



**Université Sultan Moulay Slimane**

**Faculté des Sciences et Techniques Beni Mellal**

**Centre d'Études Doctorales : Mathématiques et Physiques  
Appliquées**

**THÈSE Présentée par :**

**Mme : SOUKAINA FAHDI**

**Pour l'obtention du grade de : DOCTEUR**

**Spécialité : Génie industriel et logistique**

**Optimisation par le Machine Learning de la  
consommation de l'énergie au sein du port maritime de  
Casablanca**

Soutenue le devant la commission d'examen :

**M. Belcaid Bouikhalane : Président Prof USMS PES**

**Mme. Hanaa Hachimi : Directeur de thèse , Professeur habilité, PH USMS**

**Les rapporteurs :**

**Mme Lala Saadia Chadli : Prof FST Béni Mellal PES**

**Mme Laila El Abbadi : Prof ENSA kenitra PH**

**M. Hafida Bouloiz : Prof Ensa Agadir PES**

**Mme Mariam El Khechafi : Prof Invité, Prof PA ISCAE Casablanca**

**Mme Zoubida Benmamoun : Prof Invité PA université Abu Dhabi**

## Remerciements :

Je remercie tout d'abord Dieu qui m'a entouré de personnes formidables qui ont, chacune à sa façon, et ce, à différentes étapes de mon cheminement, contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de cette thèse de doctorat.

Merci à ma directrice de thèse, **Mme Hanaa Hachimi**, et à **Mme Mariam Elkhechafi** pour l'encadrement dont j'ai bénéficié tout au long de mes études doctorales.

Je les remercie aussi pour leurs précieux conseils et leur encouragement et soutien qu'ils m'ont toujours manifesté tout au long de ces années pour mener à terme ce projet.

Merci à M .Belcaid Bouikhalane de m'avoir honoré et accepté d'être le président de ma soutenance de ma thèse de doctorat.

Mes sincères remerciements pour les professeurs, **Mme Lala Saadia Chadli** ,**Mme Laila El Abbadi** ,**M.Hafida Bouloiz** , d'avoir accepté de rapporter cette thèse et merci pour leur précieux temps et pertinentes remarques qui ont développé ma thèse davantage .

Je suis également très reconnaissante à l'équipe du laboratoire Ingénierie des systèmes qui ont contribué pour l'aboutissement de cette thèse.

Merci au professeur **Mme Zoubida Benmamoun** pour son précieux encouragement et épaulement pour commencer mes études doctorales .

Ce parcours n'aurait pu être le même sans le soutien sincère de mon entourage.

Je remercie **ARRAHMANE RAHIME** puissant pour la facilité de mon apprentissage et toutes les merveilles que j'ai apprises pendant cette thèse et mon développement perpétuel durant ce beau voyage,

Merci **DIEU** d'avoir été présent pour moi tout le temps, Merci pour le délicieux gout d'apprentissage que j'ai dégusté durant ces années avec plaisir, Merci le prophète **MOHAMMAD** pour la guidance et d'avoir illuminé ma vie avec sa lumière,

Merci à la fabuleuse et la plus extraordinaire maman, ma meilleure amie, ma confidente, ma conseillère, **lala SAIDA ELKHIYATI** pour ton support énorme et ton encouragement,

Merci à mes organes vitaux : ma sœur chérie **JIHANE** et **MOUAD**, qui ont toujours été là pour moi sans vous je n'allais jamais être cette docteur **SOUKAINA inchallah**, Merci **RAYANE** mon cher neveu d'avoir existé dans ma vie,

Merci mes **vrais amis** qui me respectent, m'aiment et voient en moi de belles choses.

## Table des matières :

Liste des abréviations : .....	6
Liste des tableaux : .....	8
Dédicace: .....	9
Liste des publications : .....	10
Résumé : .....	11
Mots-clés : .....	13
I. Introduction générale : .....	14
1) Mondialisation et impact sur développement rapide des ports maritimes : .....	17
2) Défis et challenges économiques de la mondialisation : .....	19
3) Opérations d'exploitation portuaires maritimes : .....	19
II. Etat d'art : .....	34
1. Revue de Littérature des travaux antécédents sur l'optimisation en gestion des ports maritimes : .....	34
2. Formulation de la problématique : .....	40
3. Structure de la présentation de la problématique : .....	41
III. Revue de Littérature sur les greens ports et leurs approches d'optimisation de consommation d'énergie .....	43
a. <b>Méthodologie : Étude de cas des ports maritimes asiatiques et leurs pratiques verts asiatiques</b> : .....	49
b. <b>Résultats de l'étude comparative</b> : .....	56
c. <b>Analyse et discussions</b> : .....	57
<b>IV. Les contributions réelles en termes d'optimisation de consommation d'énergie et de planification des ressources portuaires au port de Casablanca</b> : .....	59
<b>1. Application de l'apprentissage automatique pour une production propre dans le port de Casablanca</b> .....	59
a. <b>Matériel et méthodes</b> : .....	69
b. <b>Théorie et calcul</b> : .....	78
c. <b>Résultats</b> : .....	86
d. <b>Analyse et discussion</b> : .....	89
<b>2. Application des prédictions de l'intelligence artificielle pour l'optimisation de l'allocation des ressources au port de Casablanca pour un développement durable</b> .....	93
a. <b>Matériels et méthode</b> : .....	101
b. <b>Résultats</b> : .....	109
c. <b>Analyse et discussion</b> : .....	111
<b>V. Conclusion générale</b> : .....	113

<b>VI. Références :</b> .....	115
<b>VII. Annexe:</b> .....	123

## **Liste des abréviations :**

RTG : (Rubber Tire Gantry) Portique sur Pneus Caoutchouc pour la manutention de conteneur au sein port

ARIMA : Moyenne Mobile Intégrée Autorégressive

GES : gaz à effet de serre

CT : Consommation total de 5 RTG /60 jour

TCe : Coût terminal énergie des RTG annuels

CE : Coût énergie d'un seul RTG

Nh : Nombre moyen d'heures RTG travaillées/an

Nh : Nombre d'heure de travail du RTG /an

Qf : Quantité de Diesel consommée pour 1 heure de fonctionnement RTG

Pl : Prix du litre de gasoil au Maroc

Nr : Nombre de RTG par terminal

## **Liste des figures :**

<i>Figure 1:Les chiffres du commerce maritime mondial en 2015 selon le rapport des nations unis sur le commerce et développement .....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2:Evolution de fret maritime en million de tonnes selon la source statictica unctad .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 3:Manutention des conteneurs.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 4:opération de manutention du RTG dans le port maritime .</i>	<i>30</i>
<i>Figure 5: RTGs dans le port commercial de Jazan selon la source .....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 6:les17 objectifs des nations unis pour 2030pour transformer le monde selon l'ONU.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 7:eveolution du prix du fuel selon France inflation .....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 8:la comparaison entre la consommation totale de RTG et de l'ERTG au port de Kaohsiung entre 2008 et 2011 .....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 9:conversion de RTG à E-RTG.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 10: Principaux mouvements du RTG .....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 11:Processus de la régression linéaire .....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 12:distribution de l'énergie du RTG .....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 13 : Processus de la méthode ARIMA .....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 14:extrait de la base de données des RTG .....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 15:Séries Chronologique de la consommation des RTG au port de Casablanca .....</i>	<i>110</i>

## **Liste des tableaux :**

<i>Tableau 1:Sources des énergies vertes aux ports Asiatiques .....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 2: Extrait de la base de données RTG 01 heures de fonctionnement des moteurs pendant la première semaine d'avril2019 .....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 3 : Extrait de la base de données des heures de travail RTG de chaque moteur en avril 2019.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 4: Coefficients de régression de la consommation des différents moteurs RTG .....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 5 : Coefficient de stabilité R du modèle de régression multiple de la consommation totale RTG.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 6: Coefficient de de régression du modèle de régression simple de la consommation totale RTG.....</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 7: Coefficient de stabilité R du modèle de régression simple de la consommation totale RTG.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 8:comparaison des approches vertes entre le port de Casablanca et les ports asiatiques .....</i>	<i>92</i>

## Dédicace:

ما توفيقى إلا بالله العليم

*Je remercie العليم pour la facilité de mon apprentissage et toutes les merveilles que j'ai apprises pendant cette thèse et mon développement perpétuelle durant ce beau voyage, Merci Allah d'avoir été présent pour moi tous le temps Merci Allah pour le délicieux gout de l'apprentissage que J'ai dégusté durant ces années avec plaisir,*

*j'exprime mes profonds remerciements à sayidi MOHAMAD RASSOULL ALLAH pour la guidance et d'avoir illuminé ma vie avec ta lumière, Merci à la fabuleuse et la plus extraordinaire maman, ma meilleure amie, ma confidente, ma conseillère, lala SAIDA pour ton support énorme et ton encouragement,*

*Merci à Ma personne SOUKAINA FAHDI pour son engagement et sa persévérance, sa détermination et l'effort qu'elle a fourni,*

*Merci à mes organes vitaux : ma sœur chérie JIHANE et mon frère, MOUAD, qui ont toujours été là pour moi sans vous je n'allais jamais être cette docteur SOUKAINA inchallah, Merci RAYANE mon cher neveu d'avoir existé dans ma vie,*

*Merci mes amis qui me respectent, m'aiment et voient en moi de belles choses, Merci à la professeur Madame MARIAM ELKHECHAFI pour ta pédagogie et encadrement, Merci à la professeur Madame HANAA HACHIMI d'avoir cru en moi le premier le jour de notre rencontre et inscription sous votre encadrement, je vous uis énormément reconnaissante et votre parcours m'a vraiment inspiré entant que femme forte .*

## **Liste des publications :**

- **Port vert dans l'océan bleu : optimisation de l'énergie dans les ports asiatiques.**

Fahdi, S., ELKHECHAFI, M., & HACHIMI, H. (2019, avril). En 2019, 5e Conférence internationale sur l'optimisation et les applications (ICOA) (pp. 1-4). IEEE.

- **L'apprentissage automatique pour une production plus propre dans le port de Casablanca .**

Fahdi, S., Elkhechafi, M., & Hachimi, H. (2021) Journal of Cleaner Production, 294, 126269.

- **Application des prédictions de l'intelligence artificielle pour l'optimisation de l'allocation des ressources au port de Casablanca pour un développement durable**

En cours de publication ,Fahdi, S., & Hachimi, H. (2022). Journal of cleaner production

## **Résumé :**

Le changement climatique et la sécurité énergétique font partie des plus importants 17 objectifs des nations unies de développement durable, ils sont devenus des défis communs pour l'humanité et les nations du monde entier envisagent de passer d'un système énergétique basé sur les combustibles fossiles à un système énergétique non basé sur les combustibles fossiles.

En réponse à ces tendances et motivées par la nécessité de prendre soin de la santé physique et mentale des employés des terminaux à conteneurs et de réduire la pollution dans la zone portuaire et d'économiser la consommation d'énergie, notre thèse s'oriente à l'optimisation de la consommation d'énergie dans les ports maritimes pour un développement durable afin de réduire leur production de CO<sub>2</sub>, développer un gain financier énorme et avoir une qualité d'air plus propre et plus green pour améliorer la qualité de vie sur notre terre surtout que maintenant on connaît très bien la valeur précieuse de l'air avec la pandémie de Corona.

Premièrement, nous avons décrit dans un chapitre introductif le cadre général de notre travail.

Ensuite, nous avons élaboré une revue de littérature sur les ports les plus importants au monde : les ports asiatiques, compte tenu de leur croissance et de leur position concurrentielle à l'échelle mondiale.

Ainsi, nous avons découvert leurs approches et pratiques très réussies en termes de Green port et transition énergétique et d'optimisation en gestion portuaire.

Ensuite, ces pratiques nous ont inspiré et nous avons décidé d'utiliser les outils de machine Learning pour l'optimisation de la consommation d'énergie des engins de manutention (Diesel) tel que le RTG au port de Casablanca.

Enfin, cette thèse contribue à une grande réduction d'énergie avec un gain de 674.520 Euro/an et réduit 1 907 928 tonnes d'émission de CO<sub>2</sub>/an, avec ces pratiques le port de Casablanca sera en perpétuel développement.

Après, nous avons élaboré un travail qui vise à prédire la consommation d'énergie des engins de manutention tel que le RTG à Casablanca à l'aide des outils d'apprentissage automatique, Cette technique de gestion de l'énergie permettant trois gains : gain financier en économie de coûts énergétiques de 33 600 euros par an et gain environnemental réduisant la production impure de GES émission de grue portuaire d'environ 95 040 kg

par an et gain social en améliorant la santé de l'être humain.

Finalement, ce processus de management des ressources au port permet d'éviter les gaspillages en termes de consommation d'énergie inutiles et gagner en termes financier et de qualité d'air.

**Mots-clés :**

Port maritime , optimisation, développement durable, machine learning , ingénierie énergétique, logistique portuaire ,green port .

## **I. Introduction générale :**

Le commerce maritime présente un maillon important dans la chaîne logistique mondiale et il est en croissance perpétuelle et très rapide comme le montre la figure 1 car la mer tient une place prépondérante dans la globalisation : 120 000 navires battant 198 pavillons assurent le transport de 90 % du transit commercial mondial. 43 millions de barils, sur une demande quotidienne d'environ 80 millions, font l'objet chaque jour d'échanges internationaux par voie maritime l'élément vital de ce commerce reste le port [1] et selon L'Unctad, la conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement, a publié son rapport sur l'activité du transport maritime. Un secteur qui se porte bien avec une hausse de 2,5%.



Figure 1: Les chiffres du commerce maritime mondial en 2015 selon le rapport des Nations Unies sur le commerce et développement

Le port est une infrastructure située sur le littoral maritime, sur les berges d'un lac et destinée à accueillir des navires et il présente des lieux d'échanges autour et au sein desquelles se déclinent de multiples activités économiques, il existe des ports maritimes comme affiché sur la figure1 et des ports secs selon la localisation du port.

### **Importance sociale et économique du secteur portuaire en monde entier**

Le port évoque généralement un ensemble d'installations conçues et exploitées en vue d'assurer le transfert de marchandises entre le navire et la mer. Les différents moyens de transport terrestre : rail, route, navigation intérieure, canalisations diverses. Il constitue un des principaux moteurs de développement, mais également sur le plan national et international.

Sa position, généralement à la frontière d'un pays, donc en contact direct avec le monde extérieur, explique les fonctions essentielles que le port doit remplir dans la communauté maritime internationale.

Finalement, le port constitue un nœud très important et vitale pour toute la chaîne logistique globale mondiale c'est pour cette raison que nous avons décidé de traiter ce volet important car nos efforts pour le développer une fois appliqués : c'est toute la chaîne logistique qui sera développée.

Ainsi, le monde entier sera influencé positivement pour un développement durable et équilibré respectant notre seul et unique environnement et terre précieuse pour une meilleure qualité de vie.

### **Mission des Ports maritimes :**

Les ports maritimes présentent les facilitateurs primordiaux du commerce mondial, affectant non seulement l'économie locale, mais aussi le fonctionnement des économies nationales et régionales [3]. Mais, avec la croissance rapide du transport maritime et l'augmentation de la taille des navires Megamax, post panama, qui transportent des milliers de conteneurs en un seul voyage, la gestion de la congestion du côté terrestre des terminaux à conteneurs est devenue un challenge important.

Avec 80 % du commerce mondial total par voie maritime, ce qui s'explique par le très faible coût de transport, les ports maritimes servent toute la population mondiale à recevoir tous ses besoins en terme de nourriture, voitures, lits hôpitaux, matières de construction, ordinateurs, médicaments, les bureaux [4]. En effet, les ports servent la population du monde entier à être en parfait équilibre.

L'explosion du trafic conteneurisé est le facteur majeur de l'explosion des flux commerciaux car le transport en conteneurs a provoqué une véritable révolution du transport maritime.

Le conteneur a imposé aux ports à s'agrandir indéfiniment, et cela est devenu clair, on assiste à une véritable course au gigantisme des navires.

Les plus gros navires font aujourd'hui près de 400 mètres de long pour 55 m de large et peuvent transporter jusqu'à 157000 tonnes, avec un équipage de seulement 15 personnes, c'est un énorme gain de productivité [5].

En conséquent, l'activité portuaire a besoin en urgence d'un support logistique adapté qui se manifeste aussi bien par des besoins en équipements et en compétences.

### **1) Mondialisation et impact sur développement rapide des ports maritimes :**

LA mer a été touchée par la globalisation : 120 000 navires battant 198 pavillons assurent le transport de 90 % du transit commercial mondial. 43 millions de barils, sur une demande quotidienne d'environ 80 millions, font l'objet chaque jour d'échanges internationaux par voie maritime.

La mondialisation, c'est la mise en liaison, matérielle et idéale de l'ensemble des espaces de la planète et l'explosion des flux commerciaux, principalement maritimes, est une des principales manifestations de la mondialisation. Cette mondialisation gagne du terrain. L'activité économique et richesse qui s'ensuit répartie sur le globe, nivelant les différences entre continents tels qu'ils existaient dans le passé, avec une concentration de l'activité dans l'Europe et l'Amérique du Nord, et relativement moins de pouvoir d'achat dans d'autres parties du monde.

Ainsi, les ports maritimes et le transport maritime sont confrontés à un nombre croissant de défis. L'évolution de la demande portuaire, c'est-à-dire les flux de trafics transitant au travers des terminaux portuaires de commerce au cours des dix dernières années, a été marquée par une forte croissance (+6% par an en moyenne sur les 10 dernières années)

La figure suivante présente l'évolution de fret maritime en million de tonnes selon la source unctad [6].

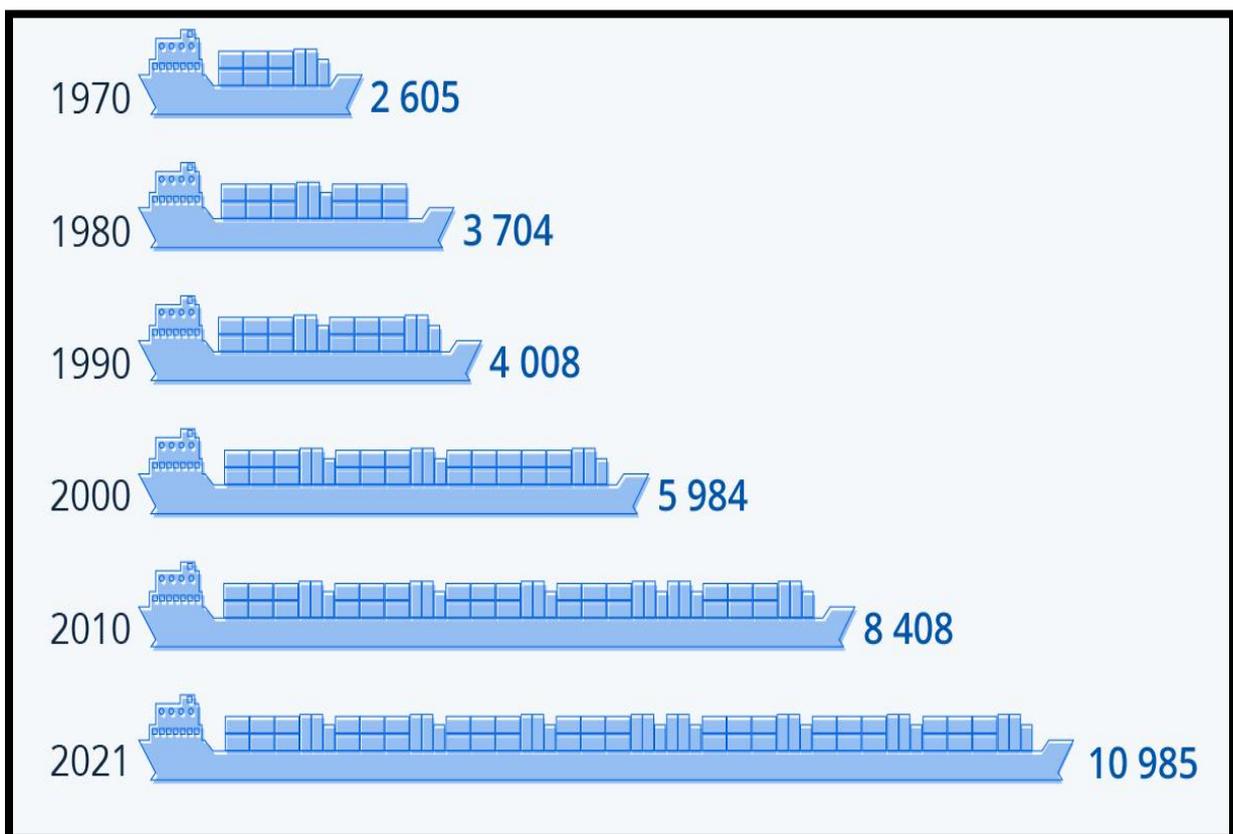


Figure 2: Evolution de fret maritime en million de tonnes selon la source statistica unctad

## **2) Défis et challenges économiques de la mondialisation :**

La mondialisation a provoqué une énorme compétitivité entre les ports et cela réclame une grande optimisation de la productivité des ports en terme de :

- ✚ La gouvernance : C'est le foncier de la gestion de consommation d'énergie ;
- ✚ La consommation d'espace qui doit être plus respectueuse de l'environnement ;
- ✚ Les équipements : Se donner les moyens de fidéliser le choix d'un port en renforçant les liens avec l'industrie logistique.
- ✚ Rajouter une belle phrase concernant l'optimisation des opérations d'exploitation portuaire.

## **3) Opérations d'exploitation portuaires maritimes :**

Le port est devenu une plateforme logistique portuaire et les opérations portuaires présentent les activités d'une unité d'exploitation portuaire ou de transport maritime dans ses dimensions techniques, commerciales, sociales et financières selon les normes de sécurité et la réglementation, dans un objectif de qualité (service, coût, délais) [7]. Les managers portuaires sont soumis à la pression des armateurs pour traiter leurs navires avec plus de rapidité. Ils sont également appelés à considérer initialement la création de capacités par l'amélioration des performances opérationnelles avant de se lancer dans de nouveaux investissements.

Pour cela, il faudra un Lean management de ces opérations mais bien avant, il faudra les connaître pour pouvoir optimiser l'opération qu'on souhaite.

Dans cette perspective, nous identifions les opérations principales et communes des ports et ils sont présentés comme suit :

**a) L'amarrage :**

L'amarrage consiste à maintenir le navire contre un quai, à l'aide d'aussières (ou amarres), longs cordages de diamètres variables selon la taille du navire, capelées d'une part au quai sur des anneaux, et d'autre part sur le navire, à l'avant et à l'arrière [8].

**b) L'arrimage des conteneurs :**

Lorsque tous les conteneurs sont chargés sur les navires, avant le départ, tous les conteneurs sont bien sécurisés afin qu'ils ne tombent pas en mer par mauvais temps. Les conteneurs sont sécurisés à l'aide de vis à bouteille, de tiges d'arrimage, de verrous à torsion, d'un empileur de conteneurs.

**c) Remorquage des navires :**

Le remorquage consiste à assister le navire, en le tractant, le poussant ou le freinant, à l'aide d'une ou plusieurs remorques lorsque celui-ci ne peut accoster ou partir seul du port. Le capitaine du navire commande la prestation de remorquage à la capitainerie du port qui la transmet à la société de remorquage [9].

**d) Ravitaillement des navires ou Shipchandling de navire :**

Le ravitaillement d'un navire consiste à approvisionner le navire, en escale au port ou en rade extérieur, en provisions et autres fournitures nécessaires pour la vie quotidienne à bord comme : l'eau, les boissons, fuel, la nourriture.

**e) L'opération de manutention des conteneurs :**

**La conteneurisation**

Les ports du monde entier envisagent des expansions pour répondre à la croissance du commerce maritime conteneurisé et aux besoins de développement de leurs économies. C'est dans cette perspective que conteneurisation s'est développée durant ces vingt dernières années [10].Le conteneur est un moyen de transport qui a permis de réduire les coûts et les délais grâce à la standardisation.

**La révolution du conteneur**

Ce dernier s'est imposé, en moins de 50 ans, comme le premier moyen d'échange de biens de consommation à l'échelle mondiale entraînant une véritable révolution dans les transports mondiaux. En 1960, la rotation d'un cargo de ligne de 10 000tonnes de capacité, déployée sur le trajet Europe-Japon-Europe prenait cinq mois [11].Près de la moitié du temps était passée au port, avec des escales atteignant parfois 5 jours.

En 2000, un grand porte-conteneurs offre une capacité de 60 000 tonnes et boucle le même trajet en deux mois avec des escales qui durent d'une dizaine à 36 heures. En même temps, l'automatisation a fait son chemin.

Le cargo fonctionnait avec un équipage de 35 hommes alors qu'aujourd'hui les porte-conteneurs n'ont plus besoin que d'une quinzaine de marins pour naviguer.

### **Transport Conteneurisé**

Le transport d'un conteneur chargé de 400 téléviseurs entre Taiwan et le Havre coûte 3000 EUR environ.

Le prix de ce transport aurait coûté au moins trois fois plus cher dans les années 1960. Le transport maritime conteneurisé est né sous l'impulsion d'un entrepreneur Américain Malcolm Mac Lean qui, en 1956, adapta 4 navires pour transporter des remorques de camions par voie maritime.

En 1956, l'Idéal X reliait New-York à Houston avec 58 remorques à son bord. L'expérience se révélant positive, MAC Lean franchit véritablement le pas en conteneurs manutentionnés qui sont identiques dans leur conception.

### **Le principe de la standardisation**

Un conteneur container, est une " boîte " rectangulaire de dimension universelle : la clé de son succès réside dans sa standardisation [12] Les conteneurs secs dry de

vingt et quarante pieds de longueur (environ six et douze mètres) sont les plus utilisés.

Ils servent au transport des marchandises dites sèches, conditionnées en caisses, cartons, balles, palettes, etc.

Mais d'autres conteneurs plus spécifiques ont été créés comme les conteneurs-citernes tank container et les open top, les conteneurs frigorifiques.

Le conteneur standard de vingt pieds sert d'unité de référence pour estimer les capacités d'un navire et évaluer les flux.

On parle alors en Equivalent Vingt Pieds-EVP Twenty Equivalent Unit-TEU ce qui correspond à un volume utile de 33 m<sup>3</sup>.

Chaque conteneur est identifié par une série d'inscriptions permanentes sur ses parois (propriétaire, numéro d'immatriculation, masse brute maximale, tare et charge utile), cette série est unifiée selon la norme ISO.

Presque toute la vaste gamme des marchandises transportées jadis comme marchandises non groupées peuvent faire actuellement l'objet d'un transport par conteneur.

Ce sont essentiellement des biens d'équipement et de consommation plus ou moins élaborés qui empruntent cette voie, mais le conteneur s'ouvre également aux produits en vrac si ce choix présente des avantages.

Le conteneur a rendu possible la fabrication mondiale, dont la croissance a, à son tour, accéléré le développement du conteneur et en a fait le moyen de transport préféré et un auxiliaire de la production industrielle

Dans le domaine du transport, un conteneur ou container, est un caisson métallique parallélépipédique conçu pour le transport de marchandises par différents modes de transport.

Les dimensions du conteneur ont été normalisées au niveau international et il existe différents types de conteneurs selon la marchandise transportée.

### **Avantages et Inconvénients de la conteneurisation :**

Le déplacement des marchandises par conteneurs a plusieurs avantages par rapport au transport de marchandises non groupées. Le conteneur favorise l'automatisation de plusieurs opérations de manutention, ce qui accélère le chargement et le déchargement et autorise un transfert plus rapide d'un mode de transport à un autre.

En outre, le conteneur protège les marchandises des intempéries et du chapardage et la manutention,

devenant plus simple, se traduit par une quantité moindre de dommages.

Les avantages inhérents des conteneurs ont pu être réalisés grâce aux capitaux considérables que les exploitants ont investis en navires, terminaux, grues, wagons à deux niveaux de chargement et autres installations ou équipements de manutention spécialisés.

Toutefois, les opérateurs, les ports et les autorités de tutelle faisant en sorte de s'adapter aux contraintes de la logistique moderne, se heurtent à un certain nombre de limites de la conteneurisation. Les contraintes physiques aussi bien dans les transports courts que sur longues distances nécessitent un minimum de protection préventive.

En effet, les températures élevées ainsi que la ventilation réduite dans le conteneur entraînent très souvent de lourds dommages si l'on n'y prend pas garde. La température provoque la dessiccation des marchandises (cacao) ou des emballages (carton, bois d'arrimage ou de calage, bois de palette, etc.). La vapeur d'eau, une fois libérée, se condense dans les zones les plus froides du conteneur et en général lors de l'alternance jour-nuit.

C'est alors une pluie qui semble retomber sur les marchandises, avec des dégâts irrémédiables faciles à imaginer.

## **Manutention et expéditions :**

Le chargement et le déchargement de la marchandise d'un conteneur : l'empotage et le dépotage selon un empilement.

Toutefois le bon sens interdira l'empotage de produits dangereux avec des denrées alimentaires. Mais, il existe des cas de contaminations moins évidents, comme un chargement de carottes contaminées par l'odeur des oignons présents dans le même conteneur.

Le chargement des marchandises dangereuses est quant à lui soumis à une réglementation stricte, contenue dans le code IMDG (International Maritime Dangerous Goods) et une signalétique spécifique est apposée sur le conteneur en fonction de la nature du produit [13].

Il existe deux possibilités d'expédier les marchandises : Soit par conteneur complet Full Container Load-FCL, c'est la solution la plus répandue où toute la marchandise appartient à un même client qui loue la boîte. Soit par groupage maritime Less than Container Load-LCL, cette méthode est utilisée pour les petits envois (1 à 10 m<sup>3</sup>).

Dans ce cas, on regroupe les lots afin d'obtenir un conteneur complet et l'empotage est effectué par la compagnie maritime ou l'organisateur de transport (transitaire).

Les opérations de manutention se réalisent au terminal à conteneurs dans les ports maritimes et les ports secs. Les navires se placent à quai au regard des portiques (grues de quai pour soulever les conteneurs).

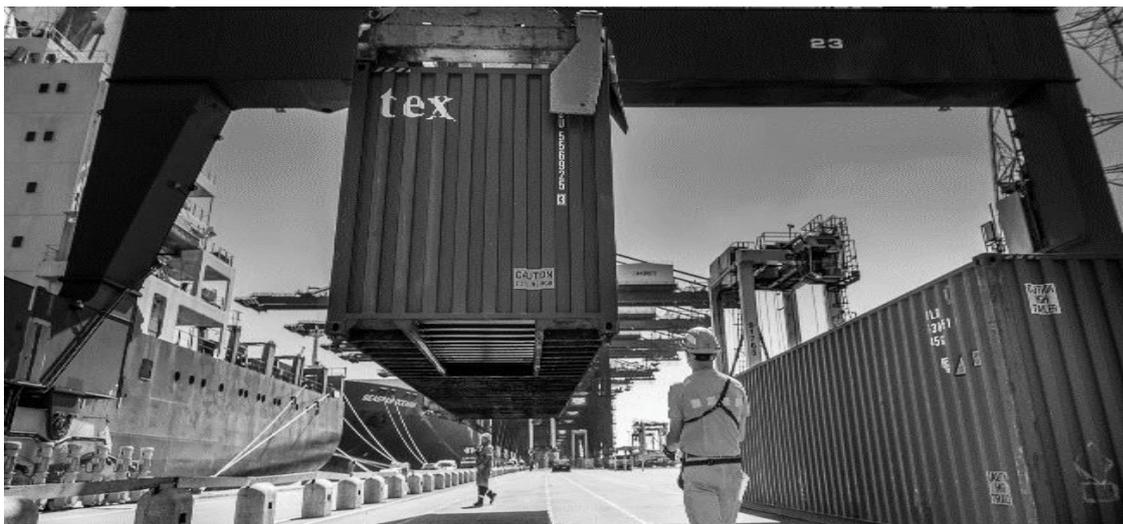


Figure 3: Manutention des conteneurs

A bord du navire, les dockers désarriment les conteneurs qui sont liés les uns aux autres par les pièces de coin durant la traversée.

Le portiqueur peut alors placer le spreader (structure où sont fixés les verrous permettant d'accrocher et de soulever le conteneur) à l'aplomb du conteneur et commencer le déchargement.

Au pied de chaque portique un homme ou un système vidéo veille pour repérer l'immatriculation du conteneur et préciser sa position (rangement dans le parc de stockage ou placement sur remorque ou wagon) à un autre docker présent dans un cavalier gerbeur straddle carrier qui va se charger de la manœuvre.

Une fois le déchargement réalisé, les manœuvres s'inversent pour les opérations de chargement.

A peine quelques heures suffisent. L'évolution technologique liée à la conteneurisation a profondément modifié les conditions de travail des dockers : ils sont moins nombreux, mais plus spécialisés et qualifiés.

Les dockers préparent le matériel, participent à l'ouverture des panneaux de cale, guident les conducteurs de portiques et pilotent les chariots élévateurs à terre.

Le pointeur est responsable de la gestion du parc à conteneurs. Depuis son terminal informatique, il affecte les marchandises à des emplacements précis en fonction de leurs destinations. Il est également chargé d'identifier et de contrôler les conteneurs qui quittent le terminal.

Le planificateur de navire ship planner est chargé d'organiser le plan de chargement sur un navire : il doit attribuer à chaque conteneur un emplacement précis à bord du navire. Il veille à ce que la stabilité du navire soit respectée.

La manutention de conteneurs consiste à déplacer les marchandises du quai vers les zones spécifiées et à les empiler dans les zones de stockage, puis à charger les marchandises sur des camions, ou vice versa dans le cas de marchandises destinées à l'exportation dans le terminal à conteneurs.

La manutention se fait par la grue mobile ou sur rails, RTG, portique à conteneur, Trolley élévateur, RMG, portique à minerais. Les accessoires de levage de ces engins sont des palonniers avec verrouillage mécanique ou automatique.

*f) Les engins de manutention portuaire :*

Les ports utilisent des équipements spécialisés et puissants sur le quai, dans la zone de triage et à leurs interfaces dans l'arrière-pays pour desservir rapidement les navires, les trains et les camions externes.

Une utilisation très productive de cet équipement nécessite une optimisation des opérations de grue.

Ce travail fournit des détails techniques sur les types de grues portuaires les plus pertinents.

**RTG** : Rubber Tire Gantry : portique de parc sur pneu en caoutchouc est un engin de levage des conteneurs souvent utilisé dans le terminal à conteneurs et port pour le transfert de 20ft, 40ft et conteneurs EVP standard de 45 pieds[14].



Figure 4: opération de manutention du RTG dans le port maritime

La grue RTG se compose de 2 moteurs de levage qui peuvent soulever un palonnier de 10 t et des conteneurs de 40 t, des moteurs de Trolley pour déplacer le conteneur d'un côté à l'autre de la grue et de 4 moteurs de portique qui sont utilisés pour déplacer l'ensemble de la grue à l'intérieur de l'installation comme affiché sur la figure 6.

Les grues RTG qui sont proposées pour le port commercial de Jazan peuvent manutentionner des conteneurs ISO STANDARD de 20', 40' et 45'.



Figure 5: RTGs dans le port commercial de Jazan selon la source

- **Grue mobile :**

Engin de manutention diesel sur pneus qui peut soulever des conteneurs et des marchandises divers les bigbangs, les toiles de fers les palettes, les pales des éoliennes : capacité de charge max 104 t.

- **Chariot cavalier :**

Chariot cavalier est un portique de manutention de conteneurs qui est roulant et automobile.

C'est un véhicule terrestre lourd, de haute taille (jusqu'à plus de 15 m), monté sur des pneumatiques et mû par un moteur thermique diesel ou électrique, qui est utilisé sur un terminal conteneur portuaire et se positionne au-dessus d'un conteneur, en l'enjambant, pour l'agripper, le soulever (jusqu'à 16 m de haut), le déplacer et le

déposer, éventuellement au-dessus d'un à trois autres conteneurs (gerbage). Les Trolleys cavaliers sont pilotés par des dockers.

Ils peuvent soulever des conteneurs d'un poids maximal d'une soixantaine de tonnes, et les déplacer à une vitesse maximale d'environ 30 km/h.

- **Grue sur rails :**

Engins de manutention sur rails engins électrique qui peut soulever des conteneurs et des marchandises divers.

**Portique à minerai :**

Portique à minerai : engin de manutention des minerais dans les ports avec différentes capacités selon les fabricants.

Finalement, afin d'améliorer l'efficacité d'un port maritime, il a fallu identifier, analyser et évaluer les facteurs qui influencent la gestion de toutes ces opérations portuaires mentionnées auparavant.

En effet, la concurrence dans le secteur du transport maritime par conteneurs du principalement à, l'augmentation de la demande de transport maritime ainsi que l'introduction de méga navires ont présenté de nombreux défis pour les ports et

les terminaux a poussé les terminaux à se doter d'outils d'analyse et de gouvernance afin d'être en amélioration continue.

À cet égard, Steenken, et les auteurs ont annoncé que « les opérations sont aujourd'hui impensables sans une utilisation efficace et efficiente des technologies de l'information, ainsi qu'une méthode d'optimisation appropriée » [15].

En conséquent, nous avons dépisté les travaux antécédents pour s'inspirer et compléter le parcours d'amélioration continue de l'optimisation de la gestion des ports maritimes [16].

## **II. Etat d'art :**

### **1. Revue de Littérature des travaux antécédents sur l'optimisation en gestion des ports maritimes :**

Au début, Marcelo et les auteurs ont élaboré un travail qui présente l'influence des facteurs internes et externes sur la gestion du port.

Ils ont essayé d'évaluer si la nature du fret manutentionné, ou le modèle de gestion adopté, affecte de manière significative l'efficacité du port maritime.

Mais leur analyse n'a pas révélé de différences significatives en matière d'efficacité en fonction des différents modèles de gestion ou de la nature de la cargaison manutentionnée [17].

Ensuite, Bergantino et les auteurs, ont testé si les facteurs externes ou internes influencent le contrôle d'un gestionnaire de port, ou une combinaison ces deux facteurs expliquent le mieux le niveau d'efficacité d'un port maritime.

Une analyse entrée par entrée est appliquée, et la méthodologie est testée sur un panel de ports du sud de l'Europe.

L'analyse d'enveloppement de données et l'analyse de frontière stochastique sont appliquées comme sous techniques. Ainsi, ils ont conclu que les facteurs liés à la gouvernance et les conditions macroéconomiques sont en les confrontant, entre autres, aux choix d'infrastructure et aux capacités de gestion [18].

Dans ce cas, en termes de gestion d'énergies, Zhen et les auteurs ont décidé de traiter dans leur article l'importance de réduire les coûts liés à l'énergie au port maritime et d'établir des systèmes de gestion de l'énergie dans les chaînes d'approvisionnement maritimes [19].

Ainsi, les auteurs Tolga Bektaş unJan et les auteurs ont montré dans leur travail le rôle de la recherche opérationnelle dans la gestion et l'optimisation des couts du transport écologique de marchandises et surtout le maritime [20]. Cela a poussé les études travers le monde y compris l'Australie à s'approfondir d'avantage dans la gestion et la planification des opérations portuaire y compris les aspects sensibles à l'énergie en se basant sur des outils d'apprentissage automatique et de recherche opérationnelle et présenter les effets de l'évolution de la technologie portuaire et de l'optimisation des processus sur la performance opérationnelle .

Pour résoudre cette problématique, Gianfranco Fancello et les auteurs ont utilisé un algorithme prédictif d'apprentissage dynamique basé sur des réseaux de neurones et un algorithme d'optimisation pour l'allocation des ressources [21].

Cette thèse propose deux algorithmes pour la planification de l'arrivée des navires afin de bien planifier les ressources humaines et bien exploiter leurs temps de travail: un algorithme prédictif d'apprentissage dynamique basé sur des réseaux de neurones et un

algorithme d'optimisation pour l'allocation des ressources dans un port de transbordement.

L'utilisation de ces deux algorithmes permet d'une part de réduire l'intervalle d'incertitude entourant l'arrivée des navires au port, en veillant à ce que les ressources humaines puissent être planifiées autour de deux quarts de travail seulement.

D'autre part, les opérateurs peuvent être alloués de manière optimale pour toute la journée de travail, en tenant compte de la demande réelle et des opérations du terminal.

C'est ainsi, Junliang He et les auteurs ont proposé une planification des ressources matérielles : ce travail aborde le problème de l'attribution intégrée des postes d'amarrage et de l'affectation des grues de quai (QC) pour le compromis entre le gain de temps et l'économie d'énergie [22].

Ce problème est formulé comme un modèle de programmation d'entiers mixtes (MIP), afin de minimiser le retard total de départ de tous les navires et la consommation totale d'énergie de manutention de tous les navires par les QC .

Raa, B. et les auteurs ont proposé aussi une planification optimale pour le système énergétique intégré au port maritime en tenant compte de l'attribution des postes d'amarrage [23].

D'autre part, MeiSha et les auteurs ont proposé l'allocation des grues de manutention électrifiées dans l'incertitude de la charge de travail en minimisant la consommation d'énergie[24].

Après, les auteurs ont décidé de développer davantage la gestion et traiter le problème d'attribution intégrée des postes d'amarrage et d'affectation des grues de quai : planification du poste d'amarrage et des grues de manutention [25] [26]. Après, Ndiaye, N. F. (2015) et les auteurs ont traité la gestion des ressources matérielles : Gestion des conteneurs en utilisant les Algorithmes d'optimisation pour la résolution du problème de stockage de conteneurs dans un terminal portuaire [27].

D'autre part, Il existe des études qui analysent uniquement les systèmes de gestion de l'énergie pour les ports tel que Çağatay Iris Jasmine Siu et les auteurs ont proposé des outils pour examiner de l'efficacité énergétique dans les ports [28].

Mais ils n'ont pas présenté les outils pour améliorer cette efficacité énergétique donc ensuite Harry Geerlings et les auteurs ont proposé des possibilités de réduire la demande d'énergie des grues de quai navire-terre dans les terminaux à conteneurs [29]. Ainsi , les auteurs Wilms Meier et les autres ont appliqué des

approches pour optimiser l'énergie dans un terminal à conteneur [30].

Ensuite, Héctor Carloun et les auteurs ont suggéré des méthodes de rasage de pointe opérationnelles, y compris l'arbitrage énergétique[31].

Mais, l'optimisation concerne aussi les coûts énergétiques des parcs à conteneurs frigorifiques selon Xin et al. Xin et les auteurs, Ils ont noté que la consommation d'énergie de pointe représente une part non négligeable des coûts totaux de l'énergie Les résultats ont mis en évidence d'importantes économies de coûts [32].Par ailleurs, il s'est avéré que l'optimisation au port se présente aussi en termes de maintenance des grues portuaires, puisque, au Japon, ils ont utilisé le système d'apprentissage automatique pour gérer le système de maintenance préventive des grues dans les ports maritimes (RTG et portique à conteneur).

Ils ont vendu cette solution sous forme de logiciel nommé CARMS qui précise le moment opportun de la maintenance et le nombre et les pièces exactes à changer et cela a permis une optimisation importante et très bénéfique en termes de temps et d'argent pour l'organisme portuaire : Ce gain en termes de temps s'explique par le fait que cette maintenance préventive

évite à la grue de tomber en panne en plein exploitation et déchargement du navire.

Ce temps présente un indicateur de performance clé du port donc si l'opération d'exploitation tarde, l'armateur va le facturer au port et ne reviendra plus à ce port puisque sa qualité de travail et sa productivité est basse.

Alors que si on fait la maintenance préventive comme le système d'apprentissage automatique signale on évitera tous ces pertes .

Puisqu'il est devenu évident que dans cet environnement très concurrentiel, outre le coût global d'utilisation des terminaux à conteneurs, leurs clients continuent d'apprécier « d'autres aspects du service qui sont plus difficiles à quantifier, notamment la réactivité, la fiabilité, la cohérence et la réputation» ainsi que d'autres aspects de la qualité du service, car celle-ci est directement liée à la satisfaction de la clientèle[33].

Finalement, notre thèse va traiter les deux dimensions du développement durable des ports maritimes car ils vont proposer une gestion optimale de la consommation d'énergie et la planification optimale des opérations à l'avance dans les ports maritimes avec les outils d'apprentissage automatique en exploitant les énergies renouvelables. Ceci dit, notre travail est réalisé en deux travaux séparés : un travail qui traite l'optimisation de la consommation d'énergie au port de Casablanca au

Maroc et le deuxième qui propose la méthode de prédiction pour la bonne planification et allocation des ressources du port.

Bien évidemment, avant d'élaborer ces deux travaux, nous avons réalisé une revue de littérature pour dépister les meilleurs pratiques de développement des ports surtout les ports hautement développés asiatiques : Shanghai, Singapore, Tokyo, Busan.

## **2. Formulation de la problématique :**

Les travaux antécédents nous ont inspirés pour appliquer les méthodes d'amélioration continue à un port très important au Maroc qui présente le hub de la méditerranée : le port maritime de Casablanca. Mais avant tout , il a fallu réaliser une revue de littérature qui englobe et analyse les meilleures pratiques des ports asiatiques hautement classés pour découvrir leur avancement à ce niveau et rajouter mes contributions économiques, environnementales et sociétales potentielles afin de générer des voies de développement plausibles pour l'évolution des ports maritimes. Ce travail s'accroît sur les principales dimensions de développement durable des ports maritimes : la dimension gouvernante, opérationnelle avec des outils de soutien important aux planificateurs pour une

planification efficace et flexible de la gestion des opérations du terminal.

### **3. Structure de la présentation de la problématique :**

Nous avons tenté dans cette partie introductif de décrire le cadre général de notre travail et nous avons situé le contexte de notre étude afin de connaître au mieux les nouveaux concepts s'y posant, et ce dans le but de contourner et de maîtriser la problématique ci étudiée.

C'est pour cette raison que nous avons décidé de traiter les pistes d'améliorations perpétuels des ports maritimes mais surtout pour un développement durable respectant l'environnement et la qualité de l'air.

On va présenter au début l'importance des ports et on va établir une revue de littérature sur les travaux traitant les axes d'améliorations en termes d'équipement et de compétences dans les ports maritimes dans le monde entier.

Ensuite, on va présenter notre contribution en termes d'optimisation de la consommation d'énergie en utilisant l'outil d'apprentissage automatique : la méthode de régression multiple au port de Casablanca.

A la fin, on va présenter notre contribution concernant l'optimisation de l'allocation des ressources RTG en utilisant la méthode de séries chronologiques au port de Casablanca pour une meilleure efficacité de gestion permettant d'augmenter les économies d'énergie et d'augmenter des gains énormes financiers et de diminuer des tonnes d'émissions de CO2 pour une meilleure qualité de vie sur notre terre.

Finalement, le résultat de ce travail permettra un gain triparti : financier, environnemental, social.

Pour une meilleure gouvernance, il faut une planification stratégique des opérations portuaires et pour cela on a besoin de connaître les types d'opérations et services logistiques aux ports.

### **III. Revue de Littérature sur les greens ports et leurs approches d'optimisation de consommation d'énergie**

En répondant au défi de l'équilibre de la convivialité pour l'environnement avec la demande économique et la croissance de les activités commerciales et le besoin de compétitivité à l'échelle mondiale marché, les ports du monde entier essaient systématiquement et évaluer en permanence toutes les possibilités d'optimisation et les coûts connexes et la réduction des émissions de CO2. De nombreuses stratégies sont de plus en plus appliquées par les ports de nombreux pays développés et ils adoptent le concept de port vert.

#### **Orientation stratégique des nations unis : Green Port**

L'ONU a décidé de fixer 17 objectifs pour 2030 pour transformer le monde et ils sont affichés sur la figure suivante [34].



Figure 6: les 17 objectifs des nations unis pour 2030 pour transformer le monde selon l'ONU

Les émissions de CO<sub>2</sub>, la cause importante du réchauffement climatique et de la pollution de l'air ont des conséquences graves sur la santé, elle est responsable de près de 47 000 décès prématurés par an en France selon le Réseau Action Climat et UNICEF France [35]. La réduction de ces émissions et la sécurité énergétique : ils sont des défis communs pour l'humanité et les nations du monde entier pour permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge. C'est pour cette raison que l'orientation stratégique des ports maritimes est devenue l'approche green [36].

Ainsi, les ports maritimes ont débuté à installer des équipements entièrement électrifiés et utilisent l'électricité comme source d'énergie, puisque la consommation d'électricité, au lieu de sources d'énergie à forte intensité de carbone, contribue aux objectifs d'atténuation du changement climatique [37] [38].

D'autre part, les prix de l'énergie ont augmenté au fil des ans illustrés sur la figure suivante selon France-inflation et surtout maintenant la hausse est très importante du fuel et les opérations durables sont une cible clé pour l'écologisation de l'industrie portuaire.

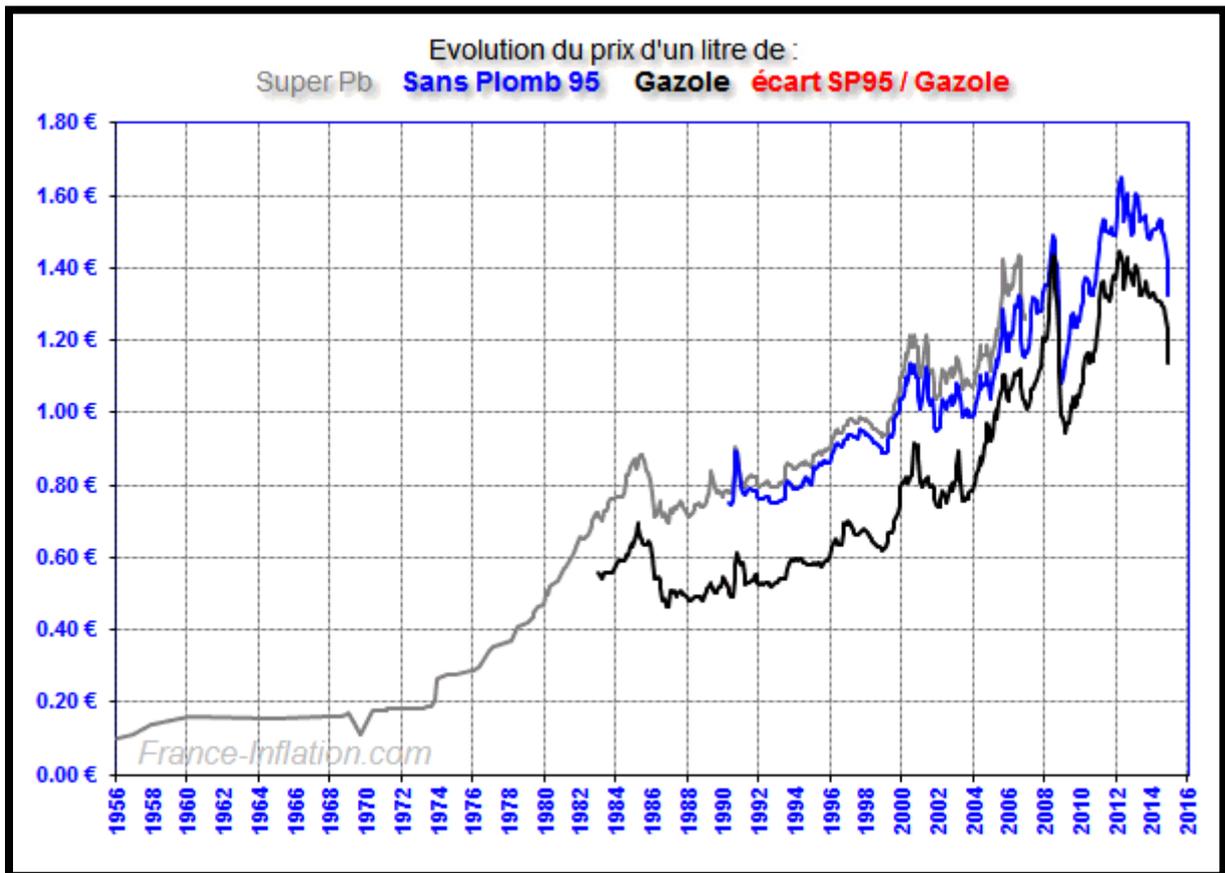


Figure 7: evolution du prix du fuel selon France inflation

D'où, différents ports asiatiques se sont orientés vers la transition énergétique verte et les auteurs expliquent clairement en leur travail en 2018 les raisons d'implémentation du concept de green port dans les ports dans le monde entiers tel que les ports italiens [39].

Le port vert vise à faire en sorte que les ports incarnent la caractéristique de la santé environnementale, protection écologique, rationnel utilisation de diverses ressources, à faible consommation d'énergie, et pollution (émission de CO<sub>2</sub>).

Un autre objectif est d'assurer l'harmonie entre l'exploitation des terminaux à conteneurs et la santé humaine, tout en favoriser le développement durable du port [40].

De nombreuses recherches confirment que les principales sources de CO<sub>2</sub> les émissions et la consommation d'énergie dans les ports consistent en l'équipement de manutention de conteneurs (76 %), les immeubles de bureaux (21 %), l'équipement d'éclairage (2 %) et d'autres sources (1 %) [41].

L'équipement de manutention des conteneurs est l'équipement nécessaire pour recevoir spécifiquement, transporte les conteneurs.

De nombreux ports verts ont adopté des pratiques durables pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et économie d'énergie grâce à la manutention des conteneurs par des équipements comme RTG.

L'une de ces pratiques durables pour les RTG est l'utilisation des énergies renouvelable tel que : l'énergie gravitationnel, éolienne ou solaire.

La deuxième mesure technologique est la conversion des RTG en E-RTG. Électrification des grues RTG amélioration performances significatives par rapport au RTG classique alimenté au diesel, et environ 82 % d'économies d'énergie peuvent être réalisées. Simple période de remboursement de l'investissement dans la version de la grue RTG à carburant diesel en électricité (modernisation de la machine) est d'environ 2,5 ans [42].

En outre, passer des grues RTG à carburant diesel à l'électricité ont un potentiel de réduction du bruit de fonctionnement niveau jusqu'à 50%. L'électrification des grues RTG fournira CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale et pas seulement des réductions d'émissions sur place si l'émission annuelle et spécifique de CO<sub>2</sub> induites par l'électricité facteur est inférieure à 1,5 t de CO<sub>2</sub> par MWh, ce qui est le cas pour tous les pays européens [43].

Il a suggéré que les caractéristiques d'un port vert à la fine pointe de la technologie comprennent le repassage à froid des navires avec automatisation rapide accostage, véhicules de transport automatisés à faibles émissions technologie, grues de chantier électriques à chargement final et grues électriques desservant la gare de triage du terminal [44] [45]. Yang a suggéré que l'équipement terminal à conteneurs automatisé respecte les exigences

des terminaux à conteneurs verts, qui comprennent des émissions de gaz à effet de serre [47].

Ainsi, les terminaux verts devraient être conçus en harmonie avec leurs emplacements, favoriser une haute efficacité, améliorer l'économie, améliorer l'infrastructure globale et fournir un lien vers la communauté.

Affirmé que les caractéristiques des terminaux verts devraient inclure l'électricité pour les navires à poste d'amarrage, amarrage automatisé pour réduire la marche au ralenti du navire, quai électrique grues, véhicules de transport automatisés à faibles émissions, chargés par l'extrémité grues de triage électriques, l'exigence que les camions éteignent leurs moteurs en attendant le service, et rendez-vous à la porte pour minimiser le temps d'attente pour les camions de rue il estime que la concurrence entre les méga ports à conteneurs s'intensifie progressivement, et cette tendance devrait se poursuivre [48].

Pour résoudre cette situation, les accords internationaux exigent des conteneurs opérateurs de terminaux à effectuer des paiements raisonnables proportionnels à leurs émissions de CO<sub>2</sub> [49].

Dans ce travail, nous avons comparé le plus grand marché mondial Ports asiatiques verts (Shanghai, Singapour, Hong Kong, Tokyo, Busan) en utilisant trois facteurs :

- ✚ La source d'énergie renouvelable ;
- ✚ L'économie d'énergie par conversion RTG en E-RTG ;
- ✚ La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par conversion RTG en E RTG.

a. **Méthodologie : Étude de cas des ports maritimes asiatiques et leurs pratiques verts asiatiques :**

a) **Port de Singapour :**

L'autorité maritime et portuaire de Singapour (2011) a mis en œuvre l'Initiative verte maritime de Singapour afin de promouvoir un transport maritime respectueux de l'environnement. Cette initiative vise à lutter contre les émissions serres de gaz provenant des navires maritimes et canaliserá **100 millions de dollars dans trois programmes de base au cours de la prochaine cinq ans : Programme des navires verts, Programme des ports verts et programme de technologies vertes** [50].

En 2011, l'autorité portuaire maritime de Singapour s'est engagée à investir jusqu'à 100 millions de dollars dans la Maritime Singapore Green Initiative au cours des cinq prochaines années [51].

L'Initiative verte lancée par l'Autorité portuaire de Singapour en l'année 2009 contient plusieurs économies d'énergie et réductions de CO2 mesures, y compris :

- Utilisation de panneaux muraux complets dans les bureaux conception, utilisation de l'éclairage naturel, installation du mouvement capteurs dans les pièces et les couloirs où la circulation humaine est peu fréquente, et aménagement paysager autour des bâtiments pour réduire les effets de la chaleur urbaine et fournir un refroidissement.
- Conversion des RTG en E-RTG alimentés.
- Installation de dispositifs d'économie de carburant pour réduire la consommation de diesel.
- Utilisation de l'entraînement hydraulique hybride pour réduire la consommation de carburant de 20 % (Goh, 2010).

### **b) Port de Hong Kong :**

L'objectif global du plan directeur du port de Hong Kong 2022 est de formuler une stratégie compétitive et durable pour le port développement sur une période de planification de 20 ans.

Le plan vise à permettre à Hong Kong de conserver une position de leader dans les services portuaires dans le sud de la Chine, fournir une base solide pour la poursuite de l'expansion du port et sécuriser les avantages économiques durables pour le Hong Kong Spécial Région administrative.

Selon les projections de HKP 2020, le débit total de conteneurs maritimes à Hong Kong augmentera de 13,9 millions d'EVP en 2002 à 31,87 millions d'EVP en 2020, et le trafic total de conteneurs à Hong Kong devrait atteindre 27,9 millions d'EVP en 2010 et 40,2 millions d'EVP en 2020. Le gouvernement de Hong Kong a promu des initiatives pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, notamment en exhortant les exploitants de véhicules pour passer à un carburant à combustion plus propre et exiger tout l'industrie, y compris des véhicules routiers.

Les opérateurs portuaires de Hong Kong HIT et Modern Terminals ont également converti de la combustion de carburant diesel à l'utilisation l'électricité pour alimenter leurs grues à portique RTG dans 70% des terminaux HIT et ont également adopté d'autres solutions d'économie d'énergie des mesures (telles que la limitation de l'éclairage dans la zone portuaire), et utiliser l'énergie solaire pour entendre l'eau sur place, ce qui se traduit par des économies de plus de 120 000 kW par année.

L'accord MARPOL VI prescrit que l'exploitant du navire l'entrée dans le port doit brûler des combustibles qui émettent moins de 2,5 % de CO<sub>2</sub> dans les eaux intérieures de Hong Kong et dans la proximité du port [52].

### **Port de Tokyo :**

Le port de Tokyo a atteint un débit record de conteneurs de 3,88 millions d'EVP, et les deux terminaux sont responsables pour des émissions annuelles moyennes de CO<sub>2</sub> de 20 000 tonnes et 12 000 tonnes respectivement.

Selon une enquête empirique menée par Tokyo Port Terminal Corporation (2011), les principales sources des émissions de CO<sub>2</sub> provenaient de l'équipement de manutention des conteneurs (76 % des émissions), les immeubles de bureaux (21 %), les équipements d'éclairage (2 %) et d'autres sources (1 %).

Cette société a été activement promouvoir et soutenir l'introduction de l'environnement mesures et équipement de protection de l'environnement du client au cours des dernières années.

Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des conteneurs équipement de manutention, le port de Tokyo a appliqué deux technologies dans les RTG.

L'un d'eux est la puissance régénératrice, qui consiste en la génération d'énergie à partir de la gravitation l'énergie potentielle libérée lorsqu'un conteneur est abaissé cette énergie peut ensuite être utilisée pour soulever un autre conteneur. Le second La mesure technologique est la conversion des RTG en E-RTG. En introduisant ces mesures impliquant des équipements de manutention, les émissions de GES et la consommation d'énergie ont été réduits de 40 % (66 t de CO<sub>2</sub>/unité et 25 kWh/unité), et là ont également permis de réduire considérablement les émissions de polluants atmosphériques (700 kg de NO<sub>x</sub> et 520 kg de particules) (APEC, 2009). Le gouvernement Japonais a offert des subventions spéciales pour les économies d'énergie équipement de manutention de fret (y compris les RTG hybrides et électriques) à partir de 2009. Depuis avril 2008, le port de Tokyo Terminal Corporation a fourni des incitations environnementales sous la forme de frais préférentiels de location de quais pour les opérateurs qui peuvent permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre [53]. Ces plans prévoient passer à une faible consommation d'énergie et à un conteneur à haut rendement les équipements de manutention, et en particulier la conversion des grues à portique pneumatiques du diesel à l'électrique pouvoir (Ministère des transports de la République populaire de la Chine, 2008) [54].

Conformément à ce qui précède les lignes directrices et le 12e Plan national de développement des cinq ans, l'Autorité portuaire et des transports de Shanghai a émis Lignes directrices pour l'économie des ressources et le respect de l'environnement Développement du port de Shanghai le 14 décembre 2011.

Ces dernières lignes directrices appellent au développement d'un port économe et respectueux de l'environnement afin de favoriser le développement sain et durable du port de Shanghai.

Selon les directives émises par le Shanghai Transport et administration portuaire (2011), l'énergie globale la consommation des unités de production portuaire devrait diminuer 5 % et 12 % en 2015 et 2020 respectivement par rapport à 2010 et leurs émissions de CO2 devraient diminuer de 10 % et 12 % par rapport à 2005, conversion des portiques (RTG) aux ERTG seront complétés à 100% en 2015 [55].

### **Port Busan**

Le gouvernement coréen a promulgué une loi de base pour Croissance verte à faible émission de carbone et a commencé la mise en œuvre d'un Plan national quinquennal pour la croissance verte [56] .

De plus, le ministère coréen des Affaires terrestres, des Transports et maritimes a établi un plan global pour répondre au changement de climat dans les zones terrestres et océaniques nationales, et ce plan comprend : un projet national de port vert [57]. L'autorité du Port de Busan a élaboré des plans pour un port vert de Busan, et en 2010 et a également mis sur pied une équipe de groupe de travail chargée d'enquêter sur les nouvelles idées et politiques pour la croissance verte du port de Busan. Au total, 186 RTG au port de Busan sont exploités. Par les exploitants de terminaux.

Le port de Busan a décidé de convertir les RTG diesel en E-RTG électriques pour un coût total d'environ 400 000 USD par RTG, et les opérateurs finaux et BP A ont convenu de partager ce coût également.

En introduisant les ERTG, les émissions de GES ont été réduites de 64,4 % et la consommation d'énergie a été réduite d'au moins 84 % (APEC, 2009).

Port de Busan a estimé que le coût d'exploitation d'un RTG diesel est de 18 000 USD par mois lorsque le prix du diesel est de 1,2 USD par litre ; en comparaison, le coût d'exploitation d'un e-RTG est estimé à USD 2000 par mois (Cho, 2010).

En résumé, les émissions de CO<sub>2</sub> générés par les RTG utilisés par les quatre grandes compagnies maritimes au port de Kaohsiung ont augmenté de 21 896 896,96 kg en 2008 à 23 658 404,76 kg en 2011, ce qui représente un croissance de 8,04 %.

Le gouvernement devrait formuler des règlements appropriés ou prévoir des mesures incitatives pour encourager les terminaux et les opérateurs pour mettre à niveau leur équipement de manutention ou effectuer des opérations E- RTG conversion projets.

**b. Résultats de l'étude comparative :**

Dans le tableau 1, nous avons comparé les premiers ports dans le monde entier qui ont adopté le concept de port vert : Port de Kaohsiung, Port de Singapour, Port de Tokyo, Port de Hong Kong, Port de Shanghai, Port de Busan.

Tableau 1: Sources des énergies vertes aux ports Asiatiques

PORT VERTS	Facteurs de Comparaison		
	Source d'énergie	Gain d'énergie	Réduction des émissions CO <sub>2</sub>
Port de SINGAPORE	Energie solaire	20%	20%
Port de TOKYO	Energie Gravitationnelle	40%	40%

Port de BUSAN	E-RTG	86%	67%
Port de HONK KONG	Energie solaire	70%	60%

Cette comparaison repose sur trois facteurs importants :

- ✚ Le premier facteur : sources d'énergie comme l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable : utiliser les rayons du soleil pour produire de l'électricité verte et aussi l'énergie éolienne en utilisant des éoliennes et aussi l'énergie de la gravitation qui consiste en la génération d'énergie gravitationnelle libéré lorsqu'un conteneur est abaissé et que cette puissance peut alors être utilisée pour soulever un autre conteneur.
- ✚ Le deuxième facteur est la réduction de CO2 en utilisant E-RTG.
- ✚ Le dernier facteur est l'économie d'énergie en utilisant E-RTG.

### **c. Analyse et discussions :**

Le tableau 1 étudie les ports asiatiques responsables de la moitié des émissions mondiales de CO2 dans le monde. Ainsi, il est clairement nécessaire d'augmenter la part de l'énergie renouvelable par l'intermédiaire de sources alternatives.

D'un côté, Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans ces ports asiatiques utilisant des énergies renouvelables (éolien, solaire, gravitationnel) est clair et peut atteindre 80%, ce qui est un pourcentage très important et cela conduira à un énorme réduction de la pollution dans le monde.

D'autre part, en utilisant E-RTG, ces ports peuvent économiser de l'énergie de 20% à 84% par exemple le port BUSAN a estimé que le coût d'exploitation d'un RTG diesel est de 18 000 USD par mois lorsque le prix de diesel est de 1,2 USD par litre;

En comparaison, les coûts d'exploitation d'un e-RTG sont estimés à 2000 USD par mois (Cho, 2010) et le prix de conversion des RTG diesel en E-RTG électriques pour un coût total d'environ 400 000 USD par RTG. Donc, dans 2 ans le prix E-RTG est amorti [58].

Selon notre étude, nous pouvons remarquer que le concept du port vert permet une optimisation phénoménale des coûts de manutention et la réduction du CO<sub>2</sub> alors il nous offrira un environnement vert avec bénéfice.

Pour tout cela, la prochaine étape de notre travail est d'installer ce processus dans les ports marocains spécialement avec l'avantage de la diversité des ressources naturelles d'énergie.

#### **IV. Les contributions réelles en termes d'optimisation de consommation d'énergie et de planification des ressources portuaires au port de Casablanca :**

##### **1. Application de l'apprentissage automatique pour une production propre dans le port de Casablanca**

Les ports maritimes sont les principaux centres d'activité économique et représentent un maillon essentiel et important dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement mondiale [59]. Les ports desservent le monde entier pour recevoir tous leurs besoins et cet important nœud d'approvisionnement La chaîne devient l'épine dorsale du commerce international et le principal moteur de la mondialisation et joue un rôle important dans le transport maritime international qui influence inévitablement l'environnement mondial et la qualité de l'air figure toujours parmi les principales priorités environnementales des ports [60].

Ainsi, la figure suivante présente la comparaison entre la consommation totale de RTG et celle du E-RTG au port de Kaohsiung entre 2008 et 2011.

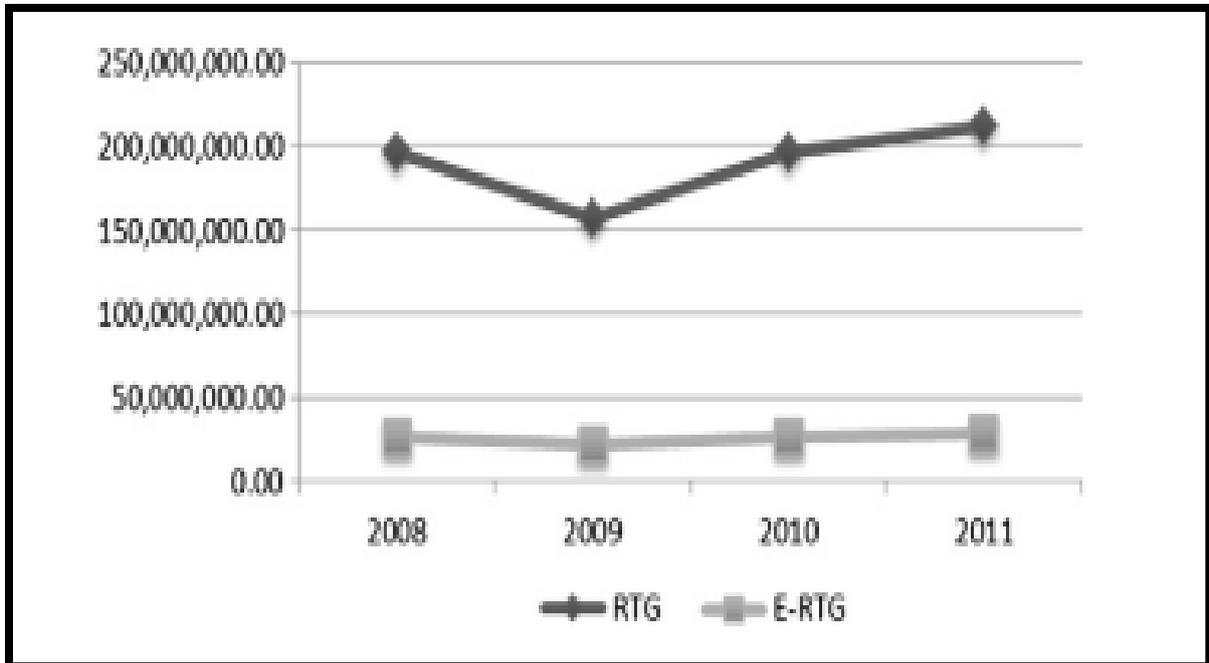


Figure 8: la comparaison entre la consommation totale de RTG et de l'ERTG au port de Kaohsiung entre 2008 et 2011

Les ports sont en développement perpétuel, de sorte que l'impact de la production des ports sur la qualité de l'air est significatif et clair, avec des émissions particulièrement élevées de gaz d'échappement diesel, de particules et d'oxydes d'azote. Les effets de ces polluants atmosphériques sur la santé des résidents des communautés locales comprennent l'asthme, d'autres maladies respiratoires, les maladies cardiovasculaires, le cancer du poumon et la mortalité prématurée.

Chez les enfants, il existe des liens avec l'asthme, la bronchite, les journées d'école manquées et les visites aux urgences.

Ainsi c'est le meilleur moment pour apprécier la valeur de respirer de l'air pur, l'importance de ces impacts sur la santé environnementale et la Terre, nécessite des efforts vigoureux pour atténuer le problème et passer de la pollution à la propreté de l'air [61].

Pour un développement durable, un port est sensé équilibrer trois lignes de fond, à savoir la prospérité économique, le bien-être social et la qualité de l'environnement. La réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, cause importante du réchauffement climatique, exerce une pression croissante sur les gouvernements et les industries pour qu'ils présentent des initiatives visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> [62].

De nombreuses associations internationales encouragent cet équilibre Comme l'a souligné Maria Belen Espineira (Women's International Shipping and Trading Association [WISTA, 2013]) « Il est bon de savoir qu'il y a une prise de conscience croissante parmi les entreprises privées, et qu'elles agissent ».

Les auteurs espèrent qu'à partir de maintenant, le secteur public prendra également des mesures pour fournir des lignes directrices. Le gouvernement semble avoir commencé à prendre des mesures maintenant.

N'oublions pas que la production et la consommation d'énergie ont un intérêt spécial en raison des facteurs économiques en jeu.

Mais c'est aussi une question d'intérêt général car, en fin de compte, ce qui est sérieusement compromis, c'est l'environnement, qui appartient à tous » [63].

Pour ces raisons, l'harmonisation des activités économiques avec les considérations environnementales est apparue comme un nouveau phénomène de mondialisation pour les ports. Le phénomène est étiqueté comme « port vert » de la « gestion verte de la chaîne d'approvisionnement », comme mentionné dans la littérature, vient de Srivastava (2018), qui définit GSCM comme « l'intégration de la pensée environnementale dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement, ainsi que la gestion de la fin de vie du produit après sa durée de vie utile » [64].

En conséquence, le concept de port vert est développé pour atténuer les impacts négatifs des opérations portuaires inappropriées sur l'environnement à influencer.

Ainsi, de nombreux ports et terminaux s'efforcent d'améliorer l'efficacité énergétique, car les prix de l'énergie ont augmenté au fil de l'année et l'atténuation du changement climatique est un objectif clé pour l'industrie portuaire. Des réglementations environnementales plus strictes sont adoptées par les autorités pour limiter les polluants et les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la consommation d'énergie.

De plus en plus, les stratégies opérationnelles portuaires et les modèles de consommation d'énergie font l'objet d'un examen minutieux afin d'ancrer la durabilité et la protection de l'environnement des ports.

De nombreux pays adoptent des pratiques vertes, par exemple, le port de Barcelone examine les stratégies portuaires qui améliorent la performance environnementale et promeuvent des solutions durables pour lutter contre le changement climatique.

L'emplacement géographiquement sensible de ce port maritime européen sur la mer Méditerranée entraîne des volumes élevés de trafic de fret et de croisiéristes, et il présente une étude de cas intéressante pour relever les défis de durabilité associés [65].

Nous avons traité en 2009 les quatre ports à conteneurs les plus fréquentés et les plus importants au monde à des débits significativement élevés. Ces ports sont conscients de la responsabilité de la production de leurs ports impurs et examinent leurs trajectoires de croissance probables, les problèmes de durabilité dans le développement portuaire et côtier et découvrent que les principales sources d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Ainsi, ils découvrent que la consommation d'énergie dans les ports se compose d'équipements de manutention de conteneurs (essentiellement RTG) (76 %), d'immeubles de bureaux (21 %), de matériel d'éclairage (2 %) et d'autres sources (1 %)[66].

Ainsi, les auteurs ont proposé des pratiques portuaires vertes utilisant de nombreuses sources vertes (solaire, éolien, vagues, biomasse, énergie gravitationnelle, conversion du RTG diesel en RTG électrique).

Afin d'augmenter les économies d'énergie et de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et d'améliorer la qualité de l'air et les résultats sont clairement présentés dans le tableau 1. L'énergie gravitationnelle consiste en une puissance de production à partir de l'énergie potentielle gravitationnelle libérée lorsqu'un conteneur est abaissé. Cette puissance peut ensuite être utilisée pour soulever un autre conteneur.

La conversion du diesel RTG en électrique, comme le montre la figure 13, permet d'éliminer la dépendance aux prix du carburant et d'offrir une amélioration significative des performances par rapport aux RTG, et peut réaliser des économies d'énergie de 86,60% et une réduction de 67,79% des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le travail précédent présente clairement l'impact financier et environnemental important et merveilleux des pratiques vertes et explique clairement la motivation de la mise en œuvre et comment il est si facile à appliquer et le gain est important.



**Figure 9:conversion de RTG à E-RTG**

Nous avons présenté des solutions et des pratiques n'ont pas pris en compte un facteur important qui influencera avant et après ces pratiques qui est le mode inactif. Le mode inactif est la période pendant laquelle ne fait aucun mouvement et le pilote RTG attend juste la nouvelle mission pour le faire, cette période peut actuellement être de plusieurs heures. D'autre part, l'auteur PAPAIOANNOU et tous ont traité le port FLEXITOWN et présenté un concept important qui consiste d'abord à analyser l'énergie RTG totale pour comprendre le comportement de l'énergie avant de l'optimiser.

Les auteurs ont analysé l'énergie RTG et identifié un mode inactif : idle c'est la période pendant laquelle la grue est en marche mais le conducteur ne charge aucune cargaison, il attend juste la nouvelle mission et la marche au ralenti pendant une longue période contribue à une pollution atmosphérique importante [67]. La limitation des travaux précédents étudiés sur l'énergie RTG est la taille de la population qui se compose de seulement d'un seul RTG et pour une petite période de 8 jours tandis que la consommation d'énergie RTG change en raison de : La variation des volumes de manutention et des modèles d'appel des navires, la saisonnalité des besoins énergétiques des conteneurs frigorifiques, les fluctuations des temps de séjour au port pour l'importation, l'exportation, le transbordement, les conteneurs frigorifiques le papier ne présentait pas le degré d'influence du mode inactif.

Cependant, notre thèse propose un modèle actif 24 heures sur 24 et des outils d'analyse pour la grue 11 RTG.

Différentes études sur l'énergie RTG ont été réalisées en utilisant des données sur une petite période de 30 jours maximum. Cependant, motivé par la nécessité de réduire les coûts d'exploitation et la pollution des gaz d'échappement générés par les équipements de manutention de fret dans les terminaux à conteneurs, ce travail propose un modèle actif 24 heures sur 24 et des outils d'analyse pour 11 grues RTG.

Le présent document de travail étudie la consommation des RTG et considère tous les facteurs (ralenti, HOIST, portique, Trolley) influençant probablement la production, c'est pourquoi ce travail traite des RTG dans le port atlantique le plus pertinent de Casablanca, au Maroc. Ce modèle pourrait être une solution potentielle pour optimiser la consommation d'énergie et réduire les émissions de Co2.

Les données opérationnelles ont été collectées pendant 365 jours/an pendant 2 ans et demi par l'ERP du port de Casablanca et analysées en termes d'utilisation de la demande quotidienne, la demande quotidienne des différents moteurs de la grue RTG pendant toute la période de l'année.

L'originalité de ce travail est de transformer toutes ces données opérationnelles d'énergie RTG collectées en modèle de régression de distribution d'énergie RTG avec ses moteurs à l'aide d'un outil d'apprentissage automatique [67], [68].

### **L'utilité de ce travail :**

Ce travail vise à :

- ✚ Promouvoir une consommation et une production propres dans les ports ainsi que la promotion de la santé et du bien-être, comme le préconisent **les 17 objectifs de développement durable élaborés par les Nations Unies** ;
- ✚ Promouvoir le développement durable des ports pour qu'ils soient plus propres et respectueux de l'environnement ;

- ✚ Étudier et analyser l'énorme consommation d'énergie de la grue du port de Casablanca lors de la manutention de marchandises lourdes et son émission de CO<sub>2</sub> ;
- ✚ Réduire la consommation portuaire impure et les émissions de CO<sub>2</sub> générées par la manutention des grues portuaires ;
- ✚ Diminuer la pollution de l'air des ports et rendre la production portuaire plus propre ;
- ✚ Améliorer la qualité du besoin humain précieux et essentiel : l'Air et c'est le meilleur moment pour l'apprécier ;

Ainsi, la structure du papier est la suivante : Tout d'abord : la grue RTG est décrite.

Ensuite, la méthodologie de collecte des données RTGs dans le port de Casablanca est présentée.

Ensuite, l'étude utilise l'apprentissage automatique pour produire un modèle de cluster d'énergie RTG avec ses paramètres : HOIST, Trolley, gantry et ralenti.

Ensuite, les auteurs analysent et discutent les résultats et proposent différentes stratégies et pratiques vertes pour augmenter la production de RTG propres.

## **a. Matériel et méthodes :**

### **Description du portique sur pneus en caoutchouc (RTG):**

Un élément vital dans un terminal à conteneurs est la grue RTG, comme illustré à la figure 6, et elle est utilisée pour manipuler les conteneurs pendant le processus de transbordement, par exemple lors du transfert de marchandises d'un cargo au transport terrestre. Il s'agit d'une grue mobile à plusieurs voies de conteneurs empilés, et peut gérer des conteneurs longs de 20 ou 40 EVP pesant jusqu'à 65 tonne.

Comme son nom l'indique, les grues à portique sur pneus sont équipées de pneus en caoutchouc qui permettent de se déplacer d'une ligne de conteneurs empilés à une autre. En moyenne, la grue effectue 15 mouvements par heure, ce qui est presque le même qu'avec le profil « normal », la planification du chargement/déchargement est complètement aléatoire, donc parfois, il peut s'agir de quelques camions qui ont besoin d'être déchargés, et/ou des fois où la grue doit charger un quelques conteneurs de la pile [69].

Le spreader est la partie de la grue qui se fixe au sommet d'un conteneur. L'épandeur porte bien son nom car il peut s'étendre et se contracter en longueur pour s'adapter à diverses normes de conteneurs d'expédition.

Cette grue dispose de trois moteurs différents responsables de trois mouvements importants : HOIST, Trolley, portique.

Il a montré une grue se fixant en toute sécurité au conteneur à l'aide d'un épandeur, l'épandeur est relié à la grue au moyen de huit fils connectés à un ensemble de poulies et à un tambour situé dans le Trolley, où se trouve généralement la cabine de l'opérateur.



**Figure 10: Principaux mouvements du RTG**

Le Trolley se déplace horizontalement dans une direction perpendiculaire par rapport à la longueur du conteneur.

Ce type de mouvement est connu sous le nom de « mouvement de Trolley » ;

Le mouvement vers le haut et vers le bas de l'épandeur est accompli en faisant tourner le tambour principal couplé au moteur de levage. C'est ce qu'on appelle le «mouvement de levage» [70].

Le mouvement du portique est défini comme le mouvement de l'ensemble de la grue le long de la pile

de conteneurs à l'aide de quatre ensembles de roues en caoutchouc.

Tous les actionneurs sont des moteurs électriques et leur classement en termes de consommation électrique est par ordre décroissant [71].

#### **a) Collecte des données :**

Nous utilisons des données opérationnelles réelles collectées dans le port de Casablanca au Maroc pour évaluer le flux d'énergie RTG dans toutes les conditions réelles. Afin d'avoir ces données, nous nous sommes réunis avec les techniciens responsable de la maintenance préventive et curative des RTG ainsi que de leur manager et grâce à leur traçabilité des données pour connaître la date exacte pour effectuer la maintenance, nous avons pu avoir l'historique des données opérationnelles réelles de la consommation journalière d'énergie des 11 grues RTG de janvier 2017 à mai 2019 dans le port de Casablanca [72].

Les données contiennent la consommation d'énergie quotidienne des RTG pendant tous les jours de l'année car les grues fonctionnent 24 heures sur 24 pendant 365 jour /an pendant 2,5 ans : 1000 jours pour 11 RTG, donc la dimension des données était de 11000 données réelles et les auteurs n'ont pas ajouté de données aléatoires.

La consommation d'énergie quotidienne RTG lors de la manutention traite différents volumes et différents types de conteneurs.

Ainsi, les données présentent le comportement quotidien réel de la grue dans le port pendant la période de pointe et de faible demande et les RTG ont

fonctionné en mode actif : lorsque la grue fonctionne, elle exécute activement une tâche telle que soulever/abaisser un conteneur.

Ils traitent également en mode inactif est un " temps d'attente" lorsque la grue est allumée mais n'exécute aucune tâche "mode inactif".Les données collectées contiennent la consommation d'énergie quotidienne de chaque RTG et spécialement l'énergie liée aux différents moteurs (HOIST, Gantry et Trolley) et ces énergies des moteurs ont été mesurées avec un compteur d'heures de travail pour chaque moteur et également le nombre total d'heures de travail RTG comme mentionné dans le tableau2.

Tableau 2: Extrait de la base de données RTG 01 heures de fonctionnement des moteurs pendant la première semaine d'avril

Les jours		Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
		01	02	03	04	05	06	07
RTG1	TOTAL CONSOMMATION	10075	10095	10117	10136	10153	10167	10167
	HOIST	3017	3026	3035	3043	3051	3056	3056
	TROLLEY	1892	1897	1903	1907	1911	1914	1914
	GANTRY	1431	1434	1437	1440	1443	1445	1445

La consommation totale présente le compteur d'heures totales de fonctionnement RTG, HOIST est le compteur d'heures de fonctionnement du moteur de levage, TROLLEY est le compteur d'heures de fonctionnement du moteur de Trolley et GANTRY est le compteur d'heures de fonctionnement du moteur de portique.

Par exemple, le RTG numéro 1 sur le tableau 2 indique au 01/04/2019 le compteur RTG total 10 075 heures et

le compteur de levage mentionne 3017 heures et le compteur de gantry mentionne 1892 et le compteur de Trolley 1431 heures comme mentionné dans le tableau 3 en annexe.

Enfin, lorsque l'auteur dispose de tous les compteurs heures de chaque paramètre de consommation RTG, l'auteur a besoin du nombre de litre de diesel consommé par RTG pendant 1 heure et du prix du litre de diesel pour calculer le coût de la consommation d'énergie RTG et ils ont également besoin du facteur d'émission de Co<sub>2</sub> /heure de ce type de RTG (KALMAR) pour estimer la production de Co<sub>2</sub> des RTG et le port de Casablanca a fourni cette donnée importante. Pour traiter ces données, il a fallu utiliser les outils de l'apprentissage automatique.

### **Apprentissage automatique et ses outils :**

#### **Processus d'apprentissage automatique : Qu'est-ce que l'apprentissage automatique ?**

L'apprentissage automatique est une technique qui enseigne aux ordinateurs à faire ce qui vient naturellement aux humains et aux animaux : apprendre de l'expérience. Les algorithmes d'apprentissage automatique utilisent des méthodes de calcul pour « apprendre » des informations directement à partir des données. L'efficacité de l'algorithme augmente lorsque le nombre d'échantillons disponibles augmente.

Ces techniques permettent de prendre de meilleures décisions commerciales pour progresser de près pour les organismes et devenir plus intelligents et plus compétitifs.

### **a) Apprentissage automatique :**

#### **L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique :**

L'intelligence artificielle (IA) et l'apprentissage automatique (ML) sont des innovations qui ont fait beaucoup de bruit dans le monde technique ces derniers temps, et pour des raisons valables : ils permettent aux entreprises de simplifier leurs processus de travail et d'identifier des modèles de données pour faire des choix commerciaux plus intelligents. Ils font progresser presque tous les secteurs en les aidant à travailler plus efficacement, et ils deviennent des outils fondamentaux permettant aux organisations de conserver un avantage concurrentiel.

#### **Application d'Intelligence artificielle et apprentissage automatique :**

L'apprentissage automatique est une branche de l'intelligence artificielle (IA) et de l'informatique qui utilise principalement des données et des algorithmes pour imiter la manière dont les êtres humains apprennent, en améliorant progressivement sa précision.

Les technologies émergentes du big data et de l'intelligence artificielle apportent des paradigmes prometteurs pour modéliser et résoudre des problèmes pratiques difficiles dans le transport maritime dans des scénarios complexes, difficiles à aborder.

Les objectifs principaux de cette technologie sont :

- ✚ Développer un système d'aide à la décision sur mesure basé sur les données et basé sur les technologies émergentes en tenant compte des caractéristiques d'un problème spécifique;
- ✚ Résoudre les problèmes classiques de gestion du transport maritime et de l'exploitation portuaire en utilisant des approches innovantes avec une efficacité et une efficacité plus élevées ;
- ✚ Utiliser les technologies émergentes pour résoudre les problèmes reconnus et les nouveaux problèmes dans le secteur du transport maritime ;
- ✚ Utiliser la technologie des méga données pour recueillir des données massives sur les activités maritimes et les analyser avec des approches d'intelligence artificielle de pointe ;
- ✚ Analyser les potentiels et les difficultés de l'adoption des technologies émergentes dans l'industrie maritime et discuter des solutions possibles ;

Ainsi, le grand défi pour les auteurs Fahdi et les autres est de traiter de grandes données opérationnelles pendant deux ans sur 11 RTG du port maritime de CASABLANCA et de faire une analyse robuste pour comprendre le comportement de la consommation de la grue [73]. Pour cette raison, nous avons utilisé la technique de la régression linéaire, son algorithme est mentionné dans la figure suivante et cette technique est la forme la plus courante d'analyse de régression linéaire [74].

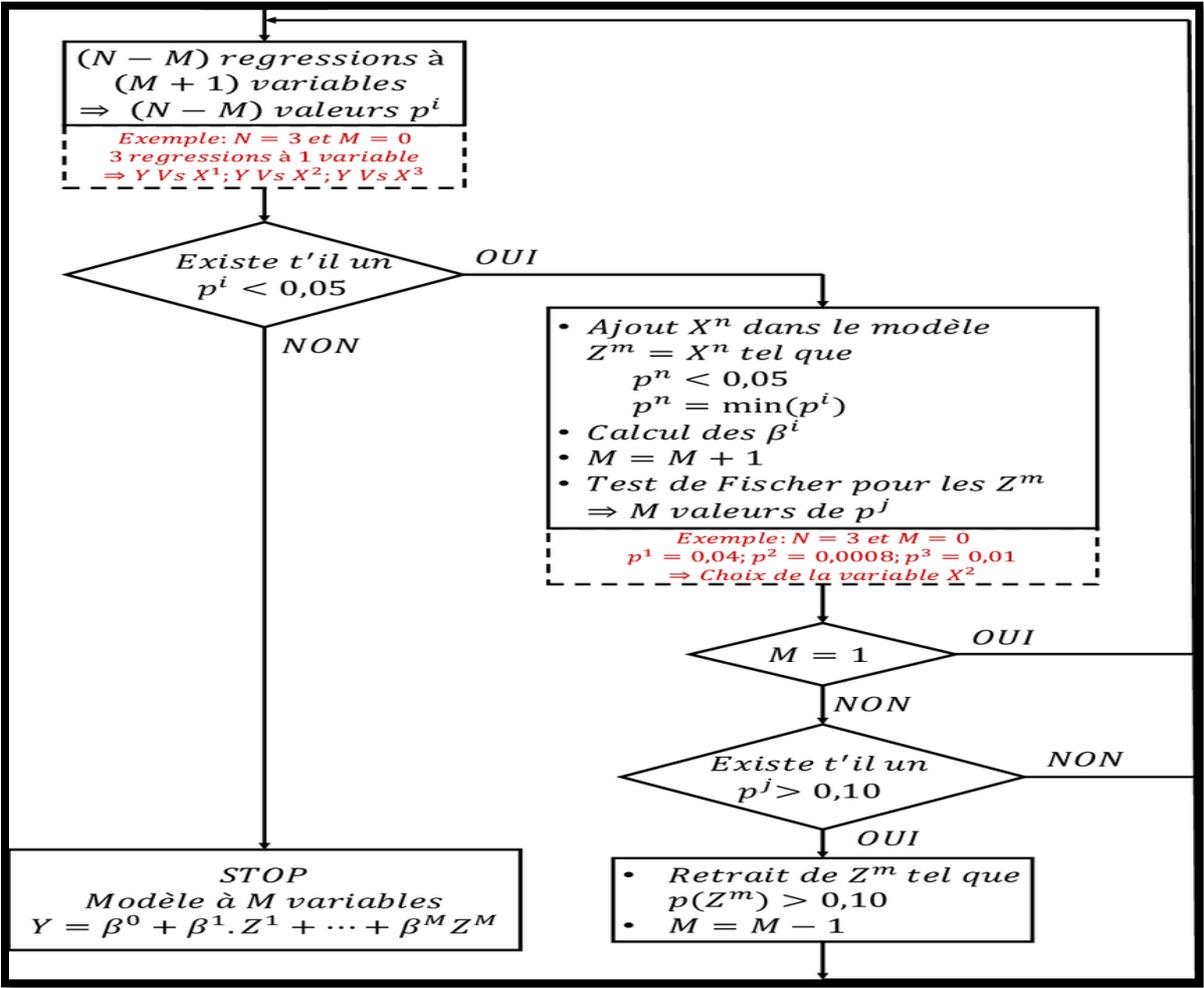


Figure 11:Processus de la régression linéaire

La régression est essentiellement une approche statistique utilisée dans l'apprentissage automatique pour trouver une relation entre des variables. Ainsi, la régression linéaire multiple est une méthode pour décrire et expliquer une variable dépendante par plusieurs variables numériques indépendantes [75].

Il permet d'expliquer des variables et des variables explicatives sous forme d'équation de type :  $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots$  où  $Y$  est la variable à expliquer,  $X_n$  variables indépendantes,  $a$  constante et  $b_n$  coefficients de régression partielle [76].

Ainsi, le modèle de régression se présente comme suit : La variable ( $Y$ ) selon toute variable indépendante ( $X_i$ ) sous la forme suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_kX_k ; \quad B_i : \text{Coefficient de régression de } X_i$$

La constante d'erreur  $\varepsilon$  présente le risque d'erreur du modèle et doit être minimale pour avoir un modèle correct.

Le coefficient de détermination ( $R$ -carré) est une mesure statistique  $R^2$  ne peut être comprise qu'entre 0 et 1, où 0 indique que le résultat ne peut être prédit par aucune des variables indépendantes et 1 indique que le résultat peut être prédit sans erreur par la variable indépendante [77] [78].

$0 < R^2 < 1$  Ces analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS version 22.0. La distribution normale des variables était assurée à l'aide de visuels [79], [80].

Cette analyse fournit un modèle de régression multiple présentant le comportement de la variable dépendante Y qui est dans notre cas la consommation totale de RTG liée aux variables indépendantes Xi (consommation du HOIST, consommation du Gantry et consommation du Trolley, consommation du mode inactif).

### **b. Théorie et calcul :**

L'outil utilisé pour réaliser notre modèle est IBM SPSS Statistics 20 sur ordinateur personnel moderne. Selon plusieurs tests effectués sur SPSS .

Après plusieurs simulations, le modèle le plus significatif à retenir est présenté sur le tableau 4 suivant :

Tableau 4: Coefficients de régression de la consommation des différents moteurs RTG

3.1 Data Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	-551,287	58,296		-9,457	,000
X1=HOIST CONS	2,711	,101	,820	26,978	,000
X2=TROLLEY CONS	,677	,147	,134	4,605	,000
X3=GANTRY CONS	,759	,189	,046	4,010	,000

Le tableau 4 présente les coefficients de régression de la consommation totale du RTG avec ses différents moteurs : Coefficient de régression de Consommation 2,711.

Coefficient de régression de Consommation du Trolley : 0,677.

Coefficient de régression de Consommation du Gantry : 0,759.

Constante d'Erreur = -555 287

Variable dépendante :  $Y = \text{CONSOMMATION GÉNÉRALE}$

Variables indépendantes :

$X_3 = \text{HOIST CONS}$  ;  $X_2 = \text{CONS TROLLEY}$  ;  $X_1 = \text{GANTRY CONS}$  ;

### **Évaluation du modèle :**

Le modèle 1 de régression se présente sous la forme suivante :

Éq1 :  $Y = -551\,287 + 2\,711X_1 + 0,677 X_2 + 0,759 X_3$  Y :

Consommation générale  $X_1$  : Importance de la consommation du HOIST =0

$X_2$  : Signification de la consommation du Trolley =0

$X_3$  : Signification de la consommation du gantry=0 la constante d'erreur = -551 287

Le tableau 5 présente le coefficient de stabilité R pour le modèle de régression de la consommation RTG avec ses différents moteurs durant le mode idle et  $R^2=0,999$ .

Tableau 5 : Coefficient de stabilité R du modèle de régression multiple de la consommation totale RTG

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	,999a	,999	,999	62,400

Après plusieurs tests le meilleur modèle de régression est le suivant :

Variable dépendante Y : Consommation totale RTG

Variable indépendante X1 : RTG Consommation en mode inactif

Ce tableau 6 montre que les coefficients de régression de la consommation en mode veille RTG :  $2\ 0265 \ \varepsilon = 650\ 056$  / constante d'erreur ;

X1 : Signification de la consommation en mode veille RTG = 0,000

Tableau 6: Coefficient de de régression du modèle de régression simple de la consommation totale RTG

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	650,056	17,925		36,266	,000
X1=IDLE RTG CONSOMMATION	2,265	,005	,999	414,141	,000

Tableau 7 montre le coefficient de stabilité R du modèle de régression : 0,999

Ainsi, le modèle de régression linéaire simple pour la consommation totale de RTG avec la consommation en mode veille de RTG :

Éq2 :  $Y = 2,265 X1 + 650,056 \varepsilon = 650\ 056 /$  constante d'erreur ;  $R^2 = 0.999$

Tableau 7: Coefficient de stabilité R du modèle de régression simple de la consommation totale RTG

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	0,999	0,998	0,998	87,804

#### 4.1 Description des modèles de régression :

Le premier résultat présente le cadre de recherche du modèle de régression linéaire multiple pour l'énergie RTG totale avec ses différents paramètres (treuil, portique, Trolley)

$$\text{Éq1 : } Y = -551\,287 + 2\,711 X_1 + 0,677 X_2 + 0,759 X_3$$

$X_1$  : Énergie de consommation RTG du HOIST (variable indépendante)

$X_2$  : énergie de consommation RTG du Gantry (variable indépendante)

$X_3$  : énergie de consommation RTG du Trolley (variable indépendante)

$Y$  : consommation générale d'énergie RTG (variable dépendante)  $0 < X_1 < Y$  ;

$$0 < X_2 < Y ; 0 < X_3 < 0$$

(Constante) : constante d'erreur  $\varepsilon = -551\,287/$

$$R^2 = 0,999$$

Le deuxième résultat présente un modèle de régression linéaire simple pour l'énergie RTG totale avec sa consommation en mode inactif se présente comme suit :

$$\text{Éq2 : } Y = 2,265 X_1 + 650,056$$

$Y$  : consommation générale d'énergie RTG (variable dépendante)

X1 : consommation d'énergie RTG en mode veille

$\varepsilon = 650\,056$  /  $\varepsilon$  présente qu'il n'y a jamais de relation parfaite entre deux variables. Il faut tenir compte du fait que ces deux variables ne sont pas complètement liées et que leur lien varie d'une observation à l'autre. Enfin, ce terme d'erreur tient aussi compte des fluctuations d'échantillonnage.

Elle présente aussi la différence entre la valeur exacte et la valeur estimative.

## **5.2 validation des modèles de régression:**

Le tableau 6 présente la constante d'erreur de ce modèle

$\varepsilon = -551,287$ . La constante d'erreur  $\varepsilon$  tend vers 0, ce qui montre que l'erreur de risque est très minime, donc le modèle est correct.

Le tableau 7 présente le facteur  $R^2 = 0,999$  et c'est un bon estimateur du degré global d'ajustement du modèle.

Puisqu'il tend vers 1 donc, ce modèle de régression est stable.

Le tableau 6 présente la signification de chacune des variables indépendantes moteurs de RTG.

X1 : importance de la consommation du HOIST = 0,00

Le risque d'erreur pour la variable indépendante de levage est de 0, donc le risque d'erreur n'est pas significatif ; en conséquence, le levage influence

vraiment la consommation totale de RTG avec un pourcentage de 100 %.

X2 : Signification de la consommation du Trolley = 0,00

Le risque d'erreur pour la variable indépendante Trolley est de 0, donc l'erreur de risque n'est pas significative ;

En conséquence, cette variable influence vraiment la consommation totale de RTG avec un pourcentage de 100 %.

X3 : Signification de la consommation du gantry=0,00

Le risque d'erreur pour le gantry moteur à variable indépendante est de 0, donc l'erreur de risque n'est pas significative ;

Cette variable influence vraiment la consommation totale de RTG avec un pourcentage de 100 %. Ainsi, toutes les variables influencent de manière significative la consommation de RTG et ce modèle est correct.

Pour le deuxième modèle de régression linéaire simple de RTG en mode inactif :

Le tableau 6 présente le coefficient de régression de la consommation RTG en mode inactif : 2,265 et l'erreur constante est : 650 056.

Le modèle se présente comme suit :  $Y=2.265 X1+650.056$  / X1 : Consommation RTG en mode inactif.

Le tableau 7 présente le coefficient de stabilité  $R^2=0,999$  et c'est un bon estimateur du degré global d'ajustement du modèle. Puisqu'il tend vers 1, ce modèle de régression est stable.

Ainsi, ce modèle montre que la consommation de RTG en mode inactif présente un gaspillage d'environ 50 % de la consommation totale de RTG et des émissions de CO<sub>2</sub> % de chaque grue, comme indiqué dans la figure suivante.

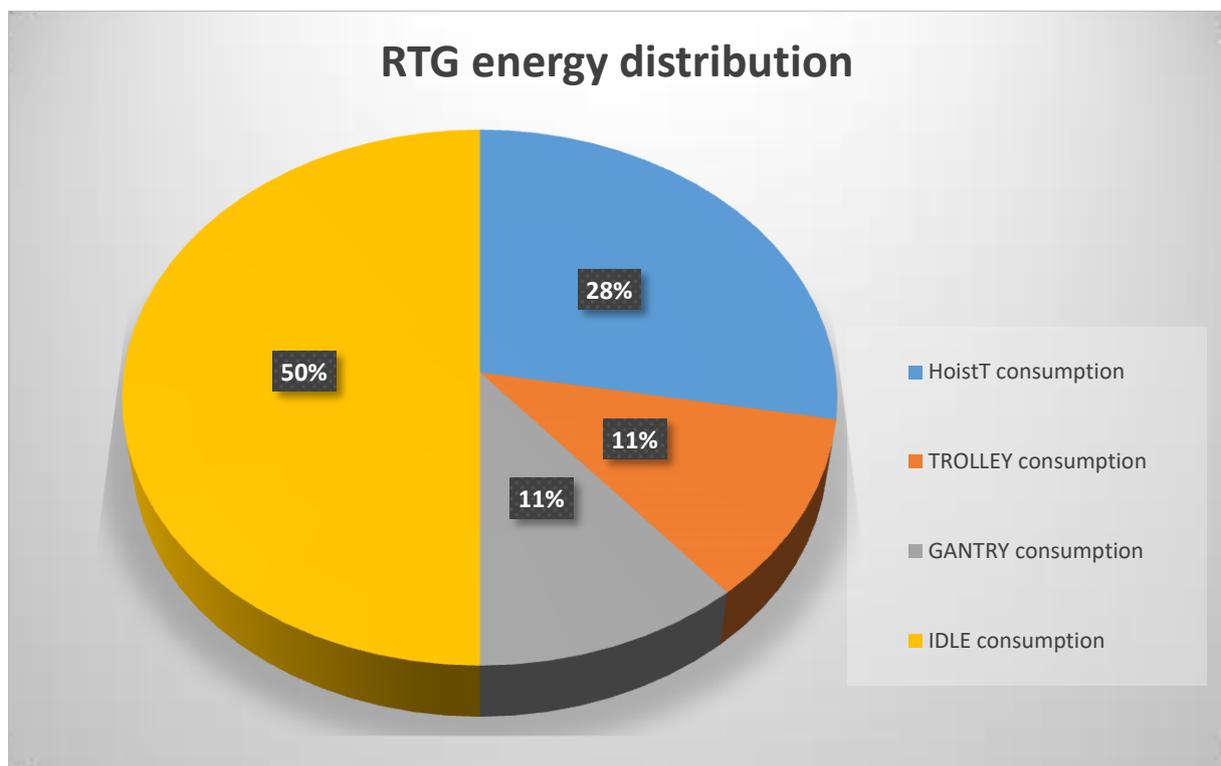


Figure 12: distribution de l'énergie du RTG

### **c. Résultats :**

D'une part, l'optimisation de la distribution du modèle RTG permet de prédire la consommation d'énergie du RTG et une bonne optimisation de ce modèle peut réduire les coûts énergétiques et les émissions de Co2.

Nous avons remarqué que dans le modèle que le levage influence fortement la consommation totale. Ainsi, ils peuvent transformer ce facteur en énergie verte dans les RTG : l'énergie gravitationnelle est une puissance régénérative, qui consiste en la génération d'énergie à partir de l'énergie potentielle gravitationnelle libérée lorsqu'un conteneur est abaissé ;

Cette puissance peut ensuite être utilisée pour soulever un autre conteneur.

La deuxième mesure technologique est la conversion des RTG en E-RTG, après résolution de la marche au ralenti.

Calcul des couts :

CE : cout d'énergie

Hw : heures de travail  $365*24$

NC : moyenne de conteneur traité par heure est :20

EC : la consommation électrique du rtg pour manutention d'un seul conteneur =3Kwh

PR : cout de KWh:0,12 euro

R : nombre de RTG

$CE=H_w*NC*EC*RP*R=365*24*11*20*3*0,12=6$   
937 920 DH /an

Diesel 1 3 490 400/an => 60% energy saving

$C=3kwatt=0,8$  kg de co2

$Co=ec*r*hw*nc*c=4$  625 280 tonne de co2 par an  
=>53 421 984 =>90%reduction de co2

Le cout d'investissement :

Coût d'installation de l'enrouleur de câble: 2.000  
000,00 dh

11RTG=22.000 000,00 dh

Coût de l'infrastructure de raccordement électrique:  
3.000.000,00 DH

Coût d'investissement: 25.000.000 DH

Économies d'énergie:

Durée d'amortissement de cet investissement : 4ans

Le fonctionnement des RTG sera presque gratuit pour le reste de leur vie.

De l'autre côté, la consommation d'énergie annuelle moyenne des RTG/heure est de 8760 heures/an et notre terminal portuaire compte 11 RTG.

Ainsi, le coût annuel de la consommation d'énergie des RTG pour ce terminal est :

T<sub>Ce</sub> : Coût terminal énergie des RTG annuels

CE : Coût énergie de 1 RTG

N<sub>h</sub> : Nombre moyen d'heures RTG travaillées/an

$N_h = 24 \text{ h de travail} * 365 \text{ jours de travail/RTG} = 8.760 \text{ h/an /RTG}$  (port de Casablanca information)

Q<sub>f</sub> : Quantité de Diesel consommée en moyenne pour 1 heure de fonctionnement RTG = 14 litre/heure

P<sub>l</sub> : Prix du litre de gasoil au Maroc = 1 Euro

N<sub>r</sub> : Nombre de RTG par borne = 11

$CE = N_h * Q_f * P_l = 8760 * 14 * 1 = 122.640 \text{ Euro/RTG/an}$  et ce terminal a 11 RTG :

$T_{Ce} = CE * N_r = 122.640 * 11 = 1.349.040 \text{ Euro/an}$  de 11 RTG/an

Selon le deuxième modèle de RTG en mode ralenti, ce mode présente environ 50% du temps de travail des grues donc : C<sub>id</sub> : Coût de l'énergie en mode ralenti

$C_{id} = T_{Ce} / 2 = 674.520 \text{ Euro/an /mode inactif}$

Enfin, le coût de l'énergie perdue pendant l'inactivité est de 674 520 euros/an et présente des pertes financières importantes.

Émission de CO<sub>2</sub> en mode veille :

Le facteur d'émission de CO<sub>2</sub> de la grue KALMAR RTG/Casablanca est : 39 600 g/heure et le temps de travail annuel est de 8 760 heures/an et le mode veille représente 50 % du temps de travail RTG, donc :

C<sub>c</sub> : émission de Co<sub>2</sub> pour 11 RTG

C<sub>i</sub> : émission de CO<sub>2</sub> du mode veille pour 11 RTG

F<sub>c</sub> : Facteur d'émission de CO<sub>2</sub> pour Kalmar RTG

N<sub>hi</sub> : nombre d'heures en mode veille pour 11 RTG

$C_c = F_c * N_h = 3814$  tonnes d'émission de CO<sub>2</sub>/an

$C_i = F_c * N_{hi} = 39600 * (96.360/2) = 1\ 907\ 928$  tonnes d'émission de CO<sub>2</sub> /an

#### **d. Analyse et discussion :**

Enfin, cette analyse montre clairement la source importante de gaspillage d'énergie du RTG est le "mode veille". Ainsi, les gestionnaires de ports devraient considérer sérieusement ce paramètre lors de la prédiction et de la planification des missions RTG pour éviter le temps d'attente de RTG et ses conducteurs devraient éteindre la grue lorsque la période d'attente est élevée. De plus, ce travail propose d'appliquer la

technologie de démarrage et d'arrêt comme utilisé dans les voitures BMW, le concept est tout simple.

Un système Start-stop arrête et redémarre automatiquement le moteur à combustion interne pour réduire le temps que le moteur passe au ralenti, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions [81].

Si les ports appliquent cette technologie, cela augmentera les économies d'énergie de 60 % et réduira les émissions de CO2 et le tableau 8 suivant présentent une comparaison des approches vertes entre le port de Casablanca et les ports asiatiques.

Tableau 8: comparaison des approches vertes entre le port de Casablanca et les ports asiatiques

PORT VERTS	Facteurs de Comparaison		
	Source d'énergie	Gain d'énergie	Reduction de CO2 emission
Port de SINGAPORE	Energie solaire	20%	20%
Port de TOKYO	Energie Gravitationel	40%	40%
Port de BUSAN	E-RTG	86%	67%
Port de HONK KONG	Energie solaire	70%	60%
Port de CASABLANCA	E-RTG	60%	80%

Ce travail encourage que les futurs objectifs portuaires devraient être couplés à la production plus propre et au développement durable. Premièrement, ces travaux contribuent à réduire le coût de la consommation de diesel de 674 520 Euros/an de l'énergie portuaire des RTG et également d'environ 1 907 928 tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>/an.

Il présente une réduction importante de la pollution de l'air et des économies d'énergie qui peuvent être investies dans les énergies vertes dans les ports et sauver notre Terre.

Deuxièmement, ce travail élabore un modèle de distribution d'énergie RTG avec ses paramètres de ses différents moteurs pendant différents modes de fonctionnement, décrivant clairement le comportement de l'énergie de vol RTG et l'optimisation de ce modèle favorisera une excellente solution pour l'environnement et le développement des ports.

Recommandations : Dans notre travail, notre objectif est d'aider les entreprises comme les ports à devenir en amélioration continue grâce à la « production plus propre », ce concept empêche la production de déchets tout en augmentant l'efficacité dans l'utilisation de l'énergie.

En conséquence, les sociétés et organismes seront axés sur le développement durable et respectueux de l'environnement.

Ainsi, nous recommandons d'utiliser différentes énergies vertes dans les ports pour réduire l'énergie du carburant afin de diminuer la pollution de l'air, d'autre part nous proposons de réduire la consommation d'énergie résiduelle générée par le mode ralenti, avec la technique du démarrage et de l'arrêt. Avec ces deux approches, des sociétés comme les ports peuvent être en développement perpétuel sans aucun dommage matériel ou sanitaire avec en plus un gain de qualité de l'air et aussi un gain d'économie d'énergie.

Dans cette contribution, nous nous sommes focalisés sur l'analyse de la consommation d'énergie du matériel portuaire mais dans la future contribution, ils utilisent les outils de prédiction pour une bonne allocation des ressources portuaires dans le port de Casablanca au Maroc.

## **2. Application des prédictions de l'intelligence artificielle pour l'optimisation de l'allocation des ressources au port de Casablanca pour un développement durable**

L'intelligence artificielle est la reproduction de l'intelligence humaine par des machines et des systèmes informatiques afin de créer des machines qui peuvent agir comme des humains, ce qui relevait de la science-fiction il y a quelques années, mais qui est de plus en plus proche de devenir une réalité. Le terme « intelligence artificielle » a été inventé par le scientifique américain John McCarthy en 1956. Cependant, le mathématicien britannique Alan Turing avait précédemment évoqué la question de savoir si les machines pourraient un jour être amenées à penser comme des humains, notamment à travers le test de Turing. C'est un critère qui apprécie l'intelligence d'une machine en fonction de la similarité et du discernement de ses réponses par rapport à un humain.

L'application de l'IA au monde du logiciel lui permet de changer son comportement sans être spécifiquement programmé. Pour ce faire, l'IA dispose de réseaux neuronaux approfondis (mieux connus en anglais sous le nom de Deep Neural Network ou DNN) qui analysent des informations complexes, telles que des vidéos, des images et des ensembles de données dans le but de décider, de détecter et de prédire en fonction des données reçues[82].

Sur la base des données collectées, l'analyse et l'observation, les systèmes d'IA peuvent identifier des modèles, faire des projections et fonctionner sans supervision dans certains scénarios. L'IA est appliquée à une multitude de domaines tels que la vision par ordinateur ou la reconnaissance automatique de la parole.

L'application de l'IA, tant dans notre vie quotidienne que dans le monde du travail, est un phénomène croissant. Une enquête menée par Gartner, un leader mondial des études de marché et du conseil, auprès d'environ 200 professionnels de l'informatique et des affaires, révèle que 24 % des organisations interrogées ont augmenté leurs investissements dans l'IA et 42 % les ont maintenus inchangés depuis le début de la pandémie de COVID-19 [83]. « *Les investissements des entreprises dans l'IA se sont poursuivis sans relâche malgré la crise* », déclare Frances Karamouzis, vice-présidente et analyste chez Gartner. Le rapport ajoute également que 79 % des répondants ont déclaré que leurs organisations exploraient ou testaient des projets d'IA, tandis que seulement 21 % déclaraient que leurs initiatives d'IA étaient en phase de production.

À ce jour, la plupart des entreprises ont opté pour l'automatisation pour soutenir leur développement. Cependant, les dernières avancées en matière d'IA montrent que les entreprises doivent aller plus loin et tirer un meilleur parti du potentiel de l'intelligence des

machines si elles veulent se différencier de leurs concurrents[84].

La meilleure façon de commencer à appliquer l'intelligence artificielle est d'établir un plan stratégique qui ajoute de la valeur à l'entreprise en tenant compte des étapes suivantes :

Applications de l'intelligence artificielle en logistique :

Les applications de l'intelligence artificielle en logistique sont encore en cours de développement, mais devraient atteindre leur plein potentiel dans les années à venir, certaines pratiques s'installent déjà dans le secteur [85].

### **Prédire les tendances de consommation.**

L'intelligence artificielle utilise les Big Data à des fins logistiques : elle croise des informations internes, telles que des historiques de vente, avec des données extraites de forums, de réseaux sociaux ou d'autres sources internet. De cette manière, le système est capable d'émettre des hypothèses sur l'intention de consommation des utilisateurs et, ainsi, prédire le comportement de la demande. Cela permet de mettre en place une logistique prédictive et d'éviter les ruptures de stock ou le stockage de biens excédentaires. C'est une façon d'atténuer le gaspillage des ressources [86].

### **L'automatisation des opérations de stockage.**

Un des plus grands exemples de l'intelligence artificielle en logistique sont les entrepôts automatisés. Ils combinent deux systèmes fondamentaux : la robotique appliquée à l'entrepôt et les logiciels de gestion. Ensemble, ils assurent une logistique qui intègre à la fois les mouvements de transport et de stockage ainsi que la gestion des opérations. Ce travail partagé génère des modèles dans le temps, qui sont continuellement analysés.

De cette façon, l'intelligence artificielle aide à optimiser les ressources et à corriger les mouvements en cas de variations de flux.

**Générer des itinéraires et des trajets de transport les plus rentables:** La coordination du transport logistique est plus simple avec l'IA. D'une part, le WMS conserve une radiographie numérique des installations de l'entreprise et enregistre tous les mouvements intralogistiques qui se produisent. Ainsi, l'IA traite ces données et organise les mouvements, à la fois des véhicules autoguidés qui s'adaptent à l'environnement et ajustent l'itinéraire en fonction des besoins comme des opérateurs aidés par des engins de manutention. D'autre part, l'IA gère également les flottes de transport, en interprétant et en intégrant les informations de trafic actualisées dans les systèmes locaux. Avec cela, le logiciel trace les itinéraires les plus pratiques pour la livraison des différentes marchandises et corrige en temps réel les itinéraires en cas d'incidents [87][88].

## **Améliorer le contrôle de l'information dans la chaîne d'approvisionnement.**

L'automatisation des processus dans la chaîne d'approvisionnement, renforcée par l'intelligence artificielle, ouvre la porte à la gestion des stocks en temps réel, à l'émission de commandes d'approvisionnement instantanées ou au suivi précis des commandes, entre autres.

De même, l'intégration des données et l'amélioration des systèmes de traçabilité permettent de répondre au besoin de connaissance de l'utilisateur.

Dire que l'intelligence artificielle fait partie de notre quotidien et de la logistique est évident. Il est également évident que la technologie est un allié pour améliorer davantage tous les processus de la chaîne d'approvisionnement. Ainsi, nous avons décidé d'utiliser l'intelligence artificielle pour prédire les tendances de consommation d'énergie au port de Casablanca le long de l'année afin de connaître les périodes de pic demandes afin de fournir convenablement et justement les ressources utiles sans pertes d'énergie et d'argent et en minimisant la production de CO<sub>2</sub> émission pour développement durable, surtout que l'intérêt devient croissant pour l'impact environnemental des opérations et du développement portuaires en raison d'enjeux mondiaux tels que le changement climatique et la consommation d'énergie.

l'industrie portuaire est confrontée à des défis croissants car elle est soumise à un examen minutieux en termes de conformité réglementaire environnementale [89][90].

L'impact environnemental apparaît clairement dans les ports au niveau des opérations de manutention des cargaisons du navire et la manutention dans les espaces de stockage. En même temps, il est essentiel de fournir une capacité adéquate, des services de qualité et des solutions rentables.

Par conséquent, les ports commencent à faire la transition vers des pratiques vertes, comme affiché sur figure 3, pour une qualité de l'air et de la vie élevée et le monde entier est devenu très conscient de l'importance de l'air surtout avec la pandémie Covid.

Pour maintenir la stratégie des ports verts en trois phases, objectifs économiques, environnementaux et sociaux, certains gouvernements deviennent consciencieux et prennent certaines mesures vertes au sérieux [91]. Dans une partie, les chercheurs évaluent les émissions de GES des ports aux terminaux à conteneurs et montrent que 38 % des émissions de GES les émissions proviennent des grues de quai et des équipements de chantier tels que les grues RTG et les manutentionnaires [92].

D'autres parts, des études confirment que la grue portuaire RTG consomme une énergie importante lors de la manutention des conteneurs, la grue RTG est utilisée pour transférer des conteneurs dans la zone de triage ou sur des camions [93].L'élément le plus responsable de la consommation d'énergie dans le système de grue provient du levage de conteneurs avec différents poids et différentes trajectoires. La demande augmente généralement lorsque les grues déplacent des conteneurs plus lourds et cette manutention consomme énormément d'énergie et d'émissions de GES .Pour ces raisons, les ports encouragent actuellement de nombreuses pratiques vertes à travers le monde pour optimiser leur gestion de l'énergie afin de minimiser les coûts d'exploitation élevés, la pollution. Il a deux manières différentes : Dans une partie, certains ports pratiquent la gestion de l'énergie en utilisant des énergies vertes pour réduire la consommation d'énergie résiduelle et augmenter les économies d'énergie.En 2019, nous avons étudié les pratiques portuaires vertes en introduisant de nombreuses sources d'énergie renouvelables et propres : énergie solaire, éolienne, biomasse et gravitationnelle, conversion du RTG diesel en RTG électrique et d'autre part les autres ports appliquent déjà l'énergie verte gestion utilisant l'apprentissage automatique pour minimiser la consommation [94].

Par conséquent, cette science a commencé à devenir une green solution efficace de gestion pour profiter pleinement d'une vie verte [95] [96].

Ainsi , Alasali F et les autres auteurs ont pensé à des moyens de management verte tel que l'électrification du RTG [97] et d'autre auteurs ont pensé à des Méthodes d'apprentissage automatique pour la prévision de la consommation d'énergie des navires dans les ports envisageant des ports verts [98]. Cette science a illuminé aussi clairement le domaine de la chimie pour servir notre one Green life and Earth car en novembre 2020, les chercheurs de KAUST ont utilisé le Machine Learning au service de green transition en chimie pour nous apprendre à rendre la fabrication de matériaux plus propre et plus durable en adoptant une vision holistique pour identifier la méthode de production la plus verte .La quête de durabilité signifie que les scientifiques du monde entier développent des matériaux avancés pour aider à résoudre les problèmes, notamment le captage du carbone, le dessalement de l'eau et le stockage de l'énergie, explique Rifan Hardian, post-doctorant au laboratoire de Gyorgy Szekely. « Bien que ces matériaux présentent des performances prometteuses, les matériaux eux-mêmes sont souvent produits de manière non durable en utilisant des conditions difficiles, des solvants toxiques et des processus énergivores qui génèrent des déchets excessifs.

Ces déchets créant potentiellement plus de problèmes environnementaux qu'ils n'en résolvent », explique Hardian [99].

Ainsi, de nombreux ports ont utilisé ce précieux outil pour le même objectif noble de servir notre univers et notre terre et augmenter notre qualité de vie donc ils ont commencé à appliquer des prédictions de consommation : ils prévoient les ressources humaines et matériels nécessaires pour pouvoir planifier efficacement les opérations d'exploitation portuaire [100].

En Août 2019, le chercheur de F.ELASALI a proposé des stratégies de contrôle utilisant le système de gestion stochastique avec algorithme génétique dans le port de Felixstowe, augmente avec succès les économies d'énergie électrique, les réductions de la demande de pointe [101].

#### **a. Matériels et méthode :**

Contrairement aux études précédentes, qui ne traitaient que deux RTG pendant 24 heures pour la saisonnalité, dans notre cas, nous avons 7 RTG pendant environ 600 jours pendant toute la saison de 2 ans.

Par conséquent, les chercheurs proposent une bonne planification de l'allocation des grues RTGS pour réduire ce mode de temps d'inactivité, de sorte que les chercheurs proposent un modèle de prédiction pour avoir une allocation efficace des ressources de RTG.

## **Description du Matériel :**

La grue RTG est un élément important et essentiel dans un terminal à conteneurs et elle est utilisée pour manipuler les conteneurs pendant le transbordement .

En fait, ils utilisent l'apprentissage automatique pour atteindre facilement cet objectif : ils ont besoin d'analyser les RTG de consommations historiques pour produire une prédiction efficace de la consommation pour l'avenir et ces prédictions basées sur la saisonnalité ARIMA permettront aux gestionnaires de port une planification efficace des ressources d'allocation (RTG). Pour ces raisons, nous avons choisi les outils d'apprentissage automatique inspirés du travail publié en 2020 par PENG et les autres auteurs ,il présente une méthode d'apprentissage automatique pour prédire la consommation d'énergie des navires dans le port en tenant compte des ports verts [102].

Choisir la technique d'apprentissage automatique appropriée : Pourquoi choisir ARIMA ? *ARIMA* : ARIMA : Modèle de prédiction des séries temporelles présente un modèle d'analyse statistique qui utilise l'analyse de séries chronologiques de données historiques pour produire une meilleure compréhension de l'ensemble de données ou pour prédire les tendances futures. Tout en choisissant un modèle de prédiction de séries chronologiques approprié, nous devons visualiser

les données pour analyser les tendances, la saisonnalité et les cycles, afin de produire des prédictions efficaces [103].

Les modèles ARIMA servent à analyser la nature, l'économie et d'autres processus variant dans le temps et produisent son comportement de prédiction et ce travail vise à prédire la saison de RTG à faible et haute consommation pour faire une bonne prédiction à utiliser dans la planification des RTG afin de gérer les déchets énergie.

La figure suivante présente clairement le processus du modèle ARIMA :

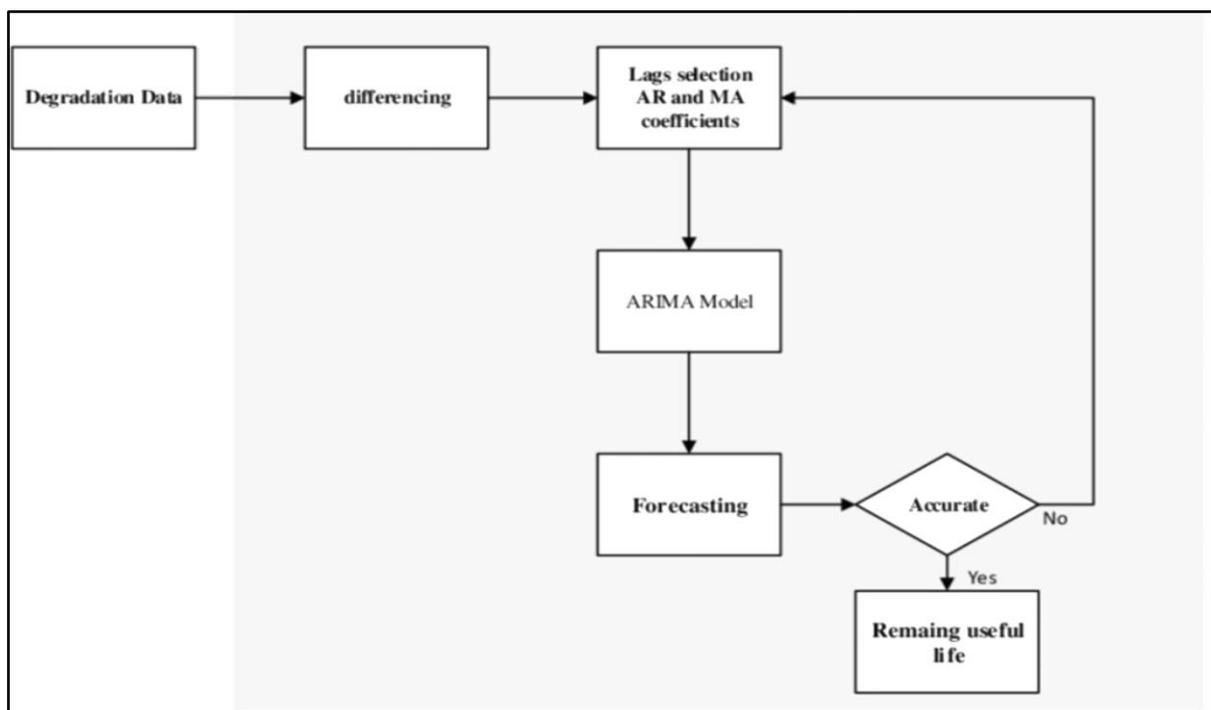


Figure 13 : Processus de la méthode ARIMA

L'auteur peut Avec ARIMA, construire un modèle de régression linéaire qui tente de prédire aujourd'hui la valeur d'une variable dépendante, compte tenu des

valeurs qu'elle avait les jours précédents et c'est la fonction mathématique d'ARIMA en fonction de la variable temps  $t$  [104].

Nous pouvons construire un modèle de régression linéaire qui tente de prédire aujourd'hui la valeur d'une variable dépendante, compte tenu des valeurs qu'elle avait les jours précédents la fonction mathématique d'ARIMA en fonction du temps  $t$  se présente comme suit :

$$Y_t = \beta_1 Y(t-1) + \beta_2 Y(t-2) + \beta_3 Y(t-3) + \dots + \beta_p Y(t-p) \quad (1)$$

Dans ce cas, nous allons utiliser la machine Learning pour prévoir la consommation des RTG durant les années précédentes et analyser leur saisonnalité et connaître les périodes de pick up et les périodes down pour une meilleure planification des RTG sans aucune perte d'énergie. Finalement, l'intelligence artificielle et le machine Learning est au service du domaine maritime et l'économie bleue. Les cas d'utilisation du machine Learning branche de l'Intelligence Artificielle dans le domaine maritime sont énormes : Optimisation de la logistique portuaire, préservation des espèces, la navigation autonome et la protection de l'environnement, prévision météorologique pour navigation des navires.

Ainsi, les chercheurs ont utilisé ces outils très efficaces pour la prédiction de leurs ressources portuaires car ces

ressources sont précieuses et coûteuse. Finalement, nous étions inspirés par l'utilité de cet outil et on propose dans ce travail d'utiliser le machine Learning pour réaliser des prédictions pertinentes pour bien prévoir l'allocation des ressources RTG au port maritime de Casablanca.

De cette manière, la planification basée sur ces prédictions permettra une optimisation importante de la consommation d'énergie de ces ressources matérielles RTG au port de Casablanca.

#### **b)Collecte de données bruts :**

Dans ce travail, nous utilisons des données réelles collectées dans le port de Casablanca au Maroc pour analyser le flux d'énergie RTG dans toutes les conditions réelles et pour faire une prédiction efficace des RTG d'allocation.Ces données contiennent la consommation énergétique de 11 grues RTG de janvier 2017 à mai 2019 au port de Casablanca. Il présente la consommation d'énergie des RTG pendant toutes les journées car il s'agit de 3 équipes au port de Casablanca et chaque équipe dure 8 heures et les grues fonctionnent 24 heures sur 24 pour 365 /an pendant 2 ans : 700 jours pour 7 RTG donc la dimension des données était de 5000 et nous n'avons pas ajouté de données aléatoires. Par conséquent, les données présentent le comportement

quotidien réel des grues dans le port pendant les périodes de pointe et de faible demande et les RTG ont fonctionné en mode actif :

Les données collectées contiennent la consommation d'énergie quotidienne de chaque RTG, comme indiqué dans cet extrait de données réelles.

RTG TC3		MERCREDI	JEUDI	VEN DREDI	SAMEDI	DIMAN CHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VEN DREDI	SAMEDI	DIMAN CHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VEN DREDI	SAMEDI	DIMAN CHE	LUNDI
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
RTG01	DIESEL		10440	10462	10481	10494	10494	10509	10514	10531	10549	10565	10576	10583	10600	10618	10630	10642	10653	10665	10665
	HOIST		3145	3149	3156	3157	3157	3166	3167	3172	3179	3186	3189	3191	3211	3211	3211	3215	3220	3224	3224
	TROLLEY		1961	1966	1970	1974	1974	1975	1976	1979	1982	1986	1988	1989	1993	1997	1997	2001	2004	2006	2006
	GANTRY		1486	1491	1493	1499	1499	1499	1499	1499	1502	1504	1506	1506	1508	1511	1511	1515	1517	1519	1519
RTG02	DIESEL		10020	10024	10036	10047	10047	10065	10079	10096	10113	10123	10128	10128	10138	10155	10171	10188	10505	10519	10519
	HOIST		2960	2960	2964	2964	2964	2973	2976	2982	2983	2990	2991	2991	2994	3000	3005	3012	3019	3025	3025
	TROLLEY		1815	1815	1818	1818	1818	1822	1824	1827	1830	1832	1832	1832	1834	1838	1840	1844	1848	1851	1851
	GANTRY		1401	1401	1403	1403	1403	1407	1409	1411	1414	1416	1416	1416	1418	1421	1423	1427	1429	1432	1432
RTG03	DIESEL		10515	10534	10553	10566	10566	10583	10598	10613	10623	10639	10651	10651	10678	10689	10705	10722	10738	10754	10755
	HOIST		2596	2602	2607	2610	2610	2616	2621	2625	2626	2631	2633	2633	2639	2645	2651	2656	2664	2667	2669
	TROLLEY		1873	1877	1881	1883	1883	1887	1890	1893	1894	1897	1899	1899	1903	1907	1911	1914	1919	1922	1923
	GANTRY		1503	1506	1510	1510	1510	1514	1517	1519	1520	1523	1524	1524	1530	1530	1533	1535	1539	1540	1540
RTG04	DIESEL		10230	10246	10265	10266	10266	10282	10295	10301	10313	10328	10338	10346	10354	10376	10392	10410	10422	10439	10441
	HOIST		3153	3163	3169	3169	3169	3173	3175	3179	3185	3188	3190	3200	3202	3208	3215	3220	3225	3227	3227
	TROLLEY		1825	1827	1830	1830	1830	1832	1835	1836	1837	1840	1842	1843	1845	1848	1850	1854	1856	1859	1859
	GANTRY		1682	1684	1687	1687	1687	1688	1690	1691	1693	1396	1397	1398	1399	1402	1405	1407	1418	1418	1418
RTG05	DIESEL		10561	10580	10593	10601	10601	10620	10634	10651	10663	10680	10691	10697	10715	10731	10750	10767	10784	10790	10790
	HOIST		3379	3385	3388	3390	3390	3398	3401	3408	3413	3419	3422	3424	3431	3437	3443	3451	3457	3457	3457
	TROLLEY		1952	1957	1957	1957	1957	1965	1968	1972	1975	1979	1981	1981	1986	1990	1994	1998	2002	2002	2002
	GANTRY		880	880	881	881	881	882	883	884	885	886	887	887	887	889	890	890	892	892	892
RTG06	DIESEL		10094	10102	10120	10133	10133	10150	10165	10182	10194	10214	10224	10231	10249	10261	10274	10292	10308	10325	10331
	HOIST		2869	2872	2878	2878	2878	2888	2893	2899	2905	2911	2914	2917	2924	2928	2931	2937	2944	2949	2952
	TROLLEY		1766	1769	1772	1772	1772	1777	1780	1784	1787	1791	1793	1794	1798	1800	1802	1805	1809	1812	1814
	GANTRY		1123	1125	1127	1127	1127	1132	1135	1137	1140	1142	1144	1145	1147	1149	1151	1153	1156	1158	1159
RTG07	DIESEL		10648	10668	10686	10699	10699	10717	10729	10746	10757	10768	10780	10787	10802	10817	10834	10846	10861	10870	10870
	HOIST		3054	3062	3067	3067	3067	3075	3078	3082	3085	3087	3090	3092	3098	3103	3107	3111	3116	3116	3116
	TROLLEY		1855	1860	1863	1863	1863	1869	1882	1882	1887	1888	1888	1888	1888	1888	1893	1895	1899	1899	1899
	GANTRY		1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110	1110

Figure 14: extrait de la base de données des RTG

## **2- Préparation des DONNÉES :**

Le prétraitement des données aide à supprimer les données indésirables à l'aide du nettoyage des données, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir un ensemble de données avec des informations plus précieuses après l'étape de prétraitement pour une utilisation ultérieure des données dans le processus d'exploration de données. Pour ces raisons, après avoir collecté des données réelles dans le port de Casablanca : nous traitons toutes les données brutes de consommation d'énergie de 11 RTG avec tous les détails sur les consommations des moteurs RTGS, ils en extraient des variables indépendantes, ils choisissent données catégorielles : Total RTG consommation par JOURS pendant deux ans. Enfin, ils ont nettoyé les mauvaises données et ils vérifient les données manquantes en conséquence, ces données de prétraitement produisent des données d'entraînement prêtes à être utilisées avec l'algorithme approprié pour une bonne prédiction.

### **3- Base de Données prête pour l'algorithme d'apprentissage automatique :**

La figure 14 présente un abstrait des données de formation de la consommation journalière de 11 RTG pendant deux ans et la consommation est quantifié par les heures réellement travaillées au port de Casablanca en terminal de conteneur.

Après cela, nous utilisons environ 70 % de ces données pour apprendre l'étape et 30 % pour valider le modèle.

#### **b. Résultats :**

La prévision est de nos jours devenue d'une importance crucial tant pour des raisons économique qu'environnementales. Des outils de prédictions peuvent assurer une connaissance a priori sur la quantité d'énergie requise à la production.

Arrima produit modèle de régression linéaire qui tente de prédire aujourd'hui la valeur d'une variable dépendante, compte tenu des valeurs qu'elle avait les jours précédents la fonction mathématique d'ARIMA en fonction du temps  $t$  se présente comme suit:

$$Y_t = \beta_1 Y(t-1) + \beta_2 Y(t-2) + \beta_3 Y(t-3) + \dots + \beta_p Y(t-p) \quad (1)$$

Sur ce travail, nous utilisons les séries chronologiques et le paramètre  $Y_t$  présente la consommation TOTALE de chaque RTG et  $Y(t-i)$  présente la consommation quotidienne du RTG de chaque jour  $i$  pendant environ deux ans et le coefficient de variance  $\beta_i$  du modèle.

$$Y(t)=0.0179Y(t-1) +15.371$$

Par conséquent, nous avons décidé de traiter des valeurs historiques de consommations des RTG et décrira le comportement de la consommation RTG pendant deux ans au port maritime commercial de Casablanca.

Il en résulte la série chronologique de toutes les consommations des grues RTGS dans port de Casablanca illustrés sur la figure suivante.

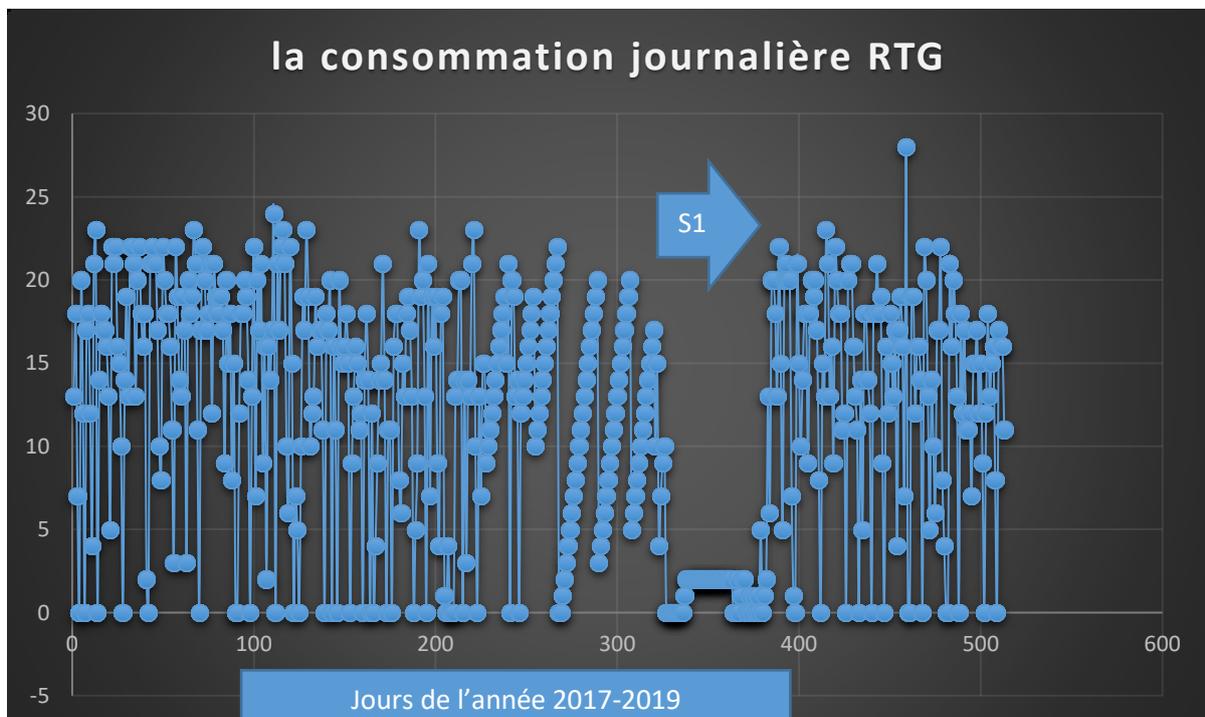


Figure 15: Série Chronologique de la consommation des RTG au port de Casablanca

Le graphique de RTG présenté à la figure présente clairement la période de plus faible demande au cours de l'année :

**S1 : saison 1 des horaires réduits de RTG : Décembre, Janvier.**

Nous présentons dans la figure le graphique des séries chronologique de la consommation des RTG pendant le mois de Mai 2019.

### **c. Analyse et discussion :**

Les séries temporelles dans la figure précédente indiquent que les RTG au cours de certaines saisons ont un minimum d'heures de travail, nous proposons donc de minimiser le nombre d'allocations RTGS pendant deux saisons :

– La saison de faible demande présente environ 2 mois au cours des deux années comme le montre la figure 10 : Décembre, janvier.

La consommation est clairement en baisse pendant cette période, nous ne pouvons donc allouer que deux RTG et nous minimiserons toute la consommation de cinq RTG car avant cette prédiction.

Ces RTG étaient en mode inactif en attendant une nouvelle mission et même cette période est en baisse, la demande est bien meilleure pour allouer seulement 2 RTG, c'est largement suffisant.

Gain financier et environnemental et social des prédictions :

Le résultat de cette prédiction RTG résultera en des gains de durée de vie :

La consommation quotidienne moyenne est de 8 heures donc la prédiction des 5rtg va permettre de produire un gain de :

CT : consommation totale quotidienne des 5rtg durant 60jours

CT :  $5 \text{ RTG} * 8\text{h} * 60 \text{ jours (2 mois)} = 2400 \text{ heures de travail RTG}$

1 heure consomme en moyenne 14 litres de gasoil et 1 litre de gasoil prix=1 EURO,  $2400*14*1=$ **33 600 euros /an**

Au final, nous aurons un gain de 33 600 euros pendant 60 jours :

Gain environnemental des prédictions :

Optimisation des émissions de GES sur une saison :

La consommation moyenne est de 8 heures donc on minimise :  $G : 5 \text{ RTG} * 8\text{h} * 60 \text{ jours} = 2400 \text{ heures}$   
Facteur d'émission de GES de la grue RTG : 39 600 g/heure TGHG :

Gain total en émission de GES TGHG= $2400*39\ 600\text{g}= 95.040.000\text{g} =95\ 040 \text{ kg}$  d'émission de GES environ 95 tonnes d'émission de GES/an.

Enfin, nous pouvons conclure que la bonne allocation des RTG utilisant une grande prédiction augmentera d'environ 50000 euros d'économie d'énergie et de coût de l'énergie, d'autre part sa diminution d'environ 95040 kg de production d'émissions de GES et cette réduction permet d'améliorer la santé mentale et physique des employés au port maritime.

## **V. Conclusion générale :**

En répondant au défi de l'équilibre de la convivialité pour l'environnement avec la demande économique et la croissance de les activités commerciales et le besoin de compétitivité à l'échelle mondiale marché, les ports du monde entier essaient systématiquement et évaluer en permanence toutes les possibilités d'optimisation et les coûts connexes et la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Ainsi, L'originalité de cette thèse c'est que les auteurs avaient le challenge de traiter une étude de cas réelle du port de Casablanca et ils ont pu finalement présenter des contributions réelles dans le monde maritime permettant une optimisation importante de la consommation d'énergie dans le port de Casablanca et d'amélioration de performance puisque d'une part, l'optimisation de la contribution 1 permet une grande réduction d'énergie avec un gain de 674.520 Euro/an et réduit 1 907 928 tonnes d'émission de CO<sub>2</sub>/an de tonnes d'émission de CO<sub>2</sub>/an. La durée pour l'amortissement des couts de conversion des RTG en E-RTG green sont amortis au bout de de 4 ans et sont non seulement respectueuses de l'environnement, mais atténuent également l'impact des hausses de prix du diesel.

D'autre part, l'optimisation de la contribution 2 produit un modèle permettant trois gains : gain financier en économie de coûts énergétiques de 33 600 Euros par an et gain environnemental réduisant la production impure de GES émission de grue portuaire d'environ 95 040 kg par an et gain social en améliorant la santé mentale et physique des personnes qui travaillent dans le port et à l'extérieur.

Cette thèse présente une optimisation de la gestion de l'énergie dans les ports maritimes et permet équilibrer trois lignes de fond, à savoir la prospérité économique, le bien-être social et la qualité de l'environnement.

Dans notre prochain travail, nous allons utiliser l'algorithme de colonies de fourmis pour l'engin portuaire « le chariot cavalier » afin de leur trouver le plus court chemin depuis le point de saisie des conteneurs au point de destination souhaité pour le déposer pour une optimisation des coûts de transfert des conteneurs et nous allons présenter aussi un travail qui englobe une optimisation globale de tous les champs du transit portuaire au port de Casablanca.

## VI. Références :

1. Brooks, M. R., Pallis, T., & Perkins, S. (2014). *Port investment and container shipping markets: roundtable summary and conclusions.*
2. [www.usinenouvelle.com/article/infographie-les-chiffres-du-commercemaritimemondial-en-2015.N358340](http://www.usinenouvelle.com/article/infographie-les-chiffres-du-commercemaritimemondial-en-2015.N358340)
3. Morvan, T. (2014). *maritime commercial port: evolutions and supply chain challenges. Logistics* 225-242
4. FOULQUIER, E. R. I. C. in 2019 *maritime Transport and Climate Change . Prospects.*
5. [www.histoiregeo.jimdofree.com/2016/03/02/transports-et-routes-maritimes](http://www.histoiregeo.jimdofree.com/2016/03/02/transports-et-routes-maritimes)
6. [www.fr.statista.com/infographie/24533/commerce-maritime-mondial-evolution-volume-de-fret-maritime-de-marchandises](http://www.fr.statista.com/infographie/24533/commerce-maritime-mondial-evolution-volume-de-fret-maritime-de-marchandises)
7. Filom, S., Amiri, A. M., & Razavi, S. (2022). *Applications of machine learning methods in port operations—A systematic literature review. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 161, 102722.
8. Zheng, Z., Ma, X., Yan, M., Ma, Y., & Dong, G. (2022). *Hydrodynamic response of moored ships to seismic-induced harbor oscillations. Coastal Engineering*, 104147.
9. Noto, R. (2021). *Shipwrecks of passenger ships. Disaster Medicine-Collective Emergencies*, 5(2), 171-187.
10. Kefi, M., Ghedira, K., Korbaa, O., & Yim, P. (2009). *Container handling using multi-agent architecture. International Journal of Intelligent Information and Database Systems*, 3(3), 338-360.
11. Wang, C., & Chen, J. (2017). *Strategies of refueling, sailing speed and ship deployment of containerships in the low-carbon background. Computers & Industrial Engineering*, 114, 142-150.
12. Ryoo, D. K., & Thanopoulou, H. A. (1999). *Liner alliances in the globalization era: a strategic tool for Asian container carriers. Maritime Policy & Management*, 26(4), 349-367.
13. ZHANG, Qi, WEN, Yuanqiao, ZHOU, Chunhui, et al. *Construction of knowledge graphs for maritime dangerous goods. Sustainability*, 2019, vol. 11, no 10, p. 2849.
14. Vlahopoulos, D., & Bouhouras, A. S. (2022). *Solution for RTG crane power supply with the use of a hybrid energy storage system based on literature review. Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102351.
15. D. Steenken, S. Vob, R. Stahlbock *Container Terminal Operations and Operations Research – Classification and Literature Review OR Spectrum*, 26 (1) (2004), pp. 3-49
16. Vanelslander, T. (2011). *Ports and shipping—Issues in optimization. Maritime Economics & Logistics*, 13(2), 99-101.

17. Beuren, Marcelo Muller., Andriotti, R., Vieira, G. B. B., Ribeiro, J. L. D., & Neto, F. J. K. (2018). *On measuring the efficiency of Brazilian ports and their management models. Maritime Economics & Logistics, 20(1), 149-168.*
18. Bergantino, A. S., & Musso, E. (2011). *The role of external factors versus managerial ability in determining seaports' relative efficiency: An input-by-input analysis through a multi-step approach on a panel of Southern European ports. Maritime Economics & Logistics, 13(2), 121-141.*
19. Zhen, L., Zhuge, D., Murong, L., Yan, R., & Wang, S. (2019). *Operation management of green ports and shipping networks: overview and research opportunities. Frontiers of Engineering Management, 6(2), 152-162.*
20. Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., & Puchinger, J. (2019). *The role of operational research in green freight transportation. European Journal of Operational Research, 274(3), 807-823.*
21. Fancello, G., Pani, C., Pisano, M., Serra, P., Zuddas, P., & Fadda, P. (2011). *Prediction of arrival times and human resources allocation for container terminal. Maritime Economics & Logistics, 13(2), 142-173.*
22. Mao, A., Yu, T., Ding, Z., Fang, S., Guo, J., & Sheng, Q. (2022). *Optimal scheduling for seaport integrated energy system considering flexible berth allocation. Applied Energy, 308, 118386.*
23. Raa, B., Dullaert, W., & Van Schaeren, R. (2011). *An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. Expert Systems with Applications, 38(11), 14136-14147.*
24. Sha, M., Zhang, T., Lan, Y., Zhou, X., Qin, T., Yu, D., & Chen, K. (2017). *Optimisation of planification of cranes consommation d'énergie minimale aux terminaux à conteneurs. Computers & Industrial Engineering, 113, 704-713.*
25. Yu, D., Li, D., Sha, M., & Zhang, D. (2019). *Carbon-efficient deployment of rubber-tired electric gantry cranes in container terminals with workload uncertainty. European Journal of Operational Research, 275(2), 552-569.*
26. Meisel, F., & Bierwirth, C. (2009). *Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45(1), 196-209.*
27. Moussi, R., Euch, J., Yassine, A., & Ndiaye, N. F. (2015). *A hybrid ant colony and simulated annealing algorithm to solve the container stacking problem at seaport terminal. International Journal of Operational Research, 24(4), 399-422.*
28. Iris, Ç., & Lam, J. S. L. (2019). *A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 170-182.*
29. Geerlings, H., & Van Duin, R. (2011). *A new method for assessing CO2 emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam. Journal of Cleaner Production, 19(6-7), 657-666.*

30. Wilmsmeier, G., & Spengler, T. (2016). *Energy consumption and container terminal efficiency*.
31. *Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 44, 214-230.
32. Xin, J., Negenborn, R. R., & Lodewijks, G. (2014). *Energy-aware control for automated container terminals using integrated flow shop scheduling and optimal control*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 44, 214-230.
33. Lam, J. S., & Yap, W. Y. (2006). *A measurement and comparison of cost competitiveness of container ports in Southeast Asia*. *Transportation*, 33, 641-654.
34. [www.interieur.gouv.fr/Archives/Archives-des-dossiers/2017-Dossiers/Le-developpement-durable-au-ministere-de-l-Interieur/L-agenda-2030-de-l-ONU-les-Objectifs-Developpement-Durable](http://www.interieur.gouv.fr/Archives/Archives-des-dossiers/2017-Dossiers/Le-developpement-durable-au-ministere-de-l-Interieur/L-agenda-2030-de-l-ONU-les-Objectifs-Developpement-Durable)
35. [www.reseauactionclimat.org/pollution-de-l-air-et-inegalites-sociales-10-informations-a-retenir](http://www.reseauactionclimat.org/pollution-de-l-air-et-inegalites-sociales-10-informations-a-retenir)
36. Yeo, G. T., Thai, V. V., & Roh, S. Y. (2015). *An analysis of port service quality and customer satisfaction: The case of Korean container ports*. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 31(4), 437-447.
37. *A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 170-18
38. Pavlic, B., Cepak, F., Sucic, B., Peckaj, M., Kandus, B. (2014). *Sustainable port infrastructure, practical implementation of the green port concept*. *Thermal Sciences*, 18(3), 935-948.
39. Ying, H., Yijun, J. (2011, December). *Discussion on the construction of the green port of Tianjin Port*. In *IPCBE International Conference on Biology, Environment and Chemistry (Vol. 1, pp. 467-469)*.
40. Alamoush, A. S., Ballini, F., & Ölçer, A. I. (2020). *Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review*. *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111508.
41. Sifakis, N., & Tsoutsos, T. (2021). *Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept*. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125448.
42. Cho, D. O. (2010). *Environmental impacts of intentional shipping: A case study of the port of Busan*. *Organization for economic co-operation and development*
43. *Asia-Pacific Economic Cooperation (2009). Sharing best-practices in reducing greenhouse gas emissions at ports*. 32nd transportation working group meeting
44. Duan, S. J. (2009). *Application of energy saving technology on Rail Tired Gantry Crane*. *Hoisting and Conveying Machinery*, 2, 4–8 (In Chinese).

45. Galbraith, V., Curry, L., & Loh, C. (2008). *Green harbours Hong Kong & Shenzhen Reducing Marine and Port-related Emission*. Hong Kong: Civic Exchange p1.
46. Lam, J.S.L., Van de Voorde, E. (2012, May). *Green port strategy for sustainable growth and development*. In *Transport Logistics for Sustainable Growth to a New Level, International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA)* (pp. 27-30).
47. Yang, Y. C. (2017). *Operating strategies of CO2 reduction for a container terminal based on carbon footprint perspective*. *Journal of Cleaner Production*, 141, 472-480.
48. Ballini, F., Vakili, S., Schönborn, A., Olcer, A., Canepa, M., & Sciutto, D. (2022). *Optimal decision making for emissions reduction measures for Italian container terminals*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 236(1), 283-300.
49. Gamage, R.N. (2016). *Blue economy in Southeast Asia: the oceans as a new frontier of economic development*. *Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India*, 12(2), 1-15.
50. Yang, Y. C., & Chang, W. M. (2013). *Impacts of electric gantry cranes on tires on the performance of green ports*. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 67-76.
51. Pavlic, B., Cepak, F., Sucic, B., Peckaj, M., Kandus, B. (2014). *Infrastructures portuaires durables, mise en œuvre pratique du greenConcept de port*. *Thermal Science*, 18(3), 935-948.
52. Zhang, Y. (2017). *Study on ship emissions and countermeasures in Shanghai Port*.
53. Ying, H., & Yijun, J. (2011, December). *Discussion on green port construction of Tianjin Port*. In *2010 International Conference on Biology, Environment and Chemistry* (Vol. 1, pp. 467-469).
54. Quirapas, M. A. J. R., Lin, H., Abundo, M. L. S., Brahim, S., Santos, D.(2015). *Ocean renewable energy in Southeast Asia: a review*. *Renouvelableet Sustainable Energy Reviews*, 41, 799-8
55. Fung, K. F. (2001). *Competition between the ports of Hong Kong and Singapore: a structural vector error correction model to forecast the demand for container handling services*. *Maritime Policy & Management*, 28(1), 3-22.
56. Trujillo, L. (2008). *Reforms and infrastructure efficiency in Spain's container ports*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(1), 243-257.
57. Frémont, A., & Ducruet, C. (2005). *The Emergence Of A Mega-Port—From The Global To The Local, The Case Of Busan*. *Tijdschrift voor economische en sociale geografie*, 96(4), 421-432.

58. Yeo, G. T., Roe, M., & Soak, S. M. (2007). Evaluation of the marine traffic congestion of north harbor in busan port. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 133(2), 87-93.
59. Cullinane, K., Teng, Y., & Wang, T. F. (2005). Port competition between Shanghai and Ningbo. *Maritime Policy & Management*, 32(4), 331-346.
60. Yang, Y. C., & Chang, W. M. (2013). Impacts of electric rubber-tired gantries on green port performance. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 67-76.
61. Song, S. (2014). Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port. *Atmospheric Environment*, 82, 288-297.
62. Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., ... & Thorpe, T. (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(5), 405-431.
63. Naicker, R., & Allopi, D. (2015). Analysis of electric gantries on tires for a greener container terminal in Durban. *IOSR Journal of Engineering*.
64. Marzantowicz, Ł., & Dembińska, I. (2018). The reasons for the implementation of the concept of green port in sea ports of China. *Logistics and Transport*, 37, 121-128.
65. Fung, K.F. (2001). Competition Between Hong Kong and Singapore Ports: A Structural Vector Error Correction Model for Forecasting the Demand for Container Handling Services. *Maritime Policy Management*, 28(1), 3-22.
66. Robinson, R. (2002). Ports as part of value chain systems: new paradigm. *Maritime Policy and Management*, 29(3), 241-255.
67. Notteboom, T. E., & Rodrigue, J. JP (2005) Port regionalization: towards a new phase of port development. *Marine de Poicy ind Min&chert*, 32(3), 297313. 3. Iris, C. & Lam, J.S.L. (2019).
68. A review of energy efficiency in ports: operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 170-182. 4. Bailey, D., and Solomon, G. (2004).
69. Pollution prevention in ports : air pollution control. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7-8), 749-774. 5. Yap, W.Y., & Lam, J.S.L. (2013).
70. 80 million twenty-foot equivalent container port Sustainability issues in port and coastal development. *Oceans and Coastal Management*, 71, 13–25.
71. Wilmsmeier, G., Froese, J., Zotz, A. and Meyer, A. (2014). Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges of Refrigerated Trade in South American Container Terminals.

72. Oliver de Oliveira, U.R., Espindola, L.S., da Silva, I.R., da Silva, I.N., & Rocha, H.M. (2018). A systematic review of the literature on green supply chain management: implications for research and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 187, 537-56
73. FAHDI, S., ELKHECHAFI, M., & HACHIMI, H. (2019, April). Green Port in Blue Ocean: Energy Optimization in Asian Ports. In 2019, 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA) (pp. 1-4). IEEE.
74. Papaioannou, V., Pietrosanti, S., Holderbaum, W., Becerra, V.M. and Mayer, R. (2017). Analysis of the energy consumption of RTG cranes. *Energy*, 125, 337–344. 11.
75. An overview of recent machine learning techniques for Port Hamiltonian systems. *Physics D: Nonlinear Phenomena*, 132620.
76. Peng, Y., Liu, H., Li, X., Huang, J. and Wang, W. (2020). Machine learning method for the prediction of the energy consumption of ships in the port taking into account green ports. *Journal of Cleaner Production*, 121564.
77. Casazza, M., Lega, M., Jannelli, E., Minutillo, M., Jaffe, D., Severino, V. and Ulgiati, S. (2019). Monitoring and 3D modeling of air quality for sustainable urban port development: Assessment and prospects. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1342-1352
78. Yang, Y.C., & Chang, W.M. (2013). Impacts of electric gantries on tires on the performance of green ports. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 67-76.
79. Hua, C., Chen, J., Wan, Z., Xu, L., Bai, Y., Zheng, T. and Fei, Y. (2020). Evaluation and Governance of Green Port Development Practices: A Case of a Seaport in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119434.
80. Pietrosanti, S., Alasali, F. and Holderbaum, W. (2020). Power management system for RTG crane using fuzzy logic controller. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100639.
81. Antonelli, M., Ceraolo, M., Desideri, U., Lutzemberger, G., & Sani, L. (2017). Hybridization of gantries on tires (RTG). *energy diary*
82. *Stochastic Optimal Energy Management System for RTG Crane Network Using Genetic Algorithm and Ensemble Predictions*
83. *Sustainable performance and benchmarking in container terminals – the energy dimension* author = Spengler, T., amp; Wilmsmeier, G., book title=In Green ports, pages=125-154, year=2019, publisher=Elsevier
84. Zhang, C., & Lu, Y. (2021). Study on artificial intelligence: The state of the art and future prospects. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100224.
85. Villani, C., Bonnet, Y., Berthet, C., Levin, F., Schoenauer, M., Cornut, A. C., & Rondepierre, B. (2018). Making sense of artificial intelligence: for a national and European strategy. *National Digital Council*.

86. Klumpp, M. (2018). Automation and artificial intelligence in business logistics systems: human reactions and collaboration requirements. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 21(3), 224-242.
87. Min, H. (2010). Artificial intelligence in supply chain management: theory and applications. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 13(1), 13-39.
88. Abduljabbar, R., Dia, H., Liyanage, S., & Bagloee, S. A. (2019). Applications of artificial intelligence in transport: An overview. *Sustainability*, 11(1), 189.
89. Lin, H. E., Zito, R., & Taylor, M. (2005, September). A review of travel-time prediction in transport and logistics. In *Proceedings of the Eastern Asia Society for transportation studies (Vol. 5, pp. 1433-1448)*.
90. Kuo S.Y., a.L.P.C. : Determinants of green performance in container terminal operations: A lean management. In: *Journal of Cleaner Production*, p. 275, 123105 (2020)
91. Nishant, R., Kennedy, M., & Corbett, J. (2020). Artificial intelligence for sustainability: Challenges, opportunities, and a research agenda. *International Journal of Information Management*, 53, 102104.
92. Papaioannou, V., Pietrosanti, S., Holderbaum, W., Becerra, V. M., & Mayer, R. (2017). Analysis of energy usage for RTG cranes. *Energy*, 125, 337-344.
93. Esmemr S., C.I.e.T.O. : A simulation for an optimal number of trucks in a terminal in a Turkish port based on a lean and green concept. In: *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, pp. 26(2), 277–296 (2010)
94. FAHDI SOUKAINA, ELKHECHAFI .MARIAM and HACHIMI .HANAA: Machine learning for cleaner production at the port of Casablanca. *Journal of Cleaner Production*, In: *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, pp. 294, 126269. ELSEVIER (2021)
95. Alasali F., H.S.a.H.W. : Energy management systems for a network of electrified cranes with energy storage. In: *International Journal of Electrical Power & Energy systems*, e.g. 106, 210–222. (2019)
96. Peng, Y., Liu, H., Li, X., Huang, J., & Wang, W. (2020). Méthode d'apprentissage automatique pour la prévision de la consommation d'énergie des navires dans les ports envisageant des ports verts. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121564.
97. Hardian, R., Liang, Z., Zhang, X., & Szekely, G. (2020). Artificial intelligence: The silver bullet for sustainable materials development. *Green Chemistry*, 22(21), 7521-7528.
98. Lin, C. Y., Dai, G. L., Wang, S., & Fu, X. M. (2022). The Evolution of Green Port Research: A Knowledge Mapping Analysis. *Sustainability*, 14(19), 11857.
99. Alasali, F., Haben, S. & Holderbaum, W. (2019). Stochastic Optimal Energy Management System for RTG Crane Network Using Genetic Algorithm and Ensemble Predictions. *Energy Storage Journal*, 24, 100759.
100. Abourraja, M. N., Oudani, M., Samiri, M. Y., Boukachour, J., Elfazziki, A., Bouain, A., & Najib, M. (2018). An improving agent-based engineering strategy for minimizing

unproductive situations of cranes in a rail–rail transshipment yard. *Simulation*, 94(8), 681-705.

101. Peng, Y., Liu, H., Li, X., Huang, J. & Wang, W. (2020). Machine learning method for the prediction of the energy consumption of ships in the port taking into account green ports. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121564.
102. [www.actuia.com/actualite/journee-mondiale-de-locean-quelques-exemples-dutilisation-de-lia-dans-le-domaine-maritime](http://www.actuia.com/actualite/journee-mondiale-de-locean-quelques-exemples-dutilisation-de-lia-dans-le-domaine-maritime)
103. Alabdulrazzaq, H., Alenezi, M.N., Rawajfih, Y., Alghannam, B.A., Al-Hassan, A.A. and Al-Anzi, F.S. (2021). On the accuracy of ARIMA-based prediction of the spread of COVID-19. *Results in Physics*, 27, 104509.
104. Rashed, Y., Meersman, H., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2017). Short-term container-to-life prediction: An ARIMA intervention model for the Port of Antwerp. *Maritime Economics and Logistics*, 19(4), 749-764. 18.

## VII. Annexe:

Tableau 3 : Extrait de la base de données des heures de travail RTG de chaque moteur en avril 2019

		01	02	03	04	05	06	07
RTG01	La consommation totale du RTG	10075	10095	10117	10136	10153	10167	10167
	HOIST	3017	3026	3035	3043	3051	3056	3056
	TROLLEY	1892	1897	1903	1907	1911	1914	1914
	GANTRY	1431	1434	1437	1440	1443	1445	1445
RTG02	La consommation totale du RTG	9643	9663	9684	9700	9712	9741	9741
	HOIST	2834	2843	2855	2861	2862	2871	2871
	TROLLEY	1744	1750	1755	1759	1760	1765	1765
	GANTRY	1344	1348	1351	1354	1356	1361	1361
RTG03	La consommation totale du RTG	10109	10129	10151	10167	10184	10209	10209
	HOIST	2489	2494	2503	2508	2514	2521	2521
	TROLLEY	1802	1805	1810	1814	1818	1823	1823
	GANTRY	1443	1446	1446	1446	1454	1458	1458
RTG04	La consommation totale du RTG	9914	9917	9917	9917	9918	9918	9918
	HOIST	3046	3046	3047	3047	3047	3047	3047
	TROLLEY	1771	1771	1772	1772	1772	1772	1772

	GANTRY	1639	1639	1641	1641	1641	1641	1641
RTG05	La consommation totale du RTG	10192	10211	10220	10229	10243	10258	10258
	HOIST	3266	3271	3274	3277	3282	3288	3288
	TROLLEY	1879	1882	1884	1886	1889	1892	1892
	GANTRY	854	855	856	857	858	860	860
RTG06	La consommation totale du RTG	9760	9778	9801	9815	9830	9855	9855
	HOIST	2769	2775	2784	2789	2795	2801	2801
	TROLLEY	1709	1713	1718	1721	1724	1727	1727
	GANTRY	1075	1076	1020	1026	1026	1027	1027
RTG07	La consommation totale du RTG	10270	10287	10306	10322	10329	10357	10357
	HOIST	2954	2960	2966	2971	2973	2981	2981
	TROLLEY	1785	1789	1793	1796	1798	1803	1803
	GANTRY	1109	1109	1109	1109	1109	1109	1109
RTG08	La consommation totale du RTG	3390	3411	3419	3424	3424	3435	3435
	HOIST	1041	1050	1053	1054	1054	1057	1057
	TROLLEY	602	608	610	610	610	612	612
	GANTRY	476	479	481	481	481	484	484

RTG09	La consommation totale du RTG	4193	4193	4215	4228	4244	4268	4268
	HOIST	1319	1319	1327	1327	1338	1345	1345
	TROLLEY	798	798	804	804	811	815	815
	GANTRY	573	573	575	575	580	584	584
RTG010	La consommation totale du RTG	3892	3905	3917	3917	3948	3971	3971
	HOIST	1139	1144	1149	1149	1160	1167	1167
	TROLLEY	706	709	712	712	719	723	723
	GANTRY	518	520	522	522	528	532	532
RTG011	La consommation totale du RTG	4411	4427	4450	4469	4487	4517	4517
	HOIST	1315	1321	1330	1336	1344	1353	1353
	TROLLEY	802	806	812	815	820	822	822
	GANTRY	600	603	605	609	613	616	616