mécanismes de validation, de prédiction logistique, et une interface adaptée aux différents utilisateurs ?

Afin de répondre à cette problématique, le mémoire a été structuré autour de quatre chapitres :

Chapitre 1 : Présentation de l'environnement d'accueil et de la logistique

Ce chapitre présente le contexte du stage ou du projet, l'entreprise ou l'environnement académique dans lequel il s'inscrit, ainsi que les besoins logistiques identifiés qui ont motivé la conception de la solution.

Chapitre 2 : Cadre théorique et concepts de base

Il s'agit ici de poser les fondations théoriques nécessaires à la compréhension du projet, en abordant notamment :

- Le transport maritime et la logistique portuaire
- Les systèmes d'information logistiques
- Le développement web moderne (React, Django REST)
- Les notions de prédiction en machine learning

Chapitre 3 : État de l'art

Ce chapitre fait le point sur les solutions existantes dans le domaine de la réservation et du suivi logistique maritime. Il met en évidence les limites de ces outils, les innovations récentes, ainsi que les opportunités d'amélioration, sur la base d'une analyse documentaire rigoureuse.

Chapitre 4 : Développement de la solution

Ce chapitre décrit de manière détaillée la conception et la réalisation de la plateforme :

- L'architecture générale (front-end / back-end)
- Les fonctionnalités développées
- Les choix techniques (frameworks, base de données, API, etc.)
- La gestion des utilisateurs, des réservations et du suivi
- Les perspectives futures comme l'intégration de la prédiction des délais ou du tracking plus fin

Chapitre 1

Présentation de l'environnement d'accueil et de la logistique

1.1 Introduction

Le transport maritime demeure ces dernières années le principal mode de transport des marchandises, constituant un pilier essentiel de la croissance économique mondiale. Il assure la fluidité des échanges internationaux et optimise les flux logistiques. L'Algérie, avec sa position géographique stratégique sur la Méditerranée, bénéficie d'une grande façade maritime et de ports majeurs tels qu'Alger, Oran et Béjaïa, qui concentrent l'essentiel du commerce extérieur [1]. Toutefois, ce secteur fait face à plusieurs défis, notamment la congestion portuaire, les retards dans le traitement des cargaisons, et un manque de digitalisation dans la gestion logistique. D'après la Banque mondiale, l'Algérie figure parmi les 20 derniers pays sur 170 en matière d'IPL [1].

Pour remédier à ces problématiques et répondre aux exigences internationales, la modernisation des infrastructures portuaires est devenue indispensable. Le développement de ports intelligents et l'intégration de technologies telles que l'intelligence artificielle permettent d'améliorer la gestion des opérations, de fluidifier le trafic de conteneurs et d'anticiper les retards, ce qui réduit les temps d'attente et accroît la productivité. Dans cette transformation, les gestionnaires portuaires ont un rôle central : ils veillent au bon fonctionnement des ports, à la maintenance des infrastructures et à l'organisation efficace des opérations de chargement et de déchargement, tout en assurant l'accès aux terminaux pour les compagnies maritimes.

1.2 Industrie portuaire

1.2.1 Présentation de l'industrie portuaire

Le transport maritime est étroitement lié au commerce international en raison de l'immensité de la surface maritime couvrant la planète, renforçant la connectivité des marchés internationaux et la fluidité des échanges commerciaux. Les ports sont des infrastructures stratégiques, qui favorisent la croissance économique en assurant le transit de grandes quantités de biens à moindre coût.

D'après le rapport de la CNUCED en 2023, plus de 12,3 milliards de tonnes de marchandises ont été transportées par voie maritime, ce qui confirme à quel point les ports sont essentiels à la mondialisation. Ils permettent le transit de matières premières comme le pétrole, le gaz naturel, les métaux ou les céréales, mais aussi de produits manufacturés tels que les voitures, les textiles ou les équipements électroniques. Ces échanges relient les grandes puissances économiques mondiales, comme la Chine, l'Europe et les États-Unis, et contribuent à la création de millions d'emplois, directs et indirects, dans des secteurs variés comme la manutention, la logistique, la douane ou la maintenance des navires[2].

En 2023, le commerce maritime s'est illustré par plus de 250 000 escales de porte-conteneurs dans les ports du monde entier. Face à cette croissance, des innovations comme l'automatisation des terminaux, l'intelligence artificielle et la blockchain apportent des avancées majeures pour rendre la gestion portuaire plus efficace [2].

Elles améliorent la capacité de suivi des biens, diminuent les temps d'attente et hâtent le processus de traitement des conteneurs. Des ports intelligents tels que celui de Shanghai utilisent ces technologies pour optimiser et fluidifier leurs opérations. En décembre 2023, la capacité des porte-conteneurs a connu une hausse de 8,2%, grâce à l'essor des navires ayant une capacité excédant les 24 000 EVP [2].

L'industrie portuaire joue aussi un rôle important dans la protection de l'environnement face aux défis du transport maritime. Pour réduire les émissions de CO₂, de nom-

breuses actions sont mises en place, comme :

- L'électrification des ports
- Le recours à des carburants plus propres comme le gaz naturel liquéfié (GNL) ou l'hydrogène
- L'amélioration de l'efficacité énergétique des installations portuaires

Enfin, cette transformation rapide du secteur portuaire oblige à adopter une nouvelle méthode dont les flux de marchandises sont suivis et gérés. Les nouvelles technologies ne sont plus de simples options, mais des exigences indispensables pour mieux anticiper les aléas et fluidifier l'ensemble de la chaîne logistique. Dans cette logique, l'intelligence artificielle devient une composante essentielle : en permettant un suivi en temps réel et une prédiction plus fiable des retards, elle donne aux acteurs portuaires les moyens de mieux planifier leurs opérations, de limiter les pertes de temps, et de renforcer leur compétitivité dans un environnement de plus en plus exigeant.

1.2.2 Définition et fonctionnement des ports

Un port est un endroit géographique par lequel transitent des marchandises et/ou des passagers. Un port maritime est un port qui accueille des navires de la mer, qui est un lieu de rendez-vous entre ces navires de mer et l'ensemble des divers modes de transport terrestre. C'est également un tel port par lequel transitent toutes les données informatisées indispensables à la facilitation du transit, aussi bien des navires que des marchandises [3].

Son rôle de liaison entre la terre et la mer, l'espace portuaire est équipé d'infrastructures et de superstructures qui permettent de réaliser des opérations efficaces de chargement, déchargement et de transfert de marchandises entre les différents modes de transport [4].

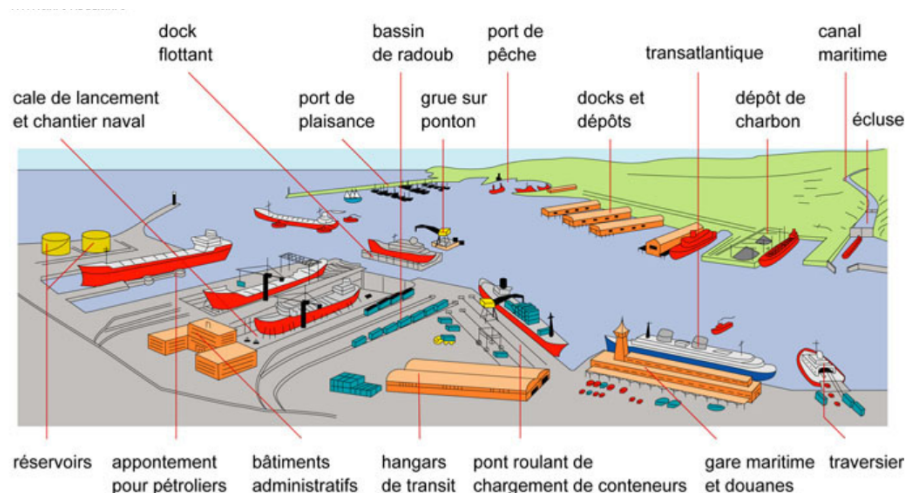


FIG. 1.1 : Fonctionnement d'un port maritime [72].

Ce schéma illustre comment un port maritime est une plateforme logistique complexe combinant transport de marchandises, passagers, industries et infrastructures techniques.

1.2.3 Organisation et classification des ports

N°	Critère	Catégories	Détails
1	Usage du port	Passager, Marchandises, Conteneurs, Militaire, Pêche, Extractif, Recherche, Complexe	Chaque type de port se distingue par son activité principale (transport passager, cargo, pêche, recherche, etc.), avec des quais spécifiques à chaque usage.
2	Localisation géographique	Côtier, Maritime, Île, Sec, Flottant, Polaire, Sous-marin	Les ports sont situés en bord de mer, sur des îles, en mer (flottants), sous-marins ou dans les terres (secs), chacun avec des fonctions logistiques particulières.
3	Système maritime utilisé	Bateau à rame, à moteur, navire, grand navire, sous-marin, aéroglisseur, hydravion	Selon les caractéristiques techniques (tirant d'eau, capacité, propulsion), les ports accueillent différents types de véhicules marins.
4	Type de corridor maritime	Lac, Rivière, Mer chaude, Océan	Le corridor d'eau influence les caractéristiques opérationnelles du port (accès, profondeur, environnement).
5	Rôle fonctionnel du port	Ancien, Accès, Commercial, Industriel, Clé, Hub, Intelligent, Terminal commun, Port-ville	Ces rôles décrivent l'évolution historique, la spécialisation, ou encore la transformation technologique des ports (ville-port, hub logistique, port intelligent).
6	Rôle dans le réseau	Port d'accès, Feeder, Hub, Échange, Logistique, Complémentaire, Central	Selon leur position dans le réseau (extrémité, centre, relais), les ports remplissent des fonctions spécifiques dans le flux maritime.
7	Durée d'opération	Permanent, Temporaire, Périodique, Urgence	Certains ports sont permanents, d'autres saisonniers, liés à une période ou à une crise (ex : port polaire ou de secours).
8	Durée de service journalier	24h, Programmée, Non-programmée	Les horaires d'activité varient : continus (24h), limités (horaires définis), ou à la demande.
9	Propriété	Privé, Institutionnel, Public, Étatique	La gestion peut être privée, institutionnelle (entreprise), publique (citoyens), ou gouvernementale.
10	Utilisabilité	Fermé, Contrôlé, Libre	Dépend de l'accès autorisé : usage personnel (fermé), groupes définis (contrôlé), tous utilisateurs (libre).
11	Zone de couverture	Dédié, Local, National, Régional, International	La portée des voyages influence la couverture géographique du port (du local à l'international).

TAB. 1.1 : Classification des ports selon différents critères - Élaboration propre -

1.3 Principaux défis dans la gestion portuaire

Les ports ont un rôle plus important qu'ils n'avaient à l'époque, étant donné que le transport maritime et l'industrie portuaire sont devenus les vecteurs indispensables de développement mais ils sont confrontés à de nombreux défis.

1.3.1 Congestion portuaire

D'une part, la congestion portuaire est un problème persistant qui peut gravement perturber les opérations maritimes mondiales. Elle se produit lorsque le volume de navires et de marchandises dépasse la capacité d'accueil et de traitement des ports, entraînant :

- Des retards dans les opérations de chargement et de déchargement
- Des temps d'attente prolongés pour les navires
- Un effet d'entraînement sur l'ensemble des chaînes d'approvisionnement

1.3.2 Enjeux environnementaux

D'autre part, la transition vers un modèle durable et respectueux de l'environnement est un enjeu majeur qui émerge également. Les ports figurent parmi les infrastructures les plus polluantes, avec des émissions massives de CO₂ dues aux navires à quai et aux équipements portuaires.

Comme le souligne la CNUCED : « Il ne fait aucun doute que le principal défi pour le secteur maritime est de mettre le cap sur la décarbonation tout en préservant la croissance économique. Le secteur doit trouver un équilibre entre durabilité environnementale, conformité aux réglementations et impératifs économiques s'il veut allier prospérité, équité et résilience. »[2]

1.3.3 Autres défis

De plus, l'industrie maritime est fortement réglementée, encadrée par un réseau complexe de règles internationales, régionales et nationales couvrant divers aspects tels que :

- La sécurité des navires
- La protection de l'environnement
- Les normes du travail
- La conformité commerciale

En outre, les perturbations de la chaîne d'approvisionnement, qu'elles soient causées par des catastrophes naturelles, des tensions géopolitiques, des pandémies ou des congestions portuaires, peuvent fortement désorganiser les calendriers d'expédition, entraîner une hausse des coûts et provoquer d'importants retards. Face à ces défis, la transformation technologique et les stratégies d'innovation sont deux éléments clés pour l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité des activités de l'industrie maritime, ils évoluent pour devenir plus efficaces, plus écologiques et mieux connectés. Le port du futur ne sera plus seulement un lieu de transit, mais un véritable hub intelligent et durable. Parmi ces avancées, l'intelligence artificielle offre des capacités avancées d'analyse de données, de prédiction et d'optimisation.

1.4 Rôle des armateurs dans le transport maritime

L'armateur propriétaire ou copropriétaire est celui qui détient la propriété totale ou partielle d'un ou de plusieurs navires ou bateaux de pêche et dont il assure lui-même l'exploitation. L'armateur non-propriétaire est celui qui exploite à son nom le navire ou le bateau de pêche [5].

L'armateur est une personne physique ou morale qui possède, exploite ou affrète un navire pour assurer son exploitation commerciale [6]. Il veille à ce que les navires naviguent en toute sécurité et dans le respect des réglementations. Son rôle est d'organiser le recrutement des équipages, assurer l'entretien des navires, optimiser leur rentabilité et adapter sa flotte aux besoins du marché grâce à l'affrètement de nouveaux navires si nécessaire[6].

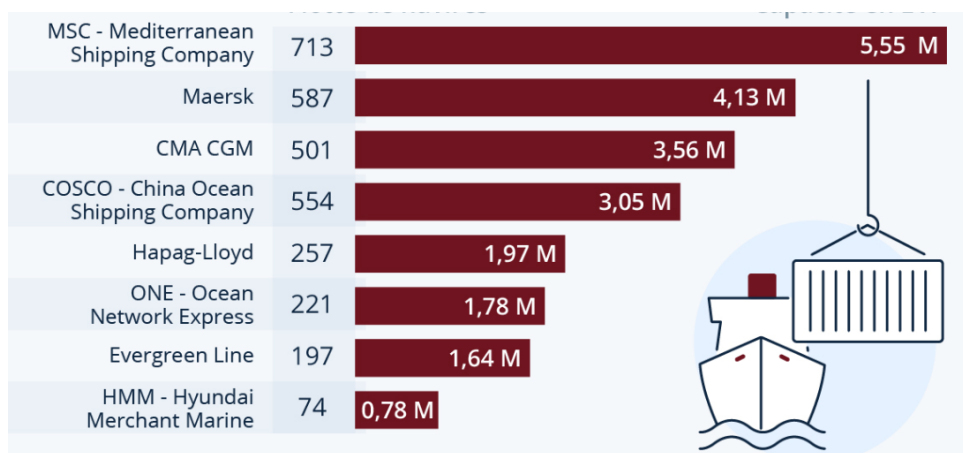


FIG. 1.2 : Top 8 armateurs en 2025 [7].

1.5 Présentation de l'environnement d'accueil

1.5.1 DP World

SPA DJAZAIR PORT WORLD est une entreprise fondée le 21 mars 2009 dans le cadre d'un partenariat 50/50 entre DP World et l'Entreprise Portuaire d'Alger (EPAL), elle bénéficie d'une concession de 30 ans sur le terminal.

Caractéristiques de l'entreprise :

- Employant plus de 890 personnes
- Parc matériel composé de :
 - 6 grues mobiles
 - 10 RS
 - 6 ECH
 - 5 RTG
 - 30 ITV
- Terminal de 33 hectares composé de 3 quais pouvant accueillir de 5 à 6 navires

- Répartis sur 3 zones de stockage et une zone de visite

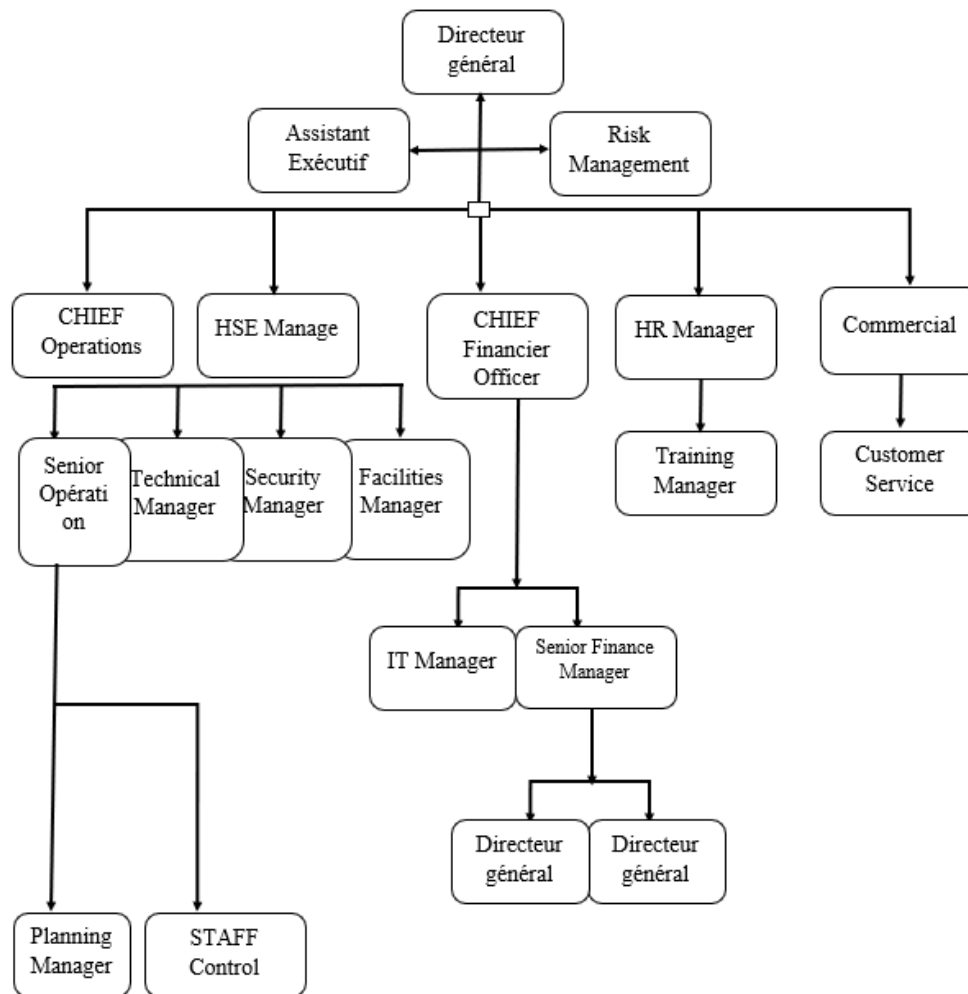


FIG. 1.3 : Diagramme du Structure organisationnelle - Diagramme extrait de la documentation interne de l'entreprise de stage

1.5.2 Présentation de MedAgensea

Med Agensea est une entreprise privée créée en 2014, représentant localement en Algérie la compagnie maritime chinoise COSCO et la compagnie maritime italienne TAR-ROS. Située à Rouïba, à 22 kilomètres à l'est d'Alger, dans la première et plus grande zone industrielle du pays, qui s'étend sur 1 000 hectares. Med Agensea est une entreprise bien connue en Algérie. Elle emploie 25 personnes, en collaboration étroite avec des transitaires et des comptes clés, afin de fournir un meilleur service. Dans le cadre de ce projet de fin d'études, Med Agensea nous a aidé en nous fournissant des données qui ont permis d'élaborer des cas d'usage réalistes pour la conception de notre plateforme. Grâce à leur retour d'expérience, nous avons pu mieux comprendre les problèmes vécus dans les opérations portuaires. En résumé, la collaboration avec Med Agensea a constitué un pont essentiel entre la théorie universitaire et les besoins concrets de l'industrie maritime. Elle

a renforcé la valeur ajoutée de notre projet en assurant une conception alignée avec les enjeux actuels du secteur portuaire et logistique.

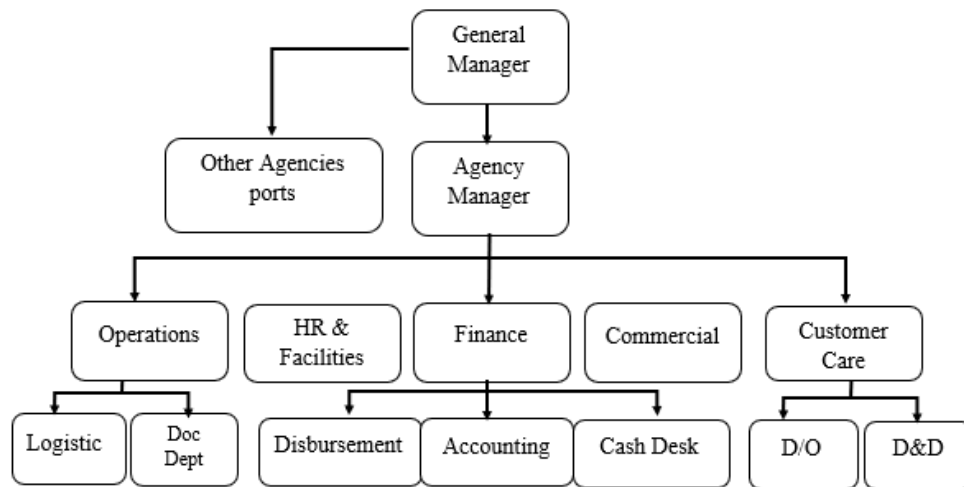


FIG. 1.4 : Diagramme du Structure organisationnelle -Diagramme extrait de la documentation interne de l'entreprise de stage

1.6 La logistique maritime

1.6.1 Définition et rôle dans les chaînes d'approvisionnement

Avant de définir la logistique maritime il faut d'abord définir le terme chaîne logistique.

Définitions selon différents auteurs :

Selon Christopher M, dans le livre de Klaus et Muller (Klaus et Müller 2012) : « Le réseau d'organisation impliqué, en amont et en aval, dans les différents processus et activités qui produisent de la valeur sous forme de produits et de services livrés aux clients finaux ».[74]

Selon A-Zouggar (Amrani-Zouggar 2009) : « La chaîne logistique peut être considérée comme un ensemble d'activités en réseaux dont l'exécution est corrélée par les flux qu'elles échangent, visant à satisfaire au mieux les besoins exprimés par un ensemble de clients ».[75]

Selon Cheyroux (Cheyroux 2003) la chaîne logistique est : « un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit ou d'un service ».[76][8]

La chaîne logistique portuaire :

la logistique portuaire est l'un des maillons les plus importants et les plus sensibles de la chaîne logistique. Notre travail de thèse concerne plus précisément les TCs. Un TC est considéré comme un système complexe où la manutention et le transport de conteneurs jouent un rôle crucial (Henesey 2006)[8].

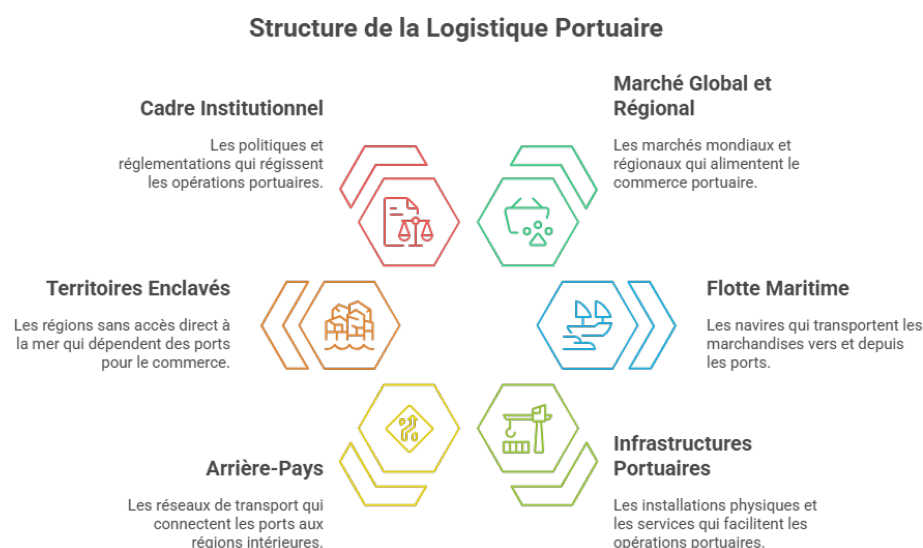


FIG. 1.5 : Fonctionnement des ports maritimes dans la chaîne logistique - Élaboration propre -

1.6.2 La Logistique 4.0

Dans cette étude, nous cherchons à intégrer des systèmes intelligents dans les opérations portuaires afin de les optimiser. Pour se faire, il est nécessaire de définir le concept de logistique 4.0, qui constitue un cadre de référence pour mieux comprendre cette transformation.

La Supply Chain ne cesse d'évoluer, et ce notamment avec l'apparition de la logistique 4.0 ; un concept né suite à l'essor de l'industrie 4.0, fondé sur une numérisation totale des processus. La logistique 4.0 est une gestion d'entrepôt fondée sur la connexion informatique, la numérisation de l'information et l'utilisation de logiciels sur le cloud. Les informations sont plus complexes à traiter qu'avec les logistiques 2.0 et 3.0, qui elles se basent davantage sur la robotisation et la standardisation des procédés, devenues indispensables avec l'expansion du commerce international[9].

1.6.3 Place de la logistique dans le commerce international

La logistique est décrite comme étant une fonction et une démarche essentielle dans les opérations du commerce international. C'est l'art de livrer le bon produit au bon endroit et au bon moment. Elle est devenue la préoccupation majeure des entreprises, non seulement pour l'aspect financier mais aussi pour l'amélioration des partenariats avec l'ensemble des acteurs de la chaîne d'approvisionnement[10].

La logistique occupe une place centrale dans le fonctionnement du commerce international. Sans une logistique efficace, les échanges commerciaux ne pourraient pas soutenir le rythme de croissance de l'économie mondiale.

Les systèmes logistiques vont connaître des transformations profondes sous le double effet de la numérisation et des enjeux environnementaux. La numérisation et les coûts environnementaux vont également entraîner des coûts supplémentaires qui vont peser sur la compétitivité des entreprises, qui vont donc chercher à diminuer d'autres coûts[10].

Ainsi, la logistique n'est pas seulement une fonction opérationnelle, mais bien un facteur stratégique de compétitivité économique et de souveraineté commerciale dans un monde interdépendant.

1.7 Conclusion

Ce chapitre met en évidence le rôle central des ports dans les échanges commerciaux mondiaux, en tant que nœuds stratégiques de la chaîne logistique internationale. Leur bon fonctionnement conditionne directement l'efficacité du transport maritime, qui assure plus de 80% du commerce mondial. À l'échelle nationale, l'Algérie bénéficie d'un positionnement géographique favorable et d'une façade maritime importante, mais peine encore à exploiter pleinement ce potentiel.

En effet, le secteur portuaire algérien fait face à plusieurs défis majeurs : une congestion persistante, une digitalisation insuffisante et un manque d'innovations technologiques. Ces faiblesses affectent directement la fluidité et la performance de l'ensemble de la chaîne logistique nationale.

La logistique maritime, de plus en plus tournée vers les modèles de la logistique 4.0, nécessite aujourd'hui des ports plus intelligents, connectés et durables. Une gestion efficace, appuyée par des technologies modernes, est donc indispensable pour renforcer la compétitivité du pays, réduire les retards, et améliorer la coordination entre les acteurs logistiques.

Chapitre 2

Cadre théorique et concepts de base

2.1 Introduction

Le transport maritime représente l'axe central du commerce mondial, jouant un rôle clé dans l'interconnexion des économies grâce à des réseaux complexes de routes maritimes, de ports et de points de passage stratégiques [11]. Il assure environ 80% du volume des échanges internationaux de marchandises, une proportion encore plus importante dans les pays en développement où les infrastructures terrestres ou aériennes sont limitées. Bien que sa part en valeur soit légèrement inférieure (environ 60 à 70%), notamment à cause de la montée du transport aérien pour les biens à forte valeur, le transport maritime reste indispensable en raison de son coût relativement faible sur de longues distances, permis par les économies d'échelle [11].

En plus de sa capacité à transporter de grandes quantités à moindre coût, le transport maritime repose sur un maillage mondial de ports et de routes interconnectés, facilitant un flux continu de marchandises à l'échelle internationale. Cette organisation logistique contribue à l'intégration économique mondiale et au développement des chaînes d'approvisionnement. Ce chapitre vise à analyser en profondeur le fonctionnement du transport maritime, en abordant ses fondements, son évolution historique, les types de navires, les infrastructures portuaires, les principaux acteurs du secteur ainsi que les innovations technologiques et écologiques qui transforment ce domaine.

2.1 Conteneurisation

2.1.1 Définition du concept de conteneurisation

La conteneurisation est une innovation née aux États-Unis dans la seconde moitié des années 1950, grâce à Malcolm McLean, souvent considéré comme son inventeur [20]. Elle repose sur une idée simple mais révolutionnaire : transporter les marchandises dans des conteneurs, c'est-à-dire des boîtes métalliques aux dimensions standardisées, conçues pour être facilement manutentionnées [21] et transférées d'un mode de transport à un autre. Ce système a permis une intégration efficace entre les différents moyens de transport — maritime, ferroviaire et routier — en réduisant les ruptures de charge, les temps d'attente et les coûts logistiques [22]. D'abord perçue comme une simple solution technique, la conteneurisation a en réalité profondément transformé les chaînes d'approvisionnement mondiales et facilité le développement du commerce international.

2.1.2 Objectifs et avantages du transport conteneurisé

La conteneurisation, en améliorant considérablement l'efficacité du transport maritime, a joué un rôle central dans la croissance des échanges mondiaux de produits manufacturés et constitue aujourd'hui l'épine dorsale logistique de la mondialisation [20]. En Afrique, ce phénomène connaît depuis les années 2000 une progression rapide, accompagnée par la modernisation des infrastructures portuaires et une transformation des modes de gestion. En facilitant la manutention et en accélérant les opérations de chargement et de déchargement, le conteneur permet également de réduire les coûts de transport [23].

2.4.3 Origine et invention du conteneur

Malcolm McLean en est considéré comme l'inventeur pendant la seconde moitié des années 1950. Son idée consiste à acheminer les marchandises dans des boîtes ou 'containers'

[23].

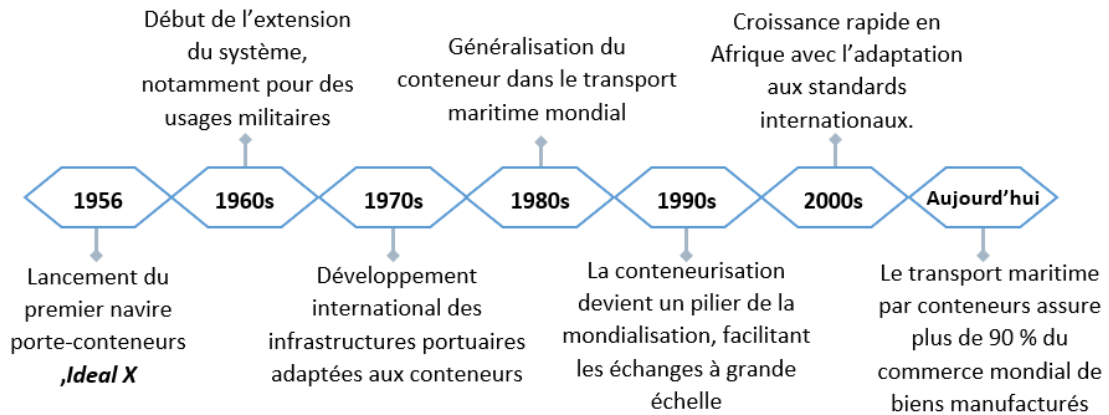


FIG. 2.3 : Historique et évolution de la conteneurisation

2.1.4 Expansion et standardisation

Le développement de la conteneurisation a été largement favorisé par la normalisation de ses caractéristiques techniques. À partir de 1965, les échanges sur les routes maritimes de l'Atlantique Nord ont commencé à adopter des conteneurs aux dimensions unifiées, facilitant leur déploiement sur d'autres corridors commerciaux [20]. Ce processus de standardisation a abouti en 1974, lorsque l'Organisation internationale de normalisation a fixé les normes définitives encadrant la taille, la forme et les dispositifs de manutention des conteneurs [20]. Grâce à cette harmonisation, les conteneurs sont devenus parfaitement adaptés au transport intermodal, pouvant être transférés aisément entre navires, camions et trains. Aujourd'hui, bien que plusieurs tailles soient encore en circulation, les formats de 20 et 40 pieds dominent largement le marché, tandis que d'autres tendent à disparaître. La capacité des navires et des terminaux portuaires est généralement exprimée en EVP (Équivalent Vingt Pieds), l'unité de référence dans le secteur du transport conteneurisé.

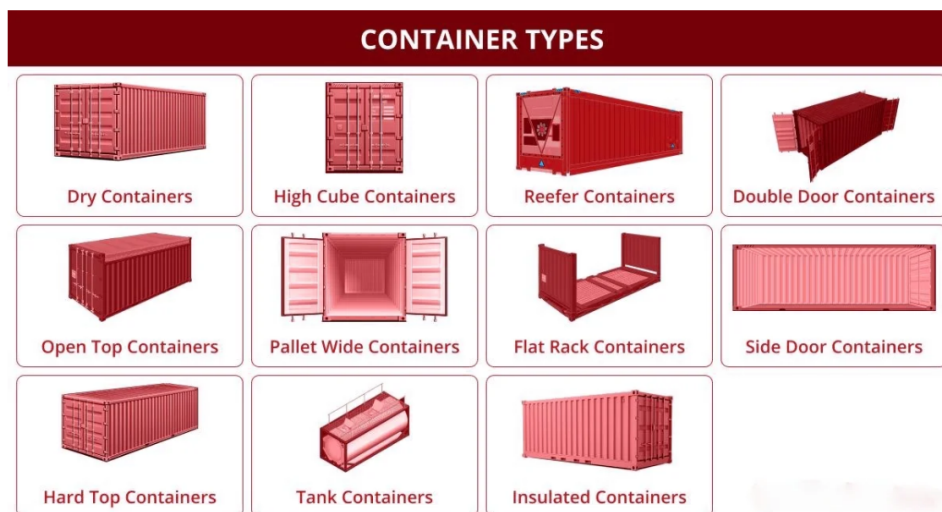


FIG. 3.3 : Types de conteneurs [70].

2.1.5 Fonctionnement et chaîne logistique du terminal de conteneur

Selon (Carlo, Vis, et Roodbergen 2014), un TC peut être réparti en trois zones principales : la zone des opérations maritimes, la zone de stockage, et la zone des opérations terrestres.

- **Zone des opérations portuaires** : Appelée aussi zone de quai, c'est une zone qui assure l'amarrage des navires porte-conteneurs pour le chargement et le déchargement. Les grues de quai ou les portiques chargent et déchargent les conteneurs sur ou depuis le navire [20].
- **Zone de stockage** : C'est une zone pour l'entreposage des conteneurs transitant par le TC. Une zone de stockage se compose de plusieurs blocs. Chaque bloc se compose de plusieurs rangées de conteneurs, chacune constituée de baies. Les chariots cavaliers ou les grues à portique roulants sont utilisés pour exécuter les tâches d'entreposage et de récupération des conteneurs [20].
- **Zone des opérations terrestres** : C'est une zone interface entre le TC et les autres modes de transport. C'est la zone où se déroulent toutes les opérations de réception et d'expédition des conteneurs entrant ou sortant du TC [20].

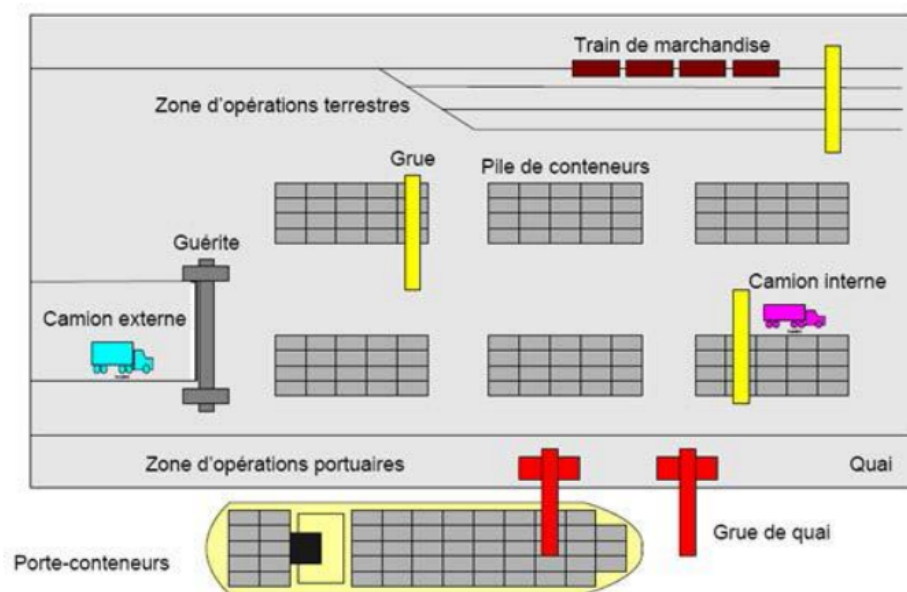


FIG. 2.5 : Fonctionnement du terminal de conteneur [?].

2.2 Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC

2.5.1 Acteurs opérationnels

- **Docker / Opérateur portuaire** : qui se charge et décharge le navire
- **Transporteur interne** : qui transporte les conteneurs au sein du terminal

- **Opérateur de portique** : manipule les grues pour transférer les conteneurs entre le navire et le quai
- **Opérateur de terminal** : une société qui exploite un terminal et gère ses ressources. Sa principale vocation est la livraison des conteneurs à leur mode de transport de sortie sous de bonnes conditions et dans les délais requis
- **Manutentionnaire** : est un ouvrier portuaire employé au chargement et déchargement de marchandises (conteneurisé ou en vrac) arrivant au port par navires. C'est une profession exclusivement masculine où la force physique est une ressource essentielle [24]

2.2.2 Acteurs du transport

- **Armateur** : est le propriétaire, l'exploitant ou l'affréteur d'un navire. Personne/Société qui arme un navire en lui fournissant matériel, vivres, combustible, équipage et tout ce qui est nécessaire à la navigation. Il exploite le navire en son nom, qu'il soit ou non propriétaire [24]
- **Consignataire maritime** : organise l'escale des navires et prend en charge le suivi des marchandises transportées : récupération des titres de propriété des marchandises, analyse des documents pour l'exportation, déclaration aux services des douanes, répartition des frais d'escale [25]
- **Transporteur terrestre** : Il assure les préacheminements et post-acheminements des conteneurs et des marchandises entre l'usine ou l'entrepôt et le port
- **Commissionnaire de transport** : Il organise les transports. Il procède, en son nom, au transport des marchandises qui lui sont confiées par le chargeur en choisissant lui-même les différents transporteurs dont il a besoin

2.2.3 Acteurs logistiques et commerciaux

- **Transitaire** (freight forwarders) : consultant en logistique et en trafic international. Le transitaire aide l'exportateur à trouver les méthodes les plus économiques et les plus efficaces de transporter et d'entreposer le fret [24]
- **Importateur / Exportateur** : celui qui commande ou destinataire des marchandises transportées
- **Prestataires logistiques** : gèrent les entrepôts, les centres de distribution et les opérations de groupage/dégroupage
- **Douane et services de contrôle** : accomplit les opérations administratives et commerciales relatives à la circulation internationale des marchandises

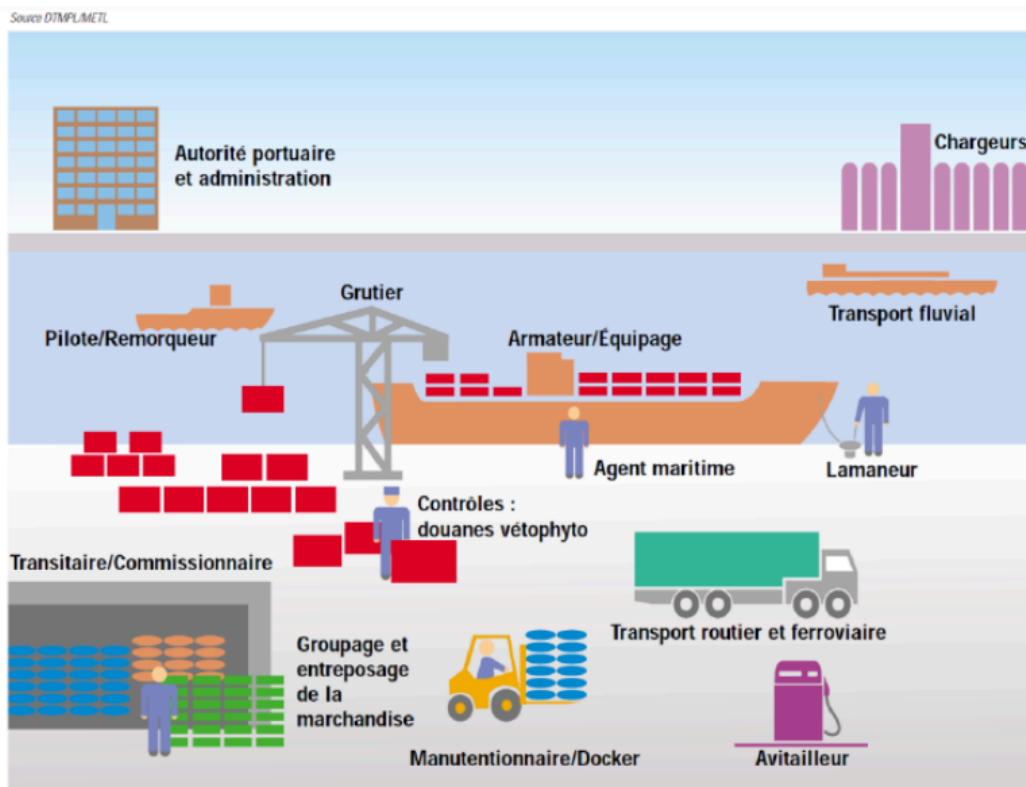


FIG. 2.6 : Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC [71].

2.2.4 Collaboration entre acteurs via le numérique

La chaîne d'approvisionnement maritime mobilise un grand nombre d'acteurs — expéditeurs, destinataires, prestataires logistiques, autorités nationales et internationales telles que l'Organisation Maritime Internationale ce qui rend la coordination des opérations plus complexe que dans d'autres secteurs [26]. Cette complexité nécessite une collaboration renforcée entre les parties prenantes, rendue possible par des plateformes numériques interconnectées. En effet, dans un environnement où une simple réservation de conteneur peut impliquer jusqu'à quarante organisations et générer des centaines de documents échangés manuellement, l'échange d'informations en temps réel devient essentiel. L'adoption de systèmes numériques comme les plateformes d'e-booking ou les systèmes portuaires intégrés améliore significativement la fluidité et l'efficacité de la chaîne logistique maritime.

2.3 Processus de dédouanement

Le dédouanement est un processus obligatoire pour toute marchandise entrant ou sortant du territoire douanier. Les étapes clés sont :

1. **Conduite et mise en douane** : Les conteneurs sont conduits dans des lieux désignés comme les ports ou les ports secs.
2. **Déclaration en détail** : Selon Art 75 - (modifié et complété par l'article 7 de la loi n°98-10 du 22 août 1998, article 74 de la loi de finances pour 2003, article 30 de la loi n°17-04 du 16 février 2017)

Toutes les marchandises importées ou réimportées, destinées à être exportées ou réexportées doivent faire l'objet d'une déclaration en détail. La déclaration en détail est l'acte, dans les formes prescrites par les dispositions du présent code, par lequel le déclarant indique le régime douanier à assigner aux marchandises et communique les éléments requis pour l'application des droits et taxes et pour les besoins du contrôle douanier. L'exemption des droits et taxes, soit à l'entrée, soit à la sortie, ne dispense pas de l'obligation de déclaration [25].

3. **Recevabilité et enregistrement** : Selon l'Art 82 - (modifié et complété par l'article 7 de la loi n°98-10 du 22 août 1998 et par l'article 37 de la loi n°17-04 du 16 février 2017) La déclaration en détail doit être faite par écrit, elle doit être signée par le déclarant [25].
4. **Vérification documentaire et physique** : En Algérie, la douane peut libérer les marchandises (mainlevée) de trois façons : sans contrôle, après vérification des documents, ou après un contrôle complet.
5. **Liquidation et paiement des droits et taxes** : Une fois les marchandises vérifiées ou la déclaration acceptée, la douane calcule les droits, taxes et pénalités à payer.
6. **Enlèvement des marchandises** : En général, on ne peut enlever les marchandises qu'après avoir payé ou garanti les droits et taxes.

2.4 La conteneurisation face aux défis technologiques

Avec l'augmentation continue des volumes de fret et la complexification croissante des opérations portuaires, l'efficacité et la fiabilité des activités dans les ports et terminaux à conteneurs sont devenues essentielles [27]. Les systèmes et technologies de l'information (STI) jouent un rôle central dans l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement maritime [28]. Face aux défis liés à la conteneurisation, une logistique automatisée et durable exige une digitalisation accrue des processus portuaires, ainsi qu'une intégration de solutions basées sur l'intelligence artificielle (IA) pour améliorer la performance et la durabilité des opérations.

2.4.1 Digitalisation et automatisation des conteneurs

L'introduction des technologies numériques dans la gestion des conteneurs permet une automatisation croissante des processus logistiques. Parmi ces technologies, les systèmes de transport intelligents (STI) représentent une solution clé pour optimiser les opérations. Ils reposent sur l'application de technologies avancées et émergentes, telles que les ordinateurs, les capteurs, les dispositifs de commande, de communication et d'électronique, dans le domaine du transport, dans le but de sauver des vies, du temps, de l'argent, de l'énergie et de préserver l'environnement [27].

Dans cette optique, l'usage croissant de ces technologies numériques au sein des ports améliore significativement leur efficacité opérationnelle. En effet, leur intégration permet de réduire à la fois les coûts logistiques, le temps de traitement des marchandises et l'espace nécessaire à leur gestion. Plus précisément, ces technologies contribuent à diminuer le temps passé à quai par les navires, réduisant ainsi les coûts liés à cette période d'inactivité, à limiter les heures de travail à rémunérer, et à optimiser l'occupation des surfaces d'empilement des conteneurs [27].

2.4.2 Rôle de l'Intelligence Artificielle dans la conteneurisation

L'intelligence artificielle (IA) s'impose comme une solution prometteuse dans le monde des opérations logistiques, où l'efficacité et la sécurité sont essentielles, notamment dans le secteur portuaire. Ce domaine, connu pour sa complexité et son ampleur, trouve dans l'IA un outil précieux pour faire face à ses défis traditionnels [28].

L'intelligence artificielle (IA) constitue un axe de transformation majeur dans la gestion intelligente de la conteneurisation. En s'appuyant sur des données massives issues des capteurs (IoT), des systèmes portuaires ou des historiques de transport, l'IA permet d'analyser, prédire et optimiser de nombreuses étapes du cycle de vie d'un conteneur.

Elle permet :

- La prévision des retards en analysant les conditions opérationnelles
- L'optimisation du placement des conteneurs, réduisant les mouvements inutiles
- L'automatisation des décisions logistiques

Conclusion

Ce chapitre a permis d'explorer en profondeur les concepts de base du secteur maritime, en abordant les différents types de transport (ligne régulière, tramping), les défis environnementaux liés aux sources d'énergie, ainsi que l'impact majeur de la conteneurisation dans la gestion des flux logistiques.

Derrière cette infrastructure logistique il existe une organisation complexe : les terminaux à conteneurs, les zones portuaires, et plusieurs acteurs, mais malgré une structure bien établie, la chaîne logistique maritime rencontre de nombreuses difficultés comme les pratiques manuelles, des échecs d'information et un manque de visibilité en temps réel. Ces limites causent des problèmes en termes d'efficacité et de réactivité.

Chapitre 3

État de l'art

3.1 Introduction

Au cœur des échanges internationaux, le transport maritime s'impose comme le mode de transport dominant pour les marchandises, assurant la majorité des flux commerciaux mondiaux avec plus de 80% du volume total. Dans ce contexte, la gestion logistique, en particulier celle des conteneurs, joue un rôle stratégique. Pourtant, le suivi précis des flux, la prédiction des retards et l'optimisation des opérations portuaires demeurent des défis complexes, notamment en raison de la diversité des acteurs, des aléas météorologiques et des contraintes d'infrastructure.

Ces difficultés soulignent le besoin croissant d'innovation technologique dans le secteur. L'émergence de solutions numériques comme les systèmes d'information logistique, l'IoT ou encore les algorithmes d'intelligence artificielle ouvrent de nouvelles perspectives pour améliorer la performance globale des chaînes logistiques maritimes.

Ce chapitre a pour objectif de :

- Identifier les principales approches et technologies utilisées dans le domaine ;
- Comparer leurs apports, leurs limites et leurs performances ;
- Guider les choix technologiques adoptés pour notre propre solution, en s'appuyant sur une analyse critique de l'existant.

Pour cela, nous proposons une revue de littérature structurée en trois sections. Dans un premier temps, nous présenterons les technologies utilisées dans la gestion logistique, en abordant à la fois les systèmes d'information, les outils de suivi physique, ainsi que les modèles de prédiction. Ensuite, une analyse des travaux de recherche récents sera réalisée à partir des articles sélectionnés. Enfin, une conclusion synthétisera les enseignements de ce chapitre et préparera la transition vers le développement de notre solution dans le chapitre suivant.

3.2 Technologies utilisées dans la gestion logistique

3.2.1 Systèmes d'information logistique

La traçabilité des marchandises est un enjeu majeur pour la gestion efficace des chaînes logistiques mondiales. Elle repose sur la capacité à suivre le parcours des cargaisons depuis l'expéditeur jusqu'au destinataire final, garantissant ainsi la transparence, la sécurité et l'intégrité des produits [32, 35]. Ce suivi implique l'enregistrement et le partage d'informations précises sur les mouvements physiques des conteneurs et des marchandises à chaque étape [31, 33].

Pour assurer cette visibilité, les systèmes logistiques utilisent des plateformes informatiques intégrées, souvent basées sur des outils de gestion tels que les ERP, les WMS et les TMS [31, 33]. Ces solutions permettent de centraliser les données, de coordonner les opérations entre les différents acteurs et d'améliorer la prise de décision [34].

Les opérations portuaires, qui constituent des nœuds clés dans le réseau logistique, s'appuient également sur ces systèmes pour optimiser la planification, le déchargement et le transit des conteneurs [32]. La digitalisation croissante des processus favorise ainsi une meilleure collaboration entre les entreprises maritimes, les opérateurs portuaires et les clients [29, 35].

3.2.2 Technologies utilisées pour le suivi des conteneurs

Dans le contexte actuel de la mondialisation et de la complexification croissante des chaînes logistiques, la visibilité en temps réel des marchandises est devenue une nécessité stratégique pour les acteurs du transport et de la logistique [32, 35]. Pour répondre à cette exigence, l'intégration de technologies avancées telles que les capteurs IoT, les dispositifs GPS, les systèmes de géolocalisation embarqués et la RFID s'est imposée au sein des systèmes de gestion logistique [35, 37].



FIG. 3.1 : Facteurs et informations influençant le TAE [41]

Ces outils permettent un suivi précis des mouvements de conteneurs, le contrôle des conditions de transport (température, humidité, etc.), ainsi qu'un partage fiable des données entre les différents intervenants de la chaîne logistique [32, 30]. Ainsi, l'intégration de ces technologies dans des plateformes interconnectées, souvent couplées à des systèmes de gestion logistique comme les ERP, WMS ou TMS, permet d'optimiser les processus, d'améliorer la coordination et de réduire les délais [33, 34].

Des ports et terminaux de référence, tels qu'Anvers, Singapour ou Rotterdam, ont déjà déployé ces solutions pour optimiser leurs opérations, réduire les pertes et renforcer la sécurité des cargaisons [32]. Le GPS joue un rôle central dans cette traçabilité logistique portuaire. Par exemple, le système AIS, basé sur des récepteurs GPS embarqués, assure la localisation continue des navires en mer [29]. Le GPS différentiel (DGPS) permet quant à lui de localiser précisément les équipements portuaires tels que véhicules ou conteneurs, fournissant des données indispensables aux tableaux de bord de gestion opérationnelle [30]. Ces dispositifs peuvent aussi enregistrer des événements critiques, comme l'ouverture d'un conteneur, et transmettre ces informations en temps réel [30].



FIG. 3.2 : Schéma de fonctionnement d'un capteur de position [46]

Les capteurs IoT, embarqués directement sur les conteneurs, complètent ce suivi en offrant une surveillance dynamique des conditions de transport (température, humidité, pression, etc.) [32]. Ils permettent également l'analyse automatique des données collectées et la génération d'alertes en cas de dépassement de seuils critiques, facilitant une prise de décision proactive [32].

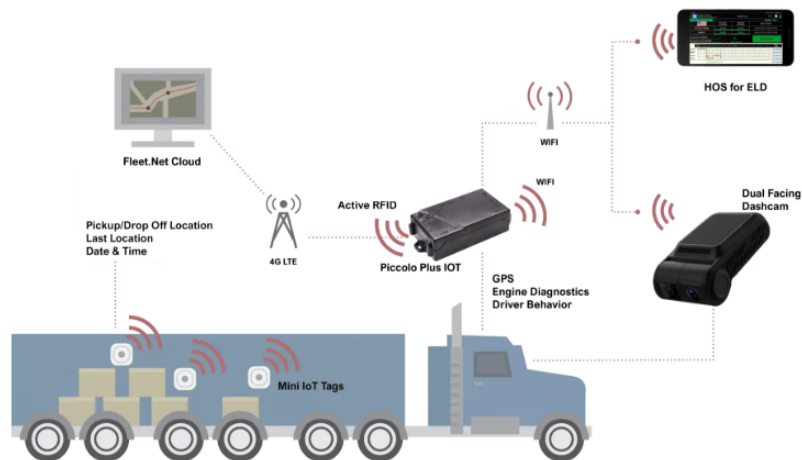


FIG. 3.3 : Suivi des expéditions avec IoT [45]

La technologie RFID constitue une autre composante clé de la traçabilité intelligente, permettant une lecture à distance et simultanée de plusieurs objets sans besoin de ligne de visée [37]. Les étiquettes RFID, souvent intégrées sous forme de sceaux électroniques intelligents, enregistrent des événements importants et transmettent instantanément ces données via ondes radio [30]. La RFID est généralement intégrée dans des systèmes inter-organisationnels, synchronisant les flux physiques et informationnels à travers des solutions telles que les ERP ou WMS [31, 37].

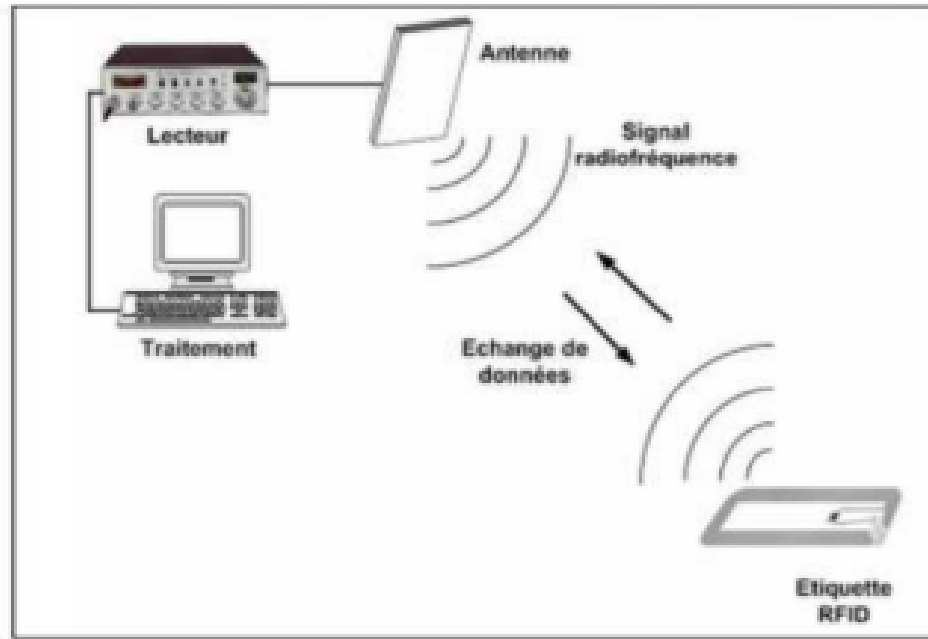


FIG. 3.4 : Principe de fonctionnement de la RFID [34]

Dans des hubs logistiques à haute densité comme Singapour ou Rotterdam, la synergie entre RFID, GPS et IoT est utilisée pour renforcer la sécurité, éviter les pertes et fluidifier le transit [35].

3.2.3 Modèles d'optimisation et de prédiction

La prévision joue un rôle central dans la gestion logistique moderne, notamment dans les chaînes logistiques maritimes caractérisées par leur complexité et leur dépendance à des facteurs externes. Grâce à l'essor du Big Data et de l'intelligence artificielle, les acteurs du transport maritime utilisent des modèles de prédiction pour anticiper des événements tels que les retards, les congestions ou les délais d'opérations portuaires [37]. Ces modèles exploitent des données historiques (heures d'arrivée, opérations portuaires passées, durées de transit, etc.) ainsi que des données en temps réel pour produire des estimations précises [38].

Modèles de prédiction dans les opérations logistiques

La logistique portuaire s'appuie de plus en plus sur des modèles prédictifs avancés afin de mieux anticiper des variables critiques telles que le temps d'escale, le temps d'attente, ou encore l'heure estimée d'arrivée. Les techniques mobilisées dans ce contexte sont issues du Machine Learning supervisé, de la régression multivariée, ou encore du Deep Learning, avec une utilisation intensive des données issues de l'AIS.

1. Algorithmes basés sur les arbres de décision

Méthodes d'évaluation

Pour évaluer la performance des modèles prédictifs utilisés dans la logistique portuaire, plusieurs métriques sont couramment mobilisées :

- **MAE** : calcule l'erreur absolue moyenne, c'est-à-dire la moyenne des différences absolues entre les prédictions $\hat{y}_i$ et les valeurs réelles y_i . Il est moins sensible aux valeurs extrêmes que le RMSE.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

- **RMSE** : mesure l'écart quadratique moyen entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Plus le RMSE est faible, plus le modèle est précis.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

- **R² (coefficient de détermination)** : indique dans quelle mesure le modèle explique la variance des données. Sa valeur est comprise entre 0 et 1.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Ces métriques permettent de comparer objectivement la précision des différents modèles testés, tels que Random Forest, XGBoost ou CatBoost, dans le cadre de la prédiction d'indicateurs logistiques clés.

Modèles de prédiction

Les modèles d'ensemble comme Random Forest (RF), XGBoost, et CatBoost sont parmi les plus utilisés pour la prédiction des indicateurs clés dans les ports. Ces méthodes reposent sur des algorithmes arborescents qui agrègent plusieurs arbres de décision pour améliorer la précision.

- Random Forest est efficace pour réduire la variance grâce à l'agrégation de multiples arbres entraînés sur des sous-échantillons de données. Il a été appliqué pour prédire les temps de séjour au port avec de bonnes performances

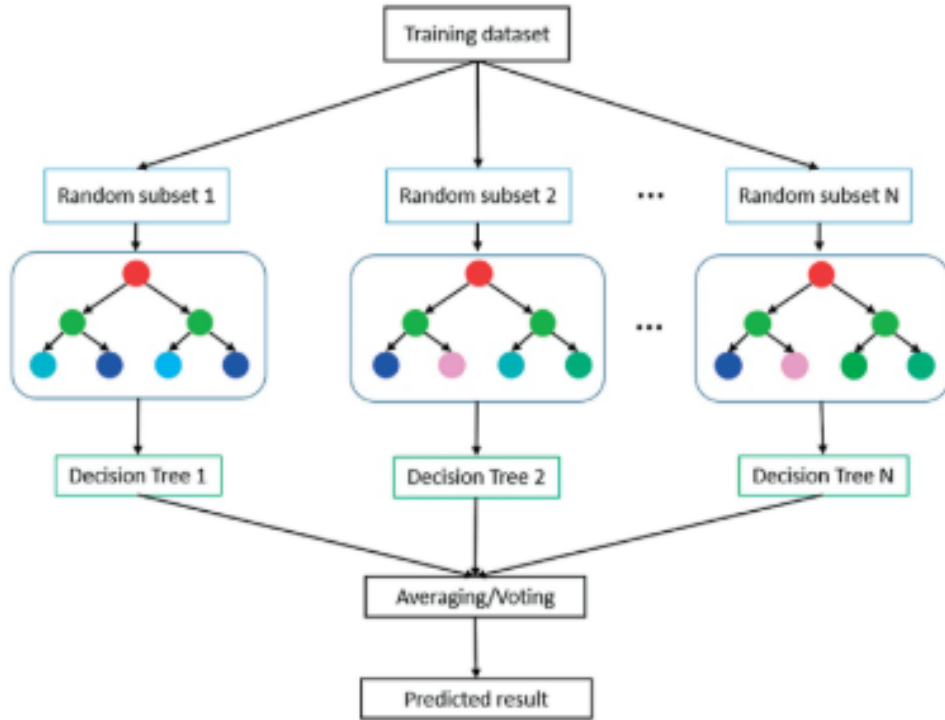


FIG. 3.5 : Organigramme de la régression par forêt aléatoire [39]

- XGBoost dépasse souvent RF en précision car il construit les arbres de manière séquentielle, en corrigeant les erreurs précédentes. Il intègre aussi une régularisation L1/L2 pour prévenir le surapprentissage. Dans l'étude menée sur le port d'Haiphong, XGBoost atteint un R^2 de 0.9933 en test, avec un RMSE de seulement 0.5019 pour la prédiction du temps de rotation des navires.

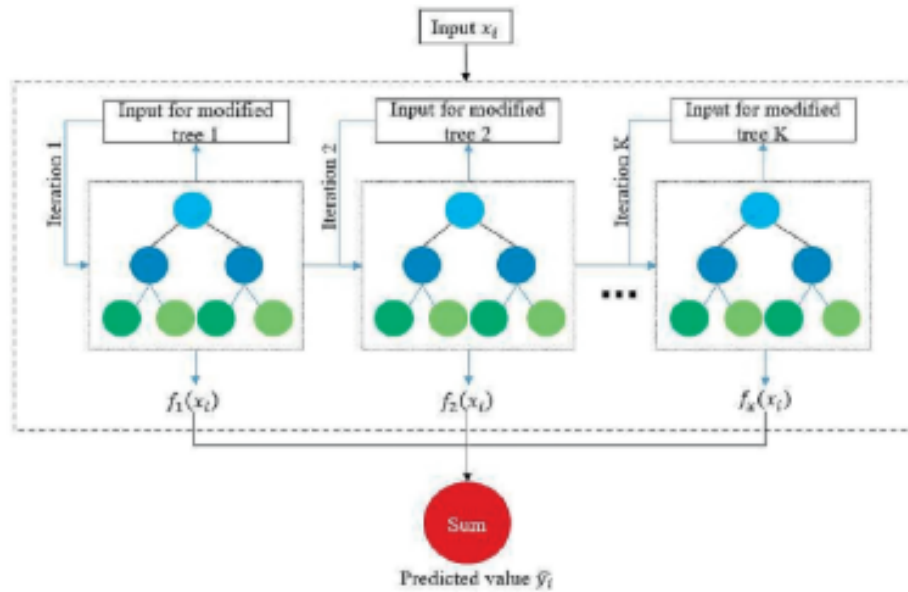


FIG. 3.6 : Schema structurel de XGBoost [39]

- CatBoost, adapté aux variables catégorielles, a également montré des résultats compétitifs dans certains contextes, notamment sur des horizons courts (2 jours, 1 jour), bien qu'il soit légèrement dépassé par XGBoost dans des périodes plus longues.

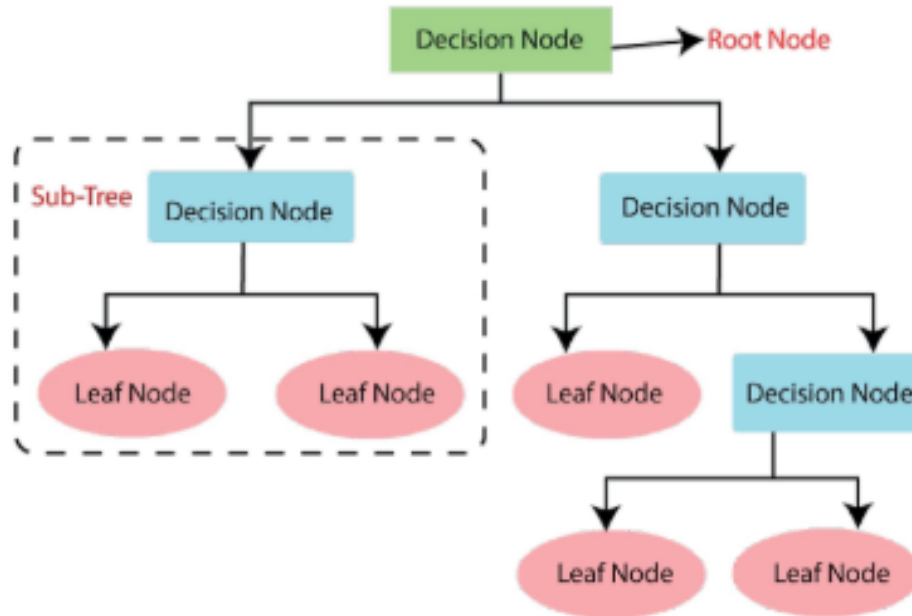


FIG. 3.7 : Schéma structurel d'un algorithme d'arbre de décision [39]

2. Méthodes de régression multivariée et statistiques

Les modèles classiques de régression linéaire, ridge regression, elastic net ou polynomial regression sont également utilisés, mais avec des performances inférieures aux méthodes arborescentes.

Par exemple, la régression linéaire appliquée à la prédiction du temps d'escale donne un RMSE 17, contre 11 pour XGBoost et 10 pour Random Forest.

Toutefois, ces méthodes restent utiles pour leur simplicité d'interprétation et servent souvent de baseline.

3. Réseaux de neurones et Deep Learning

Les modèles Neural Network (NN), RNN, LSTM, voire CNN et GRU, sont utilisés pour capturer les dépendances temporelles ou spatiales dans les trajectoires des navires.

- Le modèle DWT-LSTM, combinant transformation en ondelettes discrètes et LSTM, a permis une amélioration significative des prévisions du cargo throughput au port de Busan sous des scénarios de perturbation, surpassant les modèles SARIMA, RNN et même GRU.

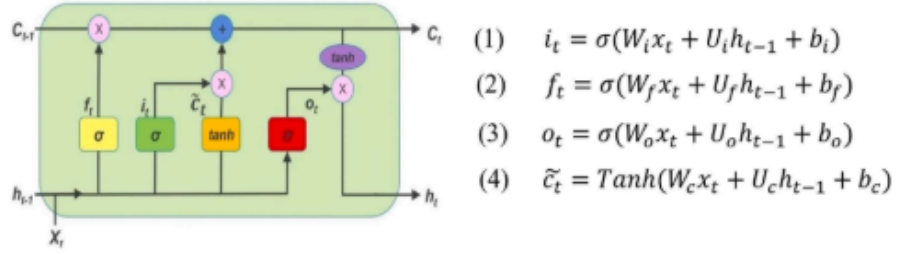


FIG. 3.8 : L'architecture LSTM [41]

- D'autres architectures comme CNN+LSTM+Attention ont été proposées pour prédire l'ETA, tirant parti des trajectoires AIS et des données météorologiques.

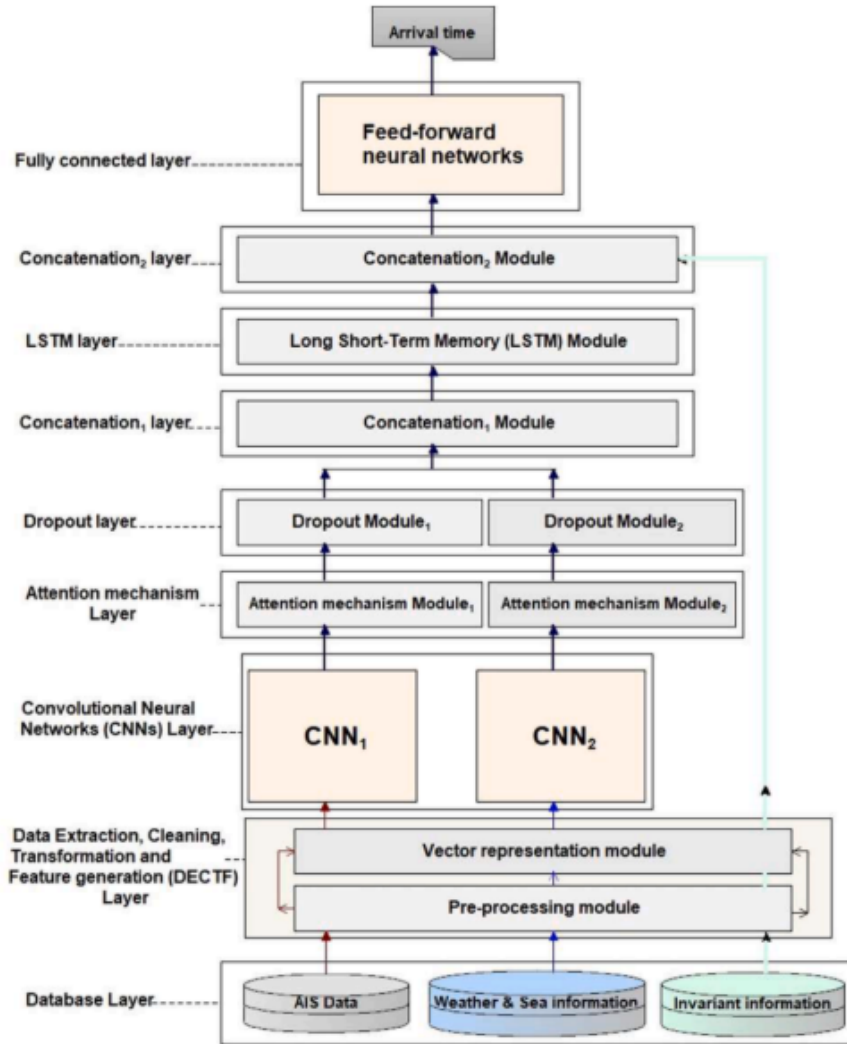


FIG. 3.9 : L'architecture de la méthode VATP [41]

4. Autres approches hybrides et optimisation

- Des modèles comme Markov Decision Process couplés à du RL ont été explorés pour des tâches telles que la prédiction dynamique d'ETA ou l'optimisation des files

d'attente dans les ports.

- Des algorithmes génétiques ont également été utilisés pour résoudre des problèmes d'allocation de quais et de planification à quai.

5. Données utilisées : l'apport des données AIS

Les données AIS fournissent en temps réel des informations sur la position, la vitesse et la trajectoire des navires. Plusieurs modèles s'appuient sur ces données pour :

- prédire les temps d'attente et de rotation ;
- détecter les congestions portuaires (Projet CIRMAR, source complémentaire n°1) ;
- identifier des comportements inhabituels liés à des risques (source complémentaire n°1).

Architecture d'une solution basée sur un modèle de prédiction

La plupart des systèmes de prédiction dans la logistique portuaire suivent une architecture similaire [30, 37] :

1. Collecte de données : les données proviennent de capteurs IoT, de systèmes AIS (Automatic Identification System), des historiques d'opérations, et de sources météorologiques [37].
2. Prétraitement des données : nettoyage, normalisation, traitement des valeurs manquantes.
3. Phase d'apprentissage (training) : les modèles sont entraînés sur les données historiques à l'aide d'algorithmes supervisés ou non supervisés [29, 32].
4. Évaluation et ajustement : les performances sont évaluées avec des métriques comme RMSE, MAE ou accuracy selon le type de modèle [31].
5. Déploiement : le modèle est intégré dans une application logistique pour fournir des prédictions en temps réel ou périodiquement [33, 36].

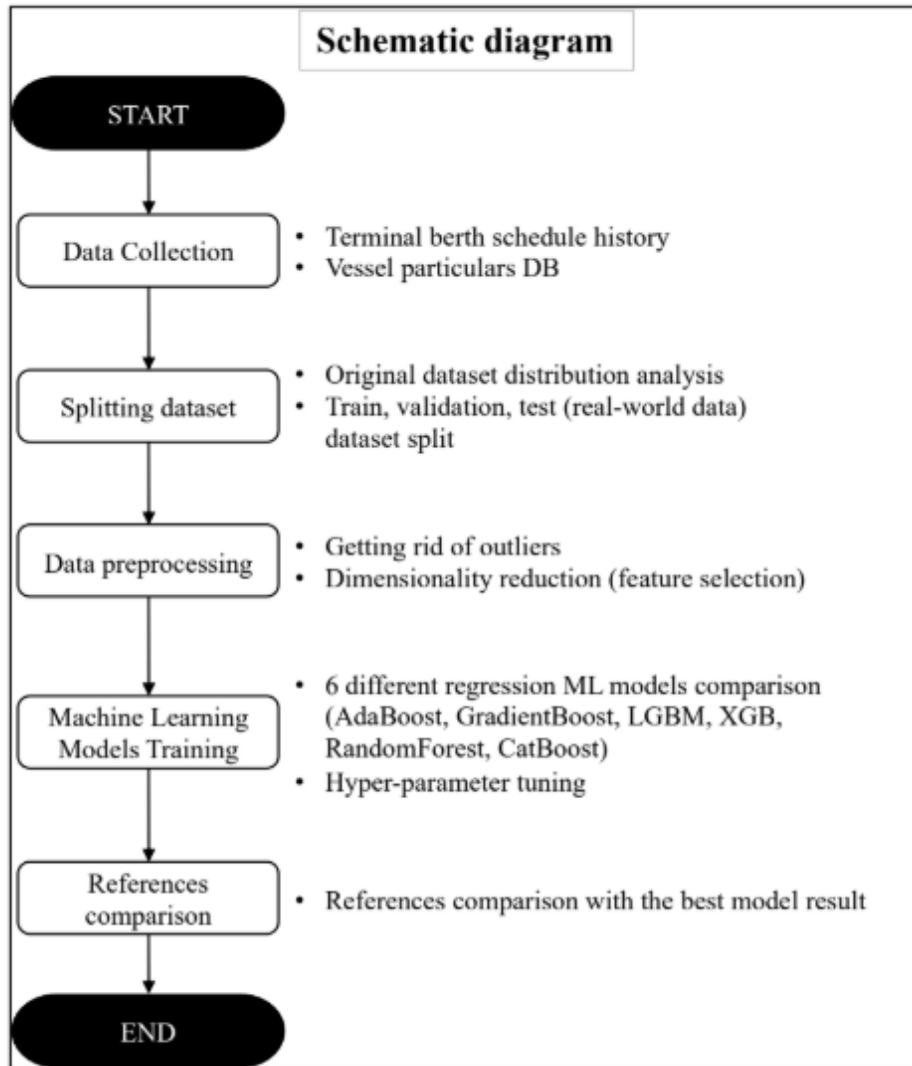


FIG. 3.10 : Schéma conceptuel de la recherche [42]

Certaines architectures avancées incluent des modules de visualisation, des API pour l'intégration avec les plateformes logistiques, ou encore des mécanismes de mise à jour automatique des modèles[38].

Impact de l'utilisation des modules de prédiction dans la chaîne logistique maritime

L'intégration de modèles de prédiction dans les systèmes d'information portuaires permet une amélioration notable de l'efficacité opérationnelle. À travers des technologies de Machine Learning et de Deep Learning, les ports peuvent désormais anticiper les mouvements des navires, mieux gérer les ressources physiques (quais, grues, camions), et optimiser les cycles de traitement.

a) Optimisation du plan de quai et de l'occupation des ressources Les modèles prédictifs permettent une planification anticipée de l'occupation des quais en estimant avec précision :

- L'heure d'arrivée des navires (ETA)

- Le temps de séjour

Résultats clés :

- Algorithmes utilisés : XGBoost, Random Forest, CatBoost
- Performance : R^2 jusqu'à 0.81 [42]
- Avantages :
 - Réduction des conflits de créneaux
 - Évite le surbooking
 - Optimise le séquençement des opérations

b) Réduction des congestions portuaires Approches combinées :

- Données AIS
- Algorithmes de prédiction
- Analyse des flux historiques

Exemple : Projet CIRMAR [29]

- Identification des périodes de congestion
- Reconfiguration dynamique des opérations
- Réduction des temps d'attente en rade

c) Prédiction du temps de traitement Applications :

- Allocation dynamique des ressources :
 - Grues
 - Camions
 - Personnels
- Performances [40] :
 - Précision : 95% (retards >24h)
 - Prédiction du *Total Time* et *Delay Time*

d) Synchronisation interopérateurs Bénéfices :

- Meilleure coordination entre :
 - Remorqueurs
 - Agents de pilotage
 - Opérateurs
- Optimisation [41] :
 - Prédiction ETA
 - Vitesse d'approche
 - Arrivée *Just-in-Time*

e) Prévision du trafic portuaire Solutions avancées :

- Modèles hybrides (DWT–LSTM)
- Performance supérieure pour :
 - Volume de trafic
 - Anticipation de demande
 - Adaptation des capacités [44]

3.3 Revue de littérature

Référence	Outils	Contribution	Résultats
[62]	ML, Logistic Regression, CART, RF	L'étude explore l'impact de l'incertitude des arrivées de navires sur la planification portuaire et propose une approche ML pour améliorer les prévisions d'ETA.	Développement d'un modèle de prédiction (Random Forest le plus performant). Amélioration de la planification grâce à des estimations quantitatives.
[61]	ML (Logistic, CART, RF)	Analyse l'impact des variations d'ETA sur l'efficacité des opérations portuaires. Approche qualitative pour estimer retards/avances.	Identification des variables significatives influençant l'incertitude des arrivées. Représentations graphiques pour l'analyse.
[57]	ML (supervisé, non supervisé), Deep Learning, Cognitive Computing	Explore le potentiel de l'IA dans la logistique, malgré une adoption encore émergente.	Capacités avancées dans le traitement de tâches complexes, mais adoption limitée dans le secteur.
[66]	C-DFP	Analyse l'impact de la digitalisation sur les plateformes de réservation des transitaires.	Identification de 5 caractéristiques essentielles pour les plateformes numériques. Amélioration de l'intégration des données.
[64]	Blockchain, IOIS, TOE, IST	Analyse les facteurs influençant l'adoption des systèmes d'e-booking dans la chaîne logistique maritime.	L'adoption est influencée par la confidentialité des données, la pression des partenaires, et les exigences gouvernementales.
[63]	SCM, Big Data Analytics, AI, Predictive Models	Explore l'importance des services logistiques intermodaux pour le transport de marchandises.	Optimisation du transfert des marchandises entre différents modes de transport.
[27]	TOE, Framework IS	Analyse les facteurs influençant l'acceptation des systèmes d'information inter-organisationnels (IST) dans le transport maritime.	Intégration de l'IoT pour optimiser les opérations portuaires. Amélioration de l'efficacité énergétique.

[58]	ICT, IoT, Blockchain, Big Data	Examine l'impact des technologies de l'information sur l'amélioration des performances portuaires.	Précision accrue des prévisions, meilleure planification des ressources et réduction des coûts.
[59]	ERP	Analyse les facteurs influençant l'adoption des systèmes de réservation électronique de conteneurs dans le transport maritime.	L'adoption est influencée par la pression des partenaires commerciaux et la compatibilité organisationnelle.
[44]	Data Analytics, ML (ARIMA, DWT, LSTM, SARIMA)	Propose un modèle prédictif innovant combinant analyse non linéaire et ML.	Développement d'un modèle hybride (DWT + LSTM) pour analyser les tendances du trafic portuaire.
[60]	MINLP	Propose une plateforme numérique intégrée pour optimiser la réservation de conteneurs.	Système multi-agents pour automatiser la réservation et l'échange d'informations en temps réel.
[68]	AIS, Spline Interpolation	Nouvelle méthode pour améliorer la précision des prévisions d'ETA basée sur l'analyse des routes maritimes passées.	Réduction de l'erreur moyenne absolue (MAE) à environ 3h14, surpassant les méthodes traditionnelles.
[42]	ML (AdaBoost, XGBoost, LGBM, CatBoost, RF)	Analyse la durée de séjour des navires pour améliorer la planification portuaire.	Les modèles ML surpassent les références opérationnelles en termes de précision.
[43]	Reinforcement Learning, Neural Networks, Gale-Shapley Algorithm	Explore comment l'IA peut répondre aux défis des ports en associant problèmes et solutions basées sur l'IA.	Optimisation du processus de correspondance entre défis et solutions grâce à un algorithme amélioré.
[40]	RF, LightGBM, SVM, NN, SHAP Analysis	Explore l'importance de la prévision des temps de séjour et des retards pour optimiser la gestion portuaire.	Précision accrue dans les prévisions, meilleure allocation des ressources et réduction des coûts.
[38]	DLBM, CNN, GNN, LSTM	Propose une nouvelle méthode combinant plusieurs sources de données pour améliorer la prédiction de l'ETA.	Amélioration significative de la précision, mais problème de surapprentissage avec de nouvelles données.

[39]	ML (XGBoost, RF, Decision Tree), GOSS, LASSO	Explore comment l'IA peut améliorer l'efficacité des opérations portuaires.	Précision accrue dans la prédiction des temps d'attente, réduction des congestions et des émissions.
[67]	Blockchain, Big Data, Cybersecurity	Analyse l'impact de l'IA sur la gestion portuaire, en particulier à Abidjan.	Amélioration de l'efficacité, meilleure gestion du trafic et réduction des coûts.
[65]	RF, AIS, SHAP Analysis	Examine les caractéristiques des ports majeurs en analysant les connexions maritimes.	Identification des facteurs clés de l'importance des ports. Construction d'un réseau pour mieux comprendre le commerce mondial.

TAB. 3.1 : Revue de littérature - Élaboration propre -

3.4 Conclusion

L'analyse des technologies mobilisées dans la gestion logistique maritime met en lumière une transition stratégique vers des systèmes intelligents, interconnectés et capables de prédiction. L'intégration des systèmes d'information logistique (ERP, WMS, TMS), combinée aux technologies de suivi en temps réel (IoT, GPS, RFID) et à des modèles de prédiction avancés comme XGBoost, LSTM ou Random Forest, transforme en profondeur les pratiques portuaires.

Les ports les plus performants capitalisent sur cette convergence pour renforcer la traçabilité, automatiser les processus décisionnels et anticiper les perturbations logistiques. Les gains opérationnels sont significatifs : réduction des délais, allocation optimisée des ressources, planification dynamique, fluidité des flux et diminution des congestions. Cette évolution favorise également une meilleure synchronisation entre les acteurs de la chaîne logistique, dans une logique collaborative et réactive.

Parmi les modèles prédictifs étudiés, XGBoost s'impose comme l'approche la plus performante, grâce à sa précision élevée, sa capacité de généralisation et sa robustesse face aux données complexes et hétérogènes. Ces atouts en font un outil central dans la conception d'une solution logistique moderne et efficace, que nous présenterons dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Développement de la solution

4.1 Introduction

Le transport de conteneurs connaît une forte expansion, soutenue par la croissance économique mondiale et les avantages qu'il offre. La numérisation a transformé le secteur maritime, améliorant la performance, la visibilité et la gestion de l'information [47]. Face à la complexité des opérations portuaires et au manque de visibilité, une solution numérique innovante devient essentielle pour garantir une gestion efficace des conteneurs. Notre plateforme répond à ce besoin en proposant un système de réservation en ligne (e-booking) enrichi de fonctionnalités avancées telles que le suivi et la prédiction des retards via l'intelligence artificielle. Elle vise à connecter l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique, à digitaliser les processus, et à renforcer la coordination pour une logistique maritime plus fluide et performante.

4.2 Ensemble des principales fonctionnalités

Dans un contexte où la complexité des opérations logistiques maritimes ne cesse de croître, il devient indispensable d'adopter des outils digitaux adaptés pour améliorer l'efficacité, la transparence et la réactivité des acteurs de la chaîne d'approvisionnement. Afin de répondre à ces enjeux, notre plateforme propose un ensemble de fonctionnalités complémentaires, pensées pour optimiser la gestion du transport de conteneurs et faciliter la coordination entre les différents intervenants :

- **E-booking :**

Le processus de réservation comprend la confirmation des détails de l'expédition et la sélection d'un conteneur. Les chargeurs peuvent utiliser des plateformes en ligne pour simplifier ce processus en comparant les offres de plusieurs compagnies maritimes et en s'assurant que des solutions rentables sont adaptées à leurs besoins.[48]

- **Suivi des conteneurs :**

Le suivi des conteneurs ou tracking est l'action de collecter puis de gérer les informations relatives aux mouvements et à la situation des conteneurs.[49] C'est un système de visualisation de la position du conteneur dans le parcours logistique.

- **Prédiction des retards :**

On utilise un moteur d'intelligence artificielle (XGboost) qui analyse les données historiques pour anticiper les retards potentiels, permettant une meilleure organisation.

- **Espace personnel :**

Un tableau de bord personnalisé offrant un accès facile à l'ensemble des informations, garantissant une expérience utilisateur fluide et centralisée.

Cette organisation vise à offrir une solution complète, intégrée et performante, répondant aux défis spécifiques du transport maritime.

4.3 Justification des choix techniques

Frontend

Le frontend d'une application est la partie visible et interactive, avec laquelle les utilisateurs interagissent directement. Il englobe tout ce qui est affiché sur le navigateur,

des éléments graphiques aux formulaires de saisie, en passant par les animations. Un frontend bien conçu est essentiel pour offrir une expérience utilisateur agréable et intuitive, qui encourage l'engagement et la satisfaction des utilisateurs.

- **React** : ReactJS est une bibliothèque JavaScript basée sur les composants, utilisée pour développer des interfaces utilisateur interactives. Actuellement, c'est la bibliothèque frontend la plus populaire. Elle gère principalement la couche "Vue" (View) du modèle MVC (Modèle-Vue-Contrôleur).[50]
- **Vite** : est un outil moderne de build frontend qui offre une alternative rapide à Webpack. Il propose un démarrage ultra-rapide du projet et un rafraîchissement instantané (Hot Module Replacement) pendant le développement, ce qui augmente considérablement la productivité du développeur.[51]
- **Tailwind CSS** : est un framework CSS utilitaire qui permet de construire des interfaces élégantes de manière rapide et cohérente, avec une grande flexibilité dans le design sans écrire de CSS personnalisé. Il est particulièrement apprécié pour sa compatibilité avec React et sa gestion facilitée des états responsive.[52]

Backend

Le backend gère le traitement des données liées aux conteneurs, la prédiction des retards, la communication avec la base de données, ainsi que la gestion des flux d'information entre les différentes interfaces (web et mobile).

- **Django** : est un framework web Python de haut niveau qui favorise un développement rapide et une conception propre et pragmatique. Conçu par des développeurs expérimentés, il prend en charge une grande partie de la complexité du développement web, ce qui permet de se concentrer sur la création de son application sans avoir à réinventer la roue. Il est gratuit et open source.[53]
- **Django REST Framework (DRF)** : permet d'exposer les fonctionnalités backend via des API RESTful. Il facilite la communication entre le backend et le frontend de manière standardisée et sécurisée, tout en respectant les principes de l'architecture REST.[54]

Base de données

- **PostgreSQL** : PostgreSQL est un système de gestion de bases de données relationnelles objet (ORDBMS) fondé sur POSTGRES. Ce dernier a été développé à l'université de Californie au département des sciences informatiques de Berkeley.[55]

Autres outils

- **Axios** : bibliothèque JavaScript, un client HTTP basé sur les promesses compatible avec node.js et les navigateurs. Côté serveur, il utilise le module natif http de node.js, et côté client (navigateur) il utilise les XMLHttpRequests.[56]
- **JWT** : est un format compact de représentation des revendications (claims), conçu pour les environnements où l'espace est limité, tels que les en-têtes d'autorisation HTTP ou les paramètres de requêtes URI.[57]

Le choix des technologies utilisées pour le développement de la plateforme CONTRACK repose sur plusieurs critères essentiels : performance, maintenabilité, sécurité, modularité et facilité d'intégration.

En résumé, l'ensemble de cette stack technologique a été sélectionné afin de répondre aux exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du projet CONTRACK, en assurant une solution sécurisée et maintenable dans le contexte réel de la logistique maritime.

4.4 Conception de la solution

4.4.1 Architecture générale

Le modèle MVC (Modèle-Vue-Contrôleur) facilite une organisation claire et structurée du code source pour notre plateforme de suivi, de prédiction des retards et de réservation (e-booking) de conteneurs maritimes. Il oriente la création des composants nécessaires et définit précisément leurs rôles respectifs.[56]

L'objectif principal du modèle MVC est de séparer la logique de l'application en trois couches distinctes :

- le Modèle, qui gère les données (réservations, conteneurs, utilisateurs, prédictions de retard),
- la Vue, qui représente l'interface utilisateur (React + Tailwind CSS),
- et le Contrôleur, qui traite les requêtes, applique la logique métier et interagit avec les données (via Django REST Framework).

Cette architecture permet une gestion plus efficace du code, facilite la maintenance, et améliore la scalabilité de la plateforme, tout en assurant une expérience utilisateur fluide et réactive.



FIG. 4.1 : Architecture MVC du système

Dans le cadre de notre système de suivi et de prédiction des retards des conteneurs maritimes, l'architecture logicielle repose sur une séparation en trois couches : Modèle, Vue et Contrôleur (pattern MVC).

Couche Modèle : La couche Modèle est responsable de la gestion de la logique métier de notre application, en particulier le traitement des données relatives aux conteneurs, aux itinéraires maritimes, aux réservations (e-booking) et aux prédictions de retard. Elle interagit avec la base de données PostgreSQL, en manipulant les différentes entités telles que les conteneurs, les ports, les clients ou encore les historiques de trajets.

Grâce à Python et au framework Django, nous avons pu intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle pour analyser les données collectées et effectuer des prédictions pertinentes sur les délais potentiels. Ce choix technologique facilite la gestion centralisée des règles métier et l'intégration fluide d'outils de machine learning ou de data analysis.

Couche Vue : La couche Vue correspond à l'interface utilisateur mobile développée avec React Native. Elle se charge de présenter les données fournies par le backend de manière claire, intuitive et interactive. Chaque écran qu'il s'agisse du tableau de bord, du suivi de conteneurs ou du module de réservation a été pensé pour offrir une expérience utilisateur fluide.

Couche Contrôleur : La couche Contrôleur assure la médiation entre l'utilisateur, le Modèle et la Vue. Implémentée via l'API REST de Django, elle traite les requêtes utilisateurs (par exemple : demande de réservation, suivi d'un conteneur, consultation des prédictions), interagit avec la couche Modèle pour récupérer ou modifier les données, puis les transmet à la Vue pour affichage.

4.4.2 Description des acteurs du système

Client

Le client est un utilisateur du système qui interagit avec la plateforme pour effectuer diverses actions liées à la gestion des conteneurs. Ses principales responsabilités incluent :

- **Créer un compte :** Le client doit s'inscrire sur la plateforme pour accéder aux services.
- **Demander un service :** Il peut effectuer diverses actions comme :
 - Réserver un conteneur : Faire une demande de réservation.
 - Suivre l'état : Vérifier l'évolution de sa demande.
 - Recevoir une notification : Être informé de l'évolution de sa demande.
- **S'authentifier :** Cette action est incluse dans plusieurs fonctionnalités et est nécessaire pour accéder à certains services.

Admin

L'admin est un utilisateur ayant des droits avancés pour gérer les clients et les services liés aux conteneurs. Ses responsabilités incluent :

- **S'authentifier :** Avant d'accéder aux fonctionnalités du système, l'admin doit s'authentifier.
- **Gérer la demande :** Superviser et traiter les demandes des clients,
 - Consultant les réservations : Vérifier les demandes de réservation des conteneurs.
 - Gérant les opérations portuaires : Suivre et mettre à jour le statut des conteneurs à chaque étape des différentes opérations portuaires (sans gérer directement ces opérations)
 - Validant les documents : Examiner et approuver les documents soumis par les clients.

- **Gérant les comptes** : Superviser les comptes utilisateurs.
- **Gérant les conteneurs** : Apporter des modifications aux réservations en ajoutant, modifiant ou supprimant des informations.
- **Gérer le compte** : Administrer les comptes des utilisateurs en :
 - Validant : Approuver des comptes ou des modifications.
 - Supprimant : Désactiver ou supprimer des comptes.
 - Modifiant : Mettre à jour les informations d'un compte.

L'admin joue donc un rôle clé dans la gestion du système en s'assurant du bon fonctionnement des opérations et en validant les demandes des clients.

4.4.3 Schéma relationnel de la base de données

1. Client

`Client(id_client, nom, prénom, email, mot_de_passe, téléphone, date_inscription)`

- `id_client` : clé primaire unique
- Contient les informations personnelles du client.
- Chaque client peut effectuer plusieurs réservations.

2. Admin

`Admin(id_admin, nom, prénom, email, mot_de_passe, rôle)`

- `id_admin` : clé primaire unique
- Contient les informations des administrateurs avec leurs rôles.

3. Conteneur

`Conteneur(id_conteneur, type, capacité, statut, localisation)`

- `id_conteneur` : clé primaire
- Représente les conteneurs disponibles pour réservation.
- Le statut indique la disponibilité ou l'étape opérationnelle.

4. Réservation

`Réservation(id_reservation, date_reservation, statut_reservation, id_client, id_conteneur)`

- `id_reservation` : clé primaire
- `id_client` : clé étrangère $\rightarrow$ `Client(id_client)`
- `id_conteneur` : clé étrangère $\rightarrow$ `Conteneur(id_conteneur)`
- Représente la demande de réservation d'un conteneur par un client.

5. Suivi

Suivi(id_suivi, id_reservation, date_mise_a_jour, statut_suivi, description)

- id_suivi : clé primaire
- id_reservation : clé étrangère → Réservation(id_reservation)
- Permet de tracer l'évolution de la réservation (ex : en attente, validée, expédiée).

6. Notification

Notification(id_notification, id_client, message, date_envoi, lu)

- id_notification : clé primaire
- id_client : clé étrangère → Client(id_client)
- Messages envoyés aux clients pour informer de l'état des réservations ou autres événements.

7. Documents

Document(id_document, id_reservation, type_document, chemin_fichier, statut_vali

- id_document : clé primaire
- id_reservation : clé étrangère → Réservation(id_reservation)
- Stocke les documents soumis par les clients et validés par les admins.

8. Liens clés

- Un Client peut avoir plusieurs Réservations.
- Une Réservation concerne un seul Conteneur.
- Une Réservation peut avoir plusieurs entrées de Suivi.
- Un Client peut recevoir plusieurs Notifications.
- Une Réservation peut être associée à plusieurs Documents.
- L'Admin intervient dans la gestion, la validation et la mise à jour des réservations, documents et comptes, mais n'est pas directement lié par clé étrangère dans les tables opérationnelles.

4.4.4 Diagrammes UML

Diagramme de cas d'utilisation



FIG. 4.2 : Diagramme de cas d'utilisation -Élaboration propre-

Ce diagramme de cas d'utilisation représente les différentes interactions entre deux types d'utilisateurs (le Client et l'Admin), pour un système de gestion de services liés à la réservation de conteneurs.

D'un côté, le Client peut créer un compte, effectuer une demande de service de réservation de conteneurs, de suivi de l'état de sa demande, et la réception de notifications. Avant tout cela on fait une authentification, garantissant un accès sécurisé et personnalisé.

De l'autre côté, l'Admin a des droits qui lui permettent de gérer les comptes utilisateurs (validation, modification, suppression), ainsi que de traiter les demandes. Cela inclut la validation de documents, la consultation des réservations, et la gestion des diffé-

rentes opérations portuaires. Il peut également gérer les clients et les conteneurs (ajout, suppression, modification).

Enfin, ce diagramme répartit les rôles et les responsabilités, tout en prenant en compte la sécurité via l'authentification. Il met également en avant l'importance d'une collaboration fluide entre utilisateurs et administrateurs pour assurer un fonctionnement optimal du système.

Modèle conceptuel UML

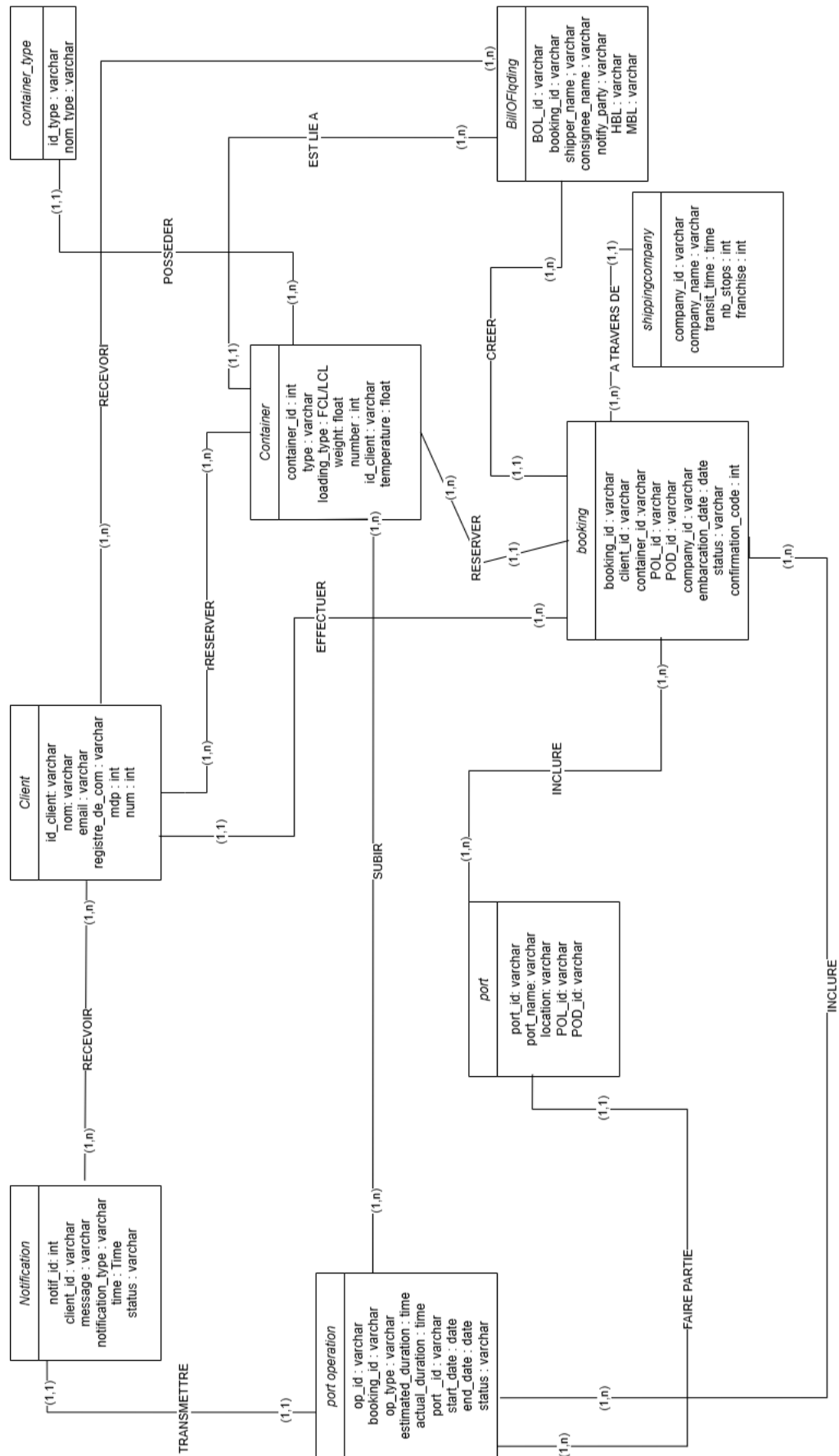


FIG. 4.3 : Modèle conceptuel UML - Élaboration propre-

Ce modèle conceptuel de données montre comment fonctionne un système de gestion des réservations de conteneurs maritimes, en reliant les différentes parties importantes du processus.

Le client peut faire des réservations, recevoir des notifications, et avoir plusieurs conteneurs, chacun avec ses propres caractéristiques (type, poids, température, etc.).

Chaque réservation est liée à un conteneur, à un port de départ, un port d'arrivée, et à plusieurs opérations portuaires. Ces opérations décrivent ce qui arrive au conteneur à chaque étape (type d'opération, durée, dates, etc.).

Les ports, identifiés par leur position géographique, peuvent être utilisés dans plusieurs opérations et jouent un rôle essentiel dans le suivi du conteneur.

Un Bill of Lading (ou connaissance) est généré pour chaque réservation. Il contient les informations sur l'expéditeur, le destinataire, et les documents liés au transport.

La compagnie maritime, avec ses navires, assure le transport des conteneurs entre les ports.

Grâce à ce modèle, il est possible de suivre de manière claire et organisée chaque étape, depuis la réservation jusqu'aux opérations finales dans les ports.

4.5 Développement des fonctionnalités

4.5.1 Module de prédiction et de suivi des opérations portuaires

1. Objectif du module

Ce module a pour objectif d'estimer, à partir de données historiques, les dates prévisionnelles des principales étapes logistiques d'un conteneur : accostage, visite douanière, et livraison. L'objectif est de fournir au client une visibilité anticipée sur les délais, afin de mieux planifier la suite de ses opérations. Les prédictions sont accessibles depuis l'espace client, sous forme de tableau synthétique. Le module ne couvre pas encore le suivi en temps réel de l'état du conteneur.

2. Méthodologie du machine learning

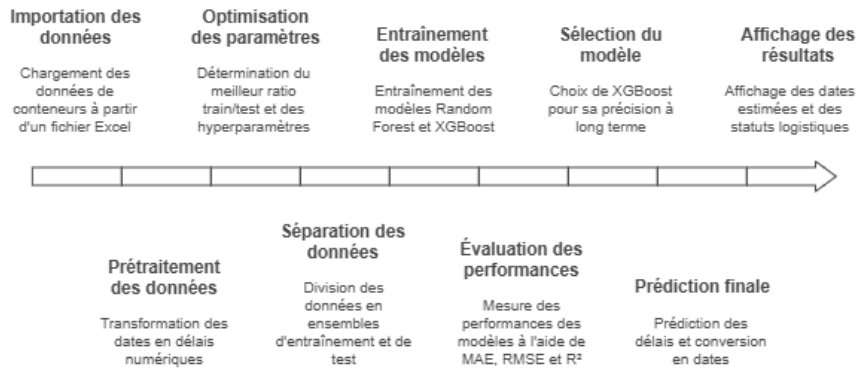


FIG. 4.4 : Workflow du module de prédiction -Élaboration propre-

3. Description des données

Le jeu de données exploité comporte 10 097 entrées, chaque ligne représentant le parcours logistique d'un conteneur depuis sa décharge jusqu'à sa livraison finale. Le fichier est fourni au format Excel (.xlsx) et contient les colonnes suivantes :

Colonne	Description
CONTAINER	Identifiant unique du conteneur
VESSEL BERTHING	Date d'accostage du navire
DISCHARGE	Date de déchargement du conteneur
DELIVERY	Date de sortie/livraison du conteneur
DWELL TIME : DISCHARGE / DELIVERY	Délai (en jours) entre le déchargement et la livraison
VISITE DATE	Date de la visite douanière
DWELL TIME : DISCHARGE / CI-IN	Délai entre le déchargement et l'entrée en zone douane
DWELL TIME : CI-IN / DELIVERY	Délai entre la fin des formalités et la livraison finale

TAB. 4.1 : Description du jeu de données - Élaboration propre -

Le module de prédiction repose sur un historique réel d'expéditions comprenant 10 097 conteneurs, fourni au format Excel. Le fichier contient plusieurs colonnes de dates liées aux différentes étapes de traitement portuaire, notamment :

- Date d'accostage (VESSEL BERTHING)

- Date de débarquement (DISCHARGE)
- Date de visite (VISITE DATE)
- Date de livraison (DELIVERY)

4. Prétraitement effectué

Afin de rendre les données exploitables par les algorithmes de machine learning, plusieurs étapes de préparation ont été réalisées :

- Tri chronologique des conteneurs en fonction de la date d'accostage, afin d'assurer une cohérence temporelle dans l'analyse.
- Calcul de délais entre les étapes, plutôt que l'utilisation des dates brutes. Les algorithmes tels que XGBoost sont plus performants avec des variables numériques continues qu'avec des timestamps. Les délais suivants ont été extraits :
 - Accostage → Débarquement
 - Débarquement → Visite (DV)
 - Visite → Livraison (VL)

5. Évaluation des performances

Afin d'identifier le modèle le plus adapté à notre cas d'usage, nous avons comparé les performances de Random Forest et XGBoost à l'aide des trois métriques classiques en régression :

- MAE
- RMSE
- R^2 (coefficient de détermination)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Modèle 1 (DV)	MAE	RMSE	R^2
Random Forest	5.6042 jours	12.9875 jours	-0.0022
XGBoost	5.3967 jours	10.3347 jours	-0.0004
Modèle 2 (VL)	MAE	RMSE	R^2
Random Forest	2.5341 jours	3.5341 jours	0.0002
XGBoost	2.5715 jours	3.6299 jours	-0.0000

TAB. 4.2 : Tableau comparatif des modèles - Élaboration propre -

Les résultats des deux modèles sont proches en termes de précision. Cependant, notre choix s'est porté sur XGBoost pour plusieurs raisons :

- Résultats légèrement meilleurs sur toutes les métriques (même si l'écart est faible).

- Références bibliographiques : plusieurs travaux de recherche consultés (voir chapitre 3 – état de l’art) ont mis en avant la robustesse et la précision de XGBoost dans des contextes similaires.
- Évolutivité : XGBoost est reconnu pour mieux gérer de plus gros volumes de données et offrir une plus grande stabilité dans les contextes de production, ce qui est un atout à long terme.

En conclusion, bien que les deux modèles soient performants, XGBoost a été retenu pour la suite du développement, notamment en raison de sa capacité à mieux généraliser et de son adoption plus large dans les cas d’usage industriels.

6. Exploitation technique du modèle

Le modèle XGBoost retenu a été entraîné localement, puis sauvegardé au format pickle. Ce fichier est ensuite chargé dans le back-end de la plateforme (développée avec Django) au moment où une prédiction est demandée.

Le processus de prédiction se fait via une API interne : lors d’une requête client, les données sont transmises au modèle, qui renvoie les délais estimés.

Les résultats sont intégrés dans l’espace personnel du client, sous forme d’un tableau synthétique indiquant les étapes logistiques estimées :

- Accostage → Visite
- Visite → Livraison

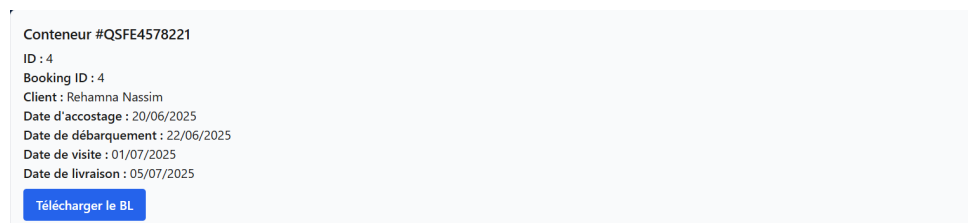


FIG. 4.5 : Affichage des prédictions côté client

7. Limites et évolutions prévues

Limites actuelles

- Le module est partiellement automatisé : bien que le modèle de prédiction soit intégré, la collecte et la mise à jour des données restent manuelles.
- L’absence d’un flux de données en temps réel réduit l’efficacité globale du suivi.
- Le modèle n’est reformé qu’en local, de manière ponctuelle, sans automatisation continue.

Évolutions envisagées

- Automatisation complète : connecter la plateforme à des sources de données portuaires ou maritimes pour une mise à jour automatique des statuts.
- Boucle de feedback : intégrer un mécanisme permettant d'enregistrer les délais réels une fois l'expédition terminée, afin de réentraîner régulièrement le modèle et améliorer sa précision.
- Historique enrichi : à mesure que la base de données s'enrichit, XGBoost pourra exploiter davantage de variables (ex. : météo, type de cargaison) pour affiner les prévisions.

4.5.2 Réservation de conteneurs

Le module de réservation permet à un client de soumettre une demande complète de transport maritime. Cette demande repose sur un ensemble de champs soigneusement structurés, permettant de capturer les spécificités techniques, commerciales et logistiques de l'expédition.

L'ensemble des paramètres collectés via le formulaire est résumé dans le tableau suivant :

Nom du champ	Description
container_type	Type de conteneur (Dry, Reefer, Open Top, etc.)
expedition	Nature de l'opération (import ou export)
incoterm	Incoterm applicable, définissant les responsabilités logistiques
cargo_category	Catégorie générale de marchandise (ex. : général, dangereux)
cargo_type	Type précis de marchandise (si connu/prévu dans les options proposées)
custom_cargo	Description personnalisée du type de marchandise (si non listé)
poids	Poids total de la cargaison (en kg)
loading_port	Port de chargement sélectionné (liste déroulante)
unloading_port	Port de déchargement sélectionné
ideal_loading_date	Date idéale de chargement souhaitée par le client

TAB. 4.3 : Paramètres collectés via le formulaire

Type de conteneur

Sélectionnez...

Mode d'expédition

Sélectionnez...

INCOTERM

Sélectionnez...

Port de chargement

Sélectionnez...

Port de déchargement

Sélectionnez...

Type de marchandise

☒ Générale
 ☐ Dangereux (IMDG)

Sélectionnez le type de marchandise

Sélectionnez...

Poids de la marchandise (kg)

Ex: 1000

Date idéale de chargement

Sélectionnez une date

FIG. 4.6 : Formulaire de réservation côté client (vue complète)

Une fois le formulaire soumis, la demande est transmise au back-end via une API REST. Elle est alors enregistrée dans la base de données et placée dans un état "En attente de validation". Cette étape permet à un administrateur de vérifier la demande manuellement, de l'éditer si nécessaire, puis de la valider ou de la rejeter.

ID	Type conteneur	Expédition	Incoterm	Catégorie	Type	Poids	Port de chargement	Port de déchargement	Date de chargement	Client	Statut
1	40' Standard	FCL	FOB	general	Textiles	2000	Port de Djendjen	Port de Dubaï (Jebel Ali)	27/05/2025	mehdi idoui	En attente
2	20' Standard	FCL	FAS	general	Produits alimentaires	4444	Port de Dammam	Port de Muscat	28/05/2025	saadi lydia	Confirmée
3	40' Dangereux	FCL	CIF	imdg	Gaz	20000	Port d'Anvers	Port de Singapour	14/06/2025	Rehamna Nassim	En attente
4	40' Standard	FCL	FOB	general	Produits alimentaires	10000000	Port de Guangzhou	Port de Mogadiscio	01/06/2025	Rehamna Nassim	En attente
8	20' Reefer	FCL	CIF	general	Matériel médical	30000	Port de Doha	Port d'Oran	30/05/2025	Regat fatima	Confirmée

FIG. 4.7 : Tableau de gestion des réservations dans l'interface admin

Lorsqu'un changement de statut intervient (validation, refus, mise à jour), le client est automatiquement notifié par e-mail, ce qui assure un suivi transparent de sa demande.

ID : 9	Type de conteneur : 20' Reefer
Mode d'expédition : FCL	Incoterm : CIF
Catégorie de cargaison : general	Type de cargaison : Produits alimentaires
Poids : 22222	Port de chargement : Port de Shanghai
Port de déchargement : Port de Rotterdam	Date de chargement idéale : 25/06/2025
Client : Ramdani Youssouf	
Statut : En attente	

Confirmer
Rejeter

[← Retour à la liste des réservations](#)

FIG. 4.8 : Détail d'une réservation côté admin



FIG. 4.9 : Exemple d'e-mail de notification reçu par le client après validation

Logique backend

Lorsque le statut passe à "Confirmée" :

1. Une entrée est automatiquement créée dans la table Container
2. L'admin peut ensuite remplir :
 - La date d'accostage
 - L'identifiant du conteneur
3. Ces données alimentent le module de prédiction pour calculer :
 - La date de visite du port
 - La date estimée de livraison finale

ID Conteneur

QSD4545263

Date d'accostage

29-05-2025

Date de visite calculée

2025-06-09

Date de livraison calculée

2025-06-13

Enregistrer

FIG. 4.10 : Formulaire d'édition d'un conteneur

Ce système permet de prédire les délais réels du traitement portuaire et de livraison à partir des données opérationnelles, offrant ainsi une vision plus précise du processus pour le client.

4.5.3 Gestion des utilisateurs

La gestion des utilisateurs repose sur un système d'inscription contrôlée, garantissant que seuls les utilisateurs validés peuvent accéder à la plateforme. L'ensemble du processus a été conçu pour concilier simplicité côté client et maîtrise côté administrateur.

1.Inscription

L'inscription est réalisée via un formulaire React, envoyé en multipart/form-data vers un endpoint Django REST. Aucun mot de passe ni identifiant ne sont demandés à cette étape, l'utilisateur renseigne uniquement ses informations personnelles et professionnelles :

- Nom et prénom
- Adresse e-mail professionnelle
- Numéro de téléphone
- Fonction dans l'entreprise
- Nom de l'entreprise
- Adresse
- Documents justificatifs

Le formulaire est ensuite traité côté back-end dans une vue APIView sécurisée qui crée une instance utilisateur avec les champs ci-dessus, et un statut `is_active=False`.

FIG. 4.11 : Formulaire d'inscription client

2. Notification de mise en attente

Dès la création du compte, un e-mail de confirmation est envoyé via un backend mailer (SMTP) configuré dans Django. Il contient un message générique de réception de la demande et informe l'utilisateur que la vérification prendra jusqu'à 24h.

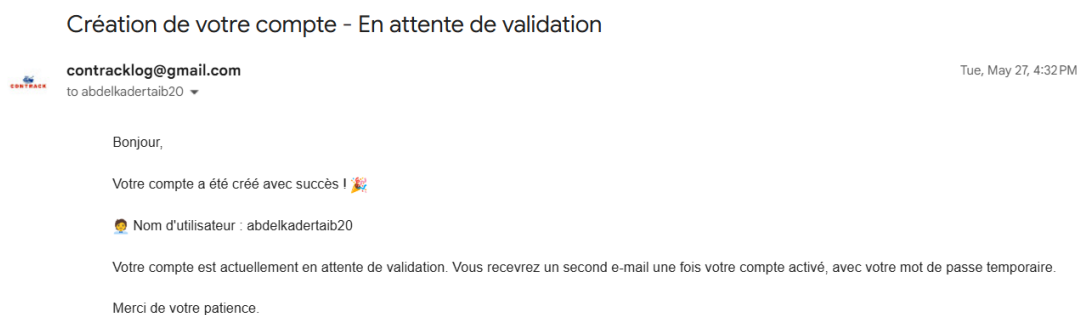


FIG. 4.12 : E-mail de mise en attente

3. Validation manuelle par l'administrateur

L'administrateur accède à la section "Utilisateurs" de l'interface d'administration React. Une requête API permet de récupérer les comptes dont `is_active=False`.

L'admin peut :

- afficher le détail du profil,

- consulter les documents joints,
- activer manuellement le compte.

Nom d'utilisateur : malakshd67	Nom complet : saha malak
Email : malakshd67@gmail.com	Téléphone : 0555697667
Entreprise : enst	Type d'entreprise : enst
Fonction : fonction	NIF : 11121121221
RC : 1121212	Adresse : alger
Document : Aucun document fourni	
Statut : ✔ Activé	
Admin : Non	

Désactiver le compte
Définir comme admin

[← Retour à la liste des utilisateurs](#)

FIG. 4.13 : Détails d'un utilisateur côté admin

L'activation déclenche une mutation back-end qui :

1. génère un username
2. crée un password sécurisé avec `get_random_string()`
3. met à jour `is_active=True`

4. Envoi automatique des identifiants

Une fois le compte activé, un e-mail HTML personnalisé est automatiquement envoyé avec :

- Le username (nom d'utilisateur) généré.
- Le password (mot de passe) généré.



FIG. 4.14 : E-mail d'envoi des identifiants de connexion

5. Attribution des rôles

L'administrateur peut assigner à chaque utilisateur un **rôle** lors de l'activation du compte :

- client : accès à l'espace client (réservations, suivi, etc.)
- admin : accès à tous les endpoints protégés (via JWT + permissions)

6. Connexion et sécurité

La connexion s'effectue exclusivement via un formulaire username/password, sécurisé par JWT (/api/token/).

- Si les identifiants sont valides, le token JWT et son refresh_token sont stockés côté client (localStorage).
- Une fois connecté, le rôle est extrait du payload du JWT et redirige l'utilisateur vers le bon espace (/client ou /admin).

4.5.4 Interface d'administration

L'interface d'administration constitue le **point de contrôle principal de la plateforme**, permettant aux utilisateurs ayant le rôle admin de gérer les différents modules fonctionnels : utilisateurs, réservations, documents logistiques, et suivi d'activité. Cette interface est construite en React, consomme les API exposées par Django REST Framework, et s'appuie sur un système d'authentification JWT pour sécuriser l'accès.

1. Tableau de bord global

Dès la connexion d'un administrateur, ce dernier est redirigé vers un tableau de bord centralisé, synthétisant les informations clés de la plateforme :

Élément affiché	Description
Nombre total de clients actifs	<code>users.count(is_active=True)</code>
Réservations en attente	<code>bookings.count(status="pending")</code>
Conteneurs livrés	<code>containers.count(status="delivered")</code>

TAB. 4.4 : Informations clés de la plateforme



FIG. 4.15 : Tableau de bord administrateur

2. Gestion des comptes utilisateurs

La section "Utilisateurs" permet à l'administrateur de gérer les comptes :
Fonctionnalités disponibles :

- Visualisation des informations détaillées
- Activation manuelle des nouveaux comptes
- Attribution ou modification du rôle (client/admin)
- Création manuelle d'un compte utilisateur avec génération automatique d'identifiants

L'ensemble de ces actions déclenche des appels API sécurisés via JWT et protégés par des permissions Django.

3. Visualisation et gestion des réservations

La section "Réservations" affiche sous forme de tableau toutes les demandes client.
Fonctionnalités :

- Vue tableau avec tri et filtre (par statut, client, date)
- Visualisation des détails d'une réservation (ports, dates, type de conteneur...)
- Modification manuelle du statut (En attente, Confirmée, Annulée)
- Déclenchement automatique de notifications par e-mail au client lorsque le statut change

4. Sécurité & Accessibilité

L'accès à l'interface est :

- restreint par rôle (admin uniquement)
- sécurisé par authentification JWT
- protégé côté back-end par les permissions Django (IsAdminUser)

5. Interface client

L'interface client permet aux utilisateurs professionnels de soumettre leurs demandes logistiques, suivre l'état de leurs réservations et accéder aux documents générés. Elle est développée en React, consomme les API Django REST sécurisées par JWT, et est accessible uniquement aux comptes validés.

1. Soumission de réservation

Formulaire guidé pour renseigner les informations nécessaires au transport (type de conteneur, ports, dates, etc.).

2. Suivi des demandes

Affichage de toutes les réservations du client avec mise à jour des statuts en temps réel (en attente, confirmée, annulée).

3. Accès aux documents

Téléchargement du Bill of Lading en PDF, disponible une fois la réservation confirmée.

4. Sécurité

Accès restreint aux clients validés, protégé par JWT et permissions côté serveur

4.5.5 Design et ergonomie

L'interface front-end a été construite en React.js avec le framework Vite, permettant un démarrage rapide et un rechargement ultra-rapide en développement. Le design de l'ensemble de la plateforme repose sur Tailwind CSS, une bibliothèque utilitaire qui permet un contrôle précis de la mise en page sans surcharger les fichiers CSS.

L'approche adoptée privilégie :

- une architecture de composants réutilisables (modulaires),
- une grille responsive basée sur Flexbox et Grid,
- et une gestion centralisée des couleurs, polices et espacements.

Chaque écran a été pensé pour être fonctionnel sur desktop, tablette et mobile, avec une gestion fluide des redimensionnements. L'expérience utilisateur a été simplifiée au maximum : navigation claire, formulaires accessibles, feedback visuel immédiat (notifications, états de bouton, loaders), tout en conservant une identité graphique cohérente.

Un soin particulier a été apporté à l'accessibilité (contrast ratios, libellés explicites, focus states) pour garantir une bonne prise en main par des profils non techniques.

4.5.6 Sécurité et authentification

La plateforme repose sur un système d'authentification JWT (JSON Web Token), mis en place grâce à la bibliothèque `django-rest-framework-simplejwt`. Lorsqu'un utilisateur se connecte, un token d'accès à durée de vie courte lui est attribué, ainsi qu'un token de rafraîchissement. Ce mécanisme permet d'éviter la persistance de sessions longues tout en assurant une bonne expérience utilisateur.

Les aspects techniques mis en œuvre sont :

- Stockage sécurisé du token dans `localStorage` côté front-end.
- Ajout systématique du token dans les en-têtes `Authorization (Bearer <token>)` lors des appels API via `Axios`.
- Rafraîchissement automatique du token lors de l'expiration, intercepté côté client.
- Vérification côté back-end avec des permissions explicites, par exemple :
 - `IsAuthenticated` pour les routes utilisateur,
 - `IsAdminUser` pour l'interface d'administration.

Chaque route Django est ainsi protégée par un système de permissions granulaires, et les erreurs (401, 403) sont gérées proprement côté React pour rediriger l'utilisateur vers la page de login si nécessaire.

Enfin, l'accès aux routes du front-end est également restreint selon le rôle de l'utilisateur (admin ou client), avec un routing conditionnel et une redirection automatique post-login vers la section correspondante.

4.5.7 Sauvegarde de la base de données

La fiabilité d'un système d'information repose également sur sa capacité à préserver les données en cas de défaillance technique ou de perte accidentelle. Pour répondre à ce besoin, nous avons intégré un mécanisme de sauvegarde automatique de la base de données PostgreSQL utilisée par la plateforme.

Une commande personnalisée a été développée à l'aide du framework Django, permettant de générer un fichier `.sql` contenant l'intégralité des données de la base. Cette sauvegarde est horodatée et stockée dans un répertoire dédié (`backups/`) au sein du projet.

Le script repose sur l'outil `pg_dump`, intégré à PostgreSQL, et utilise les variables d'environnement définies dans le fichier de configuration `settings.py`. Le processus est entièrement automatisé et peut être déclenché à tout moment via la commande :

```
python manage.py backup_db
```

Ce mécanisme assure la résilience du système et permet une restauration rapide en cas de besoin, garantissant ainsi l'intégrité des données.

4.5.8 Difficultés rencontrées et solutions apportées

Plusieurs obstacles ont été rencontrés durant le développement, notamment :

- Problèmes d'intégration entre le front-end React et l'API Django, résolus par un ajustement des formats de données échangées et une meilleure structuration des endpoints.
- Gestion de l'authentification JWT, qui a nécessité la mise en place d'un système centralisé de stockage et de rafraîchissement des tokens.
- Contraintes liées au rendu PDF pour les documents logistiques, surmontées par l'utilisation de bibliothèques comme `xhtml2pdf` et la structuration précise des templates HTML.

4.6 Conclusion

La mise en œuvre de cette plateforme logistique a permis de répondre à des problématiques concrètes du secteur du transport maritime en proposant un outil centralisé, sécurisé et orienté utilisateur. L’architecture technique, articulée autour de Django REST pour le back-end et React.js pour le front-end, a favorisé une séparation claire des responsabilités, une évolutivité du code, et une intégration fluide des différents modules.

Le processus d’inscription contrôlée, la gestion fine des rôles utilisateurs, ainsi que l’automatisation des notifications et des actions backend assurent une expérience utilisateur fluide et professionnelle, tout en garantissant à l’administrateur un haut niveau de contrôle. Le module de réservation enrichi de fonctionnalités comme la génération de documents PDF, le suivi des conteneurs ou encore la prédiction des délais logistiques, démontre la capacité de la plateforme à assister de bout en bout les opérations de transport.

L’interface, pensée pour être intuitive et responsive grâce à l’utilisation de Tailwind CSS et de composants réutilisables, reflète une volonté d’accessibilité, de performance, et de cohérence visuelle.

Enfin, les mécanismes d’authentification JWT, les permissions granulaires côté Django, et le routage conditionnel dans React, assurent une sécurité robuste à l’ensemble de l’écosystème.

Ce travail a ainsi jeté les bases solides d’un outil opérationnel, évolutif, et aligné avec les standards modernes du développement web, tout en tenant compte des besoins métiers spécifiques du secteur logistique et du transport maritime.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un environnement en constante évolution, marqué par la mondialisation des échanges et la digitalisation progressive des processus industriels, le secteur du transport maritime demeure un pilier fondamental du commerce international. En assurant plus de 80% du volume des échanges mondiaux, il représente une composante stratégique de la chaîne logistique globale. Toutefois, en Algérie, les opérations portuaires restent encore dominées par des pratiques manuelles, souvent sources de lenteur, de désorganisation, et de manque de visibilité pour les acteurs impliqués.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'études, qui visait à développer une plateforme web intelligente permettant à la fois la réservation de conteneurs, le suivi des expéditions et la prédiction des opérations portuaires. L'objectif était double : proposer une solution technique moderne capable de fluidifier la communication entre les clients et les compagnies maritimes, et démontrer l'impact potentiel des technologies numériques notamment l'intelligence artificielle sur la performance logistique.

Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté une démarche structurée, débutant par une analyse approfondie des besoins métier observés lors de notre stage au sein de DP World Alger, enrichie par la collaboration avec l'entreprise MedAgensea. Cette analyse nous a permis d'identifier les principaux blocages rencontrés par les clients et les opérateurs logistiques, tant au niveau de la réservation que du suivi et du traitement portuaire.

Sur le plan technique, la solution que nous avons conçue repose sur une architecture full-stack combinant React.js pour le front-end, Django REST Framework pour l'API back-end, et une base de données PostgreSQL. Nous avons conçu plusieurs modules essentiels : un système de réservation de conteneurs avec formulaire intelligent, un espace administrateur pour la gestion des comptes et des demandes, une authentification sécurisée via JWT, et un système de gestion des ports. Un module de prédiction, basé sur l'algorithme XGBoost, a été développé à partir d'un jeu de données réel de plus de 10 000 lignes, permettant d'anticiper la durée des opérations portuaires. Enfin, un système de sauvegarde automatisée de la base de données a été intégré afin de garantir la pérennité des informations.

Les résultats obtenus montrent que la plateforme est non seulement fonctionnelle, mais également adaptée aux besoins du terrain. Les modules développés ont été testés sur des cas concrets, validant ainsi l'efficacité de la solution. Ce projet nous a permis d'approfondir nos compétences en conception logicielle, gestion de projet, programmation full-stack, et data science appliquée à la logistique.

Les apports de ce projet sont multiples :

- pour les professionnels, une solution concrète répondant à des besoins logistiques précis ;

- pour la recherche, un cas d'application des technologies d'IA dans un secteur en développement ;

- pour nous, une expérience riche en apprentissage, en collaboration et en innovation.

Parmi les perspectives d'évolution, nous envisageons l'intégration du suivi en temps réel des conteneurs via des API externes (AIS, GPS), l'amélioration de l'interface utilisateur par des outils de visualisation avancée, l'élargissement du modèle de prédiction à d'autres indicateurs portuaires, ainsi que le déploiement de la solution à plus grande échelle.

En conclusion, ce projet constitue une base solide pour une digitalisation intelligente de la logistique portuaire algérienne, et peut servir de tremplin pour d'autres initiatives innovantes dans le domaine du transport et de la chaîne logistique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Revue de l'économie financière & des affaires. (2021). Les ports : Le maillon faible de la chaîne logistique en Algérie. *Revue de l'économie financière & des affaires*, 5(4), 371–389.
- [2] CNUCED. (2024). *Rapport sur le transport maritime*. Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement.
- [3] Scherrer, P. (2011). *Définition et rôle des ports maritimes*.
- [4] Kakou, M. A., Houssaini, A., & Mamad, M. (s.d.). Les bases théoriques du rôle du port dans le contexte supply chain. Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny & Université Ibn Tofaïl.
- [5] Journal Officiel de la République Algérienne. (2022). Article 7, Loi n°78. *Journal Officiel de la République Algérienne*, n°78.
- [6] Comité sectoriel de main-d'œuvre de l'industrie maritime – Canada. (2011). *Lexique des termes usuels dans le transport maritime et liens utiles* (Éd. nov.).
- [7] Echo du Mardi. (2024, 6 janvier). Les plus grandes compagnies de transport maritime. Consulté sur : <https://www.echodumardi.com/economie/les-plus-grandes-compagnies-de-transport-maritime/>
- [8] Samiri, M. Y. (2018). Impact de l'intégration du concept du produit intelligent sur la plateforme de la chaîne logistique du conteneur.
- [9] Économie. (2020, janvier). Grandes tendances et scénarios d'évolution de la logistique (n°90).
- [10] Ben, Z. (2020). *La logistique et le transport dans le commerce international*.
- [11] UNCTAD. (2018). *50 Years of Review of Maritime Transport*. United Nations Conference on Trade and Development.
- [12] Barrial, K. (s.d.). *L'interruption du voyage dans le transport maritime de marchandises*.
- [13] Lacoste, R., & Cariou, P. (2018). Mare economicum. Enjeux et avenir de la France maritime et littorale (Chap. 8). Presses Universitaires de Rennes.
- [14] Escach, N., Serry, A., & Doceul, M.-C. (2013, mai). Des outils pour étudier les transports maritimes à travers l'exemple de la mer Baltique. *Géoconfluences*. <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/Mobil/des-outils-pour-etudier-les-transports-maritimes-a-travers-l'exemple-de-la-mer->

- [15] Cassagnou, B. (2013). *Les grandes mutations de la marine marchande française (1945–1995). Volume II.*
- [16] Rodrigue, J.-P. (2013). *The Geography of Transport Systems* (3rd ed.). Routledge.
- [17] Proparco. (s.d.). *Le secteur portuaire en Afrique* [Document PDF institutionnel].
- [18] Foulquier, E. (s.d.). *Transport maritime et changements climatiques : mise en perspective en géographie.*
- [19] Organisation Maritime Internationale (OMI). (2023). *Stratégie de réduction des émissions de GES provenant des navires.*
- [20] Frémont, A. (2005). *Conteneurisation et mondialisation : Les logiques des armements de lignes régulières.* 21
- [21] Frémont, A. (2019). *Le transport maritime depuis 1945 : facteur clé de la mondialisation.* 8
- [22] Abourraja, M. N. (s.d.). *Gestion multi-agents d'un terminal à conteneurs.*
- [23] Frémont, A., Soppe, M. (s.d.). *Transport maritime conteneurisé et mondialisation.*
- [24] Conseil Consultatif Régional de la Mer. (s.d.). *Les acteurs du transport – Le guide des métiers de la Mer et du Littoral.*
- [25] Ministère des Transports – Direction de la Marine Marchande. (1998). *Code maritime algérien : Loi n° 98-05 du 25 juin 1998 modifiant et complétant l'ordonnance n° 76-80 du 23 octobre 1976 portant Code maritime.* République Algérienne Démocratique et Populaire.
- [26] Hakimi, F., Khaled, T., Al-Kharaz, M., Foahom Gouabou, A. C., & Amzil, K. (s.d.). Towards a digital twin modeling method for container terminal port. DMSLOG AI & Aix-Marseille Université.
- [27] Zeng, F., Chan, H. K., & Pawar, K. (2020). The adoption of open platform for container bookings in the maritime supply chain. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 141, 102019. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102019>
- [28] 1MillionBot. (s.d.). Pourquoi les terminaux à conteneurs ont besoin de l'IA. <https://1millionbot.com/fr/pourquoi-les-terminaux-à-conteneurs-ont-besoin-de-l'IA/>
- [29] Serry, A., & Léveque, L. (2015). Le système d'identification automatique, une source de données pour étudier la circulation maritime.
- [30] Dubreuil, J. (2008). *La logistique des terminaux portuaires de conteneurs.*
- [31] Erhel, D., & Calvi, R. (2018). Une typologie des prestations logistiques (PL) orientée chargeur. *Logistique & Management*, pp. 275–288.
- [32] Oluwaferanmi, A. (2025). Exploring the Role of Blockchain and IoT in Transforming Supply Chain Transparency and Reducing Delays in Ghana's Maritime Ports Operations.

- [33] Botnaryuk, M. V., & Kalinina, S. . (2021). Impact of the Internet of Things on the formation of a model for optimizing port terminal operations.
- [34] Gnimpieba Z, D. R., Nait-Sidi-Moh, A., Durand, D., & Fortin, J. Internet des objets et interopérabilité des flux logistiques : état de l’art et perspectives.
- [35] Joly, O. (2011). L’intégration différentielle des localisations des TIC dans les interfaces portuaires des chaines logistiques globales, pp. 113–122.
- [36] Hamri, M. H., & Jouad, S. (2020). Le rôle des systèmes d’information sur la performance portuaire : Cas du port d’Agadir.
- [37] Brahim-Djelloul, S. (2014). Impact de l’utilisation de la technologie RFID sur la performance d’une Supply Chain intégrant le transport.
- [38] Abdi, A., & Amrit, C. (2024). Enhancing vessel arrival time prediction : A fusion-based deep learning approach.
- [39] Dinh, G. H., Pham, H. T., Nguyen, L. C., Dang, H. Q., & Pham, N. D. K. (2024). Leveraging Artificial Intelligence to Enhance Port Operation Efficiency.
- [40] Rao, A. R., & Wang, H. (2024). Predictive Analysis for Optimizing Port Operations.
- [41] Yoon, J.-H., Kim, D.-H., Yun, S.-W., Kim, H.-J., & Kim, S. (2023). Enhancing Container Vessel Arrival Time Prediction through Past Voyage Route Modeling : A Case Study of Busan NewPort. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 1234. <https://doi.org/10.3390/jmse11061234>
- [42] Yoon, J.-H., Kim, S.-W., Jo, J.-S., & Park, J.-M. (2023). A Comparative Study of Machine Learning Models for Predicting Vessel Dwell Time Estimation at a Terminal in the Busan NewPort. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 1846. <https://doi.org/10.3390/jmse11101846>
- [43] Farzadmehr, M., Carlan, V., & Vanelslander, T. (2023). Contemporary challenges and AI solutions in port operations : applying Gale–Shapley algorithm to find best matches.
- [44] Cuong, T. N., Long, L. N. B., Kim, H.-S., & You, S.-S. (2022). Data analytics and throughput forecasting in port management systems against disruptions : a case study of Busan Port.
- [45] <https://wlius.com/blog/iot-shipment-tracking-cargo-tracking-overview-and-benef>
- [46] Cusson, T., Decazes, L., & Harguil, S. (2020). Rapport définitif : Solutions technologiques pour l’Internet des Objets.
- [47] HZ Containers. (s.d.). Booking (réservation d’espace). Consulté sur : <https://hz-containers.com/fr/glossaire/booking-reservation-despace/>
- [48] Charbon, O. (s.d.). Transports et télécommunications : le cas du suivi des conteneurs.
- [49] Vite. (s.d.). Guide officiel de Vite.js. Consulté sur : <https://vite.dev/guide/>

- [50] Django Software Foundation. (s.d.). Django : Le framework web pour les perfectionnistes sous pression. Consulté sur : <https://www.djangoproject.com/>
- [51] Richardson, L., Amundsen, M., & Ruby, S. (s.d.). RESTful Web APIs. Consulté sur : <http://restfulwebapis.org/>
- [52] Django REST Framework. (s.d.). Documentation officielle de Django REST Framework. Consulté sur : <https://www.django-rest-framework.org/>
- [53] The PostgreSQL Global Development Group. (s.d.). Documentation PostgreSQL 11.22. Consulté sur : <https://www.postgresql.org/docs/11/>
- [54] Axios. (s.d.). Documentation officielle Axios – Introduction. Consulté sur : <https://axios-http.com/fr/docs/intro>
- [55] Jones, M. B., Bradley, J., & Sakimura, N. (s.d.). JSON Web Token (JWT) draft-ietf-oauth-json-web-token-13. Internet Engineering Task Force.
- [56] Marmoul, T. E., & El Hadraoui, O. (août 2024). Développement d’une application de sécurité en temps réel pour la détection et la notification de personnes inconnues. Université Hassan II Casablanca & Institut National de Statistique et d’Économie Appliquée. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20566.97605>
- [57] SSI Schaefer. (s.d.). L’intelligence artificielle dans la logistique : Définitions, Applications et Perspectives. Consulté sur : <https://ssi-schaefer.com>
- [58] Yau, K.-L. A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y.-C., & Ling, M. H. (2020). Towards Smart Port Infrastructures : Enhancing Port Activities Using Information and Communications Technology.
- [59] The effects of inter- and intraorganizational factors on the adoption of electronic booking systems in the maritime supply chain.
- [60] Mandal, J., Goswami, A., Kumari, S., & Mishra, N. A multi-agent framework for container booking and slot allocation in maritime shipping.
- [61] Pani, C., Vanelslander, T., Fancello, G., & Cannas, M. (2015). Prediction of late/early arrivals in container terminals – A qualitative approach.
- [62] Pani, C. (2013). Managing vessel arrival uncertainty in container terminals : a machine learning approach.
- [63] Iovan, S. Predictive Analytics for Transportation Industry.
- [64] Zeng, F. (2020). The Adoption of an Electronic Booking (E-booking) System for the Container Booking process in the Maritime Supply Chain.
- [65] Carlini, E., Di Gangi, D., de Lira, V. M., Kavalionak, H., Spadon, G., & Soares, A. (2024). Machine Learning-Driven Analysis of Global Port Significance and Network Dynamics for Improved Operational Efficiency.
- [66] Lim, J. (2018). Freight forwarders Cloud-Based Platform with Usability Features.

- [67] Pale, T. E. A. (2024). La révolution de l'Intelligence Artificielle (IA) : des enjeux globaux aux impacts sur le Port Autonome d'Abidjan.
- [68] Yoon, J.-H., Kim, D.-H., Yun, S.-W., Kim, H.-J., & Kim, S. Enhancing Container Vessel Arrival Time Prediction through Past Voyage Route Modeling : A Case Study of Busan New Port.
- [69] Conseil fédéral suisse. (2023). *Stratégie maritime 2023–2027*. Département fédéral des affaires étrangères (DFAE). Disponible sur : <https://www.eda.admin.ch/eda/fr/dfae/dfae/publikationen.html>
- [70] DKS Freight Services. *Container Specifications*. 2024. Disponible à l'adresse : <https://dksfreightservices.com/f/container-specifications>. Consulté le 16 juin 2025.
- [71] Benghalia, A. (2015). *Modélisation et évaluation de ...* (Thèse de doctorat, Université du Havre). École doctorale SPMII, Laboratoire LMAH, Le Havre, France.
- [72] Zmour, F. E. (2024). *Port Call Optimisation*. Juin 2024. DOI :
73 Université du Québec à Montréal. (s.d.). *La logistique des terminaux portuaires de conteneurs*. Université du Québec à Montréal.
- [73] Christopher, M. (2012). Logistique et gestion de la chaîne logistique : une approche stratégique. Dans Klaus, P. Müller, W. (Éds.), **Logistique and Supply Chain Management**. Paris : Éditions Economica.
- [75] Amrani-Zouggar, K. (2009). **Management des chaînes logistiques : concepts, méthodes et outils**. Paris : Hermes Science Publications.
- [76] Cheyroux, P. (2003). **Management de la chaîne logistique : vers l'entreprise synchronisée**. Paris : Éditions d'Organisation.