



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie Industriel

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel

Présenté par

NADA BOULAACHEB

MALEK HECIRI

OPTIMISATION DE LA GESTION DE L'EMPLACEMENT DES CONTENEURS AU TERMINALE A CONTENEURS DU PORT DE SKIKDA

Encadré par

Dr. Abdallah BOUZITOUNA

ENSTI Annaba

Co-encadré par

Dr. Mohamed DJEMANA

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. Messaoud DJEGHABA

Président

ENSTI-Annaba

Mme. Lamia AISSAOUI

Examinateur

ENSTI-Annaba

Dr. Imen DRISS

Examinateur

ENSTI-Annaba

Année 2025

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu tout puissant, qui nous a donné l'opportunité de franchir ce stade de savoir, et nous a donné la force et la patience d'accomplir cette modeste œuvre.

Nous adressons un grand merci à notre encadreur Mr BOUZITOUNA Abdallah, pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité. Nous remercions également Mr. DJEMANA Mohamed pour son aide et ses conseils.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous le personnel de Port Skikda en particulier Mr HARKAT Lyes notre encadreur pour sa prise en charge avec extrême bienveillance, ses orientations et ses encouragements durant notre stage pratique, ainsi qu'à à Mme BOUTELDJA Fouzia pour son aide.

Nous tenons également à remercier l'équipe pédagogique et administrative de l'ENSTI pour ses efforts visant à nous offrir une formation d'excellence. Nous sommes également reconnaissants à nos collègues pour leur camaraderie, leur soutien enthousiaste.

Nous remerciant les membres de jury qui ont l'amabilité d'acceptés d'évaluer notre travail.

Enfin, nous n'oublierons pas nos familles et amis, pour leur soutien durant cette période de travail intense, et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet ouvrage.

Dédicace

Louange à Dieu, sans la grâce duquel aucun effort n'est accompli ni aucune entreprise achevée. Louange à Dieu, qui nous a permis de célébrer cette étape de notre parcours universitaire avec notre thèse.

En témoignage de ma gratitude, je dédie cet humble ouvrage à :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers elle. Je prie le bon Dieu de la bénir, de veiller sur elle, en espérant qu'elle sera toujours fière de moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordé, surtout pour son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études. Je demande à Dieu de le protéger et de lui accorder une bonne santé.

A mes chères sœurs Hadil, Meriem et Aridj

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

A toute ma famille, mes proches et mes amies.

En particulier je dédie ce travail à ma binôme Malek. Et à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

A tous ceux qui me sont chers.

Nada

Dédicace

Louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a guidé, soutenu et accordé la force nécessaire pour mener à bien ce parcours.

*À la mémoire de ma chère mère, Allah yarhamha,
ton amour continue de m'accompagner malgré ton absence. Tu restes à jamais dans mon cœur.*

À mon père, pour ses sacrifices, son soutien silencieux et son affection profonde.

À ma sœur, pour sa présence réconfortante, sa patience et son soutien constant.

*À moi-même, pour avoir persévéré pendant cinq longues années, entre études et travail,
pour avoir tenu tête aux difficultés sans jamais abandonner.*

*Et à Nada, mon binôme, pour son aide précieuse, sa compréhension et son soutien sincère
durant des circonstances difficiles.*

Merci d'avoir été là, avec bienveillance et solidarité.

Malek

Résumé

Ce mémoire se situe dans le cadre de l'amélioration de la gestion logistique au terminal à conteneurs du port d'Alger Skikda. En effet, jusqu'à présent, la localisation et la traçabilité des conteneurs sont gérées manuellement, avec les inconvénients de retards, erreurs de manipulation et une densification non-optimale de l'espace. Faisant suite à une comparaison des technologies existantes (RFID, GPS, LoRaWAN), la solution LoRaWAN ajoutée à GNSS a été choisie comme la plus adaptée. En fait, cette technologie se caractérise par une couverture étendue, une facilité d'intégration dans la solution Delphi, une autonomie de vie de 3 ou 5 ans et une adaptabilité aux conditions environnementales. Ce projet propose donc une modernisation concrète et adaptée à la réalité du port de Skikda.

MOT-CLES : Conteneur, Port de Skikda, LoRaWAN, Géolocalisation, Optimisation logistique.

Abstract

This thesis aims to improve container logistics management at the Skikda port terminal. Currently, container tracking and location are still done manually, leading to delays, handling errors, and poor space utilization. After a comparative analysis of available technologies (RFID, GPS, LoRaWAN), the LoRaWAN + GNSS solution is identified as the most suitable. It provides long-range coverage, 3–5 years of battery autonomy, environmental robustness, and smooth integration with a Delphi-based application. The project thus proposes a practical and context-aware modernization of container operations in the port of Skikda.

KEYWORDS : Container, Skikda Port, LoRaWAN, Geolocation, Logistics Optimization.

ملخص:

تعد هذه الاطروحة جزءا من تحسين إدارة الحاويات في ميناء سكيكدة. في الواقع، حتى الان لا تزال عملية تتبع الحاويات وتحديد مواقعها يتم بطرق عشوائية يدويا، مما يؤدي إلى تأخيرات وأخطاء في المناولة وسوء استغلال المساحات. بعد دراسة مقارنة للتقنيات المتوفرة تم اخيار تقنية: شبكة المناطق الواسعة طويلة المدى (لوراوان) مدمجة بنظام الملاحة العالمي عبر الأقمار الصناعية كأفضل حل. حيث توفر تغطية واسعة، واستقلالية طاقة تمتد من 3 إلى 5 سنوات، ومتانة عالية، وإمكانية دمجها مع تطبيق تم تطويره بلغة دلفي.

يهدف هذا المشروع إلى تحديث واقعي وفعال يتماشى مع احتياجات ميناء سكيكدة.

الكلمات المفتاحية : الحاويات، ميناء سكيكدة، تحديد الموقع، تحسين لوجستي.

Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE, MOTIVATION ET PROBLEMATIQUE.....	3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE PORTUAIRE DE SKIKDA	3
1.2.1. LA LOCALISATION ET ROLE STRATEGIQUE	3
1.2.2. LE TERMINAL A CONTENEURS	3
1.3 MOTIVATION DU CHOIX DU THEME	4
1.4 PROBLEMATIQUE	5
1.5 L'OBJECTIFS SPECIFIQUES	5
CONCLUSION	5
CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART ET RECHERCHE BIOGRAPHIQUE.....	6
2.1 INTRODUCTION	6
2.2 PROCESSUS ACTUEL AU PORT DE SKIKDA	6
2.3 OPTIMISATION DE L'EMPLACEMENT DES CONTENEURS	6
2.4 TECHNOLOGIES DE TRAÇABILITE DES CONTENEURS.....	7
2.5 SYSTEMES INFORMATIQUES POUR LA GESTION PORTUAIRE	7
2.6 VERS UNE MODERNISATION DU PORT DE SKIKDA	8
CONCLUSION	8
CHAPITRE 3 : SOLUTIONS PROPOSEES	9

3.1 INTRODUCTION	9
3.2 SOLUTION TECHNOLOGIQUE PROPOSEE (SYSTEME GEOLOCALISATION DES CONTENEURS).....	9
3.3 TECHNOLOGIES DE GEOLOCALISATION DES CONTENEURS :.....	10
3.3.1. GEOLOCALISATION PAR RFID (RADIO FREQUENCY IDENTIFIER).....	10
3.3.2. GEOLOCALISATION PAR GPS	10
3.3.3. LoRAWAN / NB-IoT (CAPTEURS IoT LONGUE PORTEE)	9
3.4 INTEGRATION DE CES TECHNOLOGIES DANS UNE APPLICATION INTELLIGENTE DEVELOPEE EN DELPHI	11
3.5 MODALITES D'INTEGRATION DANS LE TERMINAL DE SKIKDA.....	13
CHAPITRE 4 : EVALUATION, DISCUSSION ET COMPARAISONS.....	15
4.1 CRITERES DE SELECTION	16
4.1.1. PRECISION DE LOCALISATION	16
4.1.2. COUT D'INVESTISSEMENT ET D'EXPLOITATION.....	16
4.1.3. AUTONOMIE ENERGETIQUE	16
4.1.4. PORTEE DE COMMUNICATION	16
4.1.5. INFRASTRUCTURE REQUISE	17
4.1.6. SECURITE PHYSIQUE ET RESISTANCE	17
4.1.7. INTEGRATION AVEC LES SYSTEMES INFORMATIQUES EXISTANTS.....	17
4.2 ANALYSE COMPARATIVE DETAILLEE	18
4.2.1. SYNTHESE COMPARATIVE DES TECHNOLOGIES DE GEOLOCALISATION	18
4.3 CHOIX TECHNOLOGIQUE RETENU : LoRAWAN + GNSS.....	19
4.4 JUSTIFICATION TECHNIQUE	20
CONCLUSION	21

Liste des tableaux

Table 3.1. Fiche technique – (ex. Confidex Viking).....	11
Table 3.2. Fiche technique – (ex. UHF anti-metal tag).....	12
Table 3.3. Fiche technique (ex. Teltonika FMB125).....	10
Table 3.4. Fiche technique - (ex. Abeeway / Enless).....	9
Table 3.5. Exemple d'un capteur LoRaWAN installé pour le suivi des conteneurs dans un terminal portuaire	10
Table 3.6. Tableau synthétique des modalités d'installation	11
Table 3.7. Modalités D'intégration dans le Terminal de Skikda	13
Table 4.1. Synthèse comparative des technologies de géolocalisation	18
Table 4.2. Analyse comparative détaillée	19
Table 4.3. Justification technique (résumé des caractéristiques LoraWan)	20

Liste des Figures

Figure 1.1. Port de Skikda (vue globale).....	3
Figure 1.2 : Port de Skikda (stockage conteneurs).....	4
Figure 3.1. La géolocalisation	10
Figure 3.2. Principe du Système RFID	10
Figure 3.3. Boîtier RFID actif à longue portée installé sur la paroi latérale du conteneur	12
Figure 3.4. Positionnement d'une étiquette RFID passive sur la porte d'un conteneur	10
Figure 3.5 : GPS TRACK	10
Figure 3.6. Dispositif GPS fixé sur la partie supérieure d'un conteneur pour assurer la visibilité satellite	9
Figure 3.7. Plugin Maps	11
Figure 3.8. Image de L'application	12
Figure 3.9 : Evolution Trafic des marchandises générales.....	14
Figure 3.10 : Evolution de trafic par le port de Skikda	14

Liste des Sigles et Abréviations

ISO	L'organisation internationale de Normalisation
EVP, TEU	Equivalent Vingt Pieds
EPS	Enterprise Portuaire de Skikda
TOS	Terminal Operating Systems
FRID	Radio Frequency Identifier
GPS	Global Positioning System
LoRaWAN	large gamme de réseaux à long terme
GNSS	Global Navigation Satellite System
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
TCO	Total Cost of Ownership

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, le transport maritime est le pilier du commerce international. En effet, à cause de sa capacité du fret à livrer une grande variété de marchandises sur de longues distances à un coût raisonnable. le fret est devenu le mode de transport permettant les échanges commerciaux entre nations le plus utilisé. Nous pouvons noter que, selon la CNUCED, “more than 80 per cent of world merchandise trade by volume is moved by sea” [1].

À la suite de l'essor du commerce international observé à la deuxième moitié du XXème siècle, les routes maritimes furent sollicitées pour la livraison de marchandises diverses en grandes quantités et ceci à bas coûts. De plus, les États ont eu besoin d'un support utile à l'accomplissement de cet échange, standardisé et sécurisé, en plus de voyages excellemment rapides de chargement, de transport et de déchargement. C'est dans ce contexte que l'idée est venue à l'Américain Malcolm McLean, surnommé le « père du conteneur », qui a inventé les conteneurs en 1956 [2].

Les conteneurs sont en général des boîtes métalliques rigides de dimensions standard, de 6 à 12 mètres de long est le meilleur moyen d'apporter une variété d'articles dans une seule unité. Ce sera le moyen le plus efficace de gérer la manipulation et le transport modal. En fait, les conteneurs sont devenus extrêmement importants pour le commerce moderne car ils réduisent les temps de chargement / déchargement de fret. Protège la cargaison des mauvais temps et du vol. Réduit le travail utilisé. Optimisation Représenter et processus.

Le port a dû adapter son infrastructure et ses méthodes de travail pour l'utilisation à grande échelle de sous-traitants. La terminologie des conteneurs est actuellement très structurée et nécessite une localisation, une planification, un stockage et une décharge précise de chaque conteneur. Cependant, l'augmentation rapide du trafic de conteneurs met en évidence la capacité de gestion des ports qui nécessite des systèmes de planification robustes et une amélioration de la gestion de la logistique. Le trafic de conteneurs a testé ses capacités de gestion des ports nécessitant une amélioration des systèmes de planification des solides et de la gestion de la logistique. Les emplacements de localisation, de surveillance et de planification des acteurs de quart sont devenus des tâches complexes que les mauvaises organisations peuvent guider.

L'un de l'Algérie principaux ports est le port de Skikda, qui est situé à l'est du pays. Il dispose d'un terminal moderne avec accompagnateurs. Cependant, comme de nombreux autres pays qui transplantent les ports, il est confronté à un défi majeur. Gestion efficace de l'emplacement et de la planification du contenu. Il fait face à un défi majeur : Gestion efficace et gestion de la planification de contenu. La richesse des entrepreneurs combinée au manque de systèmes de gestion sophistiqués en fait un système de gestion difficile qui abandonne la surveillance de chaque unité en temps réel. Unit continue en temps réel.

Cela peut rendre difficile le déchargement des opérations, trouver des entrepreneurs ou équilibrer les professions annuelles dans la zone du camp. Zone de stockage.

Introduction Générale

Face à cette problématique, nous pouvons fournir certaines pistes : juge Automatiser des emplacements et des processus de recherche spécifiques grâce aux bases de données centralisées pour surveiller le mouvement des conteneurs, la technologie informatique moderne.

Dans le cadre des recherches finales de ce projet, nous proposons une solution basée sur l'intégration de **capteurs de géolocalisation intelligents** (tels que GPS, RFID actifs/passifs, ou IoT) pour assurer un suivi automatique et en temps réel des conteneurs dès leur entrée jusqu'à leur sortie. Elle peut également être connectée avec une application développée à Delphi. Cela permet aux emplacements des conteneurs d'être sélectionnés, planifiés et suivis des conteneurs dans les bornes de port Skikda avec une logique d'amélioration. Capacités de gestion opérationnelle et de flux.

Méthodologie du mémoire

L'approche adoptée dans ce travail vise à aborder les étapes suivantes :

1. Analyse du fonctionnement actuel de la gestion des conteneurs au port de Skikda.
2. Étude bibliographique sur les méthodes modernes de gestion portuaire et les outils utilisés.
3. Développement une solution, simulant la planification des conteneurs.
4. Evaluation de la solution sur des scénarios pratiques.
5. Discussion des résultats obtenus et proposition de pistes d'amélioration pour la gestion future.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux, précédés d'une introduction et suit une conclusion générale comme suite :

- Le premier chapitre présente le contexte de l'entreprise et du projet.
- Le second reviendra à la pointe et aux solutions disponibles dans d'autres ports.
- Le troisième explique le travail, en particulier sur le développement des applications.
- Enfin, le quatrième décrit les résultats obtenus et leurs effets possibles.

Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise, motivation et problématique

Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise, motivation et problématique

1.1 Introduction

Ce premier chapitre introduit le lecteur au cadre professionnel dans lequel s'inscrira ce travail, soit l'Entreprise Portuaire de Skikda, en soulignant son importance économique et logistique dans la région. Au-delà de cette description, il importerait de préciser les motifs qui nous ont poussé à faire ce choix de sujet ainsi que la problématique qui se posera dans le travail. Il s'agit donc des éléments primaires qui constituent le fondement de tout ce qui sera développé dans ce mémoire.

1.2 Présentation de l'entreprise portuaire de Skikda

1.2.1. La Localisation et rôle stratégique

Le port de Skikda est situé dans le nord-est de l'Algérie à Wilaya, le même nom. Grâce à sa position dans la mer Méditerranée et à la proximité du grand centre industriel de l'est algérien, il joue un rôle important dans les transports maritimes nationaux et internationaux. La Skikda Port Company (EPS), qui gère cette infrastructure, est un acteur public du ministère des Transports. Les ports contiennent plusieurs bornes spéciales, telles que les bornes d'hydrocarbures, les terminaux de mini-référence, les terminaux pour différents produits et **les terminaux de conteneurs**. Ce dernier est le plat principal de notre sujet d'étude. [3]



Figure 1.1. Port de Skikda (vue globale)

1.2.2. Le terminal à conteneurs

Le terminal à conteneurs est localisé au niveau du Môle Château Vert. Il est équipé pour le traitement des conteneurs standards (20 et 40 pieds), et dispose :

- D'une capacité de traitement de plusieurs milliers d'EVP par an.
- De zones de stockage délimitées.
- De moyens de manutention modernes : portiques, chariots élévateurs camions-remorques.
- D'un personnel qualifié pour les opérations de manutention et d'exploitation.

Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise, motivation et problématique

En octobre 2024, l'EPS a traité plus de 18 600 conteneurs en un mois, renforçant ainsi sa position clé dans le transport maritime national. Ce chiffre met en évidence l'ampleur de l'activité et souligne l'importance d'optimiser les processus de gestion. [4]



Figure 1.2 : Port de Skikda (stockage conteneurs)

Toutefois, Malgré les améliorations des infrastructures, les appareils souffrent toujours de certains défauts de la gestion des conteneurs, en particulier en ce qui concerne la traçabilité, l'utilisation de l'espace et l'optimisation des voyages. Une activité accrue au port de Skikda nécessite une gestion minutieuse pour éviter la surcharge et garantir les performances des opérations du port. Cela nécessite l'utilisation d'instruments modernes qui peuvent fournir des conteneurs dynamiquement et permettre une identification rapide.

1.3 Motivation du choix du thème

Ce thème est choisi sur la base d'une observation réelle des conditions de travail au niveau du terminal à conteneurs du port de Skikda. Sur le terrain, nous avons constaté une absence quasi-totale d'outils informatiques pour surveiller les positions des conteneurs. La plupart du temps, les agents doivent rechercher manuellement des conteneurs basés sur des notes orales ou sur des documents papiers improvisés, ce qui perd beaucoup de temps et augmente le risque d'erreurs dans les opérations de manutention.

Compte tenu des plaintes et des inefficacités qui découlent de cette situation, nous voulions développer une solution simple, efficace et personnalisable pour le port. La solution consiste en une base de données relationnelle avec des applications installées sur un système Delphi connecté aux informations stockées dans une base de données. Elle peut également être connectée à une source de données sur un GPS, un lecteur RFID ou une passerelle LORA. De cette façon, Cela qui permet la recherche des conteneurs sur la carte graphique dans la zone du port et spécifier leur statut affiché sur une page de couleur (disponible ou occupant). Ainsi, ce travail se veut une réponse concrète à un besoin exprimé par les acteurs de terrain, dans l'objectif d'améliorer la fluidité et la performance du terminal à conteneurs.

Chapitre1 : Présentation de l'entreprise, motivation et problématique

1.4 Problématique

La capacité à gérer efficacement la zone de stockage gérer et la zone de stockage et à localiser rapidement chaque contenu est essentielle aux performances d'un terminal à conteneurs. Localiser rapidement chaque contenu est crucial pour la performance d'un terminal à conteneurs. Cependant, l'actuel gestion du port de Skikda repose essentiellement sur des méthodes traditionnelles sans aucune assistance numérique fiable. La réalité se manifeste par un certain nombre de défis opérationnels, tels que des retards dans la livraison du contenu, une mauvaise utilisation des zones de stockage et des surcharges de charge de travail des agents. Partant sur cette observation, nous posons nous la question suivante :

- Comment concevoir une solution informatique simple, intuitive et adaptée au contexte du port de Skikda, permettant de gérer de manière optimale les emplacements des conteneurs tout en assurant leur traçabilité ?

1.5 L'Objectifs spécifiques

Pour répondre à cette problématique, notre objectif principal est de **fournir des solutions pour améliorer la planification et la gestion des conteneurs** au port de Skikda.

En particulier, c'est :

-  tudier les méthodes actuelles de gestion des conteneurs au port de Skikda.
- Identifier les insuffisances et les besoins spécifiques des utilisateurs (opérateurs, agents logistiques).
- Concevoir un outil informatisé pour visualiser les emplacements des conteneurs sur une interface graphique.
- Permettre une planification intelligente de l'occupation des espaces de stockage.
- Offrir des fonctionnalités de recherche rapide de conteneur.

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser le cadre général de notre travail. Nous avons présenté l'entreprise portuaire de Skikda, souligné l'importance du terminal à conteneurs, et identifié les limites actuelles dans la gestion des emplacements. En réponse à ces constats, notre projet vise à proposer une solution numérique pour faciliter la localisation et la planification des conteneurs. Le chapitre suivant présentera les recherches bibliographiques et les solutions déjà existantes dans d'autres ports à travers le monde, afin de situer notre travail dans son contexte scientifique et technologique

Chapitre 2 : Etat de l'art et recherche biographique

Chapitre 2 : Etat de l'art et recherche biographique

2.1 Introduction

Il est essentiel de gérer les conteneurs de manière efficace dans les terminaux portuaires pour garantir des opérations logistiques fluides. Ce chapitre fournit un examen des recherches actuelles concernant l'optimisation de la disposition des conteneurs, les technologies de suivi et les systèmes informatiques mis en œuvre dans les ports. Notre intention est de positionner notre projet en lien avec les recherches contemporaines et les solutions implémentées dans le domaine.

2.2 Processus actuel au port de Skikda

Le port de Skikda est l'un des plus importants ports commerciaux d'Algérie, avec un terminal à conteneurs situé au Môle Château Vert. Malgré l'infrastructure de base relativement moderne, la gestion des conteneurs reste presque semi-automatisée, voire manuelle.

Aujourd'hui, les **entrepôts de conteneurs**, les **processus** de recherche et de planification des conteneurs sont réalisés par les agents portuaires à l'aide :

- De fiches papier ou fichiers Excel,
- D'instructions verbales ou notes de service,
- Sans système de géolocalisation en temps réel.

Cette méthode entraîne plusieurs contraintes :

- Des délais longs pour retrouver un conteneur (10 à 20 minutes parfois),
- Une surcharge de travail pour les agents,
- Des erreurs fréquentes dans la recherche d'emplacement ou la remise au client,
- Une mauvaise exploitation de l'espace de stockage. [5]

Ce type de gestion manuelle peut provoquer jusqu'à 30 % de perte de productivité comparée à une gestion optimisée.

2.3 Optimisation de l'emplacement des conteneurs

L'objectif de l'optimisation du placement des conteneurs est de réduire les déplacements superflus et d'accroître l'efficacité des opérations dans le port. De nombreuses solutions ont été suggérées dans les publications pour traiter cette question compliquée.

Par exemple, Ayachi et al [6]. Ont **élaboré un algorithme génétique** pour s'attaquer au défi de l'attribution de l'espace de rangement des conteneurs, en prenant en considération différents genres de conteneurs ainsi que les échéances de livraison des clients. Leur méthode a démontré une avancée notable comparativement aux techniques traditionnelles comme le LIFO. Par ailleurs, une recherche récente a suggéré un modèle **d'optimisation stochastique** en deux

Chapitre 2 : Etat de l'art et recherche biographique

phases pour la gestion adaptable des zones de stockage dans les terminaux à conteneurs, en se servant d'**algorithmes heuristiques** afin de réduire au minimum les coûts d'exploitation portuaire. [7]

2.4 Technologies de traçabilité des conteneurs

L'une des principales faiblesses des ports comme Skikda est l'absence de traçabilité en temps réel. Pour y remédier, de nombreux ports ont adopté des technologies intelligentes telles que :

✓ **RFID (Radio Frequency Identification)**

Ce système est utilisé dans les ports de Los Angeles et Shanghai et identifie automatiquement chaque conteneur via des étiquettes électroniques et des joueurs solides situés aux intersections.

- ▶ Il améliore considérablement la satisfaction, la sécurité et la réduction de l'erreur humaine [8]

✓ **GPS / GNSS**

La surveillance en temps réel de chaque conteneur sera possible sur la surface du terminal dans les ports de Rotterdam et Hambourg.

- ▶ Cher mais très précis (± 5 mètres) et visibilité globale [9]

✓ **IoT – Réseaux LoRaWAN et NB-IoT**

- ▶ Ces technologies offrent des années d'autonomie, ont une grande portée (jusqu'à 15 km) et sont idéales pour les grandes zones industrielles telles que les terminaux de conteneurs.

- ❖ Exemple : Port de Singapour a intégré le capteur LORA dans le programme "Smart Port Initiative" [10]

2.5 Systèmes informatiques pour la gestion portuaire

Les systèmes informatiques jouent un rôle crucial dans la gestion des opérations portuaires. Les Terminal Operating Systems (**TOS**) sont des plateformes logicielles utilisées pour gérer et contrôler les diverses opérations d'un terminal.[11] Ils facilitent l'optimisation du déplacement et de l'entreposage des conteneurs, l'amélioration de l'exploitation des ressources et la fourniture de données en direct pour une prise de décision performante. [12]

Chapitre 2 : Etat de l'art et recherche biographique

De plus, des options **basées sur le cloud**, telles que celles mises en avant par **Contpark**, fournissent une gestion flexible des équipements et des terminaux, convenant aux installations portuaires intérieures ou intermodales. [13]

2.6 Vers une modernisation du port de Skikda

Pour combler l'écart technologique, il est impératif que le port de Skikda envisage une transition numérique progressive, en adoptant :

- Des capteurs RFID pour l'identification rapide des conteneurs,
- Des unités GPS temporaires pour les conteneurs en transit long,
- Equipement LORA WAN qui couvre toutes les zones du port,
- Un système TOS simplifié intégré avec une base de données centralisée,
- Une interface graphique pour les opérateurs afin de visualiser les emplacements en temps réel.

Ces outils permettent à :

- Une réduction du temps de recherche (de 15 minutes à < 2 minutes),
- Une diminution des erreurs de placement (<1%),
- Une augmentation du taux d'occupation optimal de +20 à 30 %.

Conclusion

Cette étude bibliographique souligne les progrès notables dans le secteur de la gestion et de l'optimisation des conteneurs portuaires. L'optimisation de la localisation, le recours à des technologies de suivi telles que la RFID, et l'incorporation de systèmes informatiques comme les TOS constituent des composantes essentielles pour augmenter la performance des activités portuaires. Ces recherches établissent un fondement robuste pour l'élaboration de notre propre solution conçue spécifiquement pour le contexte du port de Skikda.

Chapitre 3 : Solutions proposées

Chapitre 3 : Solutions proposées

3.1 Introduction

Le port de Skikda, comme de nombreux ports méditerranéens, a longtemps été confronté à une gestion **manuelle** et **non systématique** des positions des conteneurs. Les actions de **chargement, déchargement** et de **stockage** sont effectuées **de manière aléatoire**, sans système de traçabilité en temps réel, s'appuyant surtout sur le savoir-faire des employés et l'espace disponible à proximité. Cette méthode de travail entraîne plusieurs problèmes significatifs tels que : Défaillances fréquentes dans **la localisation exacte des conteneurs**, Des retards notables pour les opérations de recherche surtout lors des livraisons, **Le manque d'optimisation de l'espace** disponible entraînant des zones encombrées et d'autres peu utilisées, Les prévisions des flux représentent également un défi, surtout pour les navires à fort volume ou en période de pics d'activité saisonniers.

Dans ce Chapitre, face à ces défis, nous proposons une solution basée sur l'intégration de **capteurs de géolocalisation intelligents** (tels que GPS, RFID actifs/passifs, ou IoT) pour assurer un suivi automatique et en temps réel des conteneurs dès leur entrée jusqu'à leur sortie.

D'après Benjelloun et Crainic (2008), le manque de systématisation dans la gestion des conteneurs au sein des terminaux entraîne, en moyenne, une perte de productivité de 15 à 30 % par rapport aux systèmes optimisés. [14]

3.2 Solution technologique proposée (Système géolocalisation des Conteneurs)

Pour relever ces défis, l'intégration proposée de capteurs de géolocalisation intelligents (tels que le GPS, la RFID active/passive et l'Internet des objets) assure un suivi automatique et en temps réel des conteneurs, de leur entrée à leur sortie. Cela nous permet de localiser précisément chaque conteneur à son arrivée au terminal, de visualiser immédiatement sa position, de réduire le recours à la mémoire ou aux enregistrements manuels et d'éviter les erreurs récurrentes de manutention et de transport.

L'intégration des capteurs de géolocalisation dans un environnement portuaire nécessite une réflexion technique de la méthode d'installation.

Chaque technologie (RFID, GPS, Lorawan ...) a sa propre installation en fonction de l'emplacement du capteur, de la structure du conteneur, de l'étendue requise et de l'infrastructure requise pour la communication de données.[15]

Définition (Géolocalisation) : [16] La géolocalisation est un moyen de rechercher des plans basés sur l'objet sur une carte ou ses coordonnées géographiques. Cette procédure est basée sur un terminal avec la capacité de déterminer son emplacement et de communiquer les coordonnées géographiques (latitude / longueur). Les emplacements enregistrés peuvent être

Chapitre 3 : Solutions proposées

conservés sur le terminal et peuvent être restaurés plus tard ou transférés en direct sur la plate-forme de géolocalisation du logiciel.

Pour les transmissions en temps réel, un terminal avec des dispositifs de communication tels que GSM, GPRS, UMTS, radio ou satellites est nécessaire pour transmettre des emplacements à des fréquences normales. Cela permet de représenter l'emplacement du terminal sur la carte via une plate-forme de géolocalisation.

3.3 Technologies de géolocalisation des Conteneurs :

Pour moderniser la gestion des conteneurs, Plusieurs technologies sont envisageables selon les contraintes du terrain, le budget, et les objectifs de précision.

3.3.1. Géolocalisation par RFID (Radio Frequency Identifier)

La radio-identification, couramment référencée par l'acronyme RFID, est une technique permettant d'enregistrer et d'accéder à des informations de manière distante grâce à des dispositifs nommés « radio étiquettes ». (« RFID tag » ou « RFID transponder » en anglais) [17].

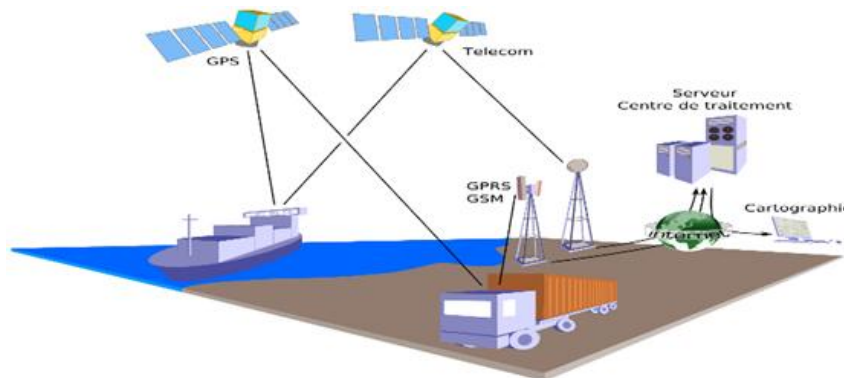


Figure 3.1. La géolocalisation

- **Système RFID :** Comme la figure ci-dessus l'indique, le RFID est un dispositif qui se compose de transpondeurs (également appelés étiquettes, marqueurs, tags, identifiants...) et d'un ou plusieurs interrogateurs (aussi connus sous le nom de coupleurs, lecteur antenne...).

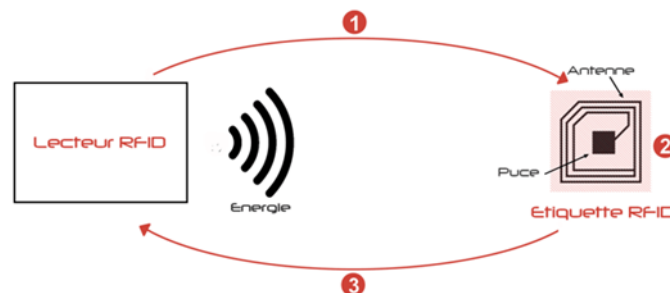


Figure 3.2. Principe du Système RFID

Chapitre 3 : Solutions proposées

- **Interrogeurs RFID** : Il s'agit de dispositifs émetteurs de radiofréquences qui, en étant actifs, vont stimuler les tags qui se présentent à proximité en leur procurant l'énergie nécessaire à leur fonctionnement. En plus d'alimenter l'étiquette, l'interrogeur transmet des instructions spécifiques auxquelles le tag réagit. L'une des solutions les plus directes pourrait consister à retourner une identification numérique.
- **Étiquettes RFID** : Il s'agit d'un dispositif récepteur que l'on positionne sur les éléments à suivre (objet, animal, etc.). Ils possèdent une puce renfermant les informations et une antenne destinée à faciliter la transmission de données.

Par ailleurs, il existe deux grandes familles d'étiquettes RFID :

3.3.1.1 RFID Actif (Étiquette à batterie)

- **Les étiquettes actives** : connectées à une source d'énergie intégrée (Pile, batterie, etc.). Les étiquettes actives ont une portée supérieure, cependant elles coûtent plus cher et leur longévité est limitée.
 - ▶ **Principe** : Étiquette active émettant régulièrement un signal longue portée (100–300 m), adaptée aux environnements portuaires.
 - ▶ Fiche technique– (ex. Confidex Viking) [18]

Élément	Détail
Fréquence	≈433 MHz
Portée	Jusqu'à 200 m
Batterie	Intégrée, autonomie 3–5 ans
Température	–40 °C à +85 °C
Protection	IP67
Énergie	Active (avec batterie)
Autonomie	3–5 ans
Coût unitaire	Moyen (~10–15 USD)
Avantages	Lecture à grande distance
Inconvénients	Remplacement batterie, coût modéré

Table 3.1. Fiche technique– (ex. Confidex Viking)

- ▶ **Intégration au conteneur** : Fixation externe sur le conteneur. Des lecteurs RFID actifs répartis dans toute la zone et à l'entrée/sortie assurent une couverture complète.

❖ Installation des étiquettes RFID actives

- ▶ **Position sur le conteneur** : Les étiquettes RFID actives sont fixées à l'extérieur, idéalement en hauteur sur la paroi latérale ou supérieure, pour maximiser la diffusion du signal radio. [19]
- ▶ Méthode de fixation :
 - Fixation dans un boîtier rigide IP67, à l'aide de vis sécurisées.
 - Boîtier éventuellement protégé contre les chocs et l'humidité.

Chapitre 3 : Solutions proposées

- Infrastructure nécessaire :



Équipement	Description
Lecteurs actifs	Récepteurs radio omnidirectionnels (360°)
Serveur central	Pour réception des signaux de proximité
Logiciel de gestion	Intégré au système TOS du terminal

Figure 3.3. Boîtier RFID actif à longue portée installé sur la paroi latérale du conteneur

3.3.1.2 RFID Passif (Étiquette sans batterie)

- **Les étiquettes passives** : exploité à courte portée par le signal radio émis par l'émetteur. Ces étiquettes économiques sont souvent de taille réduite et offrent une longévité presque infinie. En revanche, elles requièrent une quantité considérable d'énergie de la part du lecteur pour opérer.
 - **Principe** : Une étiquette passive UHF activée par un lecteur fixe ; idéale pour identification proche dès le passage d'un conteneur sous un portique [20]
 - Fiche technique– (ex. UHF anti-metal tag) [21]

Élément	Détail
Fréquence	860–960 MHz (UHF)
Portée	1–10 m
Mémoire	96–512 bits EPC
Température	–30 °C à +80 °C
Protection	IP65 – IP68
Énergie	Passive (sans pile)
Autonomie	Illimitée
Coût unitaire	Très faible (~0,20 USD)
Avantages	Fiable, durable, très économique
Inconvénients	Portée limitée, infrastructure requise

Table 3.2. Fiche technique – (ex. UHF anti-metal tag)

- **Intégration au conteneur** : Fixation sur la porte ou un coin visible. Installation de portiques RFID aux entrées/sorties et zones de tri. Lecture automatique au passage.

Chapitre 3 : Solutions proposées

❖ Installation des étiquettes RFID passives

- ▶ **Position sur le conteneur** : Les étiquettes RFID passives sont généralement placées à l'extérieur, sur la porte frontale ou sur les coins métalliques inférieurs du conteneur, à un emplacement lisible par les portiques RFID installés aux points de passage.
- ▶ Méthode de fixation :
 - Utilisation d'un adhésif industriel ou rivets métalliques.
 - Nettoyage préalable de la surface pour garantir une adhésion optimale.
 - Hauteur de pose : 1 à 1,5 mètre du sol.



Figure 3.4. Positionnement d'une étiquette RFID passive sur la porte d'un conteneur

▶ Infrastructure nécessaire :

Équipement	Description
Lecteurs RFID	Installés aux portiques d'entrée et de sortie
Antennes UHF	Fixées à proximité des zones de passage
Serveur TOS	Pour associer les codes EPC aux conteneurs

3.3.2. Géolocalisation Par GPS

Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites, Il donne des informations de temps, de position et de vitesse n'importe où et n'importe quand sur la surface de la terre.

L'objectif d'un système global de positionnement par satellite est de fournir à un récepteur sa position, sa vitesse de déplacement et l'heure. Ce positionnement est réalisé de manière rapide, avec une précision d'une dizaine de mètres, n'importe quand, n'importe où sur la Terre, quelle que soit la météo et à un faible cout.

La technologie GPS (Global Positioning System) est souvent utilisée en conjonction avec la RFID pour le suivi de localisation en temps réel.

Les appareils GPS installés sur ou à l'intérieur des conteneurs fournissent des données de localisation

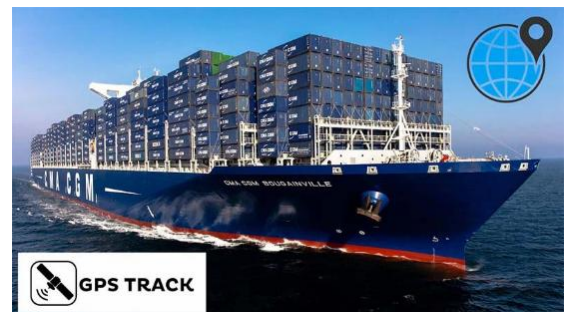


Figure 3.5 : GPS TRACK

Chapitre 3 : Solutions proposées

continues, permettant aux parties prenantes de surveiller les mouvements des conteneurs à l'échelle mondiale.

- ▶ **Principe :** Suivi global via satellites, avec remontées par GSM/GPRS pour localisation en temps réel.
- ▶ Fiche technique – (ex. Teltonika FMB125) [22]

Élément	Détail
Réseaux	GSM/GPRS (2G)
Précision	2–5 m
Interfaces	RS232/RS485, Bluetooth
Batterie interne	170 mAh
Température	–40 °C à +85 °C
Indice de protection	IP54
Autonomie	1–3 jours
Coût unitaire	Élevé (30–60 USD)
Avantages	Suivi continu, précision élevée
Inconvénients	Coût, dépendance à réseau GSM, énergie

Table 3.3. Fiche technique (ex. Teltonika FMB125)

- ▶ **Intégration :** Tracker fixé temporairement à l'intérieur ou extérieur du conteneur. Envoi régulier de la position via GSM vers plateforme centralisée.

❖ Installation des trackers GPS / GNSS

Position sur le conteneur : Le tracker peut être placé :

- À l'extérieur, sur le toit ou dans un coin supérieur (exposition satellite),
- Ou à l'intérieur, protégé contre le vol ou les chocs. [23]

▶ **Méthode de fixation :**

- Fixation par aimant industriel ou boîtier métallique vissé, selon le modèle.
- Activation automatique dès l'entrée du conteneur dans le terminal.

▶ **Infrastructure nécessaire :**

Chapitre 3 : Solutions proposées



Figure 3.6. Dispositif GPS fixé sur la partie supérieure d'un conteneur pour assurer la visibilité satellite

Équipement	Description
Couverture GSM/GPRS	Indispensable pour transmettre la position
Plateforme cloud	Pour réception des données de localisation
Interfaces mobiles	Application de suivi pour agents et superviseurs

3.3.3. LoRaWAN / NB-IoT (Capteurs IoT longue portée)

Lorawan (**large gamme de réseaux à long terme**) est **une sorte** de communication de données pour les réseaux sans fil étendus. Il est conçu pour permettre **une collecte** de données **plus lente sur de longues périodes** entre **les** capteurs connectés qui surveillent et **transfèrent** les données. LORA peut envoyer des données sur de longues distances lorsque les performances sont faibles. Ce principe **est basé** sur les lois de la **physique et nécessite des déplacements à longue distance** pour augmenter la **puissance** ou réduire la bande passante.

La technologie Lorawan permet des distances importantes qui consomment moins d'énergie. Ceci est parfait pour surveiller les conteneurs dans de grandes zones portuaires. [24]

- ▶ **Principe** : Capteurs à batterie faible, couvrant de longues distances via passerelles LoRaWAN intégrées dans l'infrastructure portuaire
- ▶ Fiche technique - (ex. Abeeway / Enless) [25]

Élément	Détail
Réseaux	LoRaWAN + GNSS
Précision	2–5 m
Autonomie	3–5 ans
Batterie	170 mAh – 4000 mAh, jusqu'à 5 ans
Température	-20 °C à +60 °C
Indice de protection	IP65–IP68
Coût unitaire	Moyen (~30–40 USD)
Avantages	Longue portée, batterie durable
Inconvénients	Bande passante limitée, latence

Table 3.4. Fiche technique - (ex. Abeeway / Enless)

Chapitre 3 : Solutions proposées

- ▶ **Intégration** : Chaque conteneur reçoit un capteur LoRaWAN ; passages relatés via passerelles placées stratégiquement pour couvrir l'ensemble du terminal.

❖ Installation des capteurs LoRaWAN / NB-IoT

- ▶ Position sur le conteneur :

Les capteurs LoRaWAN peuvent être fixés :

- À l'extérieur, dans une zone haute du conteneur pour assurer une bonne émission du signal,
- Ou à l'intérieur, si le conteneur est ouvert régulièrement. [26]

- ▶ Méthode de fixation :

- Boîtier IP68 vissé ou riveté sur le conteneur.
- Chaque capteur est associé à un identifiant unique (via code QR ou puce NFC).



Table 3.5. Exemple d'un capteur LoRaWAN installé pour le suivi des conteneurs dans un terminal portuaire

- ▶ Infrastructure nécessaire :

Équipement	Description
Passerelles LoRa	Installées sur des mâts dans tout le terminal
Réseau privé LoRaWAN	Couvre toute la zone du terminal
Système backend	Pour cartographie dynamique et alertes

Chapitre 3 : Solutions proposées

Capteur	Position recommandée	Fixation	Infrastructure requise	Risques / limites
RFID passif	Porte frontale	Adhésif / vis	Lecteurs portiques + antennes UHF	Faible portée
RFID actif	Paroi haute externe	Boîtier vissé	Récepteurs radio + serveur local	Batterie à changer
GPS	Extérieur ou intérieur	Aimant / vis	Réseau GSM + plateforme cloud	Sensibilité au vol / coût élevé
LoRaWAN	Zone haute externe	Boîtier IP68	Passerelles + réseau LoRa privé	Latence, faible bande passante

Table 3.6. Tableau synthétique des modalités d'installation

3.4 Intégration de ces technologies dans une application intelligente développée en Delphi

Pour assurer une exploitation efficace pour garantir les technologies mentionnées ci-dessus, nous avons développé une application de bureau d'automatisation intelligente en utilisant son environnement de programmation Delphi « dans le cadre de notre Projet de Fin d'Études (PFE) », reconnu de grande capacité élevée dans la gestion de la base de données, interfaces graphiques et interaction avec les appareils externes.

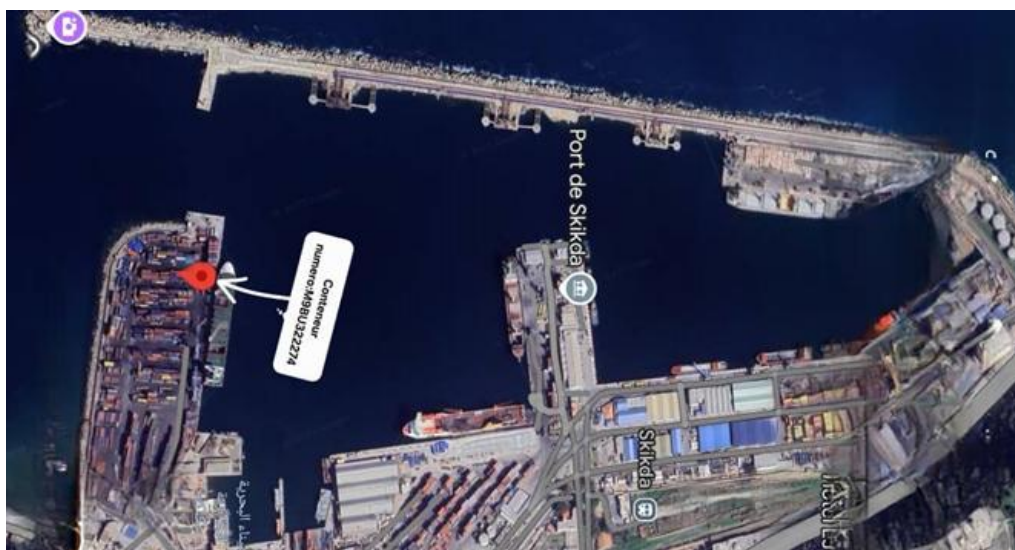


Figure 3.7. Plugin Maps

Chapitre 3 : Solutions proposées

Cette application permet rechercher des emplacements de conteneurs et d'afficher leur numéro de BL, leur type et leur emplacement. Elle facilite également la gestion d'emplacement, car il peut être marqué comme (occupé, Libre...).

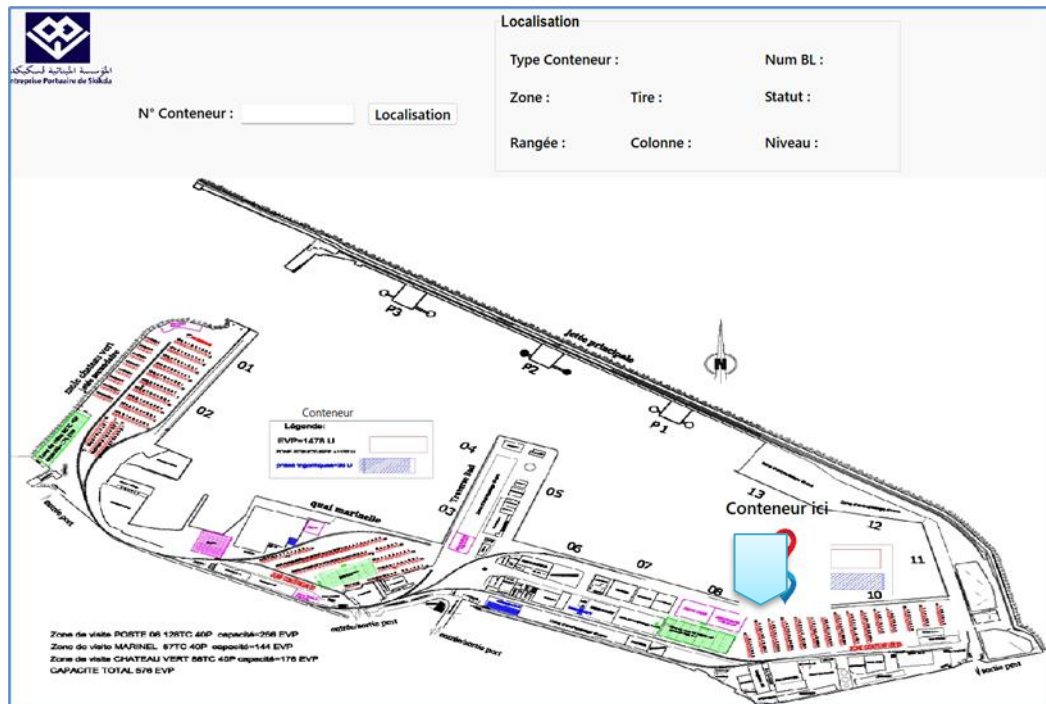


Figure 3.8. Image de L'application

Cette application est l'interface principale qui permet aux opérateurs de port de maintenir les conteneurs en temps réel et d'interagir efficacement avec le système de stockage.

Par exemple, l'application est conçue pour être connectée à une base de données (Access) qui contient des informations détaillées sur le conteneur et son emplacement. Elle peut également être connectée à une source de données sur le périphérique **GPS**, le lecteur **RFID** ou le portail **LORA**. Cela qui permet de localiser le conteneur de la carte graphique dans la zone du port pour indiquer l'état de l'emplacement. Pages à colorier (gratuites ou occupées) d'Afficher des rapports sur les conteneurs près de la date de publication pour imprimer des documents tels que les approbations et les laissez-passer.

Ce type d'intégration s'applique pour :

- Réduire les temps de réponse,
- Diminuer la dépendance à l'intervention humaine,
- Améliorer la productivité globale, et assurer un suivi précis et complet des conteneurs tout au long de leur présences au sein du port.

Chapitre 3 : Solutions proposées

❖ Avantages attendus

- ✓ Réduction du temps de recherche : de 15 minutes à moins de 2 minutes
- ✓ Réduction du taux d'erreur de localisation : de 5–10 % à < 1 %
- ✓ Amélioration du taux d'occupation optimal des zones : +20 à 30 %
- ✓ Suivi en temps réel des flux de conteneurs
- ✓ Réduction des coûts de main-d'œuvre liés à la manipulation manuelle

3.5 Modalités d'intégration dans le terminal de Skikda

Élément	Modalité proposée
Zone d'installation	Sur chaque conteneur à son entrée dans le port
Durée d'utilisation	De l'entrée jusqu'à la sortie du terminal (cycle complet) : À l'entrée de chaque conteneur (pose capteur), durant le stockage (suivi), à la sortie (désactivation ou réutilisation)
Infrastructure	Lecteurs RFID aux portiques / bornes GPS / passerelles LoRa
Système de suivi	Application centrale (PC ou mobile) synchronisée avec les capteurs
Visualisation	Carte dynamique du terminal avec états (Libre/Occupé) et positions (carte en temps réel des positions)
Interaction	Alerte en cas de positionnement incohérent ou anomalie de mouvement, Conteneur déplacé ou manquant
Maintenance	Suivi de la batterie, entretien annuel des capteurs

Table 3.7. Modalités D'intégration dans le Terminal de Skikda

Chapitre 3 : Solutions proposées

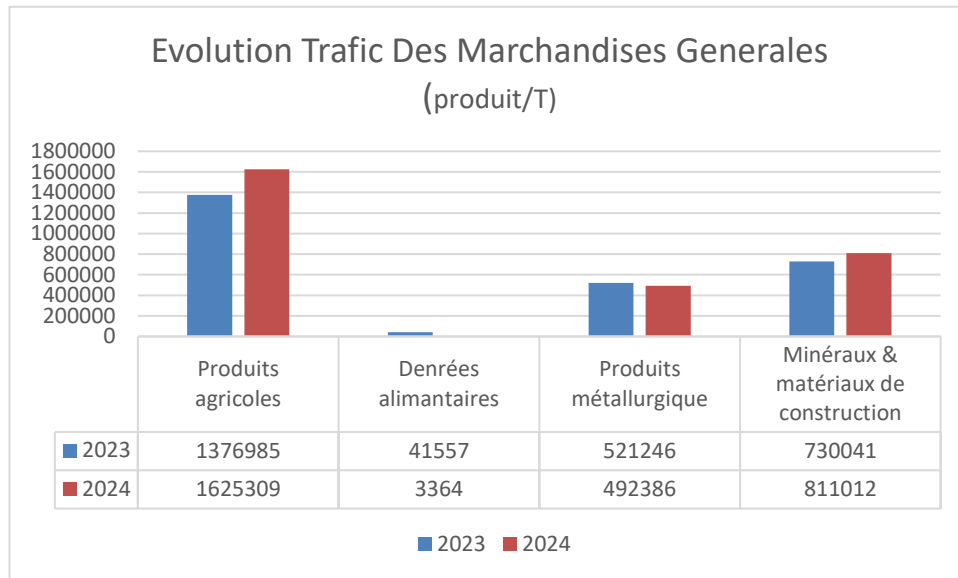


Figure 3.9 : Evolution Trafic des marchandises générales

En cumul et avec 24 317 851 T de marchandises traitées par le port de Skikda durant les douze mois de l'année 2024 contre 23 691 031 T durant la même période l'année 2023, le port de Skikda affiche une hausse de 3% (+626 820 T) avec un TRO 99% du budget annuel.

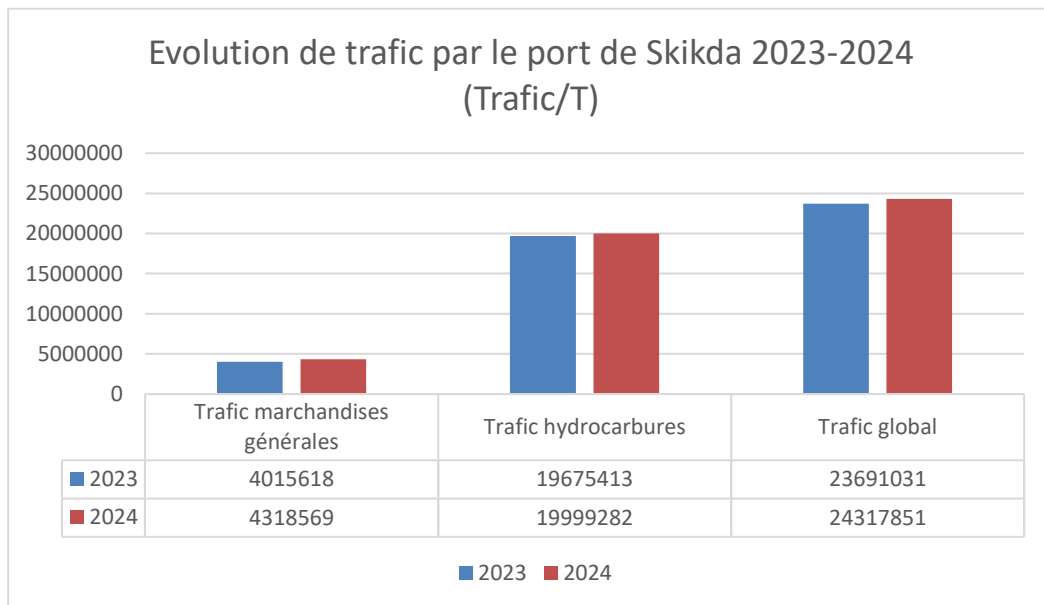


Figure 3.10 : Evolution de trafic par le port de Skikda

- La masse importante des transactions d'hydrocarbures et les matières agricoles sans importantes via le port du Skikda

Chapitre 4 : Evaluation, discussion et comparaisons

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

4.1 Critères de sélection

Dans le but de garantir la réussite du déploiement d'un système de géolocalisation au port de Skikda, il est impératif de sélectionner une technologie qui répond de manière équilibrée aux exigences techniques, économiques et fonctionnelles du projet. Les critères suivants ont été retenus pour évaluer les différentes options :

4.1.1. Précision de localisation

La précision est l'un des paramètres les plus déterminants dans le suivi logistique. Une marge d'erreur trop importante peut entraîner des erreurs de localisation des conteneurs, des manipulations inutiles, voire des pertes de productivité. Dans un environnement portuaire, une précision de 2 à 5 mètres est jugée acceptable pour assurer une assignation correcte des emplacements et une récupération rapide des conteneurs. Cette précision est souvent atteinte grâce aux systèmes GNSS multi constellation (ex. GPS + Galileo), utilisés notamment dans les capteurs LoRaWAN modernes. [27]

4.1.2. Coût d'investissement et d'exploitation

Le coût total de possession (TCO – Total Cost of Ownership) ne se limite pas au prix d'achat du capteur. Il faut également tenir compte :

- ✓ Des frais d'installation physique (supports, équipement, main-d'œuvre),
- ✓ De la maintenance (remplacement de batterie, configuration),
- ✓ Des coûts d'abonnement (pour GPS/GSM),
- ✓ De la mise en œuvre d'infrastructure (lecteurs, passerelles, serveurs...).

Une solution viable doit offrir un bon équilibre entre **coût initial** et **durabilité**, en réduisant autant que possible les frais récurrents.

4.1.3. Autonomie énergétique

Dans les environnements portuaires où l'autonomie des capteurs peut devenir un facteur clé pendant des semaines ou même des mois.

Un minimum de 3 ans d'autonomie est souhaitable et une période de 5 ans est idéale pour minimiser l'intervention humaine. La technologie RFID passive ne nécessite pas de nourriture et offre des fonctionnalités limitées. En revanche, les trackers GPS traditionnels consomment beaucoup d'énergie et nécessitent une charge fréquente. Un compromis idéal est obtenu avec les capteurs LoRaWAN avec transmission intermittente.

4.1.4. Portée de communication

La portée représente la distance maximale entre le capteur et son point de collecte (lecteur, passerelle, station). Une bonne portée permet de :

- ✓ Réduire le nombre d'équipements à installer,

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

- ✓ Couvrir efficacement des zones larges (jusqu'à 5 km en champ libre pour LoRaWAN),
- ✓ Limiter les zones d'ombre dans l'infrastructure réseau.

Les solutions RFID passives sont limitées à quelques mètres, alors que LoRaWAN ou GPS permettent une couverture bien plus large.

4.1.5. Infrastructure requise

Certains systèmes nécessitent une infrastructure dense et coûteuse (ex. RFID avec lecteurs à chaque point de passage). D'autres, comme LoRaWAN, utilisent des passerelles peu nombreuses qui couvrent toute la zone portuaire. Le choix doit prendre en compte la disponibilité des équipements, la complexité de mise en œuvre, et le coût de maintenance à long terme.

4.1.6. Sécurité physique et résistance

Les capteurs doivent résister aux conditions extrêmes du port : humidité, poussière, chocs mécaniques, variations thermiques. Un boîtier robuste (norme IP67 ou IP68) est indispensable.

De plus, dans les zones accessibles au public, une installation à l'intérieur du conteneur ou fixée solidement peut être requise pour limiter les risques de vol ou de détérioration. [28]

4.1.7. Intégration avec les systèmes informatiques existants

L'intégration fluide avec l'application Delphi développée pour ce projet est primordiale. Le capteur doit permettre :

- ✓ Une extraction facile des données (via API, MQTT, ou fichiers CSV),
- ✓ Une compatibilité avec la base de données Access,
- ✓ Une visualisation en temps réel sur interface graphique.

Une solution difficile à interfacier, ou nécessitant des logiciels propriétaires coûteux, serait inadaptée.

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

4.2 Analyse comparative détaillée

4.2.1. Synthèse comparative des technologies de géolocalisation

Le tableau ci-dessous propose une synthèse comparative des principales technologies de géolocalisation. Cette analyse est particulièrement orientée vers le contexte portuaire, notamment celui du terminal à conteneurs du port de Skikda, afin d'identifier la technologie la plus adaptée à l'optimisation des opérations de localisation et de gestion des conteneurs.

Critère	RFID Passif	RFID Actif	GPS / GNSS	LoRaWAN / NB-IoT
Principe	Lecture par stimulation depuis un lecteur	Émet un signal automatiquement	Localisation via satellites	Capteur connecté au réseau longue portée
Précision	Moyenne (± 3 – 5 m)	Bonne (± 1 – 3 m)	Très bonne (± 2 m)	Bonne (± 2 – 5 m)
Portée	Faible (1–10 m)	Moyenne (100–300 m)	Très large (couverture satellite mondiale)	Large (jusqu'à 15 km)
Autonomie	Illimitée	3 à 5 ans (pile intégrée)	1 à 3 jours (selon l'usage)	Jusqu'à 5 ans (batterie longue durée)
Coût unitaire	Très faible ($\sim 0,2$ USD)	Moyen (~ 10 – 15 USD)	Élevé (~ 30 – 60 USD)	Moyen (~ 30 – 40 USD)
Infrastructure	Lecteurs UHF à courte portée	Récepteurs actifs répartis dans le terminal	Réseau GSM + serveur cloud	Passerelles LoRa + serveur local
Installation	Étiquette collée ou rivetée	Boîtier fixé avec vis ou aimant	Boîtier GPS à fixer sur ou dans le conteneur	Boîtier vissé et appairé au conteneur
Usage idéal	Contrôle d'accès, scan aux portiques	Suivi local sur parc portuaire	Suivi global (export longue distance)	Suivi autonome et économique sur site local
Limites	Portée limitée, dépend du lecteur	Changement de batterie	Consommation d'énergie élevée, coût élevé	Bande passante faible, latence possible

Table 4.1. Synthèse comparative des technologies de géolocalisation

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

Voici une analyse technique enrichie pour mieux visualiser la valeur ajoutée de chaque capteur :

Technologie	Avantage principal	Limitation majeure	Cas d'usage idéal
RFID passif	Coût très bas, Simple à utiliser	Portée très limitée (1 - 5 m), nécessite beaucoup de lecteurs	Suivi à courte distance (entrées/sorties uniquement)
RFID actif	Bonne portée (100–200 m), autonomie 3–5 ans	Plus coûteux, batterie à remplacer	Zones où l'infrastructure RFID est déjà en place
GPS/GSM	Précision très élevée, couverture mondiale	Coût élevé, autonomie très courte (1–3 jours)	Transport en temps réel à grande échelle, suivi maritime
LoRaWAN+GNSS	Portée élevée (2 - 15 km), autonomie jusqu'à 5 ans	Latence de communication, débit limité	Suivi local ou régional de conteneurs dans une grande zone portuaire

Table 4.2. Analyse comparative détaillée

4.3 Choix technologique retenu : LoRaWAN + GNSS

Après une évaluation rigoureuse des différentes technologies disponibles, la solution de LoRaWAN, ainsi que la géolocalisation GNSS, s'est imposée comme l'option la plus appropriée pour les exigences spécifiques des connexions Skikda. Cette technologie issue des réseaux LPWAN (réseaux de zone de large largeur de puissance) de surveiller les longs conteneurs, une faible consommation d'énergie et une intégration facile à l'infrastructure numérique existante.

✓ Couverture étendue avec peu d'infrastructure :

À systèmes RFID, qui nécessitent l'installation de dizaines de lecteurs physiques dans tout le port, le réseau LoRaWAN peut couvrir plusieurs kilomètres carrés avec seulement deux ou trois passerelles stratégiquement placées. Cette fonctionnalité garantit une couverture solide et stable, même dans les environnements industriels, et rend le déploiement particulièrement avantageux d'un point de vue financier et logistique.

✓ Autonomie énergétique exceptionnelle

Les appareils LoRaWAN modernes sont conçus pour fonctionner pendant trois à cinq ans sans nécessiter de recharge car ils transmettent à basse fréquence et à intervalles (mode veille). Conçus pour fonctionner pendant trois à cinq ans sans nécessiter de recharge car ils émettent à basse fréquence et à intervalles (mode veille). Cette l'indépendance permet de réduire considérablement réduire significativement les coûts d'entretien, maintenance, notamment dans les environnements portuaires où les entrepreneurs peuvent rester sur place pendant des semaines ou des mois. Particulièrement dans les environnements portuaires où les conteneurs peuvent rester sur place pendant des semaines ou des mois. [29]

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

✓ Compatibilité avec l'application développée (Delphi)

Un autre point fort réside dans la facilité d'intégration des capteurs LoRaWAN avec l'application bureautique Delphi conçue dans le cadre de ce projet. Les données collectées par les trackers peuvent être transmises à une plateforme centrale via des protocoles standards tels que MQTT, HTTP ou UDP, puis intégrées dans une base de données (ex. Microsoft Access) exploitable en temps réel par l'interface utilisateur.

✓ Robustesse physique et environnementale

Les capteurs LoRaWAN de nouvelle génération (ex. Abeeway Compact Tracker, Lansitec LT501) bénéficient d'un boîtier industriel renforcé avec un indice de protection IP68, garantissant une résistance aux chocs, à la poussière, à l'humidité et aux températures extrêmes (de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cette durabilité les rend parfaitement adaptés aux conditions climatiques et opérationnelles du port de Skikda, situé en bord de mer. [30]

✓ Coût global optimisé

Enfin, bien que plus coûteux que les étiquettes RFID passives, les capteurs LoRaWAN offrent un bien meilleur retour sur investissement. Leur capacité à assurer un suivi continu, leur autonomie et leur compatibilité avec des systèmes modernes les placent dans une position Médiane en termes de coût, mais avec des performances proches des solutions GPS industrielles (tout en étant moins dépendants du réseau GSM). [31]

4.4 Justification technique

Le tableau suivant expose les principaux critères techniques justifiant le choix d'une solution de géolocalisation basée sur la technologie LoRa dans le contexte du port de Skikda. Il met en évidence les atouts de cette technologie en matière de fiabilité, de simplicité de déploiement, d'économie d'énergie et d'adaptabilité logicielle, éléments essentiels dans un environnement logistique complexe où la performance et l'intégration sont des enjeux majeurs.

Aspect	Justification
Fiabilité	Précision constante ($\pm 5\text{ m}$), pas d'interruption liée à la position géographique.
Simplicité de déploiement	Une passerelle LoRa couvre 2 à 5 km, réduisant drastiquement les coûts d'infrastructure.
Économie d'énergie	Fonctionnement par signal intermittent : grande autonomie sans recharge fréquente.
Adaptabilité logicielle	Interface via protocole MQTT, possibilité d'intégration directe avec Access et Delphi.
Résilience	Capteurs résistants aux conditions portuaires (eau, chaleur, poussière, manipulation).

Table 4.3. Justification technique (résumé des caractéristiques LoraWan)

Chapitre 4 : Evaluation, discussion des résultats, comparaisons

Conclusion

Selon cette étude comparative et technique, la combinaison LoRaWAN + GNSS est la meilleure solution pour répondre aux exigences de traçabilité, comparative résilience et d'autonomie dans la gestion des prestataires du port de Skikda.

La décision est basée sur des critères techniques rigoureux plutôt que d'être prise au hasard :

- ✓ Couvrir de vastes zones, ce qui le rend compatible avec la configuration actuelle du terminal portuaire sans entraîner de coûts d'infrastructure supplémentaires.
- ✓ Analyse des coûts : Contrairement aux systèmes GPS GSM qui nécessitent des abonnements mensuels, cette solution réduit les coûts d'exploitation à long terme tout en offrant un niveau de précision élevé adapté aux opérations logistiques internes.
- ✓ Durabilité environnementale : Grâce à des capteurs IP68 et des batteries longue durée, elle répond aux contraintes climatiques côtières (salinité, humidité, chaleur).
- ✓ Compatibilité logicielle : La technologie choisie s'intègre aisément à l'application bureautique développée en Delphi, facilitant le traitement des données et l'exploitation en temps réel.
- ✓ Scalabilité : Le système est évolutif et peut être étendu à d'autres zones ou types de marchandises à l'avenir.

La solution sert de levier stratégique pour faciliter une transition numérique efficace au sein du port de Skikda et constitue une base technologique solide pour les projets de numérisation et d'automatisation à venir.

Conclusion Générale

À la fin de ces travaux de recherche et développement, nous avons pu fournir des solutions technologiques innovantes pour répondre aux exigences croissantes de traçabilité, de logistique et d'optimisation de l'automatisation au port de Skikda. Cette étude a mis en évidence les limitations actuelles du système basées sur les processus semi-automatiques et manuels, provoquant des retards, des erreurs de localisation et des ajustements de capacité de stockage.

Selon une analyse détaillée des arts de diverses techniques de géolocalisation (RFID, GPS, GNSS, Lorawan, NB-IT) et les limites réelles du domaine, la technologie Lorawan couplée à un système GNSS s'est avérée être le meilleur choix. Il fournit un bon compromis entre la précision, la faible consommation d'énergie, la zone d'expansion, les coûts de contrôle et l'intégration simple dans les systèmes d'information existants.

La mise en œuvre proposée implique d'une application logicielle développée à Delphi, assurant le suivi des conteneurs en temps réel, la visualisation dynamique de leurs emplacements et optimiser l'espace de stockage. Ce système représente une avance majeure dans le sens des ports intelligents (ports intelligents) qui peuvent s'adapter aux défis logistiques modernes.

Cette contribution servira de base à des projets de numérisation futurs dans d'autres ports algériens et stimulera l'adoption de solutions IoT industrielles dans le traitement des flux logistiques au niveau national.

Références Bibliographie

► Référence Bibliographie :

- [1] Étude sur les transports maritimes, CNUCED, 2012.
- [2] L’histoire du conteneur maritime, Goliat.fr, 2023
- [4] Djamel Dib. Entreprise portuaire de Skikda : Des résultats remarquables en octobre, *Les Républicains*, 10 novembre 2024.
- [5] Benjelloun, A. & Crainic, T.G. Design of Intermodal Terminal Networks, CIRRELT, 2008.
- [6] I. Ayachi, R. Kammarti, M. Ksouri, P. Borne. Optimization in Container Terminals, *Neural and Evolutionary Computing*, Volume 1303.1051, 2013.
- [7] Wencheng Wang, Shumin Lin, Lu Zhen. Flexible storage yard management in container terminals under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 186, 2023.
- [8] RFID Technology in Logistics, Cisco Systems, 2006.
- [9] SmartPort Logistics Strategy Report, Hamburg Port Authority, 2022.
- [10] Smart Port Initiative, Port of Singapore Authority, 2021.
- [14] Benjelloun, A., & Crainic, T. G. Trends, Challenges, and Perspectives in City Logistics, *Transportation Research Record*, Volume 2042(1), 2008.
- [15] Dempsey, M. *RFID in Ports and Terminals*, Port Technology International, Volume 51, 2011.
- [16] Elodie. La géolocalisation, *Blog Nordnet*, 16 août 2010.
- [17] Frédéric Lassabe. Géolocalisation et prédiction dans les réseaux Wi-Fi en intérieur. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Franche-Comté, 2009
- [18] Hykins. UHF 433 MHz Long Range RFID Tag – Datasheet, *Protection IP65–67*, 2023.
- [19] Étiquettes et lecteurs RFID : comment fonctionne un système RFID, Data Alliance, 2023.
- [20] Étiquettes RFID passives UHF anti métal pour palettes et conteneurs, Made in China, 2025.
- [21] AD-372 U8 RFID Tag Datasheet, Avery Dennison, 2024.
- [23] Install GPS Tracking Devices on Containers, Geoforce, 2024.
- [26] LoRaWAN GNSS Container Tracker – Deployment Guidelines, Lansitec Technology, 2024.

Références Bibliographie

[29] Michael Harttree. Get 10 Years from 9 Volts: The Power of LoRaWAN, *Cisco Blogs*, 2025.

[30] Abeeway Compact Tracker & Lansitec LT501 – Fiches techniques, Abeeway & Lansitec Technology, 2024.

[31] Comparaison entre RFID, GPS et capteurs LoRaWAN, Cykeo RFID, 2024.

► Sites Bibliographie :

[3] <https://skikda-port.com/contact/> (consulté le 07 avril 2025).

[11] <https://terminaloperatingsystem.com/> (consulté le 28 avril 2025)

[12] <https://www.konecranes.com/en-us/port-equipment-services/software/container-terminal-operating-system-tos> (consulté le 03 mai 2025)

[13] <https://contpark.com/> (consulté le 07 mai 2025)

[22] <https://lora-alliance.org/> (consulté le 04 juin 2025)

[24] <https://lora-alliance.org/> (consulté le 13 juin 2025)

[25] <https://www.lansitec.com/products/lorawan-container-tracker/> (consulté le 13 juin 2025)

[27] <https://www.digitalmatter.com/our-devices/> (consulté le 16 juin 2025)

[28] : <https://www.digitalmatter.com/devices/oyster3-lorawan> (consulté le 17 juin 2025)