

Résumé :

Le port maritime est le nœud le plus important de la chaîne logistique globale. En général, avec la croissance de l'économie mondiale, l'intérêt et le besoin des services de transport maritime augmentent considérablement, ce qui soulève des difficultés et des défis pour le port maritime, tels que : le manque d'espace ; congestion aux points d'accès des ports maritimes ; l'augmentation des coûts de transport et l'impact environnemental négatif... Le rôle critique du port maritime dans la chaîne logistique globale confirme l'importance du concept de port sec et ses avantages pour surmonter les difficultés et les défis du port maritime. Ainsi, la compréhension des enjeux de port maritime conduit à reconnaître la nécessité et le fonctionnement du port sec. Le port sec peut améliorer considérablement les performances du port maritime. Par conséquent, les performances du système de port sec port maritime augmentent aussi. Le but de cette étude est de comprendre le concept de port sec et ses avantages et solutions pour le port maritime aujourd'hui, ce qui a été illustré par une Revue Littérature Systématique RLS qui montre l'évolution du concept, les types de port sec, le cycle de vie du port sec, les thèmes de recherche et les méthodes et outils utilisés dans la recherche sur les ports secs. Ensuite, dans cette RLS nous avons traité l'ensemble du système port sec port maritime PSPM (Port maritime, Rail et Port sec) en se concentrant sur les différents facteurs de risque que nous avons pu identifier, les méthodes utilisées pour l'évaluation des risques et l'emplacement de chaque méthode dans chaque processus de gestion des risques de (Project Management Institute) PMI. De plus, cette étude présente un modèle décisionnel multicritères basé sur Delphi et (Analytic Hierarchy Process) AHP, afin d'évaluer les facteurs de risque identifiés, les catégories de risque et les trois grandes parties de notre système étudié. Ce qui montre que les risques de la partie de port maritime auront un impact plus important sur tout le système de port sec port maritime. De plus, nous présentons dans cette étude un Framework basé sur un algorithme d'intelligence artificielle capable d'anticiper la possibilité d'avoir des risques dans notre système étudié, dans ce Framework nous avons utilisé l'un des algorithmes de (Artificial Neuron Network) ANN les plus utilisés et les plus efficaces, le Back-Propagation ANN (BPANN) cet algorithme est plus efficace pour améliorer les taux d'apprentissage et réduire le phénomène de surapprentissage. Nous nous sommes focalisés sur l'optimisation de la structure ou ce qu'on appelle l'optimisation hyper paramétrique, et nous avons utilisé une métaheuristique inspirée de la nature appelée Whale Optimizer Algorithm WOA afin d'optimiser la structure de BPANN, nous avons appelé ce cadre/Framework le WOA-ANN. Enfin, nous avons choisi comme exemple d'application le risque de congestion dans le quai du port maritime en raison de son importance, de son impact dans notre système PSPM et de la disponibilité de données massives nécessaires. Ensuite, nous comparons notre modèle WOA-ANN avec sept algorithmes traditionnels de machine Learning ML, le résultat montre que notre modèle est le plus précis selon plusieurs métriques, ce qui valide l'utilisation de notre modèle.

ملخص:

يعتبر الميناء البحري من أهم النقاط في سلسلة النقل الدولي. بشكل عام، مع نمو الاقتصاد العالمي، يتزايد الطلب على خدمات النقل البحري بشكل كبير، مما يؤثر تحديات للميناء البحري مثل: عدم وجود مساحة كافية للتخزين؛ ازدحام في منافذ الموانئ البحرية؛ زيادة تكاليف النقل والأثر البيئي السلبي... الدور الحاسم الذي يلعبه الميناء في سلسلة التوريد العالمية يؤكد أهمية مفهوم الميناء الجاف ومزاياه من أجل التغلب على صعوبات وتحديات الميناء البحري. وفقاً لذلك يقودنا فهم تحديات الموانئ البحرية إلى التعرف على ضرورة عمل الميناء الجاف وعمله. يمكن للميناء الجاف أن يحسن أداء الميناء بشكل ملحوظ. لذلك، فإن أداء النظام المدروس في هذا البحث (نظام الميناء الجاف الميناء البحري) يشهد تحسن ملموس نتيجة لذلك. الغرض من هذه الدراسة هو فهم مفهوم الميناء الجاف ومزاياه وحله للميناء البحري اليوم، والذي تم توضيحه من خلال المراجعة المنهجية للأبحاث العلمية بشكل الذي يوضح تطور المفهوم وأنواع الميناء الجاف ودورة حياة الميناء الجاف، محاور البحث والأساليب والأدوات المستخدمة في بحوث الموانئ الجافة. بالإضافة إلى ذلك، في الجزء من هذه الدراسة تم تحديد المخاطر المحتملة وأساليب المستعملة للحد منها لتشمل الميناء الجاف والميناء البحري والسكة الحديدية الرابطة بينهم، بعد ذلك تقدمنا بدراسة تتضمن نموذجاً متعدد المعايير لصنع القرار من أجل تقييم عوامل الخطر القائمة، وفتات المخاطر ومدى أهمية الأجزاء الثلاثة الرئيسية للنظام المدروس فيما يخص إدارة المخاطر. من أهم النتائج أننا وجدنا بأن أي خطر يحدث في جزء الميناء البحري سيكون له تأثير أكبر على نظام المدروس بالكامل. علاوة على ذلك، نقدم في هذه الدراسة إطار عمل يعتمد على خوارزمية ذكاء اصطناعي قادرة على التنبؤ بإمكانية وجود مخاطر، وفي هذا الإطار استخدمنا واحدة من أكثر خوارزميات شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية استخداماً وفعالية وهي. هذه الخوارزمية أكثر فعالية في تحسين معدلات التعلم وتقليل من ظاهرة الإفراط في التعلم. ثم أضفنا ما يسمى اليوم بالخوارزميات المستوحاة من الطبيعة من أجل تحسين نظام الذكاء الاصطناعي المستعمل. ثم أخيراً من أجل التطبيق قمنا باختيار كمثال مخاطر الازدحام في رصيف الميناء بسبب أهميته وتأثيره في نظامنا. ثم قارنا نموذجنا لخوارزمية ذكاء اصطناعي مع سبع خوارزميات تقليدية للتعلم الآلي، لتظهر النتيجة أن نموذجنا هو الأكثر دقة، الشيء الذي يعزز شرعية استخدام نظامنا الذكي

THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention de grade de Docteur en **Génie Industriel et Logistique**

Formation Doctorale : physique et sciences de l'ingénieur

Spécialité : **Génie Industriel et Logistique**

Sous le thème

Évaluation des risques de système «Port Sec-Port Maritime» basée sur une hybridation des outils d'aide à la décision multicritère et l'intelligence artificielle

Présenté par :

Nabil LAMII

Soutenue le : 09/01/2023

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. A. MOUSRIJ	PES	UH1, FST de Settat	Président
Pr. J. BENHRA	PES	UH2, ENSEM de Casablanca	Rapporteur
Pr. C. OKAR	PES	UAE, ENSA de Tétouan	Rapporteur
Pr. A. CHARKAOUI	PH	UH1, FST de Settat	Rapporteur
Pr. W. DACHRY	PH	UH1, FST de Settat	Examinatrice
Pr. C. MABROUKI	PH	UH1, FST de Settat	Co-Directeur d
Pr. E.A. SEMMA	PES	UH1, FST de Settat	Directeur de th

Année Universitaire : 2022/2023



UNIVERSITÉ HASSAN 1^{er}

Faculté des Sciences et Techniques de Settat

CEDoc : Sciences et Techniques

Formation doctorale : physique et sciences de l'ingénieur

T H È S E

Présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN GÉNIE INDUSTRIEL ET LOGISTIQUE

DE L'UNIVERSITÉ HASSAN 1^{er}

Par

LAMII NABIL

Titre :

**ÉVALUATION DES RISQUES DE SYSTÈME PORT SEC-PORT MARITIME
BASÉE SUR UNE HYBRIDATION DES OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION
MULTICRITÈRE ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

Soutenue publiquement le 09/01/2022 devant la commission d'examen :

Pr. A. MOUSRIJ	Université Hassan 1 ^{er} , FST de Settat	Président
Pr. J. BENHRA	École Nationale Supérieure d'électricité et mécanique de Casablanca	Rapporteur
Pr. C. OKAR	École Nationale des Sciences Appliquées de Tétouan	Rapporteur
Pr. A. CHARKAOUI	Université Hassan 1 ^{er} , FST de Settat	Rapporteur
Pr. W. DACHRY	Université Hassan 1 ^{er} , FST de Settat	Examineur
Pr. C. MABROUKI	Université Hassan 1 ^{er} , FST de Settat	Examineur
Pr. E.A. SEMMA	Université Hassan 1 ^{er} , FST de Settat	Directeur de thèse

Année universitaire : 2022 - 2023

**© Copyright
LAMII Nabil
2023**

{قُلْ إِنَّ صَلَاتِي وَنُسُكِي وَمَحْيَايَ وَمَمَاتِي لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ * لَا شَرِيكَ لَهُ وَبِذَلِكَ أُمِرْتُ وَأَنَا أَوَّلُ الْمُسْلِمِينَ}. (الانعام: 162-163)

DÉDICACES

À ALLAH le tout puissant,

À l'âme de mon cher Père,

À ma chère Mère que Dieu la protège,

À mon cher oncle,

À ma chère épouse,

À mon adorable Sœur,

À mes Beaux Parents,

À tous mes amis,

À tous ceux qui ont prié pour moi.

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette recherche, je suis convaincue que le projet de thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont je remercie infiniment.

Je désire grandement remercier Monsieur EL Alami Semma, professeur à la FST de Settat, le directeur de cette thèse pour ces précieux conseils et judicieuses suggestions.

J'adresse mes sincères remerciements à mon co-encadrant de thèse Monsieur Charif Mabrouki, Professeur à la FST de Settat, pour son accompagnement et ses qualités scientifiques, pour son attention de tout instant sur mon avancement.

Mes plus vifs remerciements vont également à Monsieur Abdelwahed Echchatbi professeur à la FST de Settat et le directeur de notre laboratoire de recherche qui m'a fait confiance pendant toute la durée de ma thèse.

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des membres du jury. Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont consacré afin de lire et échanger et évaluer ce projet de thèse.

Je voudrais également adresser mes remerciements à tous les membres du Laboratoire d'Ingénierie Management Industriel et Innovation (LIMII) de la Faculté des Sciences et Techniques de Settat.

RÉSUMÉ

Le port maritime est le nœud le plus important de la chaîne logistique globale. En général, avec la croissance de l'économie mondiale, l'intérêt et le besoin des services de transport maritime augmentent considérablement, ce qui soulève des difficultés et des défis pour le port maritime, tels que : le manque d'espace ; congestion aux points d'accès des ports maritimes ; l'augmentation des coûts de transport et l'impact environnemental négatif... Le rôle critique du port maritime dans la chaîne logistique globale confirme l'importance du concept de port sec et ses avantages pour surmonter les difficultés et les défis du port maritime. Ainsi, la compréhension des enjeux de port maritime conduit à reconnaître la nécessité et le fonctionnement du port sec. Le port sec peut améliorer considérablement les performances du port maritime. Par conséquent, les performances du système de port sec port maritime augmentent aussi. Le but de cette étude est de comprendre le concept de port sec et ses avantages et solutions pour le port maritime aujourd'hui, ce qui a été illustré par une Revue Littérature Systématique RLS qui montre l'évolution du concept, les types de port sec, le cycle de vie du port sec, les thèmes de recherche et les méthodes et outils utilisés dans la recherche sur les ports secs. Ensuite, dans cette RLS nous avons traité l'ensemble du système port sec port maritime PSPM (Port maritime, Rail et Port sec) en se concentrant sur les différents facteurs de risque que nous avons pu identifier, les méthodes utilisées pour l'évaluation des risques et l'emplacement de chaque méthode dans chaque processus de gestion des risques de (Project Management Institute) PMI. De plus, cette étude présente un modèle décisionnel multicritères basé sur Delphi et (Analytic Hierarchy Process) AHP, afin d'évaluer les facteurs de risque identifiés, les catégories de risque et les trois grandes parties de notre système étudié. Ce qui montre que les risques de la partie de port maritime auront un impact plus important sur tout le système de port sec port maritime. De plus, nous présentons dans cette étude un Framework basé sur un algorithme d'intelligence artificielle capable d'anticiper la possibilité d'avoir des risques dans notre système étudié, dans ce Framework nous avons utilisé l'un des algorithmes de (Artificial Neuron Network) ANN les plus utilisés et les plus efficaces, le Back-Propagation ANN (BPANN) cet algorithme est plus efficace pour améliorer les taux d'apprentissage et réduire le phénomène de surapprentissage. Nous nous sommes focalisés sur l'optimisation de la structure ou ce qu'on appelle l'optimisation hyper paramétrique, et nous avons utilisé une métaheuristique inspirée de la nature appelée Whale Optimizer Algorithm WOA afin d'optimiser la structure de BPANN, nous avons appelé ce cadre/Framework le WOA-ANN. Enfin, nous avons choisi comme exemple d'application le risque de congestion dans le quai du port maritime en raison de son importance, de son impact dans notre système PSPM et de la disponibilité de données massives nécessaires. Ensuite, nous comparons notre modèle WOA-ANN avec sept algorithmes traditionnels de machine Learning ML, le résultat montre que notre modèle est le plus précis selon plusieurs métriques, ce qui valide l'utilisation de notre modèle.

Mots-clés : Port sec, Transport intermodal, Revue Littérature Systématique RLS, les méthodes multi critères MCDM, système de port sec port maritime, processus de gestion des risques, évaluation des risques, ANN, BPANN, WOA, métaheuristique.

ABSTRACT:

The seaport is the main hub in the worldwide transportation. In general, with the development of the world economy, the interest and the need of the maritime transport services are expanding significantly, which raises difficulties and challenges for the seaport, such as: Lack of space; Congestion at the access points of seaports; the increase of transport costs and Negative environmental impact... The critical role that seaport plays in the global supply chain confirms the importance of the concept of the dry port and his advantages in order to overcome the seaport difficulties and challenges. Accordingly, the understanding of the seaport challenges leads us to recognize the dry port necessity and functioning. Dry port can improve significantly the performance of the seaport. Therefore, the performance of the dry port seaport system raises consequently. The purpose of this study is to understand the dry port concept and his advantages and solutions for the seaport today, which was illustrated by a systematic literature review RLS that shows the evolution of the concept, the types of dry port, life cycle of dry port, themes of research and the methods and tools used in dry port research. Then, we tried to treat the whole system (seaport, rail and dry port) focusing on the different risk factors that we could identify, the methods used for risk assessment, and the emplacement of each method in the risk management process of the project management institute PMI. In addition, this study presents a multi-criteria decision-making model based on Delphi and The Analytic Hierarchy Process AHP, in order to evaluate the identified risk factors, the risk categories and the three major parts of the studied system. Which shows that any risk happens in the seaport part will have a greater impact of all the dry port seaport system. Furthermore, we present in this study a framework based on artificial intelligence algorithm capable of predicting the possibility of having risks in our studied system, in this framework we used one of the most used and efficient Artificial Neurons Network ANN algorithms which is the Back-Propagation ANN BPANN this algorithm is more effective in improving learning rates and reducing overfitting phenomenon. Based on the hyper parametric tuning/optimisation we used a natural inspired metaheuristic called Whale Optimizer Algorithm WOA in order to optimize the structure of BPANN, we called this framework the WOA-ANN. Finally, we choose as an example of application the risk of the congestion in the berth of the seaport due to his important, his impact in our system and availability of the dataset. Then we compare our WOA-ANN model with seven traditional machine learning algorithms, the result shows that our model is the most accurate by multiple metrics which validate the use of our model.

Key words: Dry port, intermodal transport, Systematic Literature Review SLR, Multi Criteria Decision Making MCDM, the dry port seaport system, risk management processes, risk assessment, ANN, BPANN, WOA, metaheuristic.

يعتبر الميناء البحري من أهم النقاط في سلسلة النقل الدولي. بشكل عام، مع نمو الاقتصاد العالمي، يتزايد الطلب على خدمات النقل البحري بشكل كبير، مما يؤثر تحديات للميناء البحري مثل: عدم وجود مساحة كافية للتخزين؛ ازدياد في موانئ الموانئ البحرية؛ زيادة تكاليف النقل والأثر البيئي السلبي ... الدور الحاسم الذي يلعبه الميناء في سلسلة التوريد العالمية يؤكد أهمية مفهوم الميناء الجاف ومزاياه من أجل التغلب على صعوبات وتحديات الميناء البحري. ووفقًا لذلك يتودنا فهم تحديات الموانئ البحرية إلى التعرف على ضرورة عمل الميناء الجاف وعمله. يمكن للميناء الجاف أن يحسن أداء الميناء بشكل ملحوظ. لذلك، فإن أداء النظام المدروس في هذا البحث (نظام الميناء الجاف البحري) يشهد تحسن ملموس نتيجة لذلك. الغرض من هذه الدراسة هو فهم مفهوم الميناء الجاف ومزاياه وحله للميناء البحري اليوم، والذي تم توضيحه من خلال المراجعة المنهجية للأبحاث العلمية بشكل الذي يوضع تطور المفهوم وأنواع الميناء الجاف ودورة حياة الميناء الجاف، محاور البحث والأساليب والأدوات المستخدمة في بحوث الموانئ الجافة. بالإضافة إلى ذلك، في الجزء من هذه الدراسة تم تحديد المخاطر المحتملة وأساليب المستعملة للحد منها لتشمل الميناء الجاف والميناء البحري والسكة الحديدية الرابطة بينهم. بعد ذلك تقدمنا بدراسة تتضمن نموذجًا متعدد المعايير لصنع القرار من أجل تقييم عوامل الخطر القائمة، وفئات المخاطر ومدى أهمية الأجزاء الثلاثة الرئيسية للنظام المدروس فيما يخص إدارة المخاطر. من أهم النتائج أننا وجدنا بأن أي خطر يحدث في جزء الميناء البحري سيكون له تأثير أكبر على نظام المدروس بالكامل. علاوة على ذلك، نقدم في هذه الدراسة إطار عمل يعتمد على خوارزمية ذكاء اصطناعي قادرة على التنبؤ بإمكانية وجود مخاطر، وفي هذا الإطار استخدمنا واحدة من أكثر خوارزميات شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية استخدامًا وفعالية وهي. هذه الخوارزمية أكثر فعالية في تحسين معدلات التعلم وتقليل من ظاهرة الإفراط في التعلم. ثم أضفنا ما يسمى اليوم بالخوارزميات المستوحاة من الطبيعة من أجل تحسين نظام الذكاء الاصطناعي المستعمل. ثم أخيرًا من أجل التطبيق قمنا باختيار كمثل مخاطر الازدياد في رصيف الميناء بسبب أهميته وتأثيره في نظامنا. ثم قارنا نموذجنا لخوارزمية ذكاء اصطناعي مع سبع خوارزميات تقليدية للتعلم الآلي، لتظهر النتيجة أن نموذجنا هو الأكثر دقة، الشيء الذي يعزز شرعية استخدام نظامنا الذكي.

الكلمات الرئيسية: مفهوم الميناء الجاف، النقل متعدد الوسائط، اتخاذ القرار متعدد المعايير، نظام الموانئ الجافة، المراجعة المنهجية للأدبيات، تقييم المخاطر، أساليب إدارة المخاطر، نظام الذكاء الاصطناعي، بالخوارزميات المستوحاة من الطبيعة.

LISTE DES ACRONYMES

ACO	L'optimisation des colonies de fourmis
ABB	Activity Based Budgeting
AG	L'algorithme génétique
AHP	Analytic hierarchy process
ANN	Artificial Neuron Network
ANP	The analytical network process
AUC	Area Under the ROC Curve
BAP	Berth Allocation Problem
BBN	Bayesian belief network
BCR	Berth Congestion Risk
BPANN	Back-Propagation ANN
CMSAE	Convolutional Long Short Term Memory Selectional Auto Encoders
CNN	Convolutional Noron Network
COVID 19	Corona virus disease 2019
CPN	Colored Petri nets
CSA	Algorithme de recherche de corbeau
DEA	Data Envelopment Analysis.
DTC	Decision Tree Classifier
ELECTRE	ELimination and Choice Expressing Reality.
ER	Evidential Reasoning
ETA	Event tree analysis
ETA	Event tree analysis
EVP	Équivalent Vingt Pieds
FBNN	Feedback Neural Network
FCFS	Frst-come-first-served
FCM	Fuzzy C-Means.
FFNN	feed forward neural network
FFTA	Fuzzy Fault Tree Analysis
FNN	Feedforward Neural Network
FST	fuzzy set theory
Ft	Foot
GBC	Gradient Boosting Classifier
GWO	Gray Wolf Optimizer
IA	Intelligence artificielle
IC	Indice de cohérence
KNN	K-nearest neighbors
KPI	Key Performance Indicator
LDA	Linear Discriminant Analysis
LF	Levy Flight
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TechNique.
MAUT	Multi Attribute Utility Theory
MCDM	Multi Criteria Decision Making
ML	Machine learning
MOA	Metaheuristics Optimization Algorithms

MSA	Moth Search Algorithm
MSE	Mean Square Error
OP	Les risques opérationnels.
OR	Les risques organisationnels.
PCS	Systèmes communautaires portuaires
PMIP	Project management institute
PN	Petri nets
PR	Les risques professionnels.
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation.
PSO	Particle Swarm Optimization
PSPM	Système port sec port maritime
RBS	Risk Breakdown Structure
RC	Ratio de cohérence
RLS	Revue Littérature Systématique
ROC	Receiver operating characteristic curve
Ro-Ro	Roll-on/roll-off
RT	La recherche tabou
SC	Supply Chain
STPA	System-theoretic process analysis
SVM	Support Vector Machine
SWOT	STRENGTHS, WEAKNESSES, OPPORTUNITIES, THREATS
TEU	Twenty feet Equivalent Unit
TOPSIS	Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution.
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development.
WOA	Whale Optimizer Algorithm

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Répartition du cout total de la logistique.</i>	24
<i>Figure 2 : Étude comparative de la capacité de chargement entre navire, train et camion.</i>	24
<i>Figure 3 : Exemple des conteneurs</i>	26
<i>Figure 4 : Évolution de la capacité de chargement des navires</i>	27
<i>Figure 5 : Exemple de port maritime</i>	28
<i>Figure 6 : Exemple de quai du port maritime</i>	29
<i>Figure 7 : Zone de stockage d'un port maritime</i>	29
<i>Figure 8 : Exemple de portique</i>	31
<i>Figure 9 : Système port sec port maritime PSPM</i>	34
<i>Figure 10 : Les fonctions principales du port sec [8]</i>	35
<i>Figure 11 : Les type de port sec [26]–[28]</i>	36
<i>Figure 12 : L'évolution spatiale de la structure des relations entre le port sec et le port maritime [31]</i>	37
<i>Figure 13 : La modélisation de développement de la relation port sec-port maritime selon [29]</i>	38
<i>Figure 14 : Le cycle de vie de la relation port sec-port maritime selon [32]</i>	38
<i>Figure 15 : Le cycle de vie de la relation port sec-port maritime selon [33]</i>	40
<i>Figure 16 : Le processus de RLS</i>	41
<i>Figure 17 : L'évolution de la recherche du concept de port sec entre 1980 et début de 2020</i>	44
<i>Figure 18 : La répartition des articles sélectionnés entre les articles qui traitent le concept de port sec et les articles qui traitent la gestion des risques dans le système PSPM en entier avec leur interaction.</i>	45
<i>Figure 19 : Distribution d'articles sur les trois parties du système de port sec portuaire</i>	46
<i>Figure 20 : La distribution des articles selon les thèmes de recherche.</i>	47
<i>Figure 21 : L'évolution des thèmes de recherche.</i>	48
<i>Figure 22 : L'évolution des méthodes utilisées au fil de temps.</i>	49
<i>Figure 23 : Les méthodes utilisées dans chaque thème de recherche</i>	51
<i>Figure 24 : Un exemple des étapes d'application d'un entretien / réunion</i>	66
<i>Figure 25 : Analyse SWOT</i>	67
<i>Figure 26 : Les étapes d'application d'une analyse SWOT</i>	68
<i>Figure 27 : Exemple de Risk Breakdown Structure RBS</i>	70
<i>Figure 28 : Root Cause Identification And Analysis</i>	71
<i>Figure 29 : Etapes d'application de Root Cause Identification And Analysis</i>	71
<i>Figure 30 : Exemple de Bow- tie diagram</i>	73
<i>Figure 31 : Un exemple de hiérarchie de décision</i>	84
<i>Figure 32 : Représentation graphique de notre exemple de TOPSIS</i>	85
<i>Figure 33 : Modélisation de notre approche utilisée</i>	91
<i>Figure 34 : The process of Delphi method is based on three phases [303]</i>	95
<i>Figure 35 : The structure of the studied system</i>	96
<i>Figure 36 : Classification des ANNs [337]</i>	109

<i>Figure 37 : Moth Search Algorithm</i>	114
<i>Figure 38 : GWO Algorithm</i>	116
<i>Figure 39 : Effects of sine and cosine</i>	117
<i>Figure 40 : Sine and cosine with range of [-2,2]</i>	118
<i>Figure 41 : Decreasing pattern for range of sine and cosine (a=3)</i>	119
<i>Figure 42 : General steps pf the SCA algorithm</i>	119
<i>Figure 43 : Flow chart of the CSA</i>	123
<i>Figure 44 : Crow Search Algorithm</i>	124
<i>Figure 45 : Flow chart of jaya algorithm</i>	125
<i>Figure 46 : Le comportement de chasse au filet à bulles des baleines à bosse [359]</i>	126
<i>Figure 47 : Bubble net search mechanism implemented in WOA : (a) shrinking encircling mechanism and (b) spiral updating position[358], [359]</i>	128
<i>Figure 48 : Pseudo- code of the WOA algorithm[358], [359]</i>	128
<i>Figure 49 : Phases de traitement de données</i>	129
<i>Figure 50 : Illustration of the proposed ANN model with backpropagation</i>	130
<i>Figure 51 : Le cadre hybride de WOA-ANN</i>	131
<i>Figure 52 : Les performances des modèles ML traditionnels avec WOA-ANN selon la courbe ROC AUC</i>	134

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Les challenges de port maritime les plus importants</i>	32
<i>Tableau 2 : Les définitions de port sec les plus citées</i>	33
<i>Tableau 3 : Les avantages apportés par le port sec</i>	34
<i>Tableau 4 : Les particularités et les avantages de chaque type</i>	36
<i>Tableau 5 : Le nombre d'articles collectés dans chaque moteur de recherche</i>	42
<i>Tableau 6 : les catégories des méthodes de recherche.</i>	48
<i>Tableau 7 : Les revues littérature de port sec.</i>	50
<i>Tableau 8 : Classification des journaux selon le nombre des articles publiés</i>	52
<i>Tableau 9 : Classification des pays selon le nombre des articles publiés</i>	52
<i>Tableau 10 : Les risques identifiés dans la partie de port maritime.</i>	54
<i>Tableau 11 : les risques identifiés dans la partie de rail.</i>	56
<i>Tableau 12 : Les risques identifiés dans la partie de port sec.</i>	58
<i>Tableau 13 : Un exemple d'un plan de gestion des risques [157]</i>	63
<i>Tableau 14 : Exemple de risk matrix [62]</i>	73
<i>Tableau 15 : L'utilisation prédominante et secondaire des méthodes/outils dans les processus de gestion des risques.</i>	75
<i>Tableau 16 : Exemple d'application de TOPSIS</i>	84
<i>Tableau 17 : Classification des méthodes multicritères</i>	89
<i>Tableau 18 : : Exemple d'échelle de comparaison [255], [268]</i>	92
<i>Tableau 19 : Scale used to compare between parts in terms of importance</i>	97
<i>Tableau 20 : Scale used to compare between risk factors in terms of frequencies</i>	97
<i>Tableau 21: Scale used to compare between risk factors in terms of severity</i>	97
<i>Tableau 22 : Scale used to compare between risk factors in terms of detectability</i>	97
<i>Tableau 23 : Scale used to compare between risk factors in terms of controllability</i>	98
<i>Tableau 24 : Le score de risque de chaque facteur de risque et le niveau d'importance de chaque catégorie et de chaque partie de notre système</i>	99
<i>Tableau 25 : Top 10 risk factors in the all-seaport dry port system</i>	102
<i>Tableau 26 : L'itération 0 dont la génération aléatoire des baleines (vecteurs)</i>	132
<i>Tableau 27 : Les FIS, RS et Accuracy des algorithmes de classification de notre cas</i>	133
<i>Tableau 28 : Les FIS, RS et Accuracy des algorithmes de classification de l'ensemble de données Cancer</i>	135
<i>Tableau 29 : Les FIS, RS et Accuracy des algorithmes de classification de Service de transfusion sanguine</i>	135
<i>Tableau 30 : Les FIS, RS et Accuracy des algorithmes de classification de l'âge de l'ormeau à partir de mesures collectées</i>	136
<i>Tableau 31 : Les FIS, RS et Accuracy des algorithmes de classification de revenu s'il dépasse 50 000 \$ par année</i>	137

LISTE DES MATIÈRES

DÉDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RÉSUMÉ.....	III
ABSTRACT:.....	V
الخلاصة.....	VI
LISTE DES ACRONYMES.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES MATIÈRES.....	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	16
OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	17
METHODOLOGIE SUIVIE.....	17
ORGANISATION DE LA THESE.....	18
CHAPITRE 01. ÉTUDE D'ÉVOLUTION DU SYSTÈME « PORT SEC-PORT MARITIME PSPM ».....	22
1. SUPPLY CHAIN MANAGEMENT ET LA LOGISTIQUE PORTUAIRE.....	23
1.1. APERÇU SUR LA LOGISTIQUE PORTUAIRE.....	24
1.1.1. ROUTES MARITIMES.....	25
1.1.2. MARCHANDISES.....	25
1.1.3. MOYEN DE TRANSPORT.....	26
1.1.4. PORTS MARITIMES.....	28
1.1.5. TRANSPORT MULTIMODAL.....	31
2. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT PORT SEC-PORT MARITIME.....	32
2.1. CHALLENGES DE PORT MARITIME.....	32
2.2. ETUDE DE CONCEPT DE PORT SEC.....	33
2.2.1. AVANTAGES DU PORT SEC :.....	34
2.2.2. FONCTIONS PRINCIPALES DE PORT SEC :.....	35
2.2.3. TYPES DE PORT SEC :.....	36
2.2.4. DEVELOPPEMENTS DU CYCLE DE VIE DU PORT SEC.....	37

3.	REVUE LITTERATURE SYSTEMATIQUE	40
3.1.	METHODOLOGIE DE LA REVUE LITTERATURE SYSTEMATIQUE	41
3.2.	RESULTATS DE RLS :	44
3.2.1.	ÉVOLUTION DE LA RECHERCHE	44
3.2.2.	ÉVOLUTION DES THEMES DE RECHERCHE SUR LES PORTS SECS	46
3.2.3.	ÉVOLUTION DES METHODES DE RECHERCHE SUR LES PORTS SECS	48
3.2.4.	RELATION ENTRE LES THEMES ET LES METHODES	51
3.2.5.	JOURNAUX ET PAYS QUI S'INTERESSENT PAR LE CONCEPT DE PORT SEC :	52
3.2.6.	RECUEILLE DES FACTEURS DE RISQUE DANS LE SYSTEME PSPM :	53
	CHAPITRE 02. LES MÉTHODES DE LA GESTION DES RISQUES UTILISÉES DANS SYSTÈME PORT SEC-PORT MARITIME	61
1.	PROCESSUS DE GESTION DES RISQUES	62
1.1.	PLANIFICATION DE LA GESTION DES RISQUES	62
1.2.	IDENTIFICATION DES FACTEURS DES RISQUES	63
1.3.	ANALYSE QUALITATIVE	64
1.4.	ANALYSE QUANTITATIVE	64
1.5.	PLANIFIER LES STRATEGIES ET LES SCENARIOS DES RISQUES	64
1.6.	SURVEILLER ET CONTROLER LES FACTEURS DES RISQUES	65
1.7.	METHODES DE GESTION DES RISQUES :	65
1.7.1.	ENTRETIEN / QUESTIONNAIRE / REUNION :	65
1.7.2.	REVUE LITTERATURE OU REVUE DOCUMENTAIRE :	66
1.7.3.	METHODE DELPHI	66
1.7.4.	SWOT ANALYSIS	67
1.7.5.	CHECK LISTS	68
1.7.6.	RISK BREAKDOWN STRUCTURE RBS :	69
1.7.7.	ROOT CAUSE IDENTIFICATION AND ANALYSIS ET BAYESIAN BELIEF NETWORK (BBN) EVENT TREE ANALYSIS (ETA)	70
1.7.8.	SENSITIVITY ANALYSE	71
1.7.9.	MONTE-CARLO SIMULATION	72
1.7.10.	RISK AUDITS	72
1.7.11.	MCDM MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING:	72
1.7.12.	BOW-TIE DIAGRAM	73
1.7.13.	PETRI NETS (PN) / COLORED PETRI NETS (CPN)	73

1.7.14. RISK MATRIX	73
2. DIFFERENTES METHODES DE GESTION DES RISQUES DANS LES PROCESSUS DE PMI 74	
CHAPITRE 03. UNE APPROCHE AHP-DELPHI POUR ANALYSER LES RISQUES DANS LE SYSTÈME « PORT SEC-PORT MARITIME ».....	80
1. METHODES D'AIDE A LA DECISION MULTICRITERE (MCDM)	81
1.1. METHODE AHP	83
1.1.1. METHODE TOPSIS	84
1.1.2. METHODE ELECTRE	86
1.1.3. PROMETHEE	86
1.1.4. METHODE MACBETH	87
1.2. SYSTEME DE SELECTION DES METHODES MULTICRITERES.....	88
2. OUTILS D'AIDE A LA DECISION AHP-DELPHI.....	90
2.1. METHODE FINE KINNEY	91
2.2. FONDEMENTS MATHÉMATIQUES DE LA METHODE AHP :.....	92
2.2.1. COHERENCE DES COMPARAISONS PAR PAIRES.....	94
2.3. METHODE DELPHI	95
3. APPLICATION DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION AHP - DELPHI.....	96
CHAPITRE 04. ÉVALUATION DES RISQUES À L'AIDE DE LA PLATEFORME WOA - ANN... 105	
1. ETUDE DE L'APPLIQUATION D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA LOGISTIQUE PORTUAIRE.....	108
2. MATERIELS ET METHODES	109
2.1. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS ANN	109
2.2. META-HEURISTIQUES.....	112
2.2.1. ALGORITHMES BASES SUR LA MEMOIRE ET SANS MEMOIRE	113
2.2.2. EXPLORATION ET EXPLOITATION	113
2.2.3. QUELQUES EXEMPLES.....	113
3. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES	128
4. CADRAGE DU MODELE PROPOSE.....	129
5. DISCUSSION DES RESULTATS NUMERIQUES	132

6.	ANALYSE COMPARATIVE DANS L'ENSEMBLE DE DONNEES DE CLASSIFICATION...	134
6.1.	CLASSIFICATION DE L'ENSEMBLE DE DONNEES CANCER.....	134
6.2.	CLASSIFICATION DE SERVICE DE TRANSFUSION SANGUINE	135
6.3.	CLASSIFICATION DE L'AGE DE L'ORMEAU (ABALONE) A PARTIR DE MESURES COLLECTEES	136
6.4.	CLASSIFICATION DE REVENU S'IL VA DEPASSER 50 000 \$ PAR ANNEE.....	136
	CONCLUSION GÉNÉRALE	139
	RAPPEL DE LA PROBLEMATIQUE	139
	APPORTS DE LA RECHERCHE	139
	PERSPECTIVES DE NOTRE THESE	140

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis les années 1970, le monde a connu une accélération des interconnexions entre les différentes zones géographiques du monde, ce qui est défini aujourd'hui sous le terme de mondialisation, qui résume tous les flux, capitaux, informations, technologies et biens au-delà du niveau national pour former une chaîne logistique globale. [1]

L'économie mondiale a aujourd'hui fait surmonter plusieurs barrières géographiques, technologiques et politiques, ce qui donne à la chaîne logistique mondiale la capacité de se développer de manière remarquable et d'ouvrir une nouvelle dimension telle que l'internationalisation de la production industrielle.

Alors que le monde a changé depuis 1970, le marché international se développe en raison de nombreux facteurs tels que l'évolution positive continue de l'économie mondiale et l'internationalisation de la production industrielle [2]. Cela se traduit par la demande croissante du service de transport maritime, qui a également connu une évolution sans précédente [2] en poussant la structure du transport maritime à se développer pour faire face à l'économie mondiale [3].

Pour cette raison, la structure du transport maritime est passée par plusieurs phases de transition, mais la phase la plus remarquable est la phase d'émergence du concept de conteneurisation, qui a clairement contribué à l'évolution du transport maritime [4].

Suite à la croissance de l'économie mondiale, le volume des échanges de marchandises en général augmente chaque année [2], qui soulève plusieurs défis pour le port maritime, parmi ces défis : la difficulté croissante de la gestion des conteneurs, le manque d'espace, la congestion aux points d'accès des ports maritimes, et les impacts environnementaux négatifs... Dans ce sens, le port sec vient comme la solution la plus appropriée pour faire face à ces défis, en transformant le port maritime à un système robuste et plus efficace, comme le système port sec port maritime PSPM [5]. Cependant, plusieurs questions se posent dans le cadre de notre système étudié, par exemple :

Quelles sont les définitions qui existent sur le port sec ? ; comment le concept de port sec a-t-il évolué dans le temps ? ; quels sont les avantages offerts par le système de port sec port maritime ? ; quels sont les fonctions et les acteurs du port sec ? Comment se développent les recherches sur le concept de port sec ? ; quels sont les thèmes ou les pistes de recherche qui sont entamés dans le cadre du système port sec port maritime ? ; quelles sont les méthodes utilisées dans chaque thème de recherche ? ; et quels sont les perspectives du système port sec port maritime dans le cadre de la quatrième révolution industrielle ?

Les réponses de ces questions nous ont conduits par la suite au thème de recherche de la gestion des risques dans le système PSPM. Selon les résultats de nos études on a constaté que malgré l'importance cruciale de ce thème de recherche il a été parmi les thèmes les moins traités, ce qui a fait apparaître d'autres questions dans notre étude à titre d'exemple : quelles sont les facteurs de risques existants dans le système port sec port maritime ? Quelles sont les méthodes déjà utilisées dans les recherches scientifiques pour traiter les risques dans les trois parties majeures (port maritime, rail et port sec) de notre système ? Quelles sont les parties critiques de notre système au niveau de gestion des risques ? Quels sont les méthodes et les outils utilisés dans chaque processus de gestion des risques ? Et dans le cadre de l'industrie 4.0 quels sont les algorithmes intelligents développés dans ce sens ?

Objectifs de recherche

Le présent travail vise à apporter les éléments de réponse à la problématique de la recherche et atteindre les objectifs suivants :

- Établir une revue littérature systématique afin d'avoir une vision claire sur le concept de port sec, les avantages offerts par ce concept, l'évolution de la recherche sur le concept, les thèmes de recherche existant ainsi l'évolution de ces thèmes de recherche ;
- Choisir une piste de recherche selon le résultat de la revue littérature. Dans notre cas, on a choisi la gestion des risques dans le système port sec port maritime ;
- Identifier les différents facteurs des risques qui existent dans notre système ;
- Identifier les méthodes et les outils utilisés pour traiter les risques dans le système PSPM ;
- Présenter une nouvelle plateforme d'aide à la décision multicritère pour l'évaluation des risques dans le système port sec port maritime ;
- Aligner notre étude avec les recherches réalisées dans le cadre de l'industrie 4.0 ;
- Et présenter une plateforme basée sur l'apprentissage automatique et les algorithmes d'intelligence artificielle dans l'objectif d'obtenir un système de prédiction des risques dynamique en appliquant ces algorithmes sur un des risques identifiés.

Méthodologie suivie

Notre méthodologie de recherche se base sur une revue littérature systématique afin de constituer une idée et une vision globale sur le thème de la recherche, par la suite on va essayer de comprendre et d'expliquer les problématiques sujets de la recherche, l'analyse profonde du résultat de revue littérature systématique nous a menés à développer un nouveau système d'évaluation des risques et nous avons proposé deux plateformes d'aide à la décision qui permettant de bien piloter évaluer et anticiper la possibilité des risques.

Organisation de la thèse

L'organisation de cette thèse suit une progression ordonnée. Ce document se décompose de quatre chapitres correspondants au cheminement de notre démarche scientifique.

Chapitre I, présente le contexte général de notre étude en citant les challenges de port maritime ainsi que la revue littérature systématique qui distingue les avantages du concept de port sec et l'évolution du concept de port sec.

Chapitre II, expose l'ensemble des facteurs de risque identifiés dans le système port sec port maritime et les méthodes utilisées pour la gestion des risques dans les trois parties du système dans le cadre des processus de gestion de risques.

Chapitre III, vise à évaluer les facteurs de risques du système proposé par une approche qui combine la méthode Delphi et la méthode multicritère AHP dans l'objectif de faciliter l'évaluation des risques dans les systèmes multicritères tel que le système port sec port maritime.

Chapitre IV, présente un système d'anticipation des risques à travers une plateforme qui combine le méta heuristique WOA et les réseaux de neurones formés par des algorithmes d'intelligence artificielle. Finalement, on compare la solution proposée avec les algorithmes connus dans ce domaine.

Liste de publication

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Nabil Lamii , Fatimazahra Bentaleb, Mouhsene Fri, Kaoutar Douaioui, Charif Mabrouki, El Alami Semma
Titre de la publication	Systematic Review of Literature on Dry Port - Concept Evolution
Année	2020
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	<i>Transactions on Maritime Science</i> , 2020, vol. 9, no 02, p. 248-270.
Base d'indexation	Web of Science

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Nabil Lamii , Fatimazahra Bentaleb, Mouhsene Fri, Charif Mabrouki, El Alami Semma
Titre de la publication	Use of Delphi-Ahp Method to Identify and Analyze Risks in Seaport Dry Port System
Année	2022
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	<i>Transactions on Maritime Science</i> , 2022, vol. 11, no 1, p. 185-206.
Base d'indexation	Web of science

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Nabil Lamii , Mouhsene Fri, Charif Mabrouki, and El Alami Semma
Titre de la publication	Using Artificial Neural Network Model for Berth Congestion Risk Prediction
Année	2022
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	IFAC-PapersOnLine (accepted)
Base d'indexation	Scopus

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Mouhsene Fri, Kaoutar Douaioui, Nabil Lamii , Charif Mabrouki, El Alami Semma
Titre de la publication	A hybrid framework for evaluating the performance of port container terminal operations: Moroccan case study
Année	2020
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	<i>Pomorstvo</i> , 2020, vol. 34, no 2, p. 261-269.
Base d'indexation	Web of Science

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Mouhsene Fri, Kaoutar Douaioui, Nabil Lamii , Charif Mabrouki, and El Alami Semma
Titre de la publication	A DEA-Based Hybrid Framework to Evaluate the Performance of Port Container
Année	2019
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development (pp. 1-12). Springer, Cham.
Base d'indexation	Springer

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Mouhsene Fri, Kaoutar Douaioui, Nabil Lamii , Charif Mabrouki, and El Alami Semma
Titre de la publication	Efficiency Analysis of Performance in Container Terminals, Case Study of Moroccan Ports
Année	2019
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	International Conference on Integrated Design and Production. Springer, Cham, 2019. p. 365-371.
Base d'indexation	Springer

Auteurs (mettre en gras le nom du candidat)	Mouhsene Fri, Kaoutar Douaioui, Nabil Lamii , Charif Mabrouki, and El Alami Semma
Titre de la publication	Evaluate the performance of port container using an hybrid framework.
Année	2019
Revue (Volume, N° première page – dernière page)	Embedded Systems and Artificial Intelligence. Springer, Singapore, 2020. p. 517-531
Base d'indexation	Springer

CHAPITRE 01. ÉTUDE D'ÉVOLUTION DU SYSTÈME « PORT SEC-PORT MARITIME PSPM »

Introduction

Indubitablement, le transport joue un rôle capital au sein de l'économie mondiale. Ce transport peut être réalisé en plusieurs modes ; le transport terrestre qui contient le transport routier et le transport ferroviaire, le transport fluvial ou maritime et le transport aérien. Le transport maritime a été pratiquement le plus utilisé vu ses nombreux avantages au niveau des couts et de capacité des cargaisons transportés. La gestion de toute activité du transport maritime relative à la partie terrestre est nommée la logistique portuaire. Ce chapitre vise à introduire la logistique portuaire et présenter le concept de port sec et son importance pour le port maritime, en étudiant une revue littérature systématique RLS qui illustre l'évolution du concept de port sec et la gestion des risques du système port sec - port maritime PSPM en général, et clarifier l'ensemble des thématiques de recherche existantes. Le chapitre est organisé de la façon suivante : la section 1 précise la valeur de la logistique portuaire au sein de la chaîne logistique globale. La section 2, présente les challenges de port maritime et une description claire du concept port sec et ses avantages pour le port maritime. La section 3 présente une RLS qui étudie l'évolution de la recherche scientifique au niveau du système PSPM, en illustrant les thèmes de recherches qui existent et les catégories de méthodes utilisées dans chaque thème, ensuite on cite les facteurs de risques identifiés dans notre RLS, ce qui va fournir une base pour les prochaines recherches dans les chapitres suivants.

1. Supply Chain Management et la logistique portuaire

Le concept de la logistique est issu du domaine militaire, puis il s'est propagé dans le monde industriel. Ce concept a connu une évolution rapide en tant que discipline au sein de la gestion des opérations. Supply Chain Management ou bien la gestion de la chaîne logistique globale à plusieurs définitions, Supply Chain Management est toutes activités nécessaires pour planifier, contrôler et exécuter le flux d'un produit depuis la matière première à la distribution aux couts minimaux. Or, jusqu'à aujourd'hui, le pourcentage des coûts logistiques du chiffre d'affaires reste élevé. Ce ratio se situe entre 10 % et 16 % du chiffre d'affaires dans les pays Européennes. Par contre, l'observatoire marocain de la compétitivité logistique estime ce taux en 2018 à 19,2 %. Ces coûts sont répartis selon les maillons de la chaîne logistique, la répartition de ces coûts par composant de la chaîne logistique est estimée par [6]- voir la figure 2.

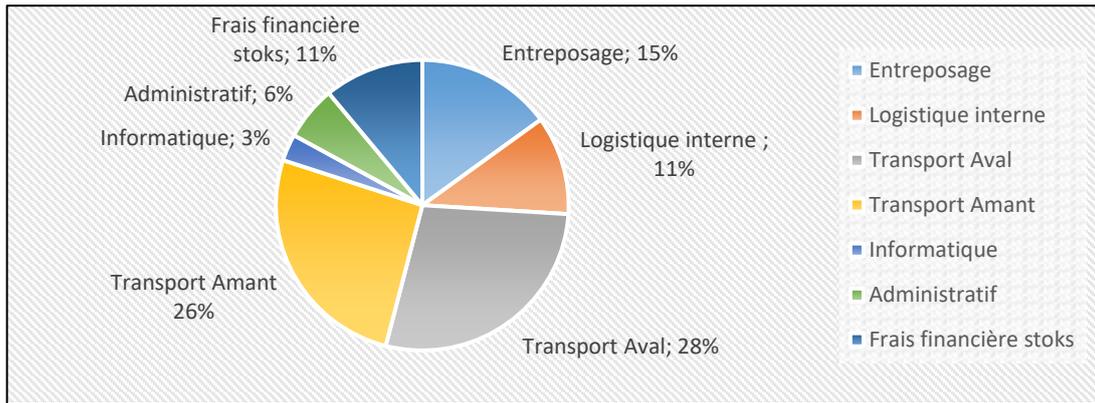


Figure 1 : Répartition du coût total de la logistique.

Le coût du transport représente un pourcentage très important dans la chaîne logistique comme indiqué dans la figure 1, ce qui signifie la minimisation du coût de transport, implique la réduction de plus que la moitié du coût total. Ainsi, 80 % de la marchandise se transporte à travers le transport maritime, cela revient à transporter 11 milliards tons de marchandise [7]. Ce qui rend le transport maritime le maillon critique de toute la chaîne logistique portuaire. La plupart des opérations de transport maritime se font au sein des ports ou bien des environnements portuaires.

1.1. Aperçu sur la logistique portuaire.

Une étude faite par l'entreprise ABB (Activity Based Budgeting) en 2015 (voir la figure 2) a comparé la capacité du chargement du navire « MSC Oscar » et les autres moyens de transport. Les résultats ont montré que pour transporter 19224 EVP [l'équivalent vingt pieds ("Twenty-foot Equivalent Unit", TEU en anglais)], il faut charger un seul navire de « MSC Oscar » ou 1100 avions « Boeing 747 » ou 35 trains de « 8000 ft » ou 9612 camions lourds.



Figure 2 : Étude comparative de la capacité de chargement entre navire, train et camion.

Cette étude comparative nous montre l'importance du transport maritime et la raison pour laquelle tous les pays adoptent et investissent dans ce domaine. Le transport maritime est une activité commerciale qui se base sur quatre piliers : i) Voie maritime, ii) Moyen de transport, iii) Marchandise et iv) Station d'activité.

1.1.1. Routes maritimes

Les routes maritimes dépendent des points d'étranglement maritimes, qui sont des emplacements stratégiques qui agissent comme des points de vérification. Les contraintes physiques (côtes, vents, courants marins, profondeur, récifs, glace) et les frontières politiques jouent également un rôle important dans la définition des routes maritimes. Les routes principales sont celles qui soutiennent les flux commerciaux les plus importants desservant les principaux marchés. Les routes secondaires sont principalement des liaisons entre des marchés plus petits. En raison de la géographie, de la géopolitique et des flux commerciaux, des emplacements spécifiques jouent un rôle stratégique dans le réseau maritime mondial. Ils sont identifiés comme des points d'étranglement et peuvent être classés en deux catégories principales :

1.1.1.1. Points d'étranglement primaires.

Points d'étranglement primaire sont des alternatives de transport maritime les plus critique. Sans eux, le délai et le coût de transport international seront gravement augmentés. Parmi ceux-ci figurent le canal de Panama, le canal de Suez, le détroit d'Ormuz, le détroit Bosphore, le détroit de Gibraltar, et le détroit de Malacca, qui sont des lieux clés du commerce mondial de marchandises et de produits de base.

1.1.1.2. Points d'étranglement secondaires.

Les points d'étranglement secondaires visent à soutenir les routes maritimes, mais impliqueraient tout de même un détour notable. Il s'agit notamment du passage Magellan, du détroit de Douvres, du détroit de la Sonde et du détroit de Taiwan.

1.1.2. Marchandises

Parmi les piliers de la logistique portuaire, on trouve la marchandise, cette dernière peut-être en vrac, en gaze ou bien solide. Ce pilier a été révolutionné par le phénomène de conteneurisation c'est-à-dire stocker la marchandise dans des conteneurs. Un conteneur et une caisse de dimensions normalisées utilisée pour la manutention, le stockage ou le transport de matières ou de lots d'objets dont elle permet de simplifier l'emballage (voir la figure 3).



Figure 3 : Exemple des conteneurs

Le principe de conteneurisation a été élaboré par l'entrepreneur 'Malcom McLean' en 1956 pour remédier au problème d'emballages, de la manutention, du stockage des avaries et le problème de vol. Ces avantages ont facilité le transport de marchandises, la figure 2 montre le volume l'évolution du transport de la marchandise conteneurisée.

Les conteneurs ont connu plusieurs stades de modification et de standardisation dans la forme et la fonction. Pour la forme, actuellement on trouve principalement deux types de conteneurs de 20 pieds et de 40 pieds. Dans les études statistiques on trouve l'unité TEU (« Twenty feet Equivalent Unit » équivalent Vingt Pieds –EVP–) 1EVP vaut un conteneur de 20 pieds. Les conteneurs les plus utilisés sont :

- DRY – Conteneur pour tous les usages.
- REEFER – Conteneur sous température contrôlée.
- CITERNE – Conteneur Citerne pour le vrac et le liquide.
- OPEN TOP – Conteneur à toit rétractable.
- FLAT RACK – Conteneur plateau.

1.1.3. Moyen de transport

Il dépend de la nature de chaque produit. Quatre types majeurs de navires peuvent être distingués : les rouliers, les porte-conteneurs, les vraquiers et les navires-citernes.

1.1.1.3. Rouliers

Roulier nommé aussi Ro-Ro, de l'anglais roll-on/roll-off la plupart des véhicules transportés sur l'eau sont faits à travers des rouliers. Ce navire est populaire pour transporter des véhicules parce qu'il est sûr et beaucoup plus rapide ;

1.1.1.4. Vraquiers

Destiné au transport de marchandises en vrac ou solides. Par exemple : le charbon, le grain et le minerai... etc.

1.1.1.5. Navires citernes

Les navires-citernes sont des navires qui portent essentiellement des quantités importantes de liquide. Ils peuvent porter une large gamme de liquides comme le pétrole, l'eau et d'autres produits chimiques. La capacité de ces bateaux arrive à plusieurs cent-mille tonnes. On distingue ces navires suivant le type de cargaison qu'ils transportent.

- Les pétroliers transportent le pétrole et ses dérivés.
- Les chimiquiers, dont les phosphoriques transportent des produits chimiques
- Les butaniers et les méthaniers transportent des gaz liquéfiés (butane, méthane) dans des cuves spécialement conçues pour résister aux fortes pressions.

1.1.1.6. Porte conteneurs

Les porte-conteneurs sont apparus en 1956 par l'adaptation de quatre navires pour porter de conteneurs afin de remédier à plusieurs problèmes de transport de marchandises. Après, les porte-conteneurs commencent à apparaître en masse et chaque fois avec des tailles plus énormes. La figure 4 présente les plus importantes évolutions des porte-conteneurs.

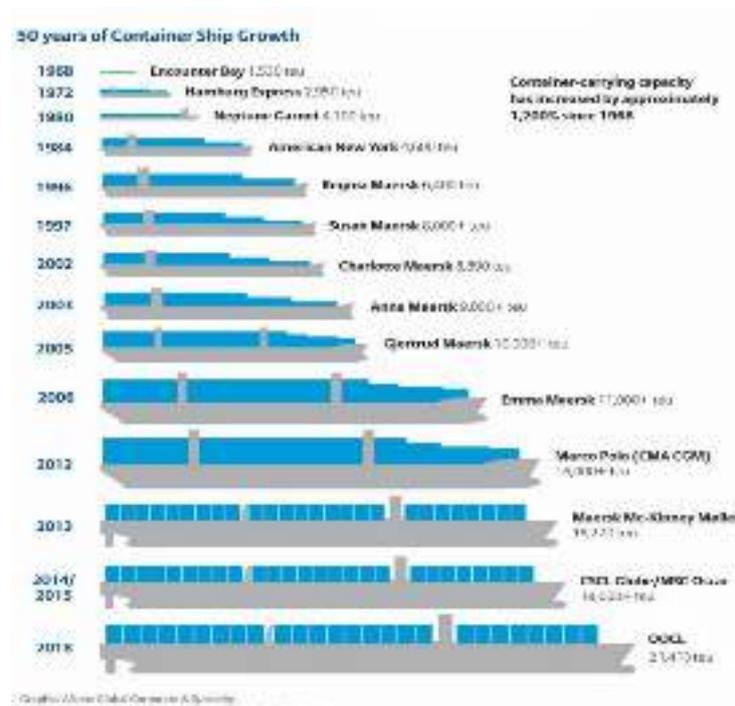


Figure 4 : Évolution de la capacité de chargement des navires

1.1.4. Ports maritimes

Les ports offrent les services de l'accostage, déchargement et la livraison pour l'importation ou les services la réception le chargement et l'appareillage, pour assurer ces services les ports sont conçus suivant une structure bien définie comme il montre la figure 5 :



Figure 5 : Exemple de port maritime

1.1.1.1. Darse

La darse est un bassin protégé par des môles contre les vagues violentes pour assurer un degré de stabilité d'eau afin que les navires n'entrent pas en collision. Plus la darse est grande en surface et en tirant d'eau plus elle peut accueillir des géants. L'accueil des bateaux dans la darse se diffère en fonction de la taille du bateau. Les petits bateaux se chargent eux-mêmes de s'accoster ou de s'appareiller. Les grands bateaux s'arrêtent près de la darse et les remorqueurs commencent l'accostage. Les remorqueurs sont de petits bateaux très puissants et facilement manœuvrables. Ils sont utilisés pour tirer les grands bateaux vers le quai pour les accoster, ainsi ils sont utilisés pour appareiller et pousser les grands bateaux hors la darse. La figure 5 présente la darse et le môle du port Tanger Med.

1.1.1.2. Quai

Le quai est la rive de la darse, là où les navires sont accostés et fixés à des aussières pour les empêcher de s'écartier, d'avancer ou de reculer. Plus que le port à des quais plus il peut accueillir des navires et plus que les quais sont plus longs, plus qu'il peut accueillir des géants. Il y a plusieurs entreprises qui élaborent des aussières pneumatiques plus flexibles afin d'amortir les chocs. La figure 6 présente les éléments clés pour l'accostage. Les quais des terminaux sont aussi équipés par des portiques de manutention pour lever les lourds conteneurs.



Figure 6 : Exemple de quai du port maritime

1.1.1.% Zone de stockage



Figure 7 : Zone de stockage d'un port maritime

La zone de stockage (figure 7) représente un espace consacré au stockage temporaire des différents types de conteneurs, la capacité de stockage de cette zone se différencie d'un port à un autre. On trouve aussi dans cette zone les différents engins nécessaires de manutention comme les ponts roulants, les élévateurs automoteurs de la manutention des conteneurs... etc.

1.1.1.1() terminaux* portuaires

Il existe plusieurs types de terminaux portuaires selon le type de cargaison à manutentionner et à stocker : i) Terminal de gaz liquéfiés, ii) Terminal des vrac, iii) Terminal roulier iv) Terminal à conteneur.

1.1.4.1.a. Terminal de gaz liquéfiés

C'est un espace réservé au stockage des produits gazeux. La forme naturelle de gaz occupe un grand volume. Pour remédier à cela, les gaz sont donc liquéfiés soit à très basse température, soit sous pression. Le combustible peut ainsi être exporté vers les marchés intéressés, pour ensuite reprendre sa forme gazeuse. Le stockage du gaz doit être fait dans des réservoirs capables de résister à une température de - 160 °C pour le conserver à l'état liquide. L'enveloppe extérieure des réservoirs est en béton armé précontraint ou en acier ainsi leur isolation doit limiter les évaporations.

1.1.4.1.b. Terminale des vracs solides.

Les chaînes d'approvisionnement de matières en vrac sec impliquent généralement un certain nombre de processus de transport qui sont interconnectés via des installations de stockage situées dans les terminaux de vrac sec dans les ports. Il existe deux différents types de terminaux de vrac sec ;

- Les terminaux d'exportation sont généralement situés dans les pays qui ont de vastes réserves de ressources minérales, comme l'Australie, le Brésil, l'Afrique du Sud et l'Inde.
- Les terminaux d'importation peuvent se trouver principalement dans les pays sans ces réserves ou qui nécessitent une importation nette de matériaux de base, notamment en Asie, en Europe occidentale et aux États-Unis

1.1.4.1.c. Terminal Roulier Ro-Ro

La plupart des ports contiennent les terminaux routiers, c'est un des terminaux principaux dans les ports. Ces infrastructures soutiennent principalement la chaîne logistique automobile, elles facilitent le chargement, déchargement, des camions tracteurs et voitures. Le temps de passage des navires rouliers au terminal routier est rapide par rapport aux autres terminaux.

1.1.4.1.d. Terminal à conteneur

Ce type de terminaux gère le flux le plus répandu, celui de marchandise conteneurisée. Il offre une réactivité et une performance plus élevée par exemple le temps de passage des porte-conteneurs est plus faible, cette structure permet d'offrir les différents services exigés dans les opérations d'import et d'export.

1.1.4.1.e. Portiques de manutention

Les portiques de manutention sont des machines pneumatiques de très grandes tailles. Il existe plusieurs technologies, innovations et applications dans le fonctionnement des portiques de manutention et surtout l'efficacité des portiques (rapidité, précision...). Plus les portiques de manutention sont nombreux et efficaces plus le chargement déchargement est rapide. La figure 8 présente deux portiques de manutention à Tanger Med.

Les portiques de manutention ainsi les grues se chargent de déplacement des conteneurs du quai au navire ou du navire au quai. Il y a toute une chaîne logistique inter modale pour amener les conteneurs au quai pour les charger ou pour dégager le quai pour les nouveaux conteneurs qui sont déchargés des navires. Ce réseau inter modal relie le quai et le yard.



Figure 8 : Exemple de portique

1.1.4.1.f. Yard

Le yard est une surface d'empilement des conteneurs, dans ce niveau se passe la réception et la livraison des conteneurs. La surface du yard est primordiale dans la rapidité du stockage des conteneurs, car plus la surface est grande plus qu'il peut accueillir plus de conteneurs et plus il est facile de les embarquer. Le choix de l'emplacement du conteneur se fait au niveau des portes du port qui présentent le dernier ou premier filet dans l'import ou l'export.

Les armateurs travaillent toujours sur l'amélioration de la capacité de ses ports, car plus le port est grand, rapide et efficace plus qu'il accueillera des navires et améliorera ses rentabilités. Les navigations peuvent durer plusieurs semaines ce qui oblige les navigateurs de prendre des repos de temps en temps pour se charger des fournitures ou parfois pour des actions de maintenance. Pour cela, on trouve plusieurs opérateurs portuaires qui offrent ces services.

1.1.5. Transport multimodal

La définition du transport multimodal a été largement discutée et étudiée par plusieurs auteurs [8]–[10]. [10] a défini le transport multimodal comme le transport des marchandises dans des unités qui peuvent être transbordées entre les différents modes de transport (par exemple, routier, ferroviaire, fluviale, maritime et aérien). Au moins deux modes de transport différents sont déployés lors du transport des marchandises [11].

Le transport multimodal joue un rôle primordial et capital au niveau de l'économie mondiale par son importance dans la chaîne logistique globale, à tous les niveaux industriels.

2. Description de l'environnement port sec-port maritime

2.1. Challenges de port maritime

Le port maritime représente un nœud très important dans la chaîne logistique globale. En général, avec la croissance du monde économique, la demande de services de transport maritime augmente considérablement [12] ce qui pose des défis pour le port maritime. Le tableau 1 cite les challenges du port maritime les plus importants.

De ce fait, il est normal d'accorder plus d'importance à l'évolution des ports maritimes qui devient de plus en plus critique [13]. Pour cela, la nécessité de développement de la performance des ports maritimes nous amène à découvrir le concept de port sec qui représente une solution adéquate aux problèmes des ports maritimes [5]. En d'autres termes, la compréhension des enjeux de port maritime nous amène à reconnaître la nécessité de port sec.

Tableau 1 : Les challenges de port maritime les plus importants

Les défis de port maritime	Les causes
Les difficultés de la gestion des marchandises aujourd'hui	<ul style="list-style-type: none"> - La croissance d'économie mondiale [1]. - L'évolution du trafic maritime [12].
Manque d'espace	<ul style="list-style-type: none"> - L'augmentation continue du volume des échanges de marchandises [12]. - L'augmentation de la conteneurisation et ses effets négative comme l'augmentation de nombre des conteneurs en souffrance [4]. - La croissance urbaine au niveau des bornes des ports maritimes. Ce qui empêche l'extension des ports. [14] - La séparation des différents types de marchandises pour garantir la sécurité (les marchandises dangereuses)[15] - Le nombre des conteneurs vides et les conteneurs abandonnés par leurs expéditeurs (les conteneurs en souffrance). [16]
Congestion au point d'accès de port maritime	<ul style="list-style-type: none"> - Le nombre important des conteneurs accueillis et expédiés en même temps. [5] - Le temps de chargement et déchargement. - Le nombre insuffisant des points d'accès au service de terminaux pour certains ports maritimes.
L'augmentation de cout de transport	<ul style="list-style-type: none"> - Le coût élevé des flux de transport entre les ports maritimes et les expéditeurs [17]
L'impact environnemental	Tant que le nombre des conteneurs transportés dans les routes augmente, le pourcentage de CO2 dans l'aire augmente. [17]–[19]

2.2. Etude de concept de port sec

Depuis l'apparition du concept de Port sec (Figure 9), plusieurs définitions ont été mentionnées par les auteurs [20]. Le tableau suivant illustre les définitions les plus citées :

Tableau 2 : Les définitions de port sec les plus citées

Source	Année	Définition de Port-Sec
[21]	1991	Par définition, les ports secs sont situés à l'extérieur des ports maritimes, mais ils sont directement liés au port maritime, en contact avec les sources des importations et la destination des exportations. Les ports secs peuvent être utilisés dans les pays ayant des ports maritimes ou les pays sans littoral (landlocked), mais seuls les modes de transport de surface sont impliqués dans l'accès.
[19]	2007	Le concept de port sec repose sur un port maritime directement connecté par chemin de fer à des terminaux intermodaux intérieurs où les expéditeurs peuvent poser et/ou retirer leurs marchandises dans des unités de chargement intermodales comme si elles se trouvaient directement dans le port maritime. [9]
[22]	2007	Un port sec est un port situé dans l'arrière-pays qui sert une région industrielle / commerciale reliée à un ou plusieurs ports par chemin de fer et/ou par route. Il offre des services spécialisés entre le port sec et les ports maritimes. Normalement, le port sec traite les conteneurs et il dispose toutes les installations logistiques nécessaires au transporteur et aux agents d'expédition dans un port.
[23]	2009	Le concept de port sec repose sur un port maritime directement connecté par chemin de fer à des terminaux intermodaux extérieurs, où les expéditeurs peuvent poser et/ou récupérer leurs unités standardisées comme si elles se trouvaient directement dans le port maritime.
[24]	2009	Un port sec peut être considéré comme un environnement intérieur doté d'installations de manutention permettant d'assurer plusieurs fonctions, par exemple la consolidation et la distribution des cargaisons, le stockage temporaire des conteneurs, le dédouanement, la connexion entre les différents modes de transport, l'agglomération d'institutions (privées et publiques) qui facilite les interactions entre les différentes parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement/ Supply Chain, etc.

[25]	2018	(Inland port) ou ports secs sont des installations, avec ou sans terminal intermodal et entreprises de logistique, qui sont directement reliées à un ou plusieurs ports maritimes dotés de moyens de transport de grande capacité, que ce soit par chemin de fer, par route ou par voie navigable, où les clients peuvent : poser / récupérer leurs unités standardisées comme si elles se dirigeaient directement vers un port maritime.
------	------	---

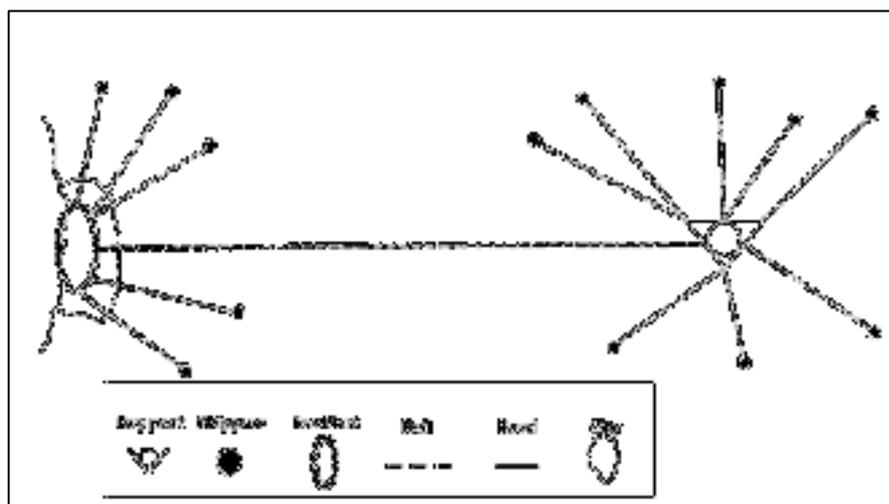


Figure 9 : Système port sec port maritime PSPM

2.2.1. Avantages du port sec :

Bien que l'implantation du port sec apporte plusieurs avantages sur le port maritime, mais les bénéfices ne se limitent pas juste sur les ports maritimes, ils touchent d'autres parties. Le tableau 3 met la lumière sur les bénéfices apportés par le port sec sur plusieurs secteurs :

Tableau 3 : Les avantages apportés par le port sec

Les avantages apportés par le port sec	
Port maritime	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la congestion au niveau des points d'accès de port maritime ; Faciliter la gestion des stocks ; Influencer positivement sur le coût du stockage ; Augmenter la capacité de stockage des marchandises ; Faciliter et augmenter la rapidité des services. Influencer positivement sur le cout de stockage ; Augmenter la capacité de gestion des marchandises ; Faciliter et augmenter la vitesse des services de port maritime ;
La ville de port maritime	Réduction de la congestion routière ;

Environnement	Réduire de transport routier qui assure la réduction de CO2 [18, p. 2] ;
Les expéditeurs	Réduire du cout de transport ; Possibilité de réduire du coût de stockage ; Faciliter l'accès aux ports maritimes ;
Pays (société)	Développer les flux du transport commercial [2] ; Augmenter les bénéfices pour les pays non bornés par la mer ; Augmenter le nombre de jobs dans les zones proches de port sec ;
Entreprises qui gèrent les trains	Fenêtre commerciale bénéfique ;

2.2.2. Fonctions principales de port sec :

En général, les fonctions du port sec sont similaires à celles du port maritime à l'exception des fonctions qui nécessite la connexion avec la partie mer. Elles sont remplacées par d'autres fonctions liées à d'autres moyens de transport, essentiellement le chemin de fer, mais parfois la voie navigable ou la route sont également prises en compte. La figure 10 présente les principales fonctions des ports secs.

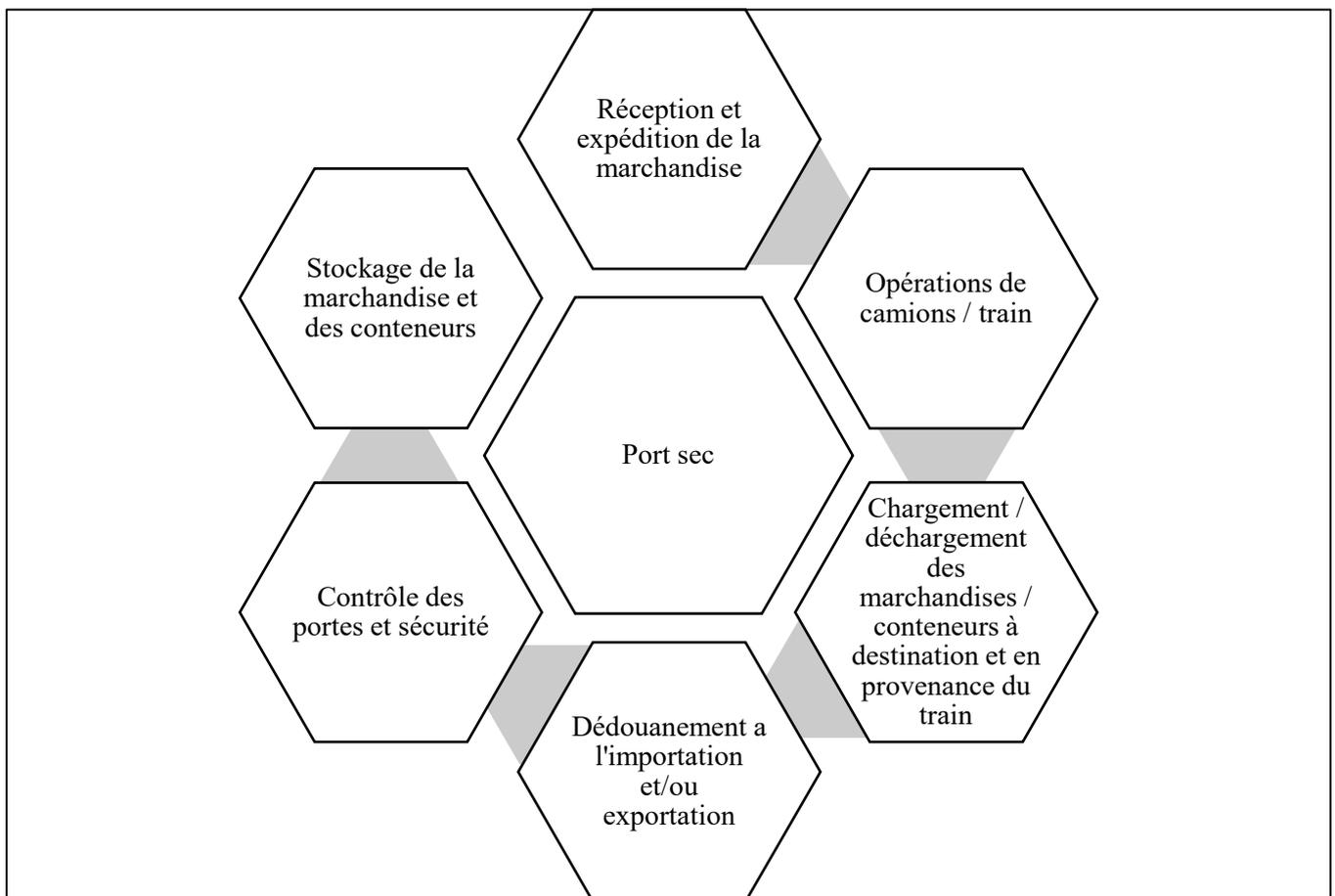


Figure 10 : Les fonctions principales du port sec [8]

2.2.3. Types de port sec :

Au niveau de port sec, il existe trois type port sec distant/lointain, port sec Milieu et port sec à proximité (figure 11). Chaque type a ses caractéristiques, mais le critère majeur de différenciation entre eux c'est la distance entre le port sec et le port maritime, le tableau 4 explique la particularité et l'avantage de chaque type.

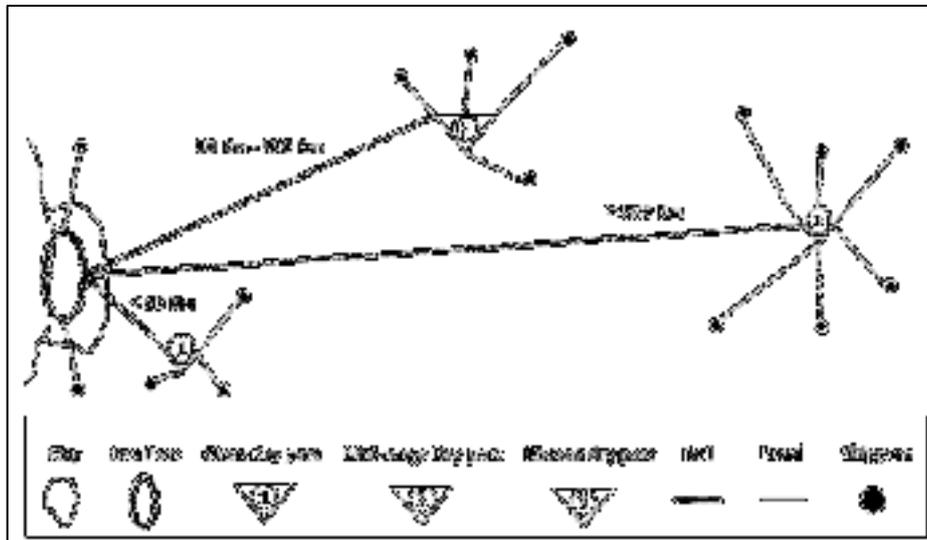


Figure 11 : Les type de port sec [26]–[28]

Tableau 4 : Les particularités et les avantages de chaque type

Type de port sec	Distance entre le port sec et le port maritime	Les avantages
Port sec distant / lointain	Plus que 500 kilomètres	-Transport sur de longues distances ; -Réduire la congestion du trafic [23] ; -Le facteur distance joue un rôle remarquable au niveau de la réduction des coûts de transport et l'impact négatif sur l'environnement. [9], [23], [26], [29], [30]
Port sec Milieu	Entre 100 et 500 kilomètres	-Réduire les coûts de transport [23] -Réduire la congestion du trafic ; -Avoir un impact positif sur l'environnement. -Représente un point efficace pour la consolidation [9], [30].
Port sec à proximité	Moins de 100 kilomètres	- Offrir un grand espace de stockage pour les ports maritimes ;[26], [29], [30] - Offrir de plus grandes possibilités de stockage des conteneurs autour du port maritime pour réduire le trafic local [29], [30]. -Offrir une consolidation du flux de transport vers et depuis le port maritime. [26]

2.2.4. Développements du cycle de vie du port sec

La première modélisation graphique du système port sec-port maritime remonte à 2011, lorsque [31] ont présenté un modèle qui clarifie l'évolution spatiale de la structure des relations entre le port sec et le port maritime (figure 12). Ce modèle présente deux types de connexions. Le développement (inside-out) le développement de la relation commence à partir de port sec, et (outside – in) ou le développement commence à partir de port maritime.

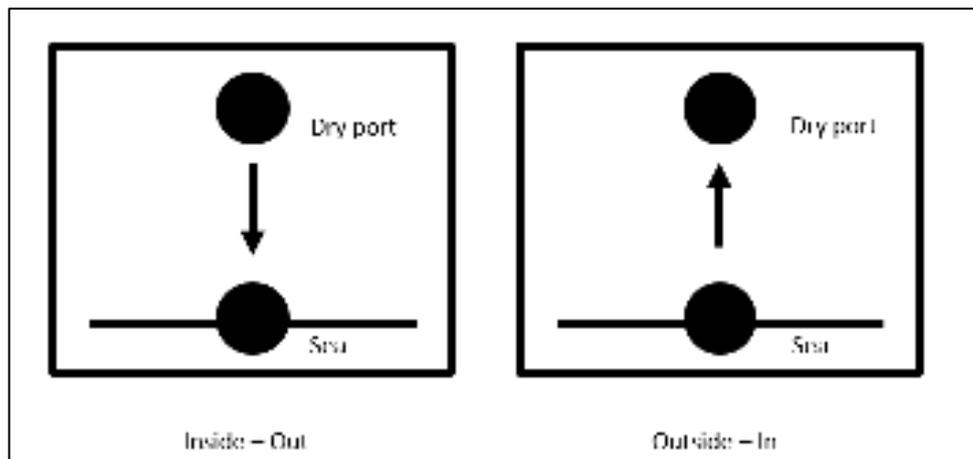


Figure 12 : L'évolution spatiale de la structure des relations entre le port sec et le port maritime [31]

En suite [29] a relié le modèle de [31] avec le facteur temporel pour donner un modèle qui se compose de trois phases : 1) Pre-phase, (2) Start-up phase and (3) Growth phase (Figure 13).

Préphase : C'est la phase de la création du port sec où plusieurs questions basiques se posent comme : est-ce que l'existence de port sec est importante ? Est-ce qu'il y a une infrastructure et une stratégie robuste qui supportent la création du port sec ?

Start-up phase : La phase de démarrage est l'ouverture qui est l'établissement de l'idée et la première étape dans la mise en œuvre des plans de port sec. À ce stade, les acteurs impliqués discutent du processus d'exécution.

Growth phase : La phase de croissance est le développement du port sec dans une direction opérationnelle, par exemple l'introduction d'une diversité d'activités à valeur ajoutée et la montée des relations entre les acteurs impliqués et le développement des infrastructures.

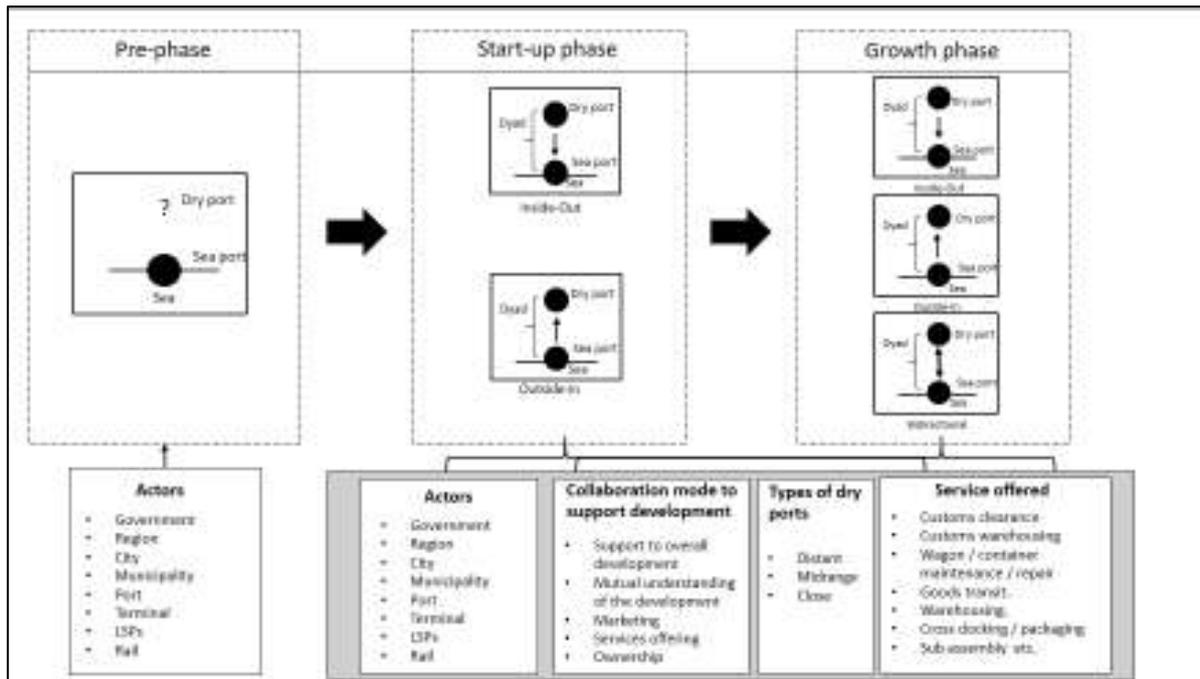


Figure 13 : La modélisation de développement de la relation port sec-port maritime selon [29]

En 2014 aussi c'était l'apparition d'un modèle présenté par [32] qui traite le cycle de vie de port sec en 5 phases (introduction, croissance, spécialisation, régionalisation, et la 5eme phase c'est une phase où il existe deux possibilités (déclin et recouvrement)) (figure 14).

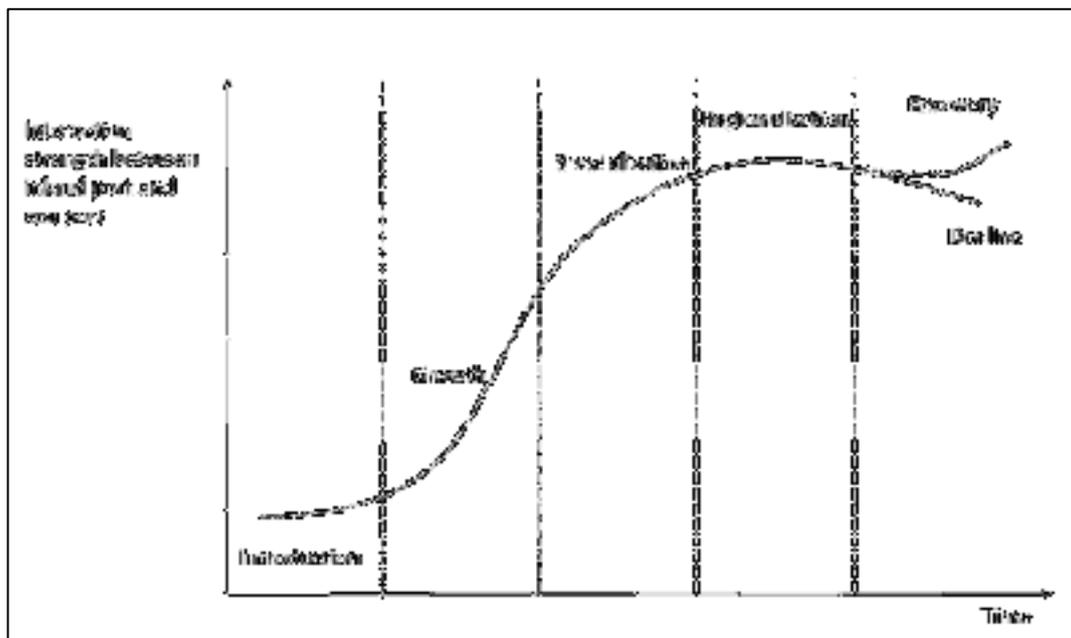


Figure 14 : Le cycle de vie de la relation port sec-port maritime selon [32]

En 2016, [33] appliquent la théorie du cycle de vie des produits de [34] au système port sec - port maritime (Figure 15), ce qui implique une description de ses phases comme suit :

1. **Phase de développement** : La reconnaissance du port sec dans la structure de transport est préparée. Les premières questions posées à ce stade concernent la nécessité du port sec. Les gestionnaires du port sec élaborent un plan de mise en œuvre. Ce plan doit définir les cibles et les objectifs du port sec à court, moyen et long terme.
2. **Phase d'introduction** : L'introduction d'une position de port sec dans le système de transport avec quelques services est terminée. Les activités sont élémentaires. La portée géographique est limitée à la ville adjacente.
3. **Phase de croissance** : Les services du port sec augmentent. La normalisation et l'innovation des processus sont abordées et mises en œuvre. Les régions dédiées des ports secs augmentent. Le port sec se développe dans le sens opérationnel.
 - a. Sous phase (3.1) : Inside-out ou Outside-in (le cas d'un port maritime avec plusieurs ports secs). Dans cette sous-phase, nous assistons au début de connexions limitées entre le port maritime et d'autres ports secs, ce qui représente un développement spatial d'un port maritime avec plusieurs ports secs.
 - b. Sous-phase (3.2) : développement bidirectionnel (le cas d'un port maritime avec plusieurs ports secs). Cette sous-phase représente la direction du développement opérationnel d'un port maritime avec plusieurs ports secs, comme le développement d'une variété de services à valeur ajoutée, qui rend la connexion entre le port maritime et les autres ports secs plus efficace.
4. **Phase de maturité** : L'activité du port sec augmente à un rythme plus lent. La concurrence sur le marché s'intensifie avec l'augmentation du nombre de ports secs. La concurrence externe augmente simultanément et proportionnellement à l'accroissement de la maturité. Cette phase comprend trois sous-phases, à savoir :
 - a. **Récupération** : réseau bidirectionnel (c'est-à-dire le cas de nombreux ports maritimes avec de nombreux ports secs). Cette sous-phase représente l'orientation opérationnelle du développement de nombreux ports maritimes avec nombreux ports secs.
 - b. **Déclin** : Elle se produit éventuellement lorsque l'on arrive au point des limites de la rationalisation réalisable ou lorsque le processus d'amélioration en général est atteint. Dans cette phase, nous pouvons annoncer le déclin de ce système, et peut-être qu'un nouveau concept sera créé, ce qui pourrait être une direction de la recherche future.

Le cycle de vie du concept de port sec aidera à rendre la recherche plus complète. Il nous donne projection future sur l'évolution de la relation port sec-port maritime

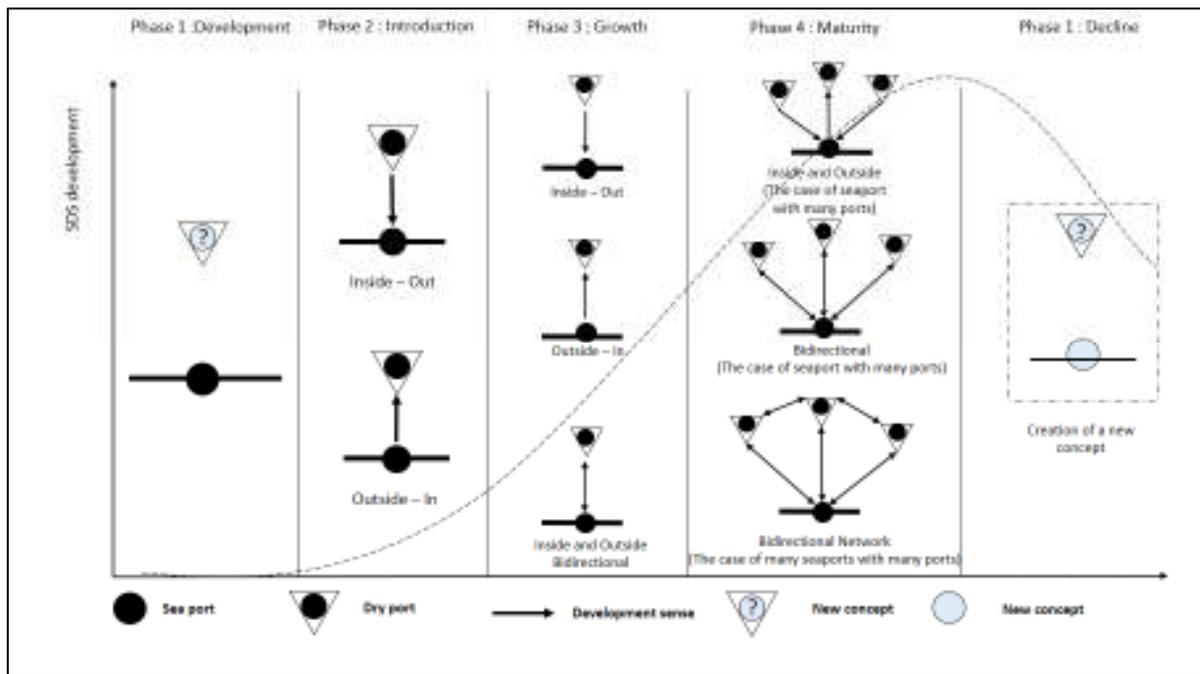


Figure 15 : Le cycle de vie de la relation port sec-port maritime selon [33]

3. Revue littérature systématique

L'objectif principal de cette revue littérature systématique RLS est d'avoir une vision globale du concept de port sec et ses avantages qui peuvent augmenter l'efficacité des services portuaires et de l'ensemble de la chaîne logistique. En plus, l'identification des facteurs de risques des trois parties majeures du système port sec – port maritime : port maritime, la connexion (chemin de fer) et le port sec (figure 9).

Pour cela, notre équipe de recherche a décidé de poser les questions cruciales dont leurs réponses vont assurer notre vision globale :

- Quelles sont les définitions existantes du concept de port sec ?
- Comment le concept de port sec a-t-il évolué au fil du temps ?
- Quels sont les fonctions et les acteurs du port sec ?
- Quels sont les avantages apportés par le système de port sec port maritime ?
- Comment la recherche sur le concept de port sec se développe ?
- Quelles sont les méthodes sur lesquelles la recherche se concentre lorsqu'elle traite du concept de port sec ?
- Quels sont les pays intéressés par le concept de port sec ?
- Quels sont les journaux scientifiques et les auteurs intéressés par le concept de port sec ?

- Quels sont les facteurs des risques possibles qu'on peut trouver dans notre système de port sec - port maritime ?
- Quelles sont les catégories de ces facteurs qu'on peut détecter dans notre système ?
- Quelle est la partie de notre système la plus traitée par les chercheurs au niveau de la gestion des risques ?
- Quelles sont les méthodes déjà utilisées pour la gestion des risques dans les différentes parties de notre système ?
- Quelles sont les méthodes qu'on peut utiliser dans chaque processus de gestion des risques ?

3.1. Méthodologie de la Revue littérature systématique

Répondre aux questions ci-dessus permettra une compréhension approfondie de notre concept de gestion des risques du système port sec – port maritime. Pour cela on a suivi une méthodologie revue littérature systématique qui se base sur sept étapes (figure 16) afin de garantir une compréhension approfondie du concept.

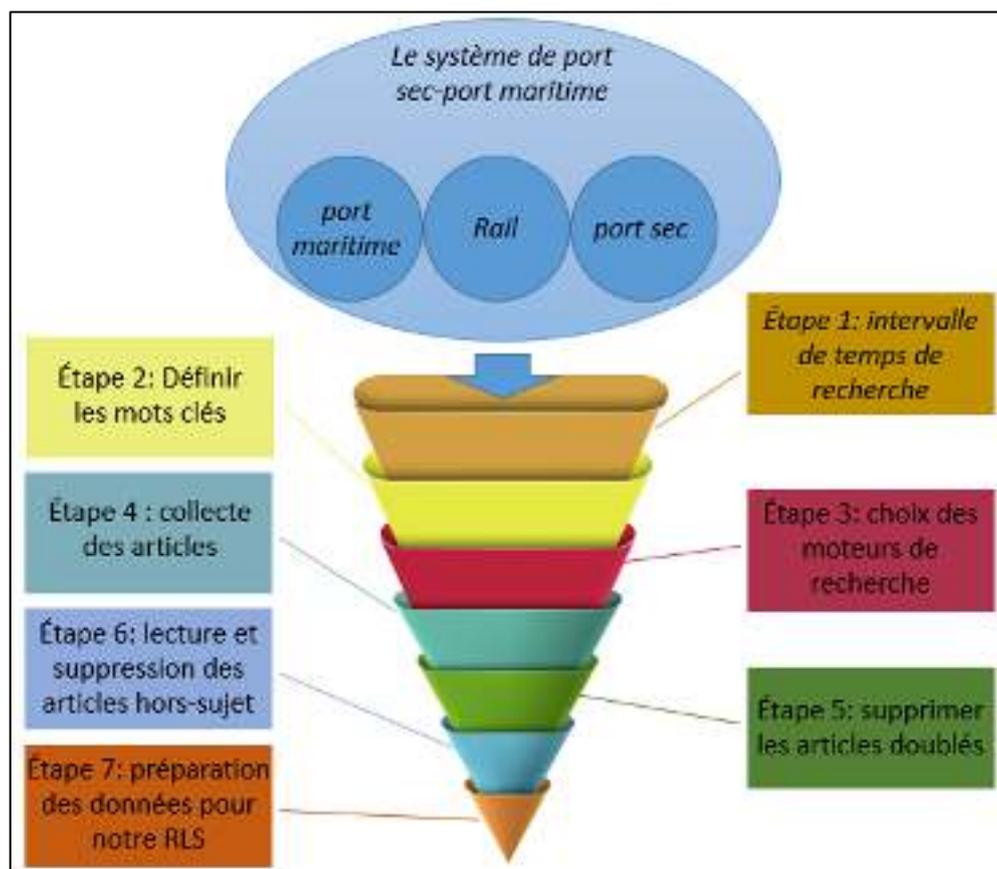


Figure 16 : Le processus de RLS

Étape 1 : Choisir l'intervalle de temps de notre RLS

Dans cette étape, nous avons choisi deux intervalles de temps, le premier allant de 1980 à 2020 en ce qui concerne le concept de port sec dans le but d'avoir la vision la plus globale possible sur le concept. Le

deuxième intervalle de temps de 2015 à 2021. Il s'agit ici d'avoir les derniers documents publiés sur la gestion des risques pour le système PSPM, et de limiter le nombre d'articles, car même avec cet intervalle de temps, la quantité d'articles collectés était énorme comme nous allons le voir dans les prochaines étapes.

Étape 2 : Définition des mots-clés

Les mots clés que nous avons choisis selon les objectifs de notre RLS sont : **Dry Port, Inland Port, Inland Intermodal Terminal, Maritime risk, Seaport risk, Seaport safety, Railway risk, Railway safety, Dry port risk et Dry Port safety.**

Étape 3 : Choix des moteurs de recherche

Le choix des moteurs de recherche dans la RLS reste une étape très importante. Dans notre cas, nous avons choisi sept moteurs, à savoir Web of Science, Science direct, Google Scholar, IEEE Explore, Taylor & Francis, et Springer link, afin d'agrandir le champ de recherche de l'analyse documentaire.

Étape 4 : Collecte des articles (2332 articles)

Dans cette étape, nous avons commencé la collecte d'articles avec deux conditions. La première condition : le document soit un article de journal indexé ou un chapitre (nous n'avons pas inclus les documents de conférence), et la deuxième condition : le titre et le résumé du document collecté soient liés à l'un des mots-clés choisis. Lorsque nous avons tapé un mot-clé dans les moteurs de recherche, chaque moteur de recherche affiche un certain nombre de résultats trouvés dans un nombre limité de pages. Le tableau 5 présente le nombre d'articles collectés dans chaque moteur de recherche dont les titres ou résumés se rapportent directement à l'une de nos trois grandes parties du système PSPM. Dans notre revue systématique de la littérature, nous avons dix mots clés et cinq moteurs de recherche, ce qui nous amène à un total de 2332 documents collectés.

Tableau 5 : Le nombre d'articles collectés dans chaque moteur de recherche

Mots clés	Moteurs de recherche	Articles collectés
Maritime risk	Science direct	252 articles
	Google scholar	119 articles
	IEEE	30 articles
	Taylor & Francis	21 articles
	Springer	36 articles
Seaport risk	Science direct	110 articles
	Google scholar	174 articles
	IEEE	5 articles
	Taylor & Francis	14 articles

	Springer	18 articles
Seaport safety	Science direct	84 articles
	Google scholar	128 articles
	IEEE	13 articles
	Taylor & Francis	10 articles
	Springer	23 articles
Railway risk	Science direct	265 articles
	Google scholar	191 articles
	IEEE	30 articles
	Taylor & Francis	29 articles
	Springer	63 articles
Railway safety	Science direct	277 articles
	Google scholar	199 articles
	IEEE	86 articles
	Taylor & Francis	24 articles
	Springer	89 articles
Dry port risk	Science direct	4 articles
	Google scholar	12 articles
	IEEE	3 articles
	Taylor & Francis	2 articles
	Springer	3 articles
Dry port safety	Science direct	3 articles
	Google scholar	8 articles
	IEEE	2 articles
	Taylor & Francis	2 articles
	Springer	3 articles
TOTAL		2332

Étape 5 : Suppression des articles en double (915 articles restants)

Les mots clés utilisés (Dry Port, Inland Port, Inland Intermodal Terminal, Maritime risk, Seaport risk, Seaport safety, Railway risk, Railway safety, Dry port risk, Dry Port safety) sont très proches en termes de sens, ce qui justifie le nombre élevé de documents dupliqués arrivés jusqu'à 39,2 % du nombre total de documents collectés. Dans cette étape, nous avons supprimé ces articles en double.

Étape 6 : Lecture des articles et élimination des articles hors sujet (376 articles éliminés)

Dans cette étape, nous avons deux conditions, la première est de vérifier la qualité des articles, et la deuxième condition nécessite une lecture précise de chaque article afin d'éliminer les articles hors sujet et les articles qui n'appartiennent pas au système port sec-port maritime, ce qui nous pousse à supprimer tous les articles qui traitent des risques maritimes hors zone portuaire et nous avons limité notre étude aux articles qui appartiennent aux trois grandes parties de notre système **port maritime, rail et port sec**. Au final, nous sommes arrivés à un total de 376 articles sélectionnés.

Étape 7 : Préparation des données sur la revue littérature systématique (376 articles)

Cette étape représente l'étape finale de notre processus de RLS, la tâche principale ici est de structurer les données collectées pour faciliter l'analyse, et fournir les réponses nécessaires à nos questions.

3.2. Résultats de RLS :

3.2.1. Évolution de la recherche

L'objectif de cette section est d'étudier l'évolution de la recherche du concept de port sec entre 1980 et 2020. Par conséquent, l'évolution de la publication des articles qui traitent le concept de port sec nous distingue trois phases majeures (Figure 17). La première phase entre 1980 et 2003. Dans cette première phase, le traitement du concept de port sec a été modeste ; nous pouvons expliquer cette réticence par la nouveauté du concept du port sec entre les chercheurs. La deuxième phase se situe entre 2004 et 2010. Elle représente un point d'évolution remarquable. Le nombre d'articles commence à augmenter clairement en raison de l'intérêt accru pour le rôle du port sec. Enfin, la troisième phase s'étend de 2011 à 2020. Dans cette phase, la production des articles liés au concept de port sec augmente de manière significative.

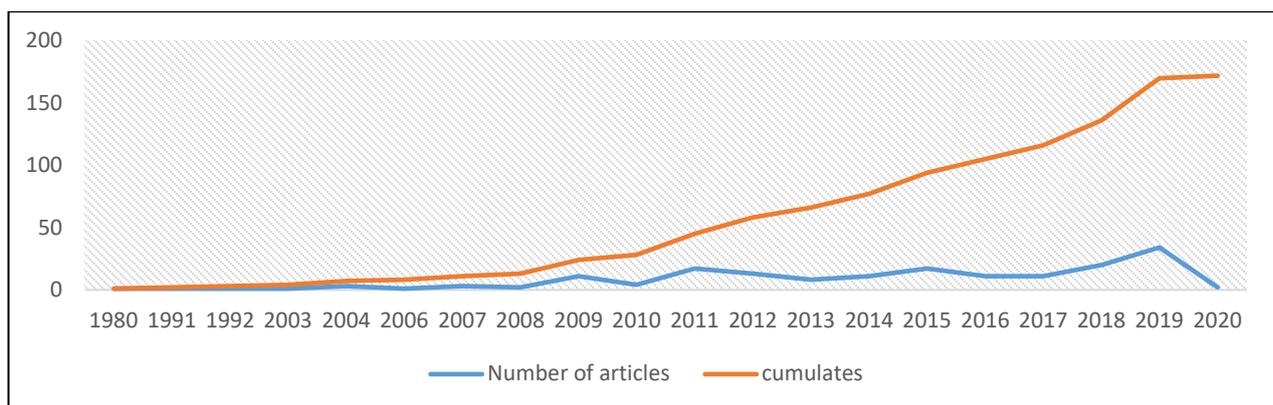


Figure 17 : L'évolution de la recherche du concept de port sec entre 1980 et début de 2020

Afin de bien clarifier la répartition de nos articles sélectionnés, la Figure 18 illustre comment les 376 articles sélectionnés dans notre RLS se composent de deux classes : 204 articles qui traitent la gestion des risques

dans le système PSPM en entier et 172 articles qui se focalisent juste sur le concept de port sec dont 9 articles représentent l'intersection entre les deux classes.

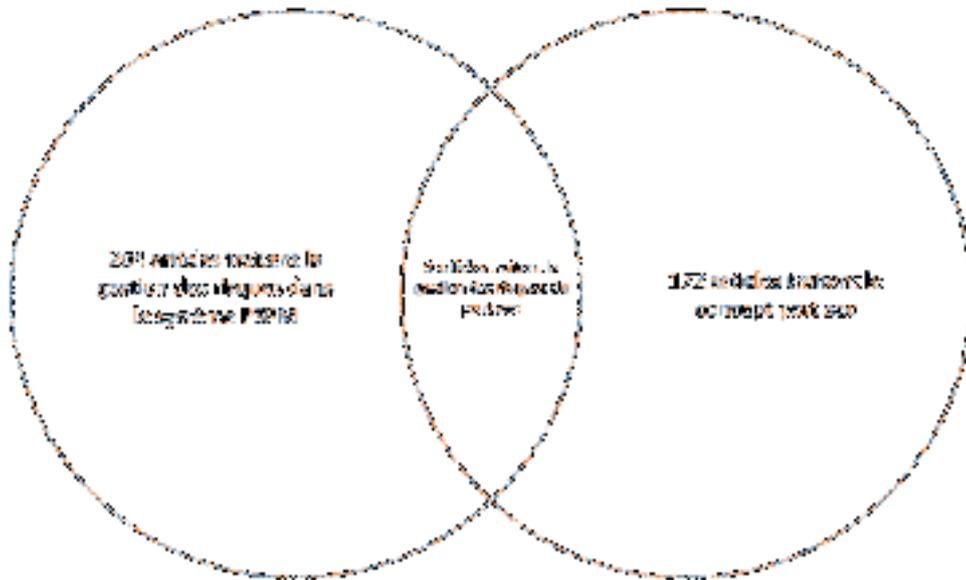


Figure 18 : La répartition des articles sélectionnés entre les articles qui traitent le concept de port sec et les articles qui traitent la gestion des risques dans le système PSPM en entier avec leur interaction.

De plus, la répartition de 204 articles qui traitent la gestion des risques dans le système PSPM sur ses trois parties. La figure 19 montre que 66 % des articles sont concentrés dans la partie rail, 39 % des articles dans la partie port maritime, 4 % des articles traitent plus qu'une partie à la fois, et seulement 1 % des articles traitent spécifiquement de la partie port sec... Il y a deux raisons derrière ce résultat, la première raison est la façon dont nous avons sélectionné nos articles. Nous avons nié la plupart des articles de la partie maritime, et nous nous sommes concentrés uniquement sur les articles qui traitent de l'opération et des activités à l'intérieur du port maritime. La deuxième raison est le nombre limité d'articles scientifiques qui traitent la gestion des risques dans les ports secs, ces deux raisons expliquent le pourcentage élevé d'articles qui traitent de la gestion des risques dans les rails (figure 19).

Ce résultat montre clairement l'écart dans le traitement de la gestion des risques au sein du système PSPM. Ce qui représente l'une des principales raisons de travailler sur cette piste de recherche.

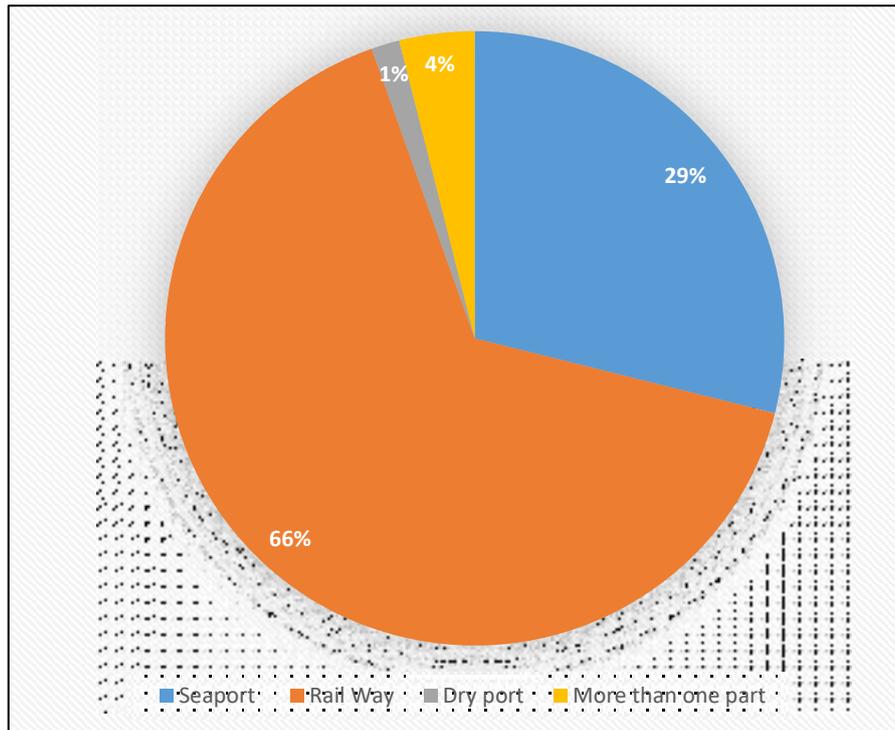


Figure 19 : Distribution d'articles sur les trois parties du système de port sec portuaire

3.2.2. Évolution des thèmes de recherche sur les ports secs

Nous avons procédé à une classification des articles sélectionnés en fonction de huit thèmes (voir figure 20) ces thèmes sont le résultat d'un brainstorming effectué par notre équipe de recherche afin d'établir les thèmes les plus importants que nous avons pu trouver dans notre revue littérature systématique RLS pour renforcer notre future recherche sur le système port sec-port maritime.

Le but de cette classification est d'avoir une vision sur les sujets ou thèmes les plus importants et les plus évalués dans les articles qui traitent le concept de port sec. Nous avons constaté que l'optimisation, la performance, le traitement du concept, la gestion de localisation, la durabilité, l'impact environnemental, la gestion des risques et l'impact financier sont les thèmes les plus importants dans notre revue littérature systématique.

De plus, nous pouvons noter que parfois nous avons trouvé plusieurs thèmes dans le même article par exemple [17] traite le concept du port sec, l'impact environnemental et l'impact financier.

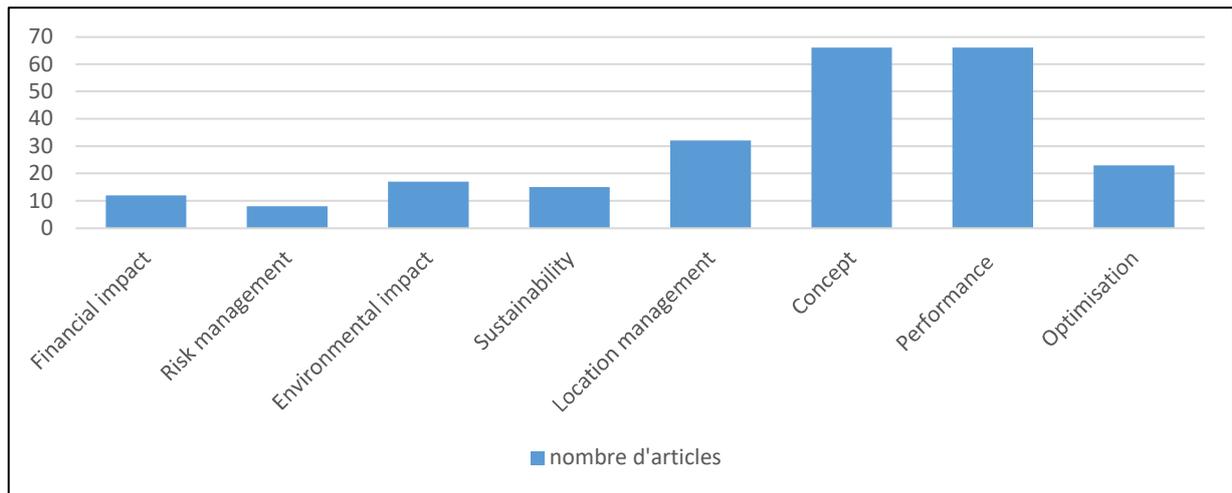


Figure 20 : La distribution des articles selon les thèmes de recherche.

Un exemple remarquable de ces thèmes c'est les articles qui évaluent la gestion de localisation, nous avons constaté que la plupart des critères utilisés sont : 1) Les critères économiques, qui se concentrent principalement sur la réduction du coût du transport, 2) les critères environnementaux qui illustrent l'impact positif de l'installation d'un port sec. 3) les critères géographiques ou spatiaux se concentrent sur l'accessibilité et la limitation d'espace pour les ports maritimes. 4) Les critères sociaux évaluent la disponibilité et le niveau de qualification de la main-d'œuvre, 5) les critères de la politique qui se concentre sur la politique du pays liée au lieu choisi et d'autres critères qui changent en fonction du contexte évalué dans l'article [33], [35]–[38]. En raison des critères multiples du problème de gestion de la localisation, nous avons remarqué que la plupart des articles ont traité la gestion de la localisation du port sec en utilisant des approches hybrides basées sur des méthodes MCDM (multi-critères de prise de décision) comme AHP, ELECTRE, ANP ou MACBETH [33], [36], [38]–[41].

Par la suite, nous avons réalisé une projection chronologique des thèmes, ce qui nous a donné une vision sur la progression temporelle de chaque thème dans notre revue littérature systématique. La figure 21 montre comment les articles qui traitent le concept de port sec ont été les articles les plus dominants. Cependant, après l'année 2010, le nombre d'articles qui touchent à l'aspect performance a augmenté d'une manière remarquable. Cela peut s'expliquer par un changement de l'angle de vision de la recherche. Au début, la recherche traitait le concept de manière générale ; ensuite, nous avons remarqué une domination des sujets qui traitent d'autres aspects de recherches sur le port sec, par exemple la performance du port sec.

La principale raison de cette évolution est qu'au début, le concept était ambigu et inconnu. Cependant, avec le temps, l'importance du port sec est devenue plus intéressante pour les chercheurs, qui ont révélé d'autres thèmes de recherche, par exemple la performance, dans [5], [42] ; la gestion de localisation, dans [43], [33], [36], [38]–[41], [44]...

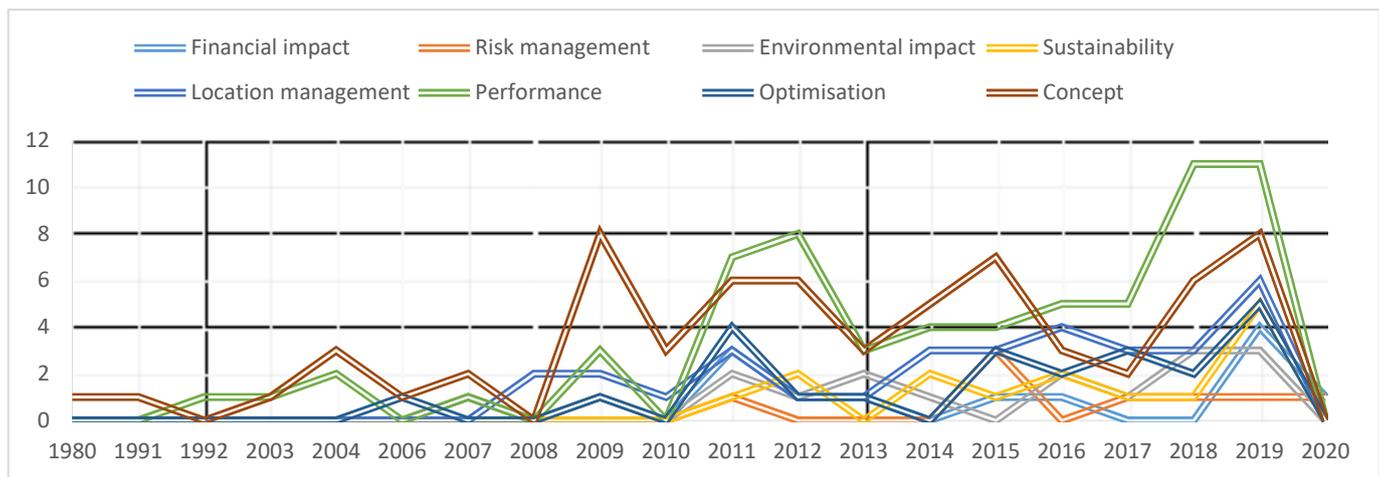


Figure 21 : L'évolution des thèmes de recherche.

3.2.3. Évolution des méthodes de recherche sur les ports secs

Dans cette section, une classification est faite selon huit catégories de méthodes (Tableau 6). Chaque catégorie représente un ensemble des méthodes utilisées. L'objectif c'est d'avoir une idée claire sur les méthodes utilisées par les auteurs des articles sélectionnés.

Tableau 6 : les catégories des méthodes de recherche.

Catégorie	Description de catégorie	Types des méthodes	Nombre d'articles
A	Articles entièrement consacrés à la revue de littérature (4 articles) Les articles contiennent des sections de revue de littérature ou sur des revues (69 articles)	Les revues littéraires ou les aperçus	73
B	Des études de cas, où le traitement s'est concentré sur un certain port sec, une région ou un pays précis.	Les études de cas	143
C	Articles utilisant des méthodes de modélisation graphique	Les modélisations graphiques	10
D	Les études qui se basent sur les entretiens, questionnaires ou brainstorming).	Les interviews et les réunions	58
E	Articles utilisant des méthodes de modélisation mathématique ou d'optimisation	Des modèles / méthodes mathématiques.	71
F	Etudes basées sur la base de données, des rapports ou des archives.	Étude d'historique	66
G	Articles basés sur des logiciels, des analyses numériques ou des langages informatiques. Par exemple, [45] présentent une simulation utilisant le logiciel Arena afin de simuler le port intérieur de Séville ; [46] ont utilisé un logiciel d'optimisation CPLEX dans leurs	Les systèmes informatiques tel que les logiciels ou les langages informatiques.	11

	recherches sur l'impact optimal du port sec sur l'environnement, etc.		
H	Articles contenant d'autres méthodes d'analyse	Autres méthodes d'analyse	14

En outre, nous avons réalisé une projection temporelle des ensembles de méthodes (figure 22). L'objectif est d'illustrer l'évolution des méthodes utilisées. De plus, comme nous pouvons le remarquer dans la Figure 22, la plupart des chercheurs relient leurs articles à une région, un pays ou un port sec précis (ensemble B) afin de donner à leur recherche une certaine légitimité, ce qui fait de l'ensemble B l'ensemble le plus dominant sur toute la période de la revue systématique de la littérature.

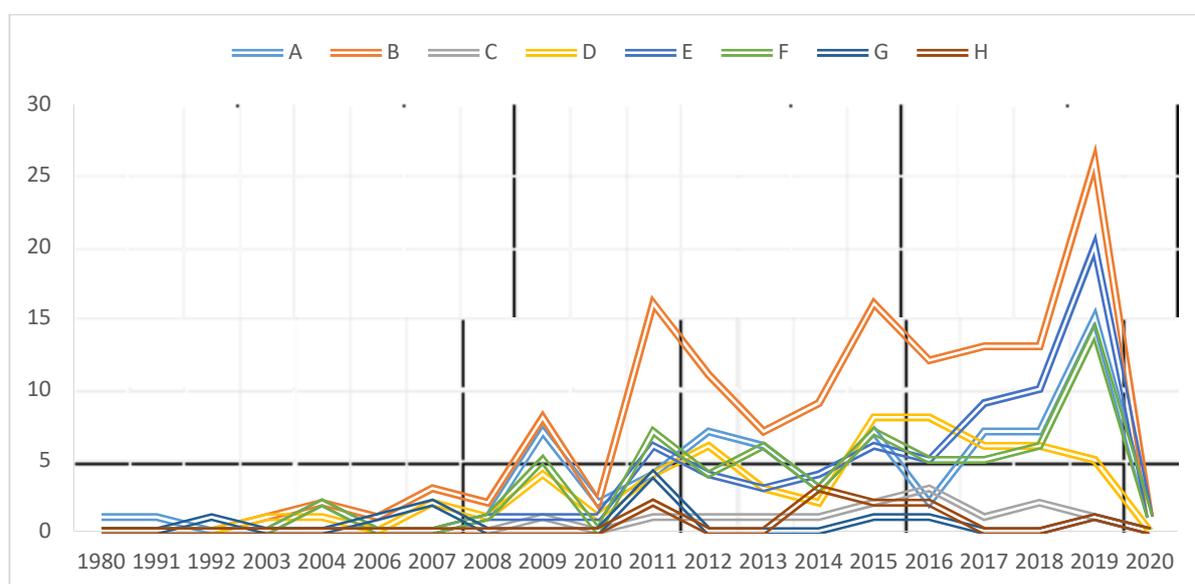


Figure 22 : L'évolution des méthodes utilisées au fil de temps.

En 2009, les ensembles de revues littéraires (A) des interviews/questionnaires (D) et des bases de données, archives ou rapports (F) se classent comme les méthodes les plus utilisées après l'ensemble d'études de cas (B). Ensuite, les autres ensembles de méthodes mathématiques (E), de logiciels ou de langages informatiques (G), de modélisation graphique (C), et l'ensemble de méthodes telles que SWOT/ benchmarking... (H) ont commencé à augmenter au fil du temps.

Nous pouvons expliquer cet ordre par la nature du développement des sujets de la figure 21. Afin d'apporter une clarification du concept de port sec, nous revenons à l'analyse documentaire et aux archives. Si nous voulons traiter de la performance du port sec ou de tout autre thème, nous utilisons des entretiens, des méthodes mathématiques et d'autres méthodes comme SWOT, la modélisation graphique, etc.

L'un des résultats les plus importants que nous avons remarqué à travers notre revue littérature systématique l'existence de quatre articles entièrement dédiés à la revue de la littérature sur les ports secs[5], [25], [47],

[48]. Chaque article nous donne un angle de vue différent sur le concept de port sec (tableau 7) en commençant en 2010 par [47]. Ils présentent une revue de littérature qui nous donne une vision claire du concept de port sec et des ports secs existants dans le monde, ce qui représente une bonne opportunité pour tout nouveau praticien ou chercheur qui souhaite commencer à découvrir le concept de port sec. Puis, en 2015, [5] nous donnent une revue littérature systématique basée sur cinq étapes : 1) définition du problème ; 2) sélection des revues sur la base de la période entre 1986 et 2015, en prenant en considération quatre moteurs de recherche (Jstor, Sciencedirect, Scopus et Google Scholar) ; 3) sélection des études ; 4) évaluation critique et 5) synthèses qui traite le concept de port sec. Les points les plus importants mentionnés sont : une bonne projection temporelle faite sur les papiers publiés ; distribution géographique des articles publiés, où ils nous donnent une idée sur le niveau d'intérêt des pays par rapport le concept de port sec...

Tableau 7 : Les revues littérature de port sec.

Revue littérature	Date	Période de la revue littérature	RLS Oui/ Non	Méthodologie de recherche	Les moteurs de recherche	Le nombre d'articles
Roso and Lumsden (2010)	2010	Non précisé	No	1) Liste des ports secs obtenus à partir de revues, documents de base Internet, conteneurisation internationale et World Cargo News. 2) Après avoir identifié la liste des ports secs, l'interview démarre sur les ports secs, sur la base d'enquêtes téléphoniques et de questionnaires envoyés aux emails. 3) Synthèse	Non précisé	Pas mentionné
Bentaleb et al.(2015c)	2015	1986 - 2015	Oui	1) définition du problème ; 2) sélection de journaux ; 3) sélection des études ; 4) évaluation critique ; 5) synthèse.	Jstor Sciencedirect Scopus Google Scholar	109
Rožić et al. (2016)	2016	1980 - 2015	No	Pas mentionné	Non précisé	Plus que 60
Witte et al. (2019)	2019	1992 - 2017	Oui	1) Définir différents critères de sélection pour l'inclusion ou l'exclusion des articles. 2) Une recherche systématique de la littérature scientifique basée sur les critères. 3) Analyse des articles et récupération des informations pertinentes pour la revue. 4) Analyse et synthèse des données effectuées.	www.scopus.com	80

Cependant, si l'on reprend toutes les revues de littérature trouvées jusqu'à présent sur le concept de port sec, dont cet article, on va remarquer qu'il y a quelques points communs, par exemple l'évolution du concept de port sec ou des articles publiés. En d'autres parts, toutes ces revues de littérature se complètent. Chaque article

donne un point de vue différent sur le concept de port sec : [47] donnent un bon aperçu des ports secs existants ;, [5] donnent le niveau de décision des articles entre 1986 et 2015, et une description géographique détaillée sur la recherche du concept de port sec. [48] ajoutent une description détaillée des méthodes et critères utilisés pour localiser le port sec. [25] illustrent les thèmes clés et les approches conceptuelles. Dans notre article, nous essayons de donner une autre vision des thèmes utilisés dans la recherche sur les ports secs. De plus, nous ajoutons un aperçu du cycle de vie du développement du port sec et nous essayons d'optimiser notre méthodologie systématique de recherche par les sept étapes mentionnées (figure 16). Par conséquent, nous recommandons à tous les futurs chercheurs ou praticiens de commencer par ces revues littéraires afin d'avoir une vision claire et complète sur ce concept intéressant qui est visiblement plus diversifié et beaucoup plus fertile.

3.2.4. Relation entre les thèmes et les méthodes

Un croisement entre les ensembles de méthodes et les thèmes de recherches a été réalisé pour avoir une vision claire des méthodes utilisées dans chaque thème (Figure 23), par exemple dans le thème « concept », nous avons constaté que le premier ensemble de méthodes utilisées est B (études de cas) afin de donner une légitimité et un aspect réaliste à la recherche dans ce thème. Ensuite, les ensembles A (revues littéraires) et F (retour aux archives) succèdent à l'ensemble B pour faire le lien entre le passé et le présent dans le traitement du concept de port sec.

Le même raisonnement vaut pour les autres thèmes afin de faire une vision claire sur les méthodes les plus utilisées dans chaque thème.

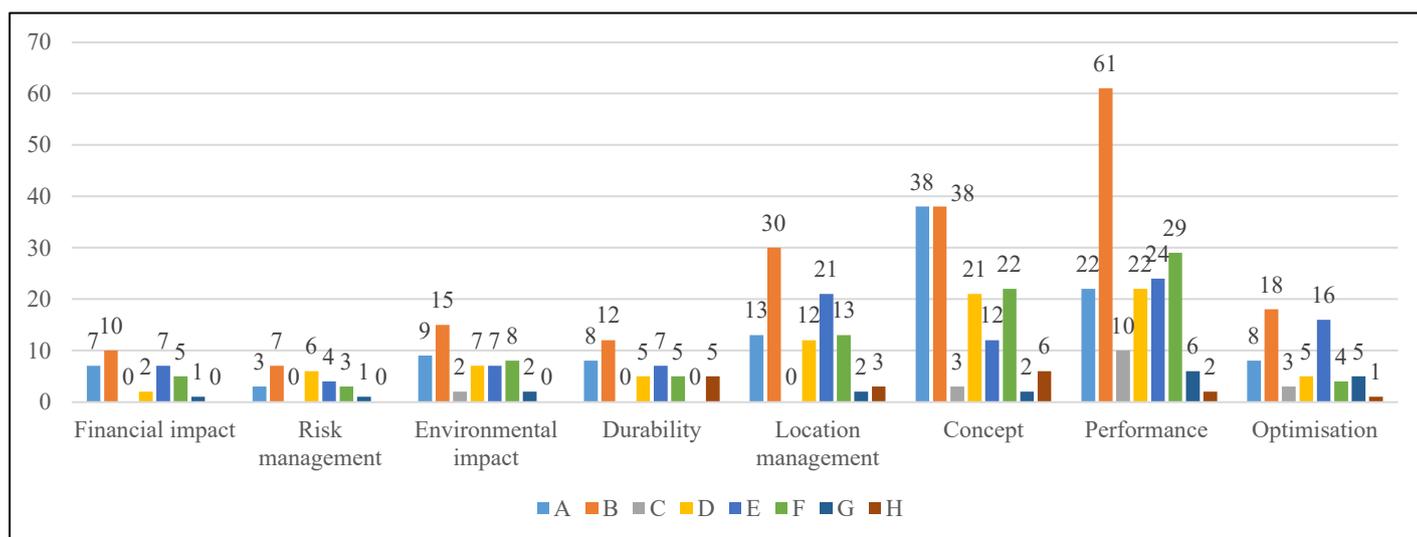


Figure 23 : Les méthodes utilisées dans chaque thème de recherche

3.2.5. Journaux et pays qui s'intéressent par le concept de port sec :

Dans cette section, l'objectif est d'identifier les journaux (tableau 8) et les pays (tableau 9) les plus productifs au niveau des articles scientifiques qui traitent le concept de port sec. Nous avons effectué une classification des journaux et des pays selon le nombre d'articles sélectionnés dans notre RLS.

Tableau 8 : Classification des journaux selon le nombre des articles publiés

Journaux	Nombre d'articles
Journal of Transport Geography	15
Maritime Policy and Management	12
Maritime Economics and Logistics	9
Research in Transportation Economics	9
Transportation Research Part E	7
Research in Transportation Business and Management	6
Procedia - Social and Behavioral Sciences	5
Sustainability	5
The Asian journal of shipping and logistics	5
Transportation Research Part A	4

Tableau 9 : Classification des pays selon le nombre des articles publiés

Pays	Tous les auteurs d'article appartiennent au même pays	Les articles dont les auteurs n'appartiennent pas au même pays	Le nombre total des articles
Chine	31	16	47
Suède	9	8	17
USA	7	9	16
Pays-bas	8	7	15
UK	4	10	14
Espagne	10	2	12
Itali	8	1	9
Australi	4	4	8
Belgique	2	6	8
Maroc	5	0	5
Canada	2	3	5
Croatie	2	3	5
Finlande	3	2	5
Malaisie	4	1	5
Chili	0	4	4
France	2	2	4

Allmand	2	2	4
Singapour	2	2	4
Tchéquie	3	0	3
Inde	3	0	3
Russie	3	0	3

3.2.6. Recueil des facteurs de risque dans le système PSPM :

En basant sur les 204 articles de gestion de risques, nous avons identifié tous les facteurs de risque trouvés, et nous avons essayé de les classer selon différentes catégories de facteurs de risque :

1) Les facteurs des risques qui peuvent être causés par l'homme comme : le manque des compétences professionnelles [49], une réaction inappropriée aux erreurs [50] ou le non-respect de certaines procédures [51].

2) Facteurs des risques qui peuvent avoir une influence négative sur l'environnement [52].

3) Facteurs des risques qui peuvent être classés dans le cadre de la sécurité tels que la contrebande [50], [53], les attentats terroristes [54], [55], [53] ou autres crimes [56].

4) Facteurs de risques naturels comme les inondations [50], [57], les vents de travers forts [58] ou les tremblements de terre [54], [55], [50].

5) Facteurs organisationnels causés par le manque de bonnes procédures d'organisation comme la congestion des quais [55], [54], [59], [60] et la congestion des zones de stockage [54] [55] [53] [59], [61].

6) Facteurs de risque opérationnel qui contiennent des facteurs liés aux opérations du système PSPM, tels que la défaillance de l'équipement [51] ou le déversement du bon de transport [55].

7) Facteurs de risques techniques tels que le manque d'entretien des équipements [54].

8) Facteurs de risque économiques comme la fraude commerciale [62] Les prix du pétrole qui augmentent brusquement [59].

Les tableaux 10, 11 et 12 représentent les différents facteurs trouvés dans notre RLS selon leurs catégories.

Tableau 10 : Les risques identifiés dans la partie de port maritime.

	Seaport	References
Human risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Lack of professional skills. - Working concentration. - Misinterpretation of Instructions at Workplace - Safety culture /Climate - Inadequate compliance of standards. - Sinking - Unsuitable reaction on errors - Not following instruction 	[49], [53], [63] [50], [50], [64], [65],[54] [55] [51]..
Environment risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Air pollution - Noise pollution - Chemical contaminants - Grounded ship impact - Salvage activities 	[50], [66].
Security risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Sabotage - Vandalism - Terrorism attacks - Arson and purposed fire. - Illegal trade - Illegal immigration - Theft - War - Political instability - Blockade - Falsification of documents - Hack of security system 	[54] [55] [67] [50]. [68] [69], [70]. [53]
Natural risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Earthquakes - Strong wind - Heavy rain - Fog - Wave height - Tide 	[54] [55] [50]. [57], [71], [72]. [73] [74]

	<ul style="list-style-type: none"> - Hurricane and cyclones risk - Floods - High Temperature during working hours - Pandemic 	
Organizational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Storage area congestion - Error in cargo handling and storage. - Lack of inspections and lack of monitoring and checking - Poor change management - Pressure and fatigue - Strike - Inadequate standards - Poor error management - Deliver the wrong container. - Berth congestion - Lack of equipment - Lack of standards 	<p>[54] [55] [53] [59], [61]. [50] [75]. [49]. [76]</p> <p>[51] [77] [78]. [44], [59]. [60] [59], [79].</p>
Operational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Seaport equipment collision during operations - Container damage - Cargo waste. - Cargo/good damage during port loading/unloading - Hazardous goods spilling - Seaport equipment failures during operations - Worker death during operations. - Worker injured during operations - Vessel collision. - Mooring operation fails 	<p>[54][50] [55]. [62]. [80]. [49] [79], [81], [82].</p>
Technical risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Stopping temporary of information system caused by a technical - Information delay - Power outage - Poor functioning of dry port equipment - Poor lighting visibility - Seaport equipment breakdown 	<p>[59][50] [54] [55] [67], [83]. [53]. [59] [49].</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - Breakdown of seaport information systems. - The berth's length 	
Economic risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Cost of evaluation / maintenance equipment (more than expected) - Global economic transformations. (crises) - Commercial fraud - Load / Unload loss. - Economic loss because natural hazard - Customer refuses to pay - Customer unable to pay 	[84]. [62]. [85]

Tableau 11 : les risques identifiés dans la partie de rail.

	Railway	References
Human risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Lack of professional skills - Working concentration. - Misinterpretation of Instructions at Workplace. - Safety culture /Climate - Inadequate compliance of standards. - Impact of suicides on railway workers - Unsuitable reaction on errors - Not following instruction - Level crossings / Pedestrian fatalities -Risky driving behavior 	<p>[51] [86] [56] [87] [88] [89] [90] [91] [92] [93] [94] [95] [96]. [97]. [98] [99] [100] [101] [102] [103] [104] [105] [106] [107] [108] [109] [110] [111] [112]. [113].</p>
Environment risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Noise pollution - Dangerous of goods transportation on the environment - Collision between train and animals 	<p>[114], [115], [115]. [116] [67], [117], [118]. [119].</p>
Security risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Sabotage - Vandalism - Terrorism attacks - Arson and purposed fire. - Theft 	<p>[67]. [120].</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - War - Political instability - Collision between trains (caused other train) 	
Natural risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Earthquakes - Strong wind - Heavy rain - Fog - Hurricane and cyclones risk - High temperature during work - Pandemic - Rock fall hazard 	[51] [121] [122] [123]. [124] [125] [126], [127]. [128] [129], [130]. [58] [131], [132]
Organizational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Poor change management - Pressure and fatigue - Strike - Inadequate standards - Poor error management - Bad train scheduling 	[76] [51] [77] [78] [56].
Operational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Containers Fall from trains - Cargo waste during transportation - Cargo/good damage during transportation - Container damage during transportation - Hazardous goods spilling 	[133] [51], [134] [89] [135] [136] [137] [105] [106] [138] [67], [139].
Technical risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Information delay. - Power outage - Poor Lighting visibility - Technical issue in railway turnout systems - SPAD (Signal Passed at Danger) risk due to technical factors - Derailment due to technic reasons Unavailable train (technical problems) 	[51] [89] [140]. [141]. [142] [143] [144] [124] [145] [77]. [97] [146] [147] [148], [149].
Economic risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Cost of evaluation / maintenance equipment (more than expected) - Economic loss because natural hazard 	[150]. [127].

Tableau 12 : Les risques identifiés dans la partie de port sec.

	Dry port	
Human risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Lack of professional skills - Working concentration - Misinterpretation of Instructions at Workplace - Safety climate - Inadequate compliance of standards - Unsuitable reaction on errors - Not following instruction 	
Environment risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Air pollution - Noise pollution - Chemical contamination 	[67], [151].
Security risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Sabotage - Vandalism - Terrorism attacks - Arson and purposed fire. - Illegal trade - Illegal immigration - Theft - War - Political instability - Blockade - Falsification of documents - Hack of security system 	
Natural risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Earthquakes - Strong wind. - Heavy rain - Fog - Hurricane and cyclones risk - High temperature during work. - Pandemic 	[152]

Organizational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Storage area congestion - Error in cargo handling and storage - Lack of inspections/Lack of monitoring and checking - Poor change management - Pressure and Fatigue - Strike. - Inadequate standards - Poor error management - Deliver the wrong container - Lack of equipment - Lack of standards 	<p>[152]. [153]. [44] [67].</p>
Operational risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Dry Port equipment collision during operations - Container damage - Cargo waste - Cargo/good damage during port loading/unloading - Hazardous goods spilling - Dry Port equipment failures during operations - Worker death during operational operations. - Workers injured during operational operations 	<p>[153]. [152]. [67] [154] [123].</p>
Technical risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Stopping temporary of information system caused by a technical - Information delay - Power outage - Poor functioning of dry port equipment - Poor lighting visibility - Dry port equipment breakdown - Breakdown of dry port information systems 	<p>[67], [155].</p>
Economic risk factors	<ul style="list-style-type: none"> - Cost of evaluation / maintenance equipment (more than expected) - Global economic transformations (crises) - Commercial fraud - Load / Unload loss - Economic loss because natural hazard 	<p>[67].</p>

	<ul style="list-style-type: none"> - Customer refuses to pay - Customer unable to pay 	
--	---	--

Le tableau ci-dessus rassemble l'ensemble des facteurs des risques identifiés dans la RLS, selon les huit catégories de risque mentionnées.

Conclusion

Aujourd'hui, le concept de port sec est passé d'un simple point d'échange à une véritable solution pour le transport maritime et toute la chaîne logistique. Les études et les recherches sur ce concept ont également évolué d'une manière similaire. Evidemment, nous avons découvert que le système PSPM est devenu un sujet très intéressant en raison de sa contribution importante dans le transport intermodal et de ses avantages qu'il peut ajouter à la gestion de la chaîne logistique globale. De plus en plus, le concept est devenu attractif pour la communauté scientifique vue les perspectives offertes. Cette évolution a généré un certain nombre d'implications en ce qui concerne le rôle et les fonctions du port sec. La dernière période de recherche sur les définitions du thème du port sec a montré que le concept est visiblement beaucoup plus fertile que prévu.

Dans notre RLS nous avons organisé le concept à différents niveaux d'investigation. Sur la base de l'évolution et de la recherche, dont nous pouvons distinguer trois phases principales (figure 17). Cependant, comme nous le remarquons dans cette RLS, malgré le développement de la recherche, certains sujets n'ont pas été pris en compte de manière adéquate, par exemple la gestion des risques, l'impact environnemental ou l'influence financière du port sec. Pour cette raison, notre équipe de recherche a choisi la piste de recherche de la gestion des risques dans le système port sec-port maritime. Ce choix se présente suite à une réflexion collective qui se base sur deux facteurs raisonnables : 1) le sujet de gestion des risques représente un pilier très important dans n'importe quelle chaîne logistique ; 2) la gestion des risques est parmi les thèmes les moins traités au niveau du système port sec-port maritime par les chercheurs selon les résultats de notre RLS ce qui représente un gap à couvrir.

Dans ce chapitre nous avons réalisé une RLS sur : 1/ l'évolution du concept de port sec afin de montrer ses avantages et les opportunités qu'il offre, 2/ la gestion des risques dans le système PSPM dans le but d'identifier les risques qui existent dans le système et offrir une base riche de nos prochaines recherches. On outre le chapitre suivant présente l'ensemble des méthodes de gestion des risques utilisées par les chercheurs dans le cadre du système PSPM et les emplacement de chaque méthodes dans le processus de gestion de risque de PMI [156].

CHAPITRE 02. LES MÉTHODES DE LA GESTION DES RISQUES UTILISÉES DANS SYSTÈME PORT SEC-PORT MARITIME

Introduction

Comme le chapitre précédent le montre, le concept de port sec a attiré l'attention des chercheurs ces dernières années [25], en raison des services et des solutions qu'il peut offrir pour faire face à certains défis auxquels le port maritime est confronté, comme le manque d'espace [4], la congestion aux points d'accès des ports maritimes [30] et l'impact négatif sur l'environnement [17], [19]...

Cependant, même avec le nombre croissant d'articles publiés chaque année traitant du concept de port sec [25], seuls quelques articles prennent en considération la question de la gestion des risques. Pour combler cette lacune, dans notre RLS nous avons focalisé aussi sur la gestion des risques dans le système PSPM, afin d'avoir une idée globale sur les facteurs des risques encourus dans chaque partie du système PSPM.

La gestion des risques reste un pilier essentiel dans toute entreprise/organisation [50], c'est pourquoi les décideurs prennent au sérieux la question d'identification, d'analyse et du contrôle des risques, en raison de l'impact énorme qui peut être causé par ces risques. Pour cette raison, dans cette recherche, nous nous basons sur les processus de PMI [156] de la gestion des risques (1. Planifier la gestion des risques, 2. Identifier les risques, 3. Analyser qualitativement des risques, 4. Analyser quantitativement des risques, 5. Planifier les réponses aux risques, 6. Mettre en œuvre les réponses aux risques et 7. Surveiller et contrôler les risques.), afin de classer les méthodes trouvées dans notre RLS dans chaque processus, ce qui nous donne une illustration sur quelles méthodes nous pouvons utiliser dans chaque processus afin de pouvoir gérer les risques dans le système PSPM ou d'autres systèmes similaires.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans la section 1, nous avons défini brièvement les processus de la gestion des risques selon PMI [156], dans la section 2, nous avons présenté une description détaillée de chaque méthode utilisée dans la gestion de risques du système PSPM, et dans la section 3, nous avons lié les méthodes trouvées avec leurs rôles et leurs emplacements dans le processus de gestion de risques de PMI [156].

1. Processus de gestion des risques

Dans cette section, on explique les différents processus de gestion de risques proposés par PMI [156].

1.1. Planification de la gestion des risques

Le but de la planification de la gestion des risques est simplement d'aider les chefs de projet à consacrer une réflexion organisée et ciblée à la gestion des risques et à fournir une infrastructure organisationnelle pour les aider dans leurs tentatives de :

- Déterminer quels risques valent un investissement de temps et d'énergie
- Isoler et optimiser les risques

- Éliminer les risques lorsque cela est possible et pratique
- Développer des pistes d'action alternatives
- Établir des réserves de temps et d'argent pour couvrir les menaces qui ne peuvent être atténuées.

La planification des risques est effectuée et répétée de manière judicieuse et doit être effectuée à intervalles réguliers.

À titre d'exemple on trouve des systèmes guidés par une série de plans qui fournissent la justification et les processus prévus par lesquels les opérations du système seront exécutées.

Une approche du contenu d'un plan de gestion des risques est illustrée dans le tableau 13.

Tableau 13 : Un exemple d'un plan de gestion des risques [157]

<p>(1) Analysis: examine supply chain structure, appropriate performance measures, and responsibilities.</p> <p>(2) Identify sources of uncertainty: focus on most important.</p> <p>(3) Examine risks: select risks in controllable sources of uncertainty.</p> <p>(4) Manage risk: develop strategies.</p> <p>(5) Individualize most adequate real option: select strategies for each risk.</p> <p>(6) Implement: this can be combined with a generic risk management process</p> <p>(7) Risk identification:</p>	<p>. Perceiving hazards, identifying failures, recognizing adverse consequences;</p> <p>. Security preparation and planning.</p> <p>(8) Risk assessment (estimation) and evaluation:</p> <p>. Describing and quantifying risk, estimating probabilities;</p> <p>. Estimating risk significance, acceptability of risk acceptance, cost/benefit analysis.</p> <p>(9) Selection of appropriate risk management strategy.</p> <p>(10) Implementation:</p> <p>. Security-related partnerships; and</p> <p>. Organizational adaptation.</p> <p>(11) Risk monitoring/mitigation:</p> <p>. Communication and information technology security.</p>
---	--

1.2. Identification des facteurs des risques

Étape critique du processus de gestion des risques, l'identification des facteurs des risques est une approche organisée et approfondie pour trouver les risques réels associés à un projet ou un système étudié. Il ne s'agit cependant pas d'inventer des scénarios hautement improbables dans le but de couvrir toutes les possibilités imaginables. Les facteurs des risques ne peuvent être évalués ou gérés tant que des possibilités réalistes ne sont pas identifiées et décrites de manière compréhensible.

Peut-être que la principale défaillance des chefs de projet et des décideurs dans l'identification des facteurs des risques est la description des événements qui causent des risques. Par exemple, les chefs de projet tentent particulièrement d'identifier les facteurs des risques qui influencent les coûts.

Pour mener à une bonne extraction des facteurs des risques, il faut utiliser différentes méthodes qui s'adaptent avec le contexte du système étudié. Par exemple : 1) les méthodes qui se basent sur les études documentaires

comme les revues de littératures et le retour aux historiques, et à la traçabilité de l'entreprise. 2) les méthodes qualitatives qui traitent les jugements et les intuitions des experts comme les questionnaires, les interviews ou la méthode Delphi. 3) les méthodes de simulation et de modélisation aussi... etc.

1.3. Analyse qualitative

Le processus d'identification produit une base des facteurs des risques du système. L'analyse qualitative permet d'organiser et de stratifier les risques identifiés. On peut classifier les risques par exemple selon les processus du système ou selon les catégories des facteurs des risques comme dans notre cas dans ce chapitre.

1.4. Analyse quantitative

L'analyse quantitative des facteurs des risques est l'effort d'examiner les facteurs des risques et d'attribuer des valeurs métriques strictes à la fois aux facteurs des risques du système étudié dans son ensemble et aux facteurs des risques les plus importants (selon les objectifs et les critères qui définissent cette importance).

Pour assurer une bonne évaluation de ces facteurs, les décideurs utilisent une variété d'outils, notamment des entretiens avec des experts [142], [96], des analyses d'arbre de décision [135], [158], des analyses de sensibilité [159], [152] et des simulations...etc.

1.5. Planifier les stratégies et les scénarios des risques

Le développement de la réponse aux risques est un élément essentiel du processus de gestion des risques qui détermine les mesures qui seront prises pour traiter les problèmes engendrés suite à l'apparition des facteurs des risques. Et ceci après des étapes d'identification, de qualification et de quantification.

Toutes les informations générées dans les processus précédents deviennent cruciales pour déterminer ce que l'organisation fera en fonction des risques et de la tolérance de l'organisation.

Ils existent des risques au sein du système, découlent d'un facteur ou une cause commune. Lors de l'élaboration des réponses aux risques, l'équipe doit s'efforcer d'identifier toutes les causes communes, car ces causes peuvent avoir des réponses communes.

En général, les stratégies de réponse aux menaces appartiennent à l'une des catégories suivantes :

- Évitement
- Transfert
- Atténuation
- Acceptation

1.6. Surveiller et contrôler les facteurs des risques

Une fois que les facteurs des risques ont été identifiés, qualifiés et quantifiés, et que des réponses claires ont été développées, ces conclusions doivent être mises en œuvre.

La surveillance et le contrôle des facteurs des risques impliquent la mise en œuvre du plan de gestion des facteurs des risques et des réponses aux risques. Deux défis clés sont associés à la surveillance et au contrôle.

- La première consiste à mettre les plans de risque en action et à s'assurer qu'ils sont toujours valides.
- La seconde consiste à générer une documentation significative pour soutenir le processus.

La surveillance des risques implique une enquête et un suivi approfondis des risques et leur environnement.

- Les plans ont-ils été mis en œuvre comme proposé ?
- Les réponses ont-elles été aussi efficaces que prévu ?
- L'équipe du projet a-t-elle suivi la politique et la procédure organisationnelles ?
- Les hypothèses proposées sont-elles toujours valables ?
- Des déclencheurs de risque se sont-ils produits ?
- De nouvelles influences externes ont-elles modifié l'exposition aux risques de l'organisation ?
- De nouveaux risques sont-ils apparus ?

Les réponses à ces questions peuvent conduire à des approches radicalement différentes du système et de ses risques. L'élaboration de stratégies alternatives, les réévaluations, l'examen de la mise en œuvre du plan d'urgence ou la replanification peuvent être essentiels à l'atteindre des objectifs, la survie ou le succès du système.

1.7. Méthodes de gestion des risques :

Cette section est parmi les sections les plus importantes. Ici, nous avons présenté quelques méthodes trouvées dans notre RLS, afin d'avoir une idée claire sur les recherches précédentes et leurs méthodes ainsi la définition et les étapes à suivre pour la réalisation de plusieurs méthodes.

1.7.1. Entretien / Questionnaire / Réunion :

Description :

La technique **entretien / questionnaire / réunion** est relativement simple. Fondamentalement, il s'agit d'identifier les experts appropriés puis de les interroger méthodiquement sur les risques dans leurs domaines d'expertise en lien avec le système. La technique peut être utilisée avec des individus ou des groupes d'experts.

Le processus obtient normalement des informations sur le risque ou le facteur de risque associé aux critères choisis pour l'évaluation.

Étant donné que les entretiens d'experts aboutissent à un recueil de jugements subjectifs, la seule véritable erreur serait dans la méthodologie utilisée pour recueillir les données. Si les techniques utilisées sont inadéquates, alors l'ensemble du processus d'identification et de quantification des risques sera moins fiable. Malheureusement, il n'existe aucune technique permettant de s'assurer que les meilleures données possibles sont collectées.

La figure suivante illustre les étapes en général d'application d'entretien :

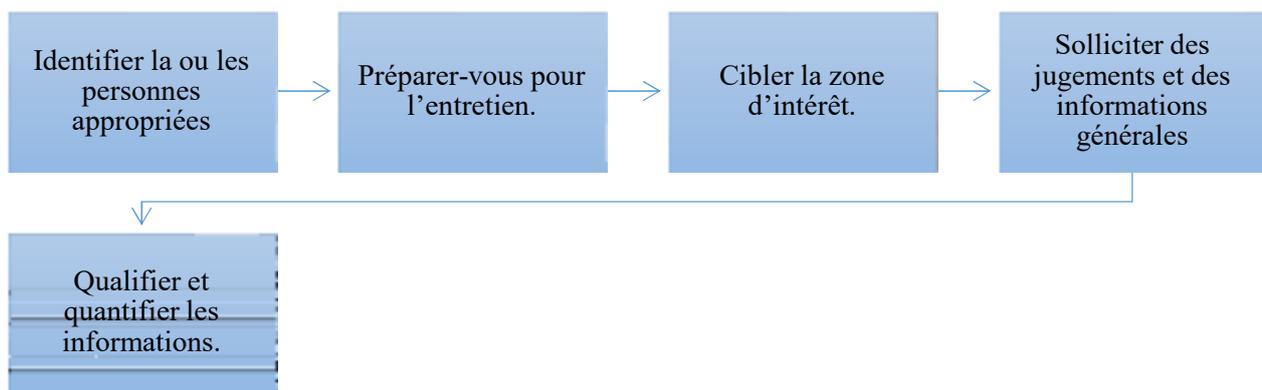


Figure 24 : Un exemple des étapes d'application d'un entretien / réunion

1.7.2. Revue littérature ou revue documentaire :

Description :

Dans certaines situations, un examen de la documentation est considéré comme une opportunité de déduire des informations. Il permet une analyse approfondie et cohérente de l'étendue de la documentation à l'appui des objectifs de système et d'extraire les informations nécessaires sur les facteurs de risques possibles.

Étant donné que les examens de la documentation sont généralement appliqués, les étapes peuvent varier en fonction du type de documentation traité par exemple au niveau des revues qui se focalisent sur les articles les étapes de la figure 16 représente un très bon exemple des étapes qu'on peut suivre.

1.7.3. Méthode Delphi

Description de la Méthode

Bien que les personnes ayant une expérience dans un domaine particulier soient une ressource clé pour les entretiens d'experts, elles ne sont pas toujours facilement disponibles pour de tels entretiens ; et, dans de nombreux cas, ils préfèrent ne pas prendre le temps de participer au processus de collecte de données. La méthode Delphi fonctionne pour remédier à cette situation en offrant un autre moyen d'obtenir des informations auprès des experts d'une manière qui ne les force ni ne les oblige à quitter le confort de leur

propre environnement. La méthode Delphi a l'avantage d'obtenir des informations directement des experts sans empiéter sur leurs horaires chargés.

Il s'agit de créer un cycle de question, réponse et réitération sont répétées plusieurs fois pour garantir que la meilleure qualité d'information possible soit extraite des experts. Une application réelle de cette méthode est présentée dans le chapitre 03.

Cette technique est recommandée lorsque les experts du projet ne peuvent pas coordonner leurs horaires ou lorsque la distance géographique les sépare. La méthode Delphi est également appropriée lorsque le fait de réunir des experts dans un lieu commun peut générer des frictions excessives.

Dans le chapitre suivant, une explication détaillée sur l'application de cette méthode avec un cas d'étude réel sur notre système de port sec-port maritime.

1.7.4. SWOT Analysis

Forces, faiblesses, opportunités et menaces : l'analyse SWOT (figure 25) est essentiellement une analyse des risques dirigée conçue pour identifier les risques et les opportunités dans le contexte organisationnel plus large. La principale différence entre cette technique et d'autres techniques d'analyse est que SWOT renforce la nécessité d'examiner les risques et les opportunités du point de vue de l'organisation dans son ensemble.

Description de la technique

La technique consiste en quatre brèves sessions de génération d'idées organisées pour remplir la documentation d'analyse avec des réponses à ces questions :

Quelles sont les forces de notre système ?

Quelles sont les faiblesses de notre système ?

Quelles opportunités ce projet présente-t-il dans ce contexte ?

Quelles menaces ce projet présente-t-il dans ce contexte ?

À l'aide des réponses à ces quatre questions, on peut discerner tout problème culturel, organisationnel ou environnemental spécifique qui peut permettre ou paralyser le système en question.

STRENGTHS	WEAKNESSES
OPPORTUNITIES	THREATS

Figure 25 : Analyse SWOT

L'analyse SWOT est un outil subjectif; ainsi, les pratiques pour remplir la grille peuvent varier selon l'animateur. Néanmoins, les étapes pour compléter l'outil sont assez cohérentes figure 26.

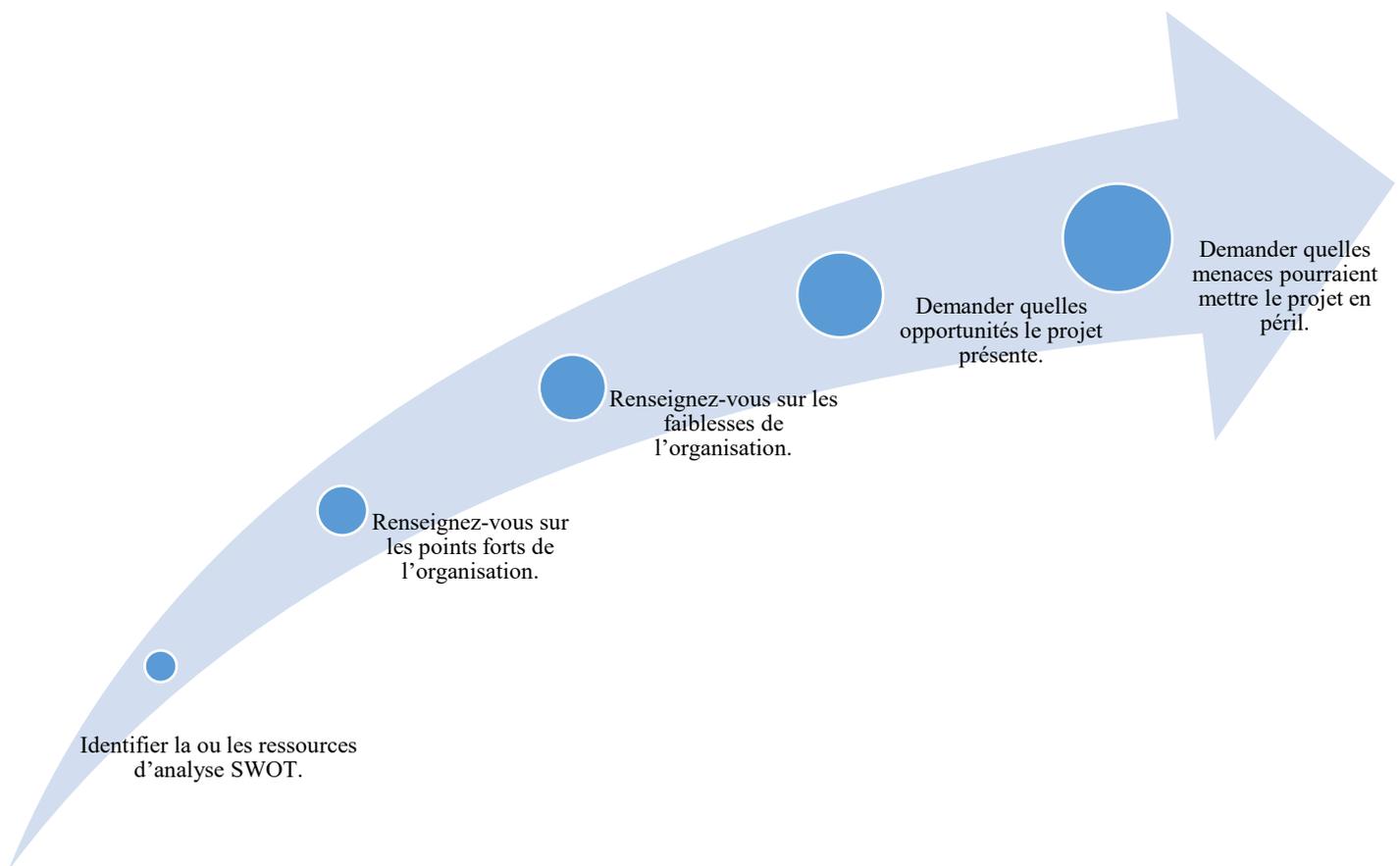


Figure 26 : Les étapes d'application d'une analyse SWOT

1.7.5. Check lists

Description de la technique

Les listes de contrôle sont des outils classiques d'identification des risques, s'appuyant sur l'expérience des experts pour assurer un niveau de cohérence dans l'analyse précoce des risques.

Ils consistent en de simples listes de questions ou de déclarations basées sur les enseignements tirés de système, qui permet une création des listes de risques précoces qui reflètent les risques rencontrés dans l'historique.

Cette technique est recommandée pour tous les systèmes et dans les organisations où des listes de contrôle ont été développées. La technique est normalement appliquée au début d'un projet, bien que des listes de contrôle puissent également être utilisées lors de contrôle des risques.

Fonctionnant en supposant qu'une liste de contrôle a déjà été créée, le processus associé aux listes de contrôle est parmi les plus simples de toutes les techniques :

Consultez la liste de contrôle des risques :

Assurez-vous que l'équipe travaille avec une liste de contrôle adaptée à l'environnement, à la culture. Étant donné que certaines listes de contrôle des risques sont conçues pour traiter des problèmes au sein d'une organisation donnée, il est important de travailler avec un outil approprié au système.

Répondez aux questions ou cochez les cases appropriées sur la liste de contrôle :

Les listes de contrôle sont normalement accompagnées de conseils pour diriger l'utilisateur vers l'application appropriée. Ces applications consistent en de simples sessions de questions-réponses ou en des systèmes d'évaluation pour évaluer la probabilité de rencontrer certains risques communs par exemple.

Examiner et communiquer les conseils fournis :

Même si les listes de contrôle incluent normalement des indications sur la façon de les remplir, elles incluent également des conseils sur la façon d'appliquer les résultats.

Dans certains cas, ces résultats peuvent ne représenter rien de plus qu'une liste de risques (ou domaines de risque). Cependant, certaines listes de contrôle les plus avancées intégreront également des suggestions sur la pratique et la procédure internes standard pour résoudre ou gérer les risques identifiés.

1.7.6. Risk Breakdown Structure RBS :

Une certaine méthode de catégorisation ou de tri est nécessaire et inévitable lors de l'identification des risques. Étant donné que les risques se prêtent naturellement à la catégorisation, le RBS, a évolué ces dernières années pour servir cette fin.

Description

L'utilisation du RBS comprend en fait deux étapes, d'abord dans le développement et plus tard dans l'application.

La première étape, le développement, consiste à créer la hiérarchie elle-même, soit sur la base de l'expérience passée, soit sur les préoccupations pertinentes de l'organisation.

Dans les organisations où le RBS est utilisé depuis un certain temps, cette étape peut ne pas être nécessaire, car une hiérarchie standardisée peut déjà exister.

Cependant, pour les projets où une nouvelle hiérarchie doit être développée et pour ceux où les risques/facteurs des risques sont suffisamment uniques pour que les hiérarchies passées ne s'appliquent pas, le développement du RBS peut être considéré comme essentiel.

Dans la deuxième étape, l'application, le RBS sert de ressource pour l'identification, l'analyse et la déclaration des risques.

Le développement du RBS figure 27 est pertinent lorsqu'il existe à la fois des catégories des risques et des facteurs de risques suffisants pour justifier une analyse approfondie de ces facteurs sous divers angles et lorsqu'il y a des changements importants dans le projet.

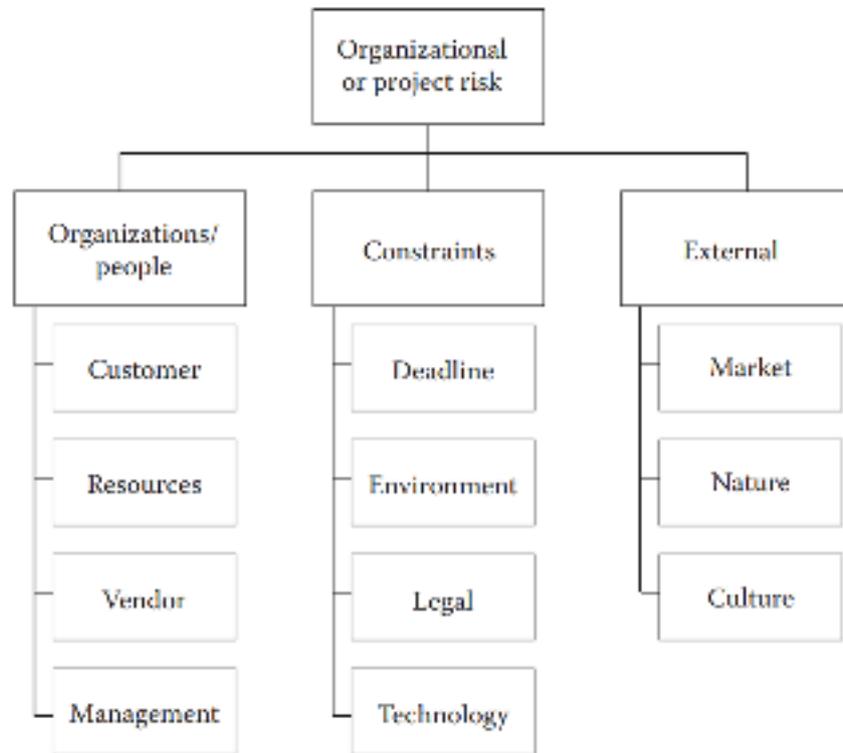


Figure 27, - *emple de Ris' . rea 'do/n 0structure R. 0

1.7.7. Root Cause Identification And Analysis et Bayesian belief network (BBN) Event tree analysis (ETA)

Root Cause Identification and Analysis, Bayesian belief network (BBN) et Event tree analysis (ETA) sont des méthodes qu'on peut utiliser pour identifier les causes racines qui peuvent contribuer à la réalisation des événements risqués.

Description

Ces méthodes représentent un exercice d'exploration. C'est une quête partagée des causes du risque. Plutôt que d'essayer de comprendre la nature d'un événement à risque donné et/ou son impact potentiel, l'identification des causes profondes examine la nature des raisons pour lesquelles les risques se produisent (ou peuvent se produire) et ce qui peut être fait pour modifier l'environnement afin de minimiser ou d'éliminer la cause.

Les résultats de l'identification et de l'analyse des causes profondes comprendront des facteurs de causalité spécifiques qui peuvent être responsables de l'activation ou de l'augmentation de probabilité (ou d'impact) d'événements à risque unique ou multiples (figure 28).

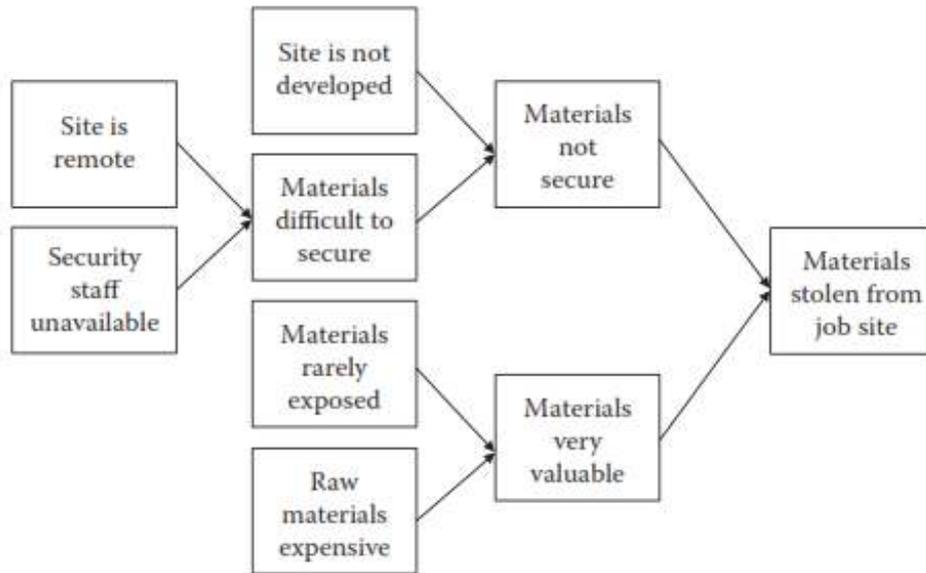


Figure 28 : Root Cause Identification And Analysis

L'identification et l'analyse des causes profondes fonctionnent à travers les « causes des causes des causes ». C'est un effort pour développer progressivement les raisons pourquoi un risque particulier ou une série de risques se produira. La figure suivante présente un exemple des étapes d'application de Root Cause Identification And Analysis.



Figure 29 : Etapes d'application de Root Cause Identification And Analysis

1.7.8. Sensitivity analyse

Les analyses de sensibilité répondent à une question simple : que se passerait-il si un seul paramètre de l'environnement du projet était modifié ?

L'objectif d'une analyse de sensibilité efficace est d'examiner l'influence potentielle d'une modification d'un paramètre du système en termes de contexte de risque.

Le paramètre modifié peut être à peu près n'importe quoi, allant d'un simple changement dans l'environnement à un changement d'une de ses contraintes.

La clé, cependant, est de modifier un paramètre suffisamment tôt pour déterminer le degré d'influence que le changement aurait sur la situation.

Description de la technique

Les analyses de sensibilité peuvent prendre plusieurs formes, y compris des évaluations qualitatives et quantitatives de l'évolution d'un paramètre donné. Dans les évaluations qualitatives, l'autorité d'un expert est utilisée pour deviner quel serait le résultat d'une modification d'un seul paramètre. Inversement, dans les environnements quantitatifs, une modification est apportée aux paramètres de l'évaluation (souvent dans une analyse Monte-Carlo), et des simulations sont effectuées pour déterminer le niveau relatif de l'influence du changement.

1.7.9. Monte-Carlo Simulation

Description

La technique utilise une analyse de simulation pour établir les niveaux relatifs de risque. Dans l'analyse Monte-Carlo, des distributions utilisées pour attribuer des valeurs de risque aux objectifs de cout et délai pour chaque catégorie de risque. Le type de distribution appliqué dépend de la nature de système traité.

Cette technique s'applique lorsque le chef de projet a besoin de connaître la probabilité qu'un objectif puisse être achevé avec succès à un niveau de financement donné ou dans un délai donné. Il convient également de l'utiliser lorsqu'il est nécessaire de savoir quel niveau de financement est requis pour atteindre une probabilité spécifiée d'achèvement d'objectifs.

1.7.10. Risk Audits

Description

Pour les audits de risques, la technique consiste le plus souvent à organiser une réunion avec les membres de l'équipe et toutes les parties prenantes externes aussi (comme les fournisseurs et les sous-traitants). La session se concentre exclusivement sur les risques, en mettant l'accent sur les éléments et les perspectives qui ont changé.

Un audit des risques implique un examen plus exhaustif, normalement effectué soit à un jalon prédéterminé, soit lorsqu'un problème majeur entraîne un changement radical dans le potentiel de réussite du projet. L'audit se concentre fréquemment sur le succès ou l'échec des stratégies de réponse aux risques.

1.7.11. MCDM multi-criteria decision-making:

Description

Les méthodes multicritères représentent un outil puissant qu'on peut utiliser pour traiter les situations ou les systèmes dont on utilise ensemble des critères de jugement, comme par exemple : la gestion de performance, gestion de la qualité ou même comme la gestion des risques. Pourtant, il existe placier méthodes MCDM on

cite ici ANP, AHP, ELECTER, DEMATEL, MACBETH, TOPSIS, ER et DEA... etc. dans le chapitre 03 une application réelle de deux méthodes multi critères.

1.7.12. Bow-Tie diagram

Cet outil décrit graphiquement l'ensemble du scénario d'un risque donné, et propose des barrières préventives et protectrices pour réduire, respectivement, son occurrence et sa gravité. La figure 30 présente un exemple qui explique l'utilisation possible de cet outil [160] ;

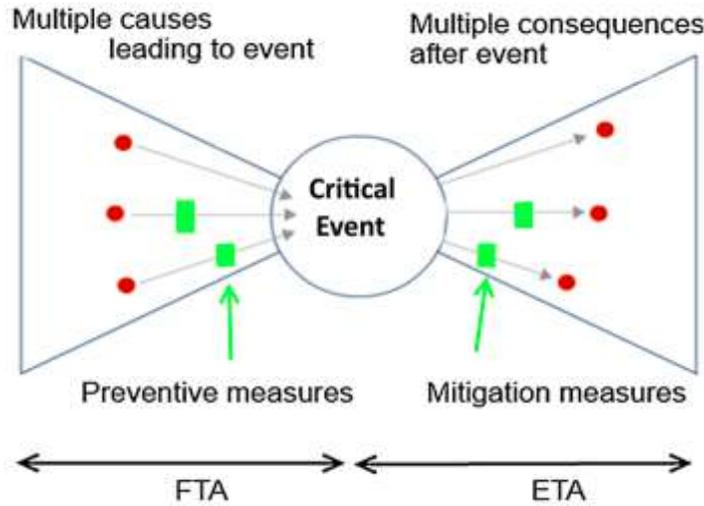


Figure 30 : Exemple de Bow- tie diagram

1.7.13. Petri nets (PN) / colored Petri nets (CPN)

Le réseau de Petri, c'est un outil de modélisation, pourrait être utilisé aussi pour décrire plusieurs événements dans le système étudié afin d'identifier les différentes causes de risque.

Cet outil nous permet d'avoir une vision globale sur les différents scénarios du système étudié et on aussi l'utiliser pour modélisé les scénarios des événements risques [161], [162], [108], [163].

1.7.14. Risk Matrix

La matrice des risques (tableau 14) est un outil basé sur une matrice de probabilité et la catégorie de gravité des conséquences, offrant une bonne visibilité aux décideurs sur les risques existant dans le système étudié.

Cet outil nous donne une visibilité claire sur l'ensemble des risques ou les facteurs des risques déjà identifiés et augmente la rapidité de la prise des décisions pour les décideurs [62],

Tableau 14 : Exemple de risk matrix [62]

		Severity Indicator			
		1	2	3	4
Frequency Indicator		Minor	Significant	Severe	Catastrophic
7	Frequency	A	A	I	I

6	Intermediate value	N	A	A	I
5	Reasonably probable	N	A	A	A
4	Intermediate value	N	A	A	A
3	Remote	N	N	A	A
2	Intermediate value	N	N	N	A
1	Extremely remote	N	N	N	N

2. Différentes méthodes de gestion des risques dans les processus de PMI

Bien que l'identification des méthodes utilisées dans notre système PSPM reste une étape essentielle dans notre recherche doctorale, et il nous permette d'illustrer les outils possibles qu'on peut utiliser dans l'évaluation des risques dans nos futures recherches.

Dans cette section on a essayé de résumer dans le tableau 15 les méthodes et les outils que nous avons trouvés dans notre étude, et de les affecter à chaque processus des processus PMI [156]. Il s'agit ici de donner une idée de l'usage prédominant et secondaire de chaque méthode dans chaque processus de gestion des risques.

Tableau 15 : L'utilisation prédominante et secondaire des méthodes/outils dans les processus de gestion des risques.

TECHNIQUE	Risk management planning	Risk identification	Risk qualification	Risk quantification	Risk response planning	Risk monitoring and control	References
Interviews / questionnaire	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante			Utilisation secondaire	Utilisation secondaire	[142], [49], [96] [114], [143], [164], [165], [73], [155], [62], [166], [63], [98], [67], [167], [141], [64], [113], [112], [76], [136], [77], [69], [168], [78], [53], [90], [169], [91], [88], [92], [93], [87], [170], [171], [172], [173], [174], [175].
Planning Meetings & Brainstorming	Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		Utilisation secondaire		[87]. [171]
Documentation Reviews	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante				Utilisation secondaire	[54], [49], [165], [73], [155], [94], [59], [176], [55], [152], [120], [177], [178], [179], [180], [111], [181], [182], [124], [183], [112], [184], [185], [186], [136], [187], [74], [78], [53], [188], [106], [189], [190], [191], [192], [170], [193], [194], [195], [140], [80], [196], [57], [75], [197],
SWOT Analysis	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante			Utilisation secondaire		[198]

Checklists	Utilisation secondaire					Utilisation secondaire	[56]
Risk Breakdown Structure	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire			Utilisation secondaire	Close application in [152] and [199].
Root Cause Identification And Analysis	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		Utilisation secondaire		[200], [198].
Sensitivity analyse	Utilisation prédominante		Utilisation secondaire				[159], [152].
Monte-Carlo Simulation		Utilisation prédominante		Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[201] [202] [135] [188] [56] [107] [203]
Risk Audits / observation	secondary use	Utilisation prédominante				Utilisation prédominante	[142], [204], [98], [112], [205], [125], [100].
AHP MCDM			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[54], [49], [73], [62], [200], [55], [206], [123], [198], [207], [150], [154], [171], [208].
DEMATEL MCDM			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[209], [210], [185].
TOPSIS MCDM			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[211] [212]

MACBETH MCDM			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[67]
The formal safety assessment (FSA)	Utilisation prédominante						[209], [62], [152], [181], [50]
Fuzzy set theory (FST)			Utilisation prédominante	Utilisation secondaire	Utilisation prédominante		[209], [54].
Evidential Reasoning (ER) approach			Utilisation prédominante		Utilisation secondaire		[54], [152], [127].
Use database / historical study		Utilisation prédominante			Utilisation secondaire		[86], [72], [204], [213], [68], [200], [214], [98], [97], [215], [216], [144], [217], [179], [180], [111], [218], [219], [145], [161], [101], [77], [95], [125], [147], [168], [148], [220], [199], [221], [129], [105], [106], [89], [222], [119], [203], [191], [196], [57], [212], [75], [175].
Bow-Tie Model / diagram					Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	[160], [223], [89].
Data envelopment analysis (DEA) model				Utilisation prédominante	Utilisation prédominante		[224], [109].

Bayesian belief network (BBN)				Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire	[159], [225], [55], [152], [226], [179], [227], [122], [101], [146], [104], [222], [75].
Petri nets (PN) / colored Petri nets (CPN)		Utilisation secondaire			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	[161], [162], [108], [163].
The analytical network process (ANP)			Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire		[210], [185].
System-theoretic process analysis (STPA)						Utilisation prédominante	[228] [110], [229], [230].
Event tree analysis (ETA)		Utilisation secondaire			Utilisation prédominante	Utilisation secondaire	[135], [158]
Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)		Utilisation secondaire		Utilisation prédominante	Utilisation prédominante	Utilisation secondaire	[231], [164], [153], [163], [81].
Risk Matrix			Utilisation prédominante		Utilisation secondaire	Utilisation secondaire	[62], [232], [50], [153], [174].

Le tableau 15 présente l'ensemble des méthodes utilisées dans la gestion des risques selon l'utilisation prédominante et secondaire de chaque méthode dans les articles sélectionnés dans la RLS, ce qui nous aide à choisir notre propre modèle de gestion de risques dans les étapes suivantes.

Conclusion

La gestion des risques reste un pilier essentiel dans toutes les entreprises et les organismes, dans ce sens, les décideurs tentent continuellement à utiliser de méthodes et des outils optimales pour assurer l'identification, l'analyse et le contrôle des risques, en raison de l'impact énorme qui peut être causé par ces risques. Pour cette raison, ce chapitre se base sur les processus [156] de gestion des risques (1. Planifier la gestion des risques, 2. Identifier les risques, 3. Effectuer une analyse qualitative des risques, 4. Effectuer une analyse quantitative des risques, 5. Planifier les réponses aux risques, 6. Mettre en œuvre des réponses aux risques et 7. Surveiller et contrôler les risques.), afin de classer les méthodes trouvées dans notre revue littéraire systématique dans chaque processus, ce qui nous donne une illustration des méthodes que nous pouvons utiliser dans chaque processus afin que nous puissions gérer les risques dans le système de port sec port maritime et les autres systèmes similaires.

Ce chapitre appuie sur les résultats du chapitre précédent à travers une présentation d'une vision claire sur l'utilisation prédominante et secondaire de chaque méthode dans les processus de gestion des risques adoptés. Ces résultats nous facilitent dans la suite le choix des méthodes qui s'adaptent avec nos études de cas et présente une base de données riche des facteurs des risques ce qui va faciliter l'évaluation des facteurs de risques de notre système port-sec port maritime.

En conclusion, même avec l'intérêt croissant que le système PSPM a eu au cours des dernières années [1], il n'y a que quelques articles qui traitent le thème de la gestion des risques dans ce système. En outre, en raison de l'importance de la gestion des risques dans toute organisation, nous avons réalisé dans les deux premiers chapitres une étude profonde afin de présenter une idée globale des risques que nous pouvons trouver dans le système de PSPM, et des méthodes qui peuvent aider à la gestion des risques. De plus, cette étude fournit une plateforme riche pour la prochaine étude d'évaluation des risques dans le système PSPM pour le chapitre suivant.

**CHAPITRE 03. UNE APPROCHE AHP-DELPHI POUR ANALYSER
LES RISQUES DANS LE SYSTÈME « PORT SEC-PORT
MARITIME ».**

Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous avons dressé une étude exhaustive traitant l'évolution du port maritime, et les challenges qui sont apparus avec cette évolution. Ensuite, nous avons illustré l'ensemble des solutions offertes par le concept de port sec, et nous avons montré que le système PSPM est plus robuste et bénéfique, sur tout pour les pays avec un accès limité aux mères ou pays enclavés. De plus, on a choisi après les synthèses le thème de recherche de la gestion des risques au sein du système « port sec-port maritime », en identifiant les différents facteurs des risques et les méthodes qu'on peut utiliser pour traiter ces risques.

Ce chapitre, appuis sur ces résultats à travers l'application d'une approche multi critère, puisque notre système se caractérise par trois parties (port maritime, rail et port sec), huit catégories de risques (Facteurs de risques humains, facteurs de risques environnementaux, facteurs de risques de sécurité, facteurs de risques naturels, facteurs de risques organisationnels, facteurs de risques opérationnels, facteurs de risques techniques et facteurs de risques économiques) et dans chaque catégorie un ensemble des facteurs de risques.

L'approche proposée est choisie vu sa capacité de traiter chaque facteur selon sa gravité, sa probabilité et son emplacement dans le système, de plus cette approche détecte les éventuelles incohérences des jugements des experts lors de la prise de décision.

Ce chapitre présente premièrement les différentes méthodes multicritères les plus utilisées aujourd'hui par les chercheurs scientifiques. Deuxièmement, il propose un modèle multi critères d'aide à la décision AHP-DELPHI qui s'adapte avec les caractéristiques de notre système. Finalement, le modèle est validé par une application d'un cas d'étude sur le PSPM de Casablanca.

1. Méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM)

Selon [233], la prise de décision multicritère est « un cadre structuré pour analyser les problèmes de décision caractérisés par des objectifs et des critères multiples et complexes ». [234]Roy souligne que le but du (*Multi Criteria Decision Making*) MCDM est de créer un outil qui aide les décideurs à trouver une solution aux problèmes de décision et qui se conforme à leurs priorités et objectifs. Il est bien observé qu'une solution idéale est difficile à atteindre, il est donc nécessaire de rechercher un compromis parmi les différentes solutions hypothétiques disponibles [235].

La méthodologie MCDM a été expliquée par [236] Guitouni et Martel en 1998 comme étant un processus récursif non linéaire qui comprend les quatre étapes suivantes : 1) structurer le problème de décision, 2) identifier et illustrer les préférences, 3) agréger les évaluations de l'alternative plans d'action, et 4) sortir avec des recommandations [233].

Cavallaro [235] a résumé les avantages des modèles MCDM comme suit : 1) ils ont la capacité de traiter une quantité importante d'informations et d'objectifs souvent contradictoires, 2) ils ne génèrent pas de solution pour le décideur en tant que vérité absolue, mais défendent plutôt un processus décisionnel, 3) ce sont des outils transparents, car ils sont basés sur l'observation et la vérification systématique des facteurs qui influencent sur la décision, 4) ils fournissent les moyens pour structurer les problèmes de décision de manière claire et facile à comprendre, et 5) ils offrent la capacité d'observer et de surveiller le processus de prise de décision au fur et à mesure qu'il évolue.

Un nombre important de méthodes MCDM ont été développées incorporant la gestion, l'informatique, la psychologie, les mathématiques, les sciences sociales et l'économie pour aider à résoudre un large éventail de problèmes de prise de décision à différents niveaux de sophistication. Et ils ont été utilisés dans divers problèmes de décisions, simples et complexes, tactiques et stratégiques [237].

Le terme *Multi Criteria Decision Making* (MCDM) peut être utilisé de manière interchangeable avec le terme *Multi-Criteria Decision Analysis* MCDA [238]. Cependant, certains livres, comme [239] et [240] distinguent les deux. Ils soutiennent que MCDM est une approche descriptive qui décrit le problème en définissant les décisions possibles, les conséquences et les critères et en incorporant une fonction d'utilité (f), qui conduit à la décision optimale si elle est maximisée, tandis que MCDA est une approche constructive qui ne cherche une solution optimale, mais construit plutôt le problème en tenant compte des préférences et de l'expérience des décideurs. En d'autres termes, MCDM se concentre sur la recherche d'une solution à un problème d'optimisation multi-objectifs, tandis que MCDA se concentre sur le processus de décision lui-même. D'autres étendent encore plus la classification. Selon [241], MCDM peut être divisé en 1) Prise de décision multi-objectifs (MODM), qui fait référence au problème de décision qui a un nombre infini de solutions alternatives, et 2) Prise de décision multi-attributs (MADM), ce qui correspond au cas où il existe un nombre fini de solutions alternatives.

La prise de décision multicritères est devenue un domaine d'étude prometteur en recherche opérationnelle avec un grand potentiel depuis 40 à 50 ans. Bien que certaines méthodes MCDM remontent à des années antérieures et soient liées à différentes disciplines, le nombre d'études académiques qui ont contribué à la fois aux théories et aux modèles, qui étaient à la base de méthodologies de décisions multicritères plus systématiques et rationnelles, a commencé à croître à un rythme régulier. Depuis le début des années 1970 [242]. De nombreuses études, dont celle de [243], largement citée, démontrent la vitalité de la MCDM et la variété des méthodes qui ont été développées pour répondre à d'innombrables problèmes de décision dans divers domaines, tels que la gestion de la chaîne logistique [244] [245], la gestion des urgences [246], [247], l'évaluation de l'enseignement [248], l'évaluation de la conception du produit [249], la gestion de l'énergie

[250], la gestion des déchets [251], d'approvisionnement [252], et l'évaluation de business intelligence [214], [215].

Plusieurs méthodes de MCDM ont été souvent utilisées, sur tout dans les derniers 10 ans. Parmi ces méthodes les plus connues sont : processus de hiérarchie analytique (AHP), technique de classement préférentiel par similarité avec la solution idéale (TOPSIS), théorie des attributs (MAUT) pondération simple par additif (SAW), technique simple d'évaluation multi attributs (SMART), théorie des ensembles flous, analyse d'enveloppement de données (DEA), raisonnement par cas (CBR), élimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE), programmation par objectifs (GP) et classement des préférences et méthode d'organisation de l'évaluation d'enrichissement (PROMETHEE).

1.1. Méthode AHP

AHP est une méthodologie de prise de décision multicritères (MCDM) largement utilisée, développée par [255]Thomas Saaty. L'approche utilise la comparaison par paires de facteurs de décision pour analyser un problème de décision et agrège les résultats de manière algébrique pour dériver une comparaison globale des alternatives de décision. En raison de sa simplicité, de sa flexibilité et de son applicabilité générale, AHP est l'un des outils de prise de décision les plus utilisés dans le monde [256] [257] [258] [259]. AHP et ses variantes ont été appliqués dans une multitude de domaines [260] [261], notamment : la planification d'entreprise [262] [263], la gestion des ressources [264] [265], la gestion de la chaîne logistique [244] [245], la gestion des technologies de l'information [266], l'ingénierie [267], l'éducation [268], la gestion de l'environnement [269] et les projets de défense [270]. Avec un nombre impressionnant d'applications réussies, AHP est également l'un des méthodes les plus étudiées en matière de prise de décision [271].

La méthodologie AHP implique quatre étapes de base pour comparer et classer les alternatives [268] :

1. Définissez la hiérarchie de décision avec un objectif de décision de niveau supérieur, des critères qui contribuent à cet objectif et les alternatives envisagées.
2. Comparez ces éléments de décision par paires pour leurs contributions à leurs éléments de décision supérieurs dans la hiérarchie.
3. Attribuez des poids numériques pour résumer les comparaisons.
4. Calculez une valeur globale pour chaque alternative en fonction des poids agrégés des éléments de décision.

La conception de la hiérarchie de décision dépend de la nature du problème, ainsi que des connaissances, du jugement et des valeurs du décideur. Les critères peuvent être successivement décomposés en sous-critères,

sous-sous-critères et ainsi de suite, en autant de niveaux que le problème l'exige. La figure 31 illustre un exemple de hiérarchie de décision.

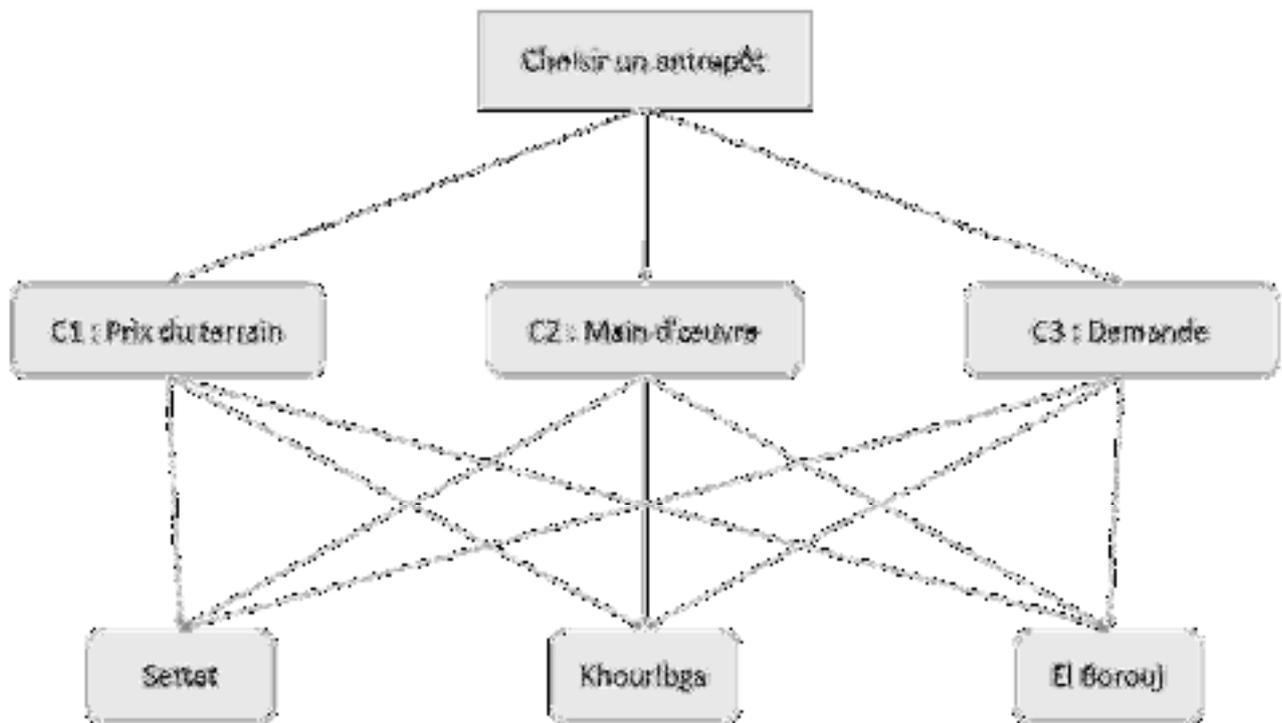


Figure 31 : Un exemple de hiérarchie de décision

1.1.1. Méthode TOPSIS

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode multi critères qui cherche à trouver la meilleure alternative en mesurant la distance des alternatives existantes d'une solution idéale hypothétique positive et d'une solution idéale hypothétique négative, également appelé solution anti-idéale. TOPSIS définit la solution idéale positive comme une alternative ayant les meilleurs attributs de toutes les alternatives. La solution idéale négative a les pires attributs de toutes les alternatives. Par exemple, si cinq voitures avec les attributs suivants étaient comparées (tableau 16) :

Tableau 16 : Exemple d'application de TOPSIS

	Sécurité (critère 1)	Vitesse (Critère 2)
Voiture 1 (Alternative A)	1 Étoile	200 km/H
Voiture 2 (Alternative B)	2 Étoiles	150 km/H
Voiture 3 (Alternative C)	3 Étoiles	140 km/H
Voiture 4 (Alternative D)	3 Étoiles	120 km/H
Voiture 5 (Alternative E)	4 Étoiles	100 km/H
Les solutions idéales « idéale positive et idéale négative » seraient :		

Solution idéale positive	4 Étoile	200 km/H
Solution idéale négative (anti-idéale)	1 Étoiles	100 km/H

Laquelle des cinq alternatives est la meilleure (la plus désirée) n'est pas évidente d'après le tableau 16. Dans TOPSIS, la distance euclidienne de chaque alternative à l'idéal positif et négatif est mesurée. Représentation graphique à deux critères montre comment cela est fait dans un exemple à deux critères, comme celui donné ci-dessus (figure 32).

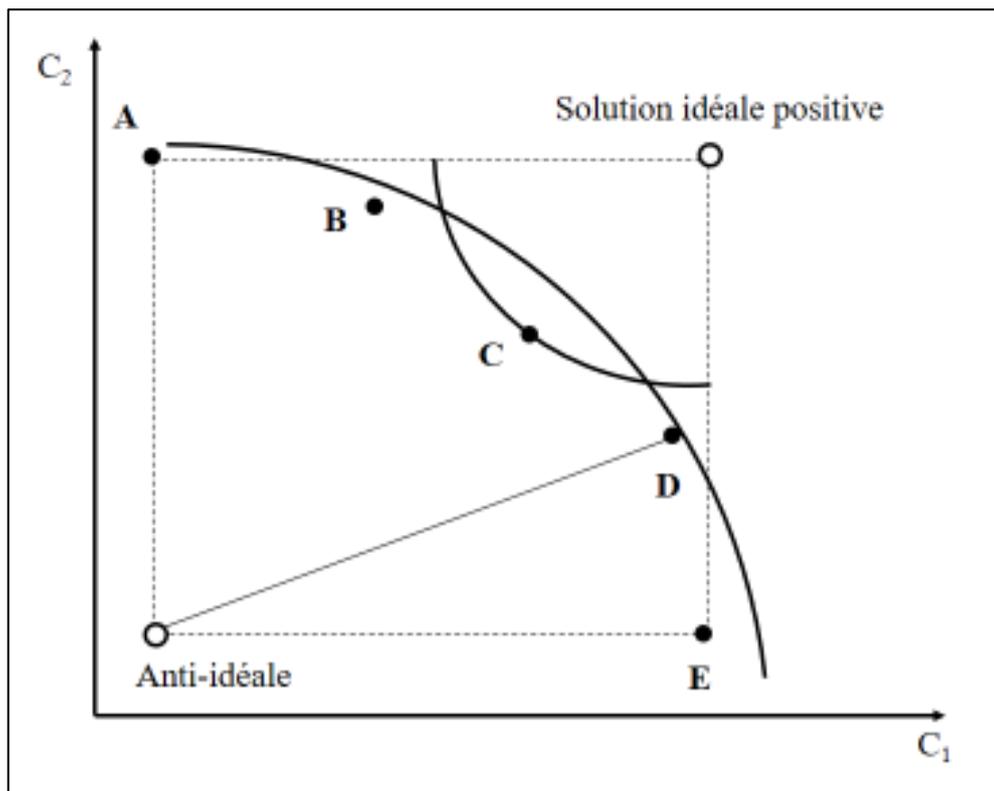


Figure 32 : Représentation graphique de notre exemple de TOPSIS

C_1 et C_2 représentent successivement dans l'exemple le critère 1 de sécurité, et le critère 2 de vitesse. L'alternative A a la meilleure valeur dans C_2 , mais la pire valeur dans C_1 . L'alternative E a la meilleure valeur en C_1 , mais la pire en C_2 . Maintenant que les solutions idéales positives et idéales négatives sont définies, la distance de chaque alternative à ces idéaux peut être mesurée. Le graphique montre que l'alternative « C » est la plus proche de la solution idéale tandis que l'alternative D est la plus éloignée de la solution idéale négative. TOPSIS utilise ensuite ces informations pour calculer quelle alternative est la meilleure.

1.1.2. Méthode ELECTRE

[272] *Elimination and Choice Translation Reality* (ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS et ELECTRE TRI ELECTRE Tree) a été proposé par le français Roy en 1971. Cette méthode consiste en deux ensembles de paramètres : le coefficient d'importance et les seuils de veto. La méthode ELECTRE se base sur une comparaison par paires des alternatives dans chaque attribut, afin de déterminer des relations binaires partielles indiquant la force de préférence d'une alternative par rapport à l'autre. Le concept de base de la méthode ELECTRE est de traiter les « relations de sur-classement » en utilisant des comparaisons par paires entre les alternatives sous chacun des critères séparément. Dans l'approche ELECTRE, les indices de concordance et de discordance sont utilisés pour surclasser le fournisseur. Au cours de la première étape, l'opinion des experts et l'étude de la littérature de surclassement sont utilisées pour reconnaître les variables et les critères effectifs de sélection des fournisseurs. Les critères dominants sont extraits et seront utilisés dans l'évaluation. Ensuite, les listes de fournisseurs qualifiés sont identifiées. Les critères de décision identifiés sont ensuite approuvés par l'équipe de prise de décision, qui leur attribue la pondération. Enfin, les poids calculés des critères sont approuvés par l'équipe de prise de décision et les rangs sont déterminés à l'aide de la méthode ELECTRE. [273] Le concept de base de la méthode ELECTRE est de traiter les « relations de supériorité » en utilisant des comparaisons par paires entre les alternatives sous chacun des critères séparément. [272] ont appliqué la méthode Electre afin de fournir une matrice de décision de sélection de matériau et de faire une analyse de sensibilité des critères et ils ont proposé un modèle de décision multicritères pour la sélection de fournisseurs en sous-traitance, en utilisant la théorie la méthode Electre. [273] ont utilisé l'application de la méthode ELECTRE pour classer les alternatives en fonction de leur performance globale dans le cas des réseaux sans fil.

1.1.3. PROMETHEE

Développée par Jean-Pierre Brans en 1982 [274], PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) est une famille de méthodes de sur-classement, qui a d'abord été introduite sous la forme d'un outil de classement partiel (PROMETHEE I) puis étendue par [275] à une technique de classement complet (PROMÉTHÉE II). PROMETHEE III a ensuite été développé comme une application de sur-classement basée sur des intervalles dans le but de répondre aux indifférences qui se produisaient parfois dans le classement. Cela a été suivi par PROMETHEE IV dont le classement était basé sur des ensembles d'actions continues qui sont définis par des variables de décision et des contraintes telles que la programmation mathématique [276]. D'autres versions, telles que V, VI et GDSS (Group Decision Support System) ont été développées plus tard pour aider à résoudre des problèmes de décision plus complexes [276].

PROMETHEE V, par exemple, comprenait des contraintes de segmentation - une procédure qui permet la sélection de plusieurs alternatives sous contraintes, tandis que PROMETHEE VI a été conçu sur la base du

fonctionnement du cerveau humain et a fourni une analyse de sensibilité. PROMETHEE GDSS a été conçu pour soutenir la prise de décision de groupe. Il commence par identifier les critères et les alternatives, suivi d'une évaluation individuelle par chaque décideur, puis l'évaluation globale est réalisée par le groupe. PROMETHEE utilise le plan GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance) (analyse géométrique pour l'assistance interactive), qui est un diagramme bidimensionnel interactif qui fournit une visualisation des conflits entre les mesures de performance (c'est-à-dire les évaluations, les fonctions de préférence, les poids, etc.) et permet aux décideurs de mieux comprendre les alternatives disponibles et les compromis nécessaires pour prendre la décision [277] [278] [279].

Par rapport à AHP, qui est considérée comme une méthode d'agrégation complète de type additif [280], PROMETHEE surmonte les compromis entre de bons scores sur certains critères et de mauvais scores sur d'autres critères où des informations détaillées et souvent importantes peuvent être perdues. Cependant, comme PROMETHEE ne décompose pas un problème de décision en ses éléments constitutifs et hiérarchies de critères, [281] soutiennent qu'il pourrait devenir très difficile pour le décideur de maintenir une observation claire du problème de décision et évaluer les résultats en cas de nombreux critères (plus de sept). [282] suggère que PROMETHEE permet une analyse de sensibilité pour déterminer les écarts les plus élevés autorisés par rapport aux poids d'origine avant que le classement des alternatives ne soit modifié, contrairement à l'AHP, qui accepte une incohérence limitée [283]. De plus, pour déterminer les poids, AHP utilise des comparaisons par paires pour établir la priorité relative de chaque élément par rapport à l'objectif, tandis que PROMETHEE ne fournit aucune directive spécifique pour déterminer les poids et nécessite beaucoup moins d'entrées. Cependant, si un nombre substantiel de pistes d'action et de critères alternatifs sont impliqués, les comparaisons par paires peuvent être considérées comme un inconvénient étant donné la longueur du processus [281].

1.1.4. Méthode MACBETH

MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) est une technique d'évaluation à critères multiples créée au début des années 1990 par Carlos Bana e Costa et Jean Claude Vansnick [284]. Fondée sur une position épistémologique constructiviste et soutenue par un logiciel visuel interactif (M-MACBETH), la méthode utilise une simple procédure technique de question-réponse pour soutenir la construction d'échelles numériques d'intervalles, permettant des différences d'attractivité entre les éléments d'un certain ensemble à être mesuré cardinalement.

En pratique, MACBETH consiste à demander au décideur (ou au groupe de décideurs) de comparer par paires les alternatives de A (avec $A = \{a, b, \dots, n\}$ étant un ensemble fini de n alternatives), et de projeter la sémantique jugements concernant la différence d'attractivité entre eux. La comparaison par paire est effectuée sur la base de catégories sémantiques prédéfinies de différence d'attractivité, à savoir : $C_0 = \text{null}$

(ou indifférence (i.e., a I b)); C1 = très faible ; C2 = faible ; C3 = modéré ; C4 = fort ; C5 = très fort ; et C6 = extrême [285]. Par exemple, si l'alternative a est considérée comme plus attrayante que l'alternative b, et que la différence entre les deux alternatives est considérée comme modérée, alors $(a, b) \in C3$. Dans la lignée de [284] MACBETH intègre une procédure automatique de détection des incohérences, même dans des contextes de tableaux incomplets de jugements de valeur. Une fois que des jugements de valeur cohérents ont été obtenus, l'étape suivante consiste à utiliser la programmation linéaire pour construire des fonctions de valeurs cardinales, qui permettent de calculer des compromis entre les variables.

Une discussion détaillée sur les fondements mathématiques de l'approche MACBETH dans [286]. Néanmoins, il convient de noter que contrairement à d'autres techniques, la procédure MACBETH n'implique que deux alternatives à la fois. Suivant les mêmes orientations épistémologiques que le processus de hiérarchie analytique (AHP) de [255], [284] défendent également que l'application de la technique MACBETH doive être simple et naturelle, impliquant une échelle sémantique formée de catégories de différence d'attractivité et la projection de jugements de valeur entre chaque couple d'alternatives. Naturellement, des différences substantielles existent entre AHP et MACBETH (voir [287], [288]). En particulier, alors que l'AHP utilise des échelles de mesure par rapport, MACBETH aborde la question des échelles de valeurs cardinales en utilisant des différences d'attractivité entre les alternatives, qui sont des échelles de mesure d'intervalle [284], [285]. En pratique, cela signifie que, tandis que dans l'AHP, les concepts de priorité ou d'importance ne tombent pas en dessous du niveau zéro, dans l'approche MACBETH, des valeurs négatives peuvent être considérées, ce qui permet aux sentiments répulsifs du décideur d'être représentés de manière cardinale.

En raison de sa nature humaniste, interactive et constructive, et en raison de l'intérêt croissant que MACBETH a suscité dans la communauté recherche opérationnelle au cours des deux dernières décennies (cf. Bana e Costa et al. 2016), il est fondamental de revoir sa structure intellectuelle. Comme déjà souligné, des revues de littérature sur la technique peuvent être trouvées dans [285].

1.2. Système de sélection des méthodes multicritères

La sélection d'une méthode MCDM pour un problème de décision spécifique n'est pas une tâche facile, puisqu'il existe un grand nombre de méthodes disponibles, ce qui rend souvent difficile la justification du choix. Malgré les nombreuses méthodes disponibles, aucune ne peut être considérée comme parfaite ou identifiée comme la « super méthode » appropriée à utiliser pour tous les problèmes de prise de décision. Ils ont tous des limites, des hypothèses et des caractéristiques et niveaux de sophistication différents [237]. Selon [280], cette diversité peut être considérée comme une force, mais elle peut aussi être considérée comme une faiblesse.

Diverses méthodes ont été proposées pour aider à choisir parmi les méthodes MCDM. Dans leur étude « Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDM method », [236] ont étudié 29 méthodes pour tenter de déterminer des lignes directrices provisoires pour sélectionner la méthode optimale pour des problèmes de décision spécifiques.

Tableau 17 : Classification des méthodes multicritères

Méthodes	AHP	TOP	MACBETH	ELECTRE	PROMETHEE
Nature des critères	Tangible ou intangible	Tangible	Tangible ou intangible	Tangible ou intangible	Tangible ou intangible
Participation des décideurs	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Supporté	Nécessaire
Logiciel	EXPERT CHOICE	TOPSIS SOLVER	M-MACBETH	ELECTRE IS	PROMCALC
Références	[289]	Hwang and Yoon (1981) [261]	[284]	[234]	[275]
Objectives	La classification des options par priorité	La classification des options	La classification des options par attractivité	La classification des options	La classification des options avec leurs forces et faiblesses
Crédibilité	Approuver	Approuver	Approuver	Approuver	Approuver
Classification de la méthode	Méthode de sur classement	Méthode de classement	Méthode interactive	Méthode de sur classement	Méthode de sur classement
Facilité d'utilisation	Moyen	Moyen	Moyen	Facile	Facile
Quantifier l'importance des critères	Non nécessaire	Nécessaire	Non nécessaire	Nécessaire	Nécessaire
Pondération des critères	Matrices de comparaison par paires	Aucune méthode spécifique	Matrices de jugement avec aucune introduction des poids	Aucune méthode spécifique	Aucune méthode spécifique

Hypothèses	Tous les critères sont considérés comme entièrement comparables	Les critères sont indépendants	Construire une échelle d'intervalle des préférences sur un ensemble d'actions	Construire une ou plusieurs relations de sur classement	Les poids sont des nombres non négatifs
Nature des entrées	Quantitatifs ou qualitatifs	Quantitatifs	Qualitatifs	Quantitatifs ou qualitatifs	Quantitatifs ou qualitatifs
Résultats finaux	Ordre global	Ordre global	Ordre global	Ordre global	Ordre global

Dans notre cas, on a commencé par une étude de comparaison entre les différentes méthodes MCDM, le but est de trouver la méthode la plus adaptée avec notre système complexe de « port sec-port maritime ». Le tableau 17 résume notre étude et facilite le choix de la méthode adéquat au cas d'étude en question.

Le système « port sec-port maritime » représente un milieu complexe où différentes entreprises et organisations interagissent entre elles selon les trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel. La méthode MCDM AHP nous donne la capacité de bien hiérarchiser le système de manière qui décortique le système étudié, ce qui facilite le traitement de chaque partie de notre système de « port sec-port maritime ». De plus, l'aptitude d'AHP à considérer les critères tangibles et intangibles, ainsi l'inclusion des entrées qualitatifs et quantitatifs, rend AHP plus adaptable à la nature des facteurs de risques identifier dans le chapitre 02, et le contexte des jugements des décideurs dans le système étudié.

2. Outils d'aide à la décision AHP-DELPHI

Les modèles d'évaluation quantitative des risques sont principalement utilisés au fil des années pour estimer les incertitudes [291]. Néanmoins, lorsque nous manquons de données, nous renforçons les modèles quantitatifs avec des méthodes qualitatives, qui nous permettent de prendre des jugements d'experts, de les transférer vers des données quantitatives, et de faciliter les analyses pour les décideurs.

Dans cette étude, nous avons proposé une approche comme la montre la figure 33 pour analyser les facteurs de risque du système PSPM. Nous appliquons AHP afin d'organiser le système dans une structure systématique, puis nous avons utilisé la technique Delphi pour assurer une bonne extraction des données nécessaires pour AHP. Ensuite, en utilisant l'équation de « score de risque » inspiré de la méthode de The Fine Kinney[292].

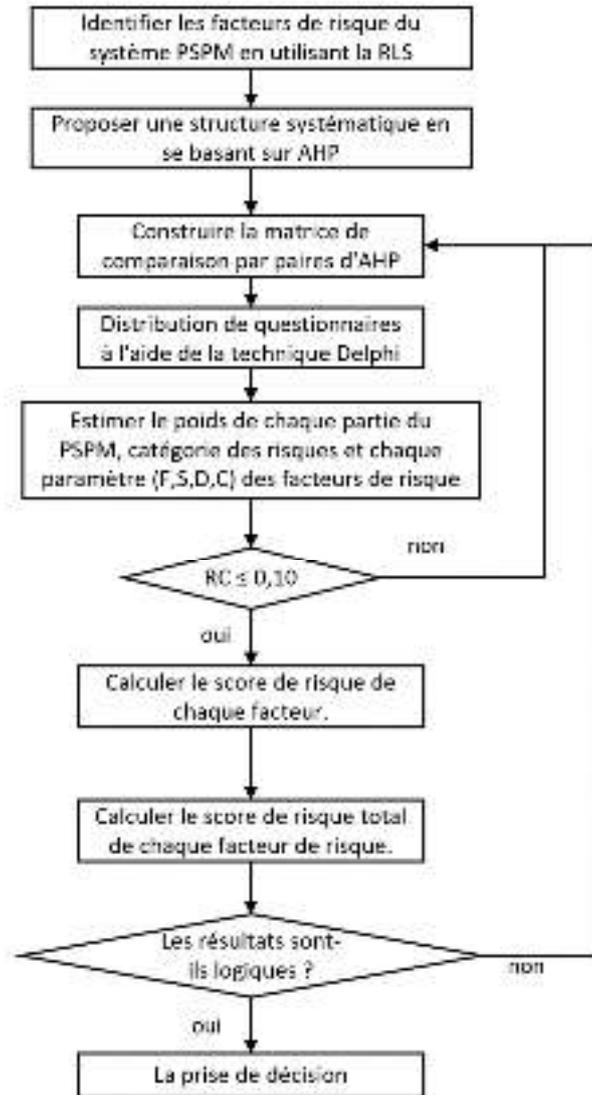


Figure 33 : Modélisation de notre approche utilisée

Finalement, nous calculons le score de risque total pour chaque facteur de risque, ce qui permet aux décideurs d'analyser facilement les facteurs de risque.

2.1. Méthode Fine Kinney

La méthode Fine Kinney est développée par Kinney et Wiruth en 1976, afin de présenter un outil quantitatif pour la recherche dans le domaine de la gestion des risques [292]. Dans notre étude, nous considérons quatre paramètres pour évaluer chaque facteur de risque : (F) Fréquences (fréquences des facteurs de risque), (S) Sévérité (Gravité / conséquences potentielles des facteurs de risque), (D) détectabilité (niveau de détection des facteurs de risque) et (C) Contrôlabilité (si ce facteur de risque se produit, quel est le niveau de contrôle possible dont nous disposons). Ensuite, nous calculons le score de risque (Criticité) pour chaque facteur de risque sur la base de l'équation (1).

$$risk\ score = F \times S \times D \times C \quad (1)$$

Dans notre étude, le score de risque est le fruit de la méthode MCDM AHP qui évalue (F) les fréquences (S) la gravité (D) la détectabilité et (C) la contrôlabilité de chaque facteur de risque sur la base des jugements intuitifs de nos douze experts, comme expliqués dans la section suivante.

2.2. Fondements mathématiques de la méthode AHP :

Dans la comparaison par paires d'éléments de décision, un décideur attribue des valeurs qui représentent l'intensité de la préférence pour chaque élément par rapport à chacun des autres éléments, le plus souvent sur une échelle de 9 points, qui inclut toute valeur entière dans la plage [1, 9] et les valeurs réciproques associées, telles que définies dans le tableau suivant [255], [268] :

Tableau 18 : : Exemple d'échelle de comparaison [255], [268]

Degree of preference A compared to B	Value A, Value B
Equally preferred	1, 1
Equally to moderately preferred	2, 1/2
Moderately preferred	3, 1/3
Moderately to Strongly preferred	4, 1/4
Strongly preferred	5, 1/5
Strongly to very Strongly preferred	6, 1/6
Very Strongly preferred	7, 1/7
Very Strongly to extremely preferred	8, 1/8
Extremely preferred	9, 1/9

Étant donné n éléments $\{A_1, A_2 \dots A_n\}$, les comparaisons sont rassemblées dans une matrice de comparaison A, où l'élément a_{ij} représente le poids de priorité relative de a_i obtenu en le comparant à a_j :

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1/a_{in} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Diverses méthodes peuvent être utilisées pour déterminer les poids numériques w_i pour chaque élément a_i à partir d'une telle matrice de comparaison [293] [294] [295] [296]. Dans AHP, les deux méthodes les plus courantes sont la méthode des vecteurs propres (the eigenvector method EVM) et la méthode des moyennes géométriques (the geometric mean method GMM), également appelée méthode des vecteurs propres approximatifs, ou la méthode des moindres carrés logarithmiques [293], [297] [298]. L'EVM dérive généralement les poids prioritaires w_i en résolvant le problème du vecteur propre correct :

$$A \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} = \lambda_{Max} \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

Où équivalent :

$$\sum_{k=1}^n a_{ik} w_k = \lambda_{Max} w_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Où λ_{max} est la plus grande valeur propre de A.

Le GMM déduit les poids prioritaires des éléments A_i de la manière suivante :

$$w_i^* = C \left(\prod_{k=1}^n a_{ik} \right)^{1/n}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Où « C » est un facteur de normalisation, généralement l'inverse de la somme des moyennes géométriques des lignes, c'est-à-dire :

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\prod_{k=1}^n a_{ik})^{1/n}} \quad (6)$$

Alors que différents arguments théoriques favorisent une méthode par rapport à l'autre, diverses études de simulation ont conclu qu'il existe un niveau élevé de concordance entre les techniques EVM et GMM [295] [298]. Ces études indiquent que les deux méthodes peuvent donner des résultats différents dans les cas où les valeurs de priorité sont proches, mais en général, elles donnent des résultats très comparables.

Compte tenu de la dérivation des poids prioritaires pour toutes les relations pertinentes, l'approche standard pour calculer le score global pour chaque alternative est la méthode de la somme pondérée [297] :

$$\sum_{i,j,k} a_{ij} * s_{jk} * c_k \quad (7)$$

Où a_{ij} est le poids prioritaire de la $i^{\text{ème}}$ alternative par rapport au $j^{\text{ème}}$ sous-critère, s_{jk} est le poids prioritaire du $j^{\text{ème}}$ sous-critère par rapport au $k^{\text{ème}}$ critère, et c_k est le poids prioritaire du $k^{\text{ème}}$ critère par rapport à l'objectif.

2.2.1. Cohérence des comparaisons par paires

La méthodologie AHP et d'autres méthodologies qui utilisent la comparaison par paires de critères dépendent de manière critique des évaluations par le décideur des priorités relatives des éléments de décision telle qu'elles sont capturées dans une matrice A de comparaison par paires [297]. Si les jugements de comparaison sont parfaitement cohérents, les valeurs de A sont transitives, c'est-à-dire :

$$a_{ij} * a_{jk} = a_{ik} \quad (\forall i, j, k) \quad (8)$$

Cependant, les décideurs ne portent généralement pas de jugements parfaitement cohérents, et les incohérences qui en résultent impliquent des inexactitudes dans les estimations du poids relatif.

Pour cela, [297] a défini l'indice de cohérence (IC) pour mesurer le niveau d'une telle cohérence pour une matrice réciproque n x n :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

Dans une matrice n x n parfaitement cohérente, $\lambda_{max} = n$, et donc IC=0. Sinon, λ_{max} et IC sont supérieurs à 0, des valeurs plus élevées impliquant des incohérences plus importantes.

Pour fournir des conseils sur les niveaux acceptables d'incohérence pour une matrice de comparaison individuelle [297] a défini le ratio de cohérence (RC) :

$$RC = \frac{IC_n}{RI_n} \quad (10)$$

Où RI_n est le moyen de IC dérivé d'un échantillon de taille 500 n x n des matrices réciproques générées aléatoirement :

RI 3 = 0,58 ; IR 4 = 0,9 ; IR 5 = 1,12 ; IR 6 = 1,24 ; et RI7 = 1,32.

[268] a défini des heuristiques de seuil pour déterminer les niveaux de cohérence acceptables :

RC = 0,05 pour les matrices 3 x 3, 0,08 pour les matrices 4 x 4 et 0,10 pour n > 4.

La validité de la méthodologie AHP dépend d'un niveau de cohérence suffisant, mais les incohérences proviennent souvent d'erreurs, d'inexactitudes et de biais dans le jugement humain.

Des recherches approfondies ont été menées pour résoudre ces problèmes [296], et de nombreuses méthodologies ont été développées pour augmenter la cohérence des matrices de comparaison par paires en rationalisant leurs valeurs [299], [300] [301] [257], [302]. Lors de l'exécution de l'une de ces méthodologies, des matrices de comparaison par paires plus cohérentes peuvent être obtenues, mais les méthodes nécessitent un temps considérable pour se terminer lorsqu'il y a un grand nombre de facteurs à comparer. De plus, les méthodologies peuvent modifier les comparaisons individuelles par paires qui diffèrent grandement des préférences initiales du décideur.

2.3. Méthode DELPHI

La méthode Delphi est un processus itératif conçu pour recueillir le jugement du décideur séparément et de manière anonyme afin d'éviter les influences négatives ou positives des membres de personnalités les plus fortes ou de la position élevée dans l'organisme sur le groupe des décideurs. Nous répétons ce processus jusqu'à ce que nous arrivions finalement à un accord général de groupe (figure 34).

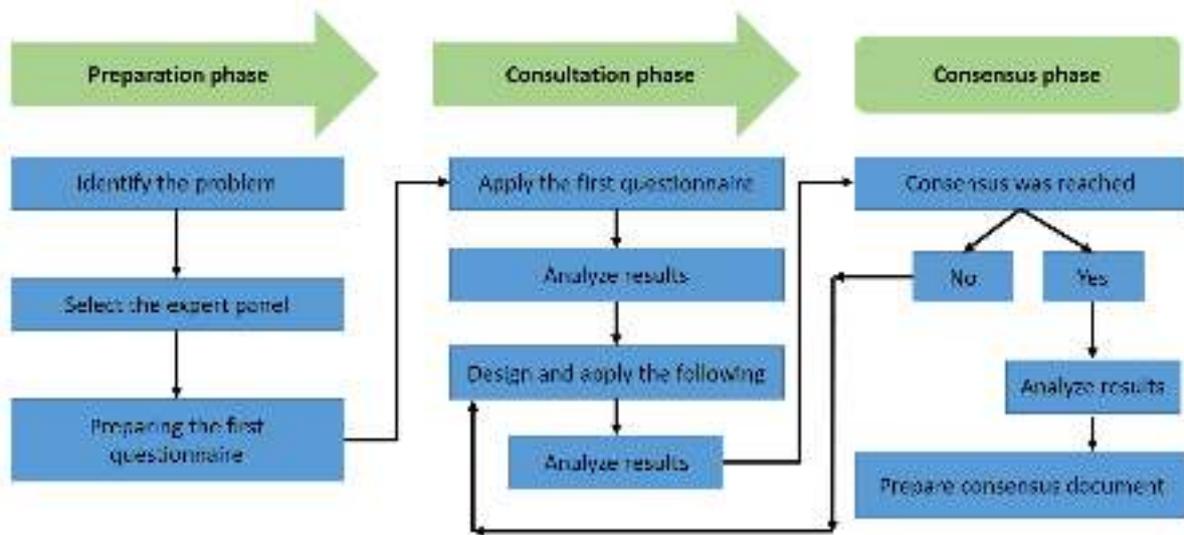


Figure 34 : The process of Delphi method is based on three phases [303]

Phase 1 Préparation : au départ, nous identifions clairement le problème dans la technique Delphi, et nous sélectionnons les décideurs avant de préparer notre questionnaire pour le premier tour, ce questionnaire doit de préférence contenir des questions avec choix multiple comme « oui/non » ou « d'accord/désaccord », les questions peuvent également inclure une échelle de notation par exemple de 1 à 9.

Phase 2 Consultations : nous commençons la distribution du questionnaire préparé sur les décideurs séparément et il est recommandé d'utiliser Internet, car c'est rapide, pratique, assure la confidentialité et il est peu coûteux, après la distribution des questionnaires, nous regroupons et résumons les réponses dans un seul document et nous analysons le résultat. Ensuite, nous commençons le deuxième tour avec une question proche du premier questionnaire, mais en incluant de manière anonyme le résultat des réponses du tour précédent avec une échelle d'accord avec ces réponses incluses.

Phase 3 Consensus : cette phase est basée sur le résultat de la phase de consultation. Nous traitons le niveau d'accord avec ce résultat et si le niveau de satisfaction dépasse par exemple 70 % nous l'acceptons, si ce n'est pas le cas nous regroupons les nouvelles réponses et nous commençons une nouvelle série de questionnaires nous répétons ce processus jusqu'à ce que nous atteignons le niveau d'accord acceptable ou ce que nous appelons « consensus ». Au final, nous préparons le document final avec le résultat de la

technique Delphi. Le nombre de tours de la méthode Delphi dépend de la convergence des jugements des experts.

Dans notre cas, nous avons appliqué Delphi sur 12 experts dans le domaine du système de port sec-port maritime ; ils ont évalué et déterminé l'interaction entre les différentes parties du système étudié, les différentes catégories de risques de chaque partie et les différents facteurs de risque de chaque catégorie figure 35. De plus, pour la distribution des questionnaires, nous avons utilisé Internet pour assurer l'isolement et la confidentialité.

3. Application de l'outil d'aide à la décision AHP - DELPHI

Dans notre cas, nous avons utilisé AHP afin d'atteindre deux points : le premier point est d'organiser nos facteurs de risque tangibles et intangibles de manière systématique. Ce qui nous amène à une structure simple figure 35 du système de « port sec-port maritime » et ses trois grandes parties, chaque partie contient huit catégories de facteurs de risque (facteurs de risques humains, facteurs de risques environnementaux, facteurs de risques sécuritaires, facteurs de risques naturels, facteurs de risques organisationnels, facteurs de risques opérationnels, facteurs de risques techniques et facteurs de risques économiques). Pour chaque catégorie, nous avons un ensemble de facteurs de risque. Le deuxième point consiste à affecter un poids pour chaque partie et catégorie de notre système en fonction de leur importance. Nous avons évalué chaque facteur de risque selon quatre critères (F) tableau de fréquences (S) tableau de gravité (D) tableau de détectabilité et (C) tableau de contrôlabilité basé sur les jugements intuitifs des décideurs.

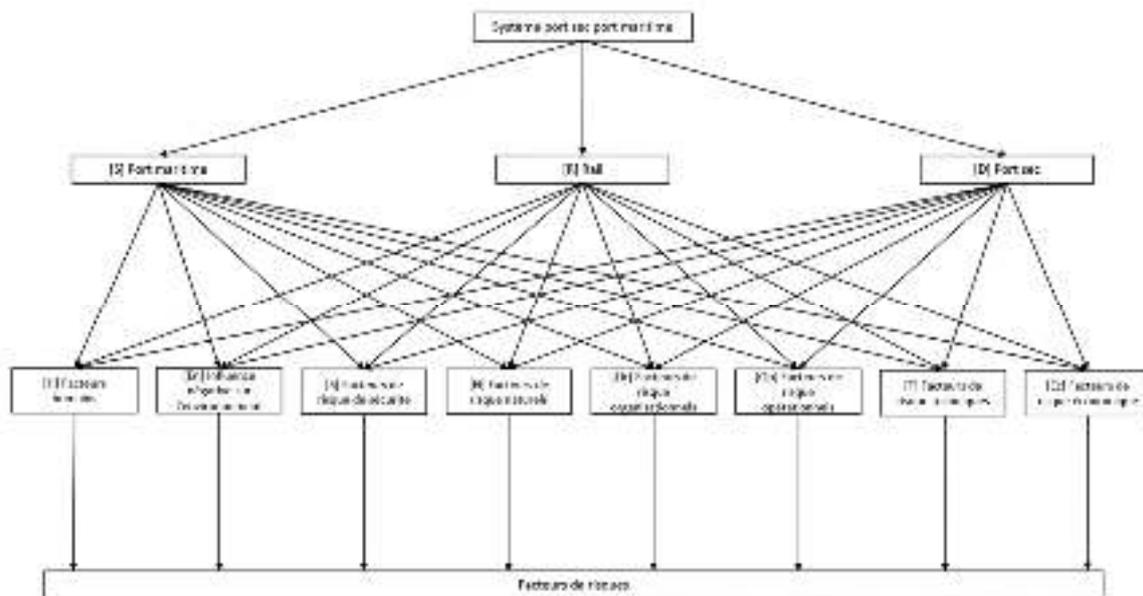


Figure 35 : The structure of the studied system

Après avoir déterminé les valeurs de l'importance de chaque partie, catégorie dans le système « port sec-port maritime », et chaque facteur de risque basé sur AHP en utilisant les échelles indiquées dans les tableaux 19-

23. Nous avons appliqué l'équation du score de risque Eq (1) pour obtenir le résultat présenté dans le tableau 24.

Tableau 19 : Échelle utilisée pour comparer les parties et les catégories en termes d'importance

Importance	Valeurs
Importance extrême de l'un par rapport à l'autre	9
Importance très forte de l'un par rapport à l'autre	7
Forte importance de l'un par rapport à l'autre	5
Importance modérée de l'un par rapport à l'autre	3
Importance égale	1
Valeurs intermédiaires	2,4,6,8

Tableau 20 : Échelle utilisée pour comparer les facteurs de risque en termes de fréquences

Fréquences	Valeurs
Continu	9
Une fois par jour	8
Plusieurs fois dans la semaine	7
Hebdomadaire	6
Plusieurs fois dans un mois	5
Mensuel	4
Plusieurs fois par an	3
Annuel	2
Rarement	1

Tableau 21: Échelle utilisée pour comparer les facteurs de risque en termes de gravité

Severity (Gravité)	Valeurs
Nombreux décès ou > \$10 ⁷ dégâts	9
Plus qu'un cas de décès, ou > \$10 ⁶ dégâts	8
Décès ou > \$10 ⁵ dégâts	7
Une blessure grave qui cause une handicap, ou > \$10 ⁴ dommages	6
Blessure grave ou > \$10 ⁴ dommages	5
Blessure qui cause un arrêt de travail pendant plus d'une journée, ou > 500 \$ de dommages	4
Blessure qui cause un arrêt de travail pendant une journée, ou > 300 \$ de dommages	3
Petite blessure ou > 100 \$ de dommages	2
Accident mineur de premiers soins, ou > 50 \$ Dommages	1

Tableau 22 : Échelle utilisée pour comparer les facteurs de risque en termes de détectabilité

Détectabilité	Valeurs
Aucun outil ne peut le détecter	9
À peine détecté par la technologie	8
La nécessité de la technologie pour le détecter	7
Difficilement détecté par les humains	6
Détection modérée	5
	4
Détectable	3
	2
Facile à détecter	1

Tableau 23 : Échelle utilisée pour comparer les facteurs de risque en termes de contrôlabilité

Contrôlabilité	Valeurs
Impossible à contrôler	9
Difficile à contrôler	8
	7
Contrôle modéré	6
	5
	4
Contrôlable	3
	2
Facile à contrôler	1

Enfin, nous sommes arrivés dans une phase où nous avons le score de risque de chaque facteur de risque et le niveau d'importance de chaque catégorie et de chaque partie de notre système étudié tableau 24, ce qui nous a donné la capacité d'analyser clairement le niveau d'impact des trois parties de notre système et les huit catégories de chaque partie. Cependant, le score de risque ici n'est limité que sur la partie traitée, par exemple le score de risque de [SH 1] Le manque de compétences professionnelles permet de comprendre le niveau d'impact de [SH 1] uniquement dans la partie port maritime. Par contre notre but ne se limite pas ici on veut avoir une idée sur l'impact de chaque facteur sur le système en entier. Pour illustrer cela, nous avons utilisé ce que nous avons appelé le score de risque total équation (11) pour donner le niveau d'impact de chaque facteur de risque sur tout le système. Le tableau 25 montre les principaux risques qui ont le plus d'impact sur l'ensemble du système de port sec-port maritime.

$$Total\ risk\ score = poid\ de\ la\ partie \times poid\ de\ la\ categorie \times le\ score\ de\ risque\ du\ facteurs \quad (11)$$

Tableau 24 : Le score de risque de chaque facteur de risque et le niveau d'importance de chaque catégorie et de chaque partie de notre système

	[S] Seaport (0.5396)	S	F	D	C	Risk score	[R] Railway (0.1634)	S	F	D	C	Risk score	[D] Dry port (0.2969)	S	F	D	C	Risk score	
[H] Facteurs humains (0.2808)	[SH 1] Lack of professional skills	0.0476	0.0691	0.0691	0.0376	8.55137 E-06	[RH 1] Lack of professional skills	0.0281	0.0749	0.0501	0.0294	3.09845 E-06	[DH 1] Lack of professional skills	0.0472	0.0687	0.0664	0.0534	1.15 E-05	
	[SH 2] Working concentration	0.0853	0.2297	0.3114	0.0681	0.000415277	[RH 2] Working concentration	0.0487	0.2170	0.2109	0.0499	0.000111262	[DH 2] Working concentration	0.0829	0.2088	0.3298	0.0998	0.00057	
	[SH 3] Misinterpretation of Instructions at Workplace	0.1228	0.3114	0.2297	0.2064	0.0018132	[RH 3] Misinterpretation of Instructions at Workplace	0.0687	0.2718	0.1674	0.1468	0.000458956	[DH 3] Misinterpretation of Instructions at Workplace	0.1406	0.3547	0.2377	0.1586	0.00188	
	[SH 4] Safety climate	0.1661	0.0399	0.1231	0.2939	0.000239623	[RH 4] Safety climate	0.0919	0.0445	0.0915	0.2408	9.01094 E-05	[DH 4] Safety climate	0.2853	0.0402	0.1216	0.3192	0.000446	
	[SH 5] Inadequate compliance of standards	0.0213	0.1748	0.1748	0.0681	4.43365 E-05	[RH 5] Inadequate compliance of standards	0.0140	0.1083	0.1307	0.0499	9.85893 E-06	[DH 5] Inadequate compliance of standards	0.0253	0.1778	0.1775	0.0998	7.96 E-05	
	[SH 6] Sinking	0.3054	0.0223	0.0223	0.1122	1.71108 E-05	[RH 6] Impact of suicides on railway workers	0.1223	0.0875	0.2446	0.2130	0.000557688	[DH 6] Unsuitable reaction on errors	0.0280	0.1213	0.0393	0.1693	2.26 E-05	
	[SH 7] Unsuitable reaction on errors	0.0292	0.1231	0.0399	0.1458	2.0883 E-05	[RH 7] Unsuitable reaction on errors	0.0182	0.1446	0.0313	0.0852	7.00421 E-06	[DH 7] Not following instruction	0.3907	0.0284	0.0278	0.0998	3.08 E-05	
	[SH 8] Not following instruction	0.2223	0.0296	0.0296	0.0681	1.32757 E-05	[RH 8] Not following instructions	0.1682	0.0219	0.0217	0.0499	3.98828 E-06							
							[RH 9] Pedestrian fatalities / Level crossing accidents	0.2664	0.0175	0.0217	0.0852	8.62453 E-06							
							[RH 10] Risky driving behaviour	0.1736	0.0120	0.0300	0.0400	2.49917 E-06							
[En] Influence négative sur l'environnement (0.0224)	[SEn 1] Air pollution	0.1170	0.2353	0.0787	0.1003	0.000217147	[REn 1] Noise pollution	0.0751	0.7092	0.1340	0.1005	0.000716878	[DEN 1] Air pollution	0.1666	0.2430	0.0840	0.1005	0.000342	
	[SEn 2] Noise pollution	0.0633	0.6076	0.0339	0.4890	0.000637393	[REn 2] Danger goods transportation	0.5917	0.0840	0.2609	0.4665	0.006049612	[DEN 2] Noise pollution	0.0938	0.7009	0.2109	0.4330	0.006005	
	[SEn 3] Chemical contaminants	0.5354	0.0480	0.2983	0.2533	0.001943077	[REn 3] Collision between train and animals	0.3332	0.2068	0.6049	0.4330	0.018047712	[DEN 3] Chemical contamination	0.7396	0.0562	0.7049	0.4665	0.013657	
	[SEn 4] Grounded ship impact	0.2210	0.0328	0.3900	0.0787	0.000222309													
	[SEn 5] Salvage activities	0.0633	0.0763	0.1991	0.0787	7.5713 E-05													
[S] Facteurs de risque de sécurité (0.1639)	[SS 1] Sabotage	0.0308	0.0988	0.2799	0.0210	1.79295 E-05	[RS 1] Sabotage	0.0307	0.2806	0.3444	0.0250	7.41282 E-05	[DS 1] Sabotage	0.0302	0.0990	0.2797	0.0211	1.76 E-05	
	[SS 2] Vandalism	0.0516	0.0784	0.0676	0.0352	9.62523 E-06	[RS 2] Vandalism	0.0528	0.1199	0.1952	0.0408	5.04427 E-05	[DS 2] Vandalism	0.0507	0.0765	0.0675	0.0353	9.23 E-06	
	[SS 3] Terrorism attacks	0.1441	0.0225	0.0183	0.1977	1.1699 E-05	[RS 3] Terrorism attacks	0.1017	0.0539	0.0276	0.2177	3.29123 E-05	[DS 3] Terrorism attacks	0.1180	0.0225	0.0183	0.1983	9.62 E-06	
	[SS 4] Arson and purposed fire.	0.0705	0.0988	0.0356	0.0764	1.89203 E-05	[RS 4] Arson and purposed fire.	0.0757	0.0754	0.0847	0.1142	5.52633 E-05	[DS 4] Arson and purposed fire.	0.0759	0.0990	0.0355	0.0766	2.04 E-05	
	[SS 5] Illegal trade	0.0183	0.2343	0.1722	0.0532	3.9254 E-05	[RS 5] Theft	0.0201	0.3068	0.1066	0.0590	3.8744 E-05	[DS 5] Illegal trade	0.0178	0.2348	0.1721	0.0533	3.84 E-05	
	[SS 6] Illegal immigration	0.0129	0.2343	0.1268	0.0532	2.03597 E-05	[RS 6] War	0.3369	0.0550	0.0428	0.3022	0.000239573	[DS 6] Illegal immigration	0.0125	0.2348	0.1267	0.0533	1.99 E-05	

	[SS 7] Theft	0.0196	0.0988	0.0936	0.0532	9.63467 E-06	[RS 7] Political instability	0.2383	0.0786	0.1450	0.1595	0.000433038	[DS 7] Theft	0.0191	0.0990	0.0935	0.0533	9.45 E-06	
	[SS 8] War	0.2388	0.0225	0.0221	0.2338	2.77342 E-05	[RS 8] Collision between trains (caused other train)	0.1437	0.0300	0.0538	0.0816	1.89201 E-05	[DS 8] War	0.2315	0.0225	0.0221	0.2345	2.7 E-05	
	[SS 9] Political instability	0.1891	0.0225	0.0510	0.1178	2.55238 E-05							[DS 9] Political instability	0.1855	0.0225	0.0513	0.1181	2.53 E-05	
	[SS 10] Blockade	0.1091	0.0225	0.0338	0.0975	8.07864 E-06							[DS 10] Blockade	0.1323	0.0225	0.0342	0.0978	9.97 E-06	
	[SS 11] Falsification of documents	0.0531	0.0381	0.0811	0.0329	5.39711 E-06							[DS 11] Falsification of documents	0.0590	0.0382	0.0810	0.0301	5.51 E-06	
	[SS 12] Hack of security system	0.0619	0.0286	0.0180	0.0282	8.99518 E-07							[DS 12] Hack of security system	0.0674	0.0287	0.0180	0.0282	9.83 E-07	
[N] Facteurs de risque naturels (0.0317)	[SN 1] Earthquakes	0.2254	0.0253	0.2990	0.2936	0.000499916	[RN 1] Earthquakes	0.3033	0.0326	0.3122	0.2900	0.000894152	[DN 1] Earthquakes	0.3967	0.0300	0.3622	0.3740	0.001612	
	[SN 2] Strong wind	0.0846	0.1330	0.0632	0.0602	4.27949 E-05	[RN 2] Strong wind	0.1030	0.1174	0.0641	0.0742	5.75199 E-05	[DN 2] Strong wind	0.0920	0.1300	0.0641	0.0742	5.69 E-05	
	[SN 3] Heavy rain	0.0558	0.1306	0.0632	0.0413	1.90316 E-05	[RN 3] Heavy rain	0.0638	0.1534	0.0590	0.0510	2.94573 E-05	[DN 3] Heavy rain	0.0593	0.1440	0.0641	0.0538	2.95 E-05	
	[SN 4] Fog	0.0564	0.1760	0.1144	0.0956	0.000108451	[RN 4] Fog	0.0356	0.2086	0.1062	0.1049	8.26191 E-05	[DN 4] Fog	0.0593	0.2327	0.1062	0.1049	0.000154	
	[SN 5] Wave height	0.0639	0.0902	0.0386	0.0602	1.3383 E-05	[RN 5] Hurricane and cyclones risk	0.1230	0.0773	0.1350	0.1300	0.000166763	[DN 5] Hurricane and cyclones risk	0.1270	0.0380	0.1350	0.1400	9.12 E-05	
	[SN 6] Tide	0.0639	0.0678	0.0386	0.0602	1.00602 E-05	[RN 6] high temperature during work	0.0356	0.3090	0.0500	0.0378	2.07463 E-05	[DN 6] High temperature during work	0.0344	0.3975	0.0641	0.0378	3.31 E-05	
	[SN 7] Hurricane and cyclones risk	0.1220	0.0231	0.1219	0.1212	4.16261 E-05	[RN 7] Pandemic	0.1958	0.0317	0.2043	0.2050	0.000260181	[DN 7] Pandemic	0.2313	0.0280	0.2043	0.2148	0.000284	
	[SN 8] Floods	0.1220	0.0462	0.0386	0.0602	1.30946 E-05	[RN 8] Rock fall hazard	0.1300	0.0700	0.0700	0.1100	0.00007007							
	[SN 9] High Temperature during working hours	0.0298	0.2831	0.0632	0.0557	2.97553 E-05													
	[SN 10] Pandemic	0.1764	0.0247	0.1592	0.1519	0.000105196													
[Or] Facteurs de risque organisationnels (0.1014)	[SO r 1] Gate congestion	0.1317	0.1596	0.0253	0.0512	2.72662 E-05	[ROr 1] Lack of monitoring and checking	0.0311	0.1000	0.0664	0.0455	9.38706 E-06	[DO r 1] Gate congestion	0.1468	0.1775	0.0267	0.0508	3.54 E-05	
	[SO r 2] Storage area congestion	0.0720	0.0978	0.0454	0.0948	3.03078 E-05	[ROr 2] Poor change management	0.0521	0.2623	0.2377	0.1218	0.00039576	[DO r 2] Storage area congestion	0.0657	0.1088	0.0480	0.0939	3.22 E-05	
	[SO r 3] Error in cargo handling and storage	0.0193	0.0708	0.0694	0.0297	2.82412 E-06	[ROr 3] Pressure and fatigue	0.0769	0.3748	0.0278	0.0823	6.60335 E-05	[DO r 3] Error in cargo handling and storage	0.0230	0.0787	0.0732	0.0295	3.91 E-06	
	[SO r 4] Lack of inspections and lack of monitoring and checking	0.0946	0.0375	0.0454	0.0199	3.20689 E-06	[ROr 4] Strike	0.3680	0.0711	0.1216	0.2301	0.000731717	[DO r 4] Lack of inspections/Lack of monitoring and checking	0.0761	0.0417	0.0480	0.0197	3 E-06	
	[SO r 5] poor change management	0.0314	0.0521	0.1197	0.0297	5.81534 E-06	[ROr 5] Inadequate standards	0.2159	0.0534	0.3298	0.3240	0.001230758	[DO r 5] Poor change management	0.0374	0.0579	0.1263	0.0295	8.06 E-06	
	[SO r 6] Pressure and fatigue	0.0363	0.3026	0.0253	0.0199	5.52581 E-06	[ROr 6] Poor error management	0.1073	0.0852	0.1775	0.1686	0.000273348	[DO r 6] Pressure and Fatigue	0.0432	0.3365	0.0267	0.0197	7.65 E-06	
	[SO r 7] Strike	0.2643	0.0155	0.0694	0.1388	3.94028 E-05	[ROr 7] Bad train scheduling	0.1487	0.0534	0.0393	0.0276	8.61433 E-06	[DO r 7] Strike	0.3147	0.0172	0.0732	0.1376	5.46 E-05	
	[SO r 8] Inadequate standards	0.0693	0.0286	0.1289	0.2382	6.08932 E-05								[DO r 8] Inadequate standards	0.0761	0.0318	0.1361	0.2361	7.78 E-05
	[SO r 9] Poor error management	0.0193	0.0209	0.1007	0.0948	3.8635 E-06								[DO r 9] Poor error management	0.0229	0.0233	0.1063	0.0939	5.33 E-06
	[SO r 10] Deliver the wrong container.	0.0770	0.0209	0.2477	0.1759	7.0237 E-05								[DO r 10] Deliver the wrong container.	0.0740	0.0233	0.2614	0.1743	7.85 E-05

	[SOr 11] Berth congestion	0.0924	0.0968	0.0175	0.0446	7.00234 E-06							[DOr 11] Lack of equipment	0.0330	0.0714	0.0278	0.0265	1.74 E-06
	[SOr 12] Lack of equipment	0.0254	0.0645	0.0263	0.0268	1.15539 E-06							[DOr 12] Lack of standards	0.0871	0.0317	0.0463	0.0885	1.13 E-05
	[SOr 13] Lack of standards	0.0670	0.0323	0.0789	0.0357	6.09204 E-06												
[Op] Facteurs de risque opérationnels (0.0682)	[SOp 1] Seaport equipment collision during operations	0.1121	0.0509	0.0309	0.0544	9.59413 E-06	[ROp 1] Containers Fall from train	0.1368	0.1722	0.0465	0.0835	9.15632 E-05	[DOp 1] Dry Port equipment collision during operations	0.1409	0.0550	0.0324	0.0600	1.51 E-05
	[SOp 2] Container damage	0.0191	0.2596	0.0541	0.0984	2.64334 E-05	[ROp 2] Cargo waste during transportation	0.0828	0.1525	0.2258	0.0490	0.000139819	[DOp 2] Container damage	0.0238	0.2810	0.0557	0.0440	1.64 E-05
	[SOp 3] Cargo waste	0.0330	0.1392	0.1647	0.0223	1.68369 E-05	[ROp 3] Cargo/good damage during transportation	0.0581	0.1637	0.3734	0.1392	0.000494067	[DOp 3] Cargo waste	0.0420	0.1486	0.1700	0.0700	7.42 E-05
	[SOp 4] Cargo/good damage during port loading/unloading	0.0251	0.1971	0.2455	0.0223	2.70612 E-05	[ROp 4] Container damage during transportation	0.0408	0.4791	0.1285	0.1704	0.000428014	[DOp 4] Cargo/good damage during port loading/unloading	0.0317	0.2117	0.2648	0.0560	9.96 E-05
	[SOp 5] Hazardous goods spilling	0.3210	0.0214	0.1647	0.3162	0.000357507	[ROp 5] Hazardous goods spilling	0.6815	0.0324	0.2258	0.5579	0.002782771	[DOp 5] Hazardous goods spilling	0.3827	0.0237	0.1760	0.3526	0.000562
	[SOp 6] Seaport equipment failures during operations	0.0444	0.0924	0.1207	0.1449	7.17394 E-05							[DOp 6] Dry Port equipment failures during operations	0.0567	0.0989	0.1258	0.1602	0.000113
	[SOp 7] Worker death during operations.	0.1958	0.0297	0.0843	0.1911	9.38155 E-05							[DOp 7] Worker death during operational operations.	0.2415	0.0328	0.0871	0.2192	0.000151
	[SOp 8] Worker injured during operations	0.0633	0.1392	0.0843	0.0324	2.41251 E-05							[DOp 8] Worker injured during operational operations	0.0807	0.1486	0.0871	0.0385	4.03 E-05
	[SOp 9] Vessel collision	0.1121	0.0409	0.0309	0.0884	1.25343 E-05												
	[SOp 10] Mooring operation fails	0.0741	0.0296	0.0196	0.0296	1.27324 E-06												
[T] Facteurs de risque techniques (0.0452)	[ST 1] Stopping temporary of information system caused by a technical	0.0393	0.0847	0.1831	0.0443	2.70152 E-05	[RT 1] Information delay.	0.0210	0.4066	0.3490	0.1487	0.000442581	[DT 1] Stopping temporary of information system caused by a technical	0.0451	0.0928	0.1888	0.0502	3.97 E-05
	[ST 2] Information delay	0.0239	0.3523	0.3432	0.0791	0.000228851	[RT 2] Power outage	0.2359	0.1036	0.0336	0.2394	0.000196858	[DT 2] Information delay.	0.0274	0.3840	0.3666	0.0874	0.000337
	[ST 3] Power outage	0.2889	0.0246	0.0697	0.2385	0.000118364	[RT 3] Poor Lighting visibility.	0.0325	0.2499	0.0752	0.0952	5.80969 E-05	[DT 3] Power outage	0.3217	0.0281	0.0711	0.0931	5.99 E-05
	[ST 4] Poor functioning of dry port equipment	0.1017	0.2215	0.1761	0.1380	0.000547504	[RT 4] Technical issue in railway turnout systems	0.1389	0.0566	0.0644	0.0952	4.82145 E-05	[DT 4] Poor functioning of dry port equipment	0.1149	0.2414	0.1802	0.1606	0.000802
	[ST 5] Poor lighting visibility	0.0697	0.1507	0.0979	0.0819	8.42737 E-05	[RT 5] SPAD (Signal Passed at Danger) risk duo to technical factors	0.0548	0.1236	0.2322	0.0526	8.26957 E-05	[DT 5] Poor lighting visibility	0.0815	0.1630	0.0994	0.0912	0.000121
	[ST 6] Seaport equipment breakdown	0.1547	0.0479	0.0484	0.1479	5.30358 E-05	[RT 6] Derailment due to technic reasons	0.3250	0.0249	0.1869	0.3382	0.000510739	[DT 6] Dry port equipment breakdown	0.1658	0.0520	0.0469	0.2262	9.14 E-05
	[ST 7] Breakdown of seaport information system	0.2156	0.0477	0.0484	0.2385	0.000118856	[RT 7] Unavailable train (technical problems)	0.1920	0.0348	0.0587	0.0307	1.2013 E-05	[DT 7] Breakdown of dry port information system	0.2436	0.0381	0.0469	0.2913	0.000127
	[ST 8] The berth's length	0.1061	0.0705	0.0332	0.0318	7.91009 E-06												
	[SEc 1] Unexpected Cost of evaluation and maintenance	0.0455	0.3691	0.2208	0.0328	0.000121923	[REc 1] Unexpected Cost of evaluation and maintenance	0.1667	0.8571	0.1250	0.1111	0.00198412	[DEc 1] Unexpected Cost of evaluation and maintenance	0.0455	0.3691	0.2208	0.0328	0.000122

[Ec] Facteurs de risque économique (0.2863)	[SEc 2] Global economic transformations. (crises)	0.2301	0.0440	0.0517	0.2269	0.000118857	[REc 2] Economic loss because natural hazard	0.8333	0.1429	0.8750	0.8889	0.092592261	[DEc 2] Global economic transformations (crises)	0.2301	0.0440	0.0517	0.2269	0.000119
	[SEc 3] Commercial fraud	0.1686	0.1111	0.3893	0.1639	0.001195067							[DEc 3] Commercial fraud	0.1686	0.1111	0.3893	0.1639	0.001195
	[SEc 4] Load / Unload loss	0.1218	0.1521	0.1220	0.1161	0.000262556							[DEc 4] Load / Unload loss	0.1218	0.1521	0.1220	0.1161	0.000263
	[SEc 5] Economic loss because natural hazard	0.3240	0.0306	0.0517	0.3218	0.000164899							[DEc 5] Economic loss because natural hazard	0.3240	0.0306	0.0517	0.3218	0.000165
	[SEc 6] Customer refuse to pay	0.0823	0.0747	0.0823	0.0827	4.18175 E-05							[DEc 6] Customer refuse to pay	0.0823	0.0747	0.0823	0.0827	4.18 E-05
	[SEc 7] Customer unable to pay	0.0280	0.2183	0.0823	0.0557	2.80087 E-05							[DEc 7] Customer unable to pay	0.0276	0.2183	0.0823	0.0557	2.76 E-05

Tableau 25 : Les 10 principaux facteurs de risque dans le système de PSPM

Facteurs de risques	Total Risk Score
[REc 2]	0.004331597
[SH 3]	0.000274735
[SEc 3]	0.000184623
[DH 3]	0.000156735
[DEc 3]	0.000101578
[REc 1]	9,282 E-05
[DEn 3]	9,08267 E-05
[REn 3]	6,60575 E-05
[SH 2]	6,29226 E-05
[DH 2]	4,75206 E-05

D'après les résultats de notre étude, on peut facilement constater que la partie la plus importante dans le système PSPM c'est le port maritime, une évaluation erronée des risques dans cette partie peut paralyser le système en entier.

Conclusion

Cette étude est le fruit d'un travail précoce [20], qui montre qu'un des thèmes de recherches les moins traités dans le système PSPM est le thème de la gestion des risques. Et en raison des avantages et de l'énorme impact positif du système étudié qui peut être produits techniquement, socialement, environnementale, et économiquement [5], [25], et l'importance primordiale du thème de gestion des risques, nous avons décidé de combler cette lacune dans notre étude.

Pour faire face à la complexité du système étudié, nous avons proposé modèle qui nous donne la capacité de : 1) proposer une structure systématique utilisant AHP (figure 35) pour simplifier la modélisation de la complexité du système étudié, ce qui facilite et organise nos prochaines étapes de distribution et de notation des facteurs de risque. 2) Nous avons distribué des questionnaires à nos 12 experts choisis. Habituellement, lors d'une réunion normale, nous sommes confrontés au problème connu d'avoir un expert avec une forte personnalité ou une position qui domine la réunion et influence les autres experts. Pour éviter ce problème, ainsi le problème de disponibilité des experts, nous avons utilisé la technique Delphi (figure 34) qui garantit l'anonymat, et conduit à un accord total sur les jugements intuitifs nécessaires pour évaluer les Fréquences, la Gravité, la Détectabilité et la Contrôlabilité de chaque facteur de risque. De plus, nous évaluons également le niveau d'importance de chaque partie et catégorie dans le système étudié. 3) calculer le score de risque Eq (1) de chaque facteur de risque qui nous donne une idée de l'impact du facteur de risque sur chaque partie du système PSPM (port maritime, Rail et port sec). De plus, nous calculons le score de risque total Eq (2) qui nous donne l'impact de chaque facteur de risque sur l'ensemble du système PSPM et pas seulement dans l'une de ses trois parties.

Bien évidemment, la méthode MCDM AHP est souvent utilisée pour évaluer différentes alternatives selon des critères multiples, mais dans notre cas l'utilisation d'AHP était pour le but d'évaluer les critères pour identifier les alternatives.

Le résultat de cette étude va aider les décideurs et les praticiens pour faciliter l'évaluation des facteurs de risque fondés et les hiérarchiser en fonction du score de risque s'ils travaillent sur une seule des trois parties, ou du score de risque total si le contexte de travail est tout le système PSPM.

L'avantage de la plateforme proposée est la simplicité et la facilité de son application pour les praticiens sur tous les systèmes multi critères similaires. Que ce soit le problème traité dans :

la gestion des risques, la gestion de la localisation, la gestion des performances ou tout autre système avec un cadre décisionnel à plusieurs critères.

Ce chapitre représente une plateforme riche pour les chercheurs et praticiens qui traitent la gestion de risques dans les systèmes similaires. Le chapitre suivant se base sur les résultats de ce chapitre et les algorithmes de machine Learning afin de développer un algorithme intelligent qui contribue dans la gestion des risques d'une manière plus développée dans le cadre de l'industrie 4.0.

**CHAPITRE 04. ÉVALUATION DES RISQUES À L'AIDE
DE LA PLATEFORME WOA - ANN**

Introduction

Ce chapitre est le fruit des trois chapitres précédents. Après la définition du concept de port sec et ses avantages et l'illustration des thèmes de recherches possibles du port sec dans le chapitre 1, on a traité l'ensemble du système port sec port maritime pour l'identification des facteurs de risques potentiels et les méthodes de gestion de risques utilisées dans notre système, ensuite dans le chapitre 3 on a appliqué une plateforme multicritère pour évaluer les facteurs de risques en utilisant DELPHI-AHP. Ce chapitre vient pour bien pousser nos recherches en avant et faire accorder notre thèse à la quatrième révolution industrielle ou ce qui est connu aujourd'hui sous le terme de l'industrie 4.0.

Même avec les perturbations de la pandémie COVID 19, le rôle essentiel du port maritime est clairement critique avec la croissance continue du commerce maritime mondiale [304]. Au fil des années, la compétitivité de la manutention efficace du nombre croissant de conteneurs a poussé les ports maritimes à améliorer la performance de ses opérations pour gérer le débit et le flux des marchandises [305]. Cependant, au milieu de cette compétitivité, de nombreux sous-problèmes et extensions liés à la complexité des opérations des terminaux sont apparus [306]. L'un des sous-problèmes les plus remarquables est le problème de l'allocation du quai (The Berth Allocation Problem BAP) [305] [306], dont on peut classer ses causes dans quatre classes : **1 / Classe spatial** ce type rassemble les causes liées à la structure du port maritime par exemple la profondeur d'eau. **2 / classe temporelle** on classe dans ce type les contraintes temporelles qui peuvent influencer le processus de service, par exemple la façon dont les temps de manutention des navires sont considérés, et la performance des opérations par rapport les objectifs [306]. Le traitement incorrect des (BAP) peut nous donner ce que l'on pourrait appeler le risque de congestion des quais (Berth Congestion Risk BCR), cette situation nous conduire à des pertes à cause de temps d'attente et des retards dans les délais de livraison time [307]. De plus, la récurrence des conséquences de la (BCR) peut provoquer un phénomène de stagnation de la Supply Chain (SC) nommé l'effet d'entraînement *the ripple effect* [308].

Puisque le résultat d'évaluation des facteurs des risques du système port sec port maritime dans le chapitre précédant nous montre que le port maritime représente un nœud critique dans notre système avec une importance qui dépasse 50%, ce qui est évident car l'impact des risques qui touche le port maritime va être généralisé sur le système PSPM en entier. Dans ce chapitre on a choisi un facteur très important qui impacte le système en entier c'est les retards des navires dans les quais qui causent la congestion des quais Berth Congestion Risk (BCR).

Le risque de congestion des quais a été traité sous différents angles : En 1980 [309] a critiqué l'ordre d'arrivée utilisé principalement dans les ports maritimes, premier arrivé-premier servi (first-come-first-served FCFS). Il indique que la sensibilité du retard nécessite un traitement adéquat en illustrant des critères qui doivent être considérés pour sortir avec organisation plus optimale de la priorité de l'ordre des navires ; [310] ont présenté des modèles sur les services de remorqueurs et leur impact sur les terminaux portuaires encombrés ; [311] ont résolu le problème des conflits d'intérêts liés aux mouillages et aux plans industriels d'aménagement de l'eau ; [312], [313] prennent la question sous l'angle des systèmes de péage et de leur impact sur la congestion des quais ; [314] dans sa simulation, il a lié le BCR à de nombreux paramètres, par exemple l'utilisation des quais, le nombre moyen de navires en file d'attente, le temps moyen qu'un navire attende en file, le temps moyen de chargement et de déchargement, le temps total qu'un navire passe à quai dans le port maritime, la productivité moyenne des grues de quai et d'autres fonctionnalités ; [315] considèrent d'autres facteurs qui pourraient conduire à un BCR : le temps improductif à quai et le temps de rotation des porte-conteneurs. ([316] ont lié le BCR aux opérations de manutention et ses effets sur la capacité de le débit et le flux des marchandises.

Dans ce chapitre, nous avons essayé d'entamer le Berth Congestion Risk BCR en proposant une plateforme basée sur le réseau de neurones artificiels (Artificial Neurons Networks ANN), qui peut prédire la possibilité d'avoir des retards dans le quai de port maritime en se basant sur : l'indice de connectivité de port maritime, le débit et le flux des marchandises, l'âge des navires, la taille des navires et la capacité de transports des navires.

Les sections de ce chapitre sont organisées comme suite : section 1 présente un aperçu sur les recherches qui utilisent l'intelligence artificielle comme un outil dans le cadre du port maritime. Section 2 illustre l'utilité des outils et les méthodes choisies dans notre étude commençant par les ANN et ses types et les méta-heuristiques inspirés de la nature en présentant quelques exemples de ces méta-heuristiques. De plus, la section 3 présente les Dataset utilisés dans notre modèle de prédiction. Section 4 explique le cadre hybride de notre modèle en détaillant la contribution scientifique de notre hybridation. Section 5 présente l'application de modèle (Whale Optimization Algorithm – Artificial Neuron Network) WOA-ANN sur notre cas d'étude avant présenter une comparaison du modèle avec les modèles de machine learning traditionnel pour évaluer la performance de notre modèle selon trois métriques Accuracy, F1 score et ROC AUC.

1. Etude de l'application d'intelligence artificielle dans la logistique portuaire

L'intelligence artificielle (IA) est aujourd'hui considérée comme un élément important de la prise de décision dans la plupart des industries [317], et ces dernières années, le nombre d'articles utilisant des algorithmes d'IA a considérablement augmenté [318]. La recherche sur l'intelligence artificielle visait d'abord à imiter la prise de décision humaine en utilisant un énorme volume de données. Aujourd'hui, l'IA peut faire des choses qui étaient impensables dix ans auparavant. Par exemple, des algorithmes d'IA raffinés présentent des navires indépendants, qui peuvent fonctionner de manière autonome sans interaction humaine, et le taux d'erreur est inférieur à celui des navires exploités par l'homme. La simulation de l'intelligence humaine se développe en permanence en améliorant le processus opérationnel traditionnel de l'industrie maritime. Par conséquent, le nombre de recherches sur l'application IA a augmenté depuis 2012 [319]. Ce changement reforme l'industrie maritime, en offrant de nouvelles chances d'améliorer la productivité [320].

Selon [317], il existe quatre catégories qui regroupent les recherches maritimes qui se basent sur l'IA :

(1) **La transformation numérique**, qui contient *le développement de technologies* afin d'améliorer le modèle commercial et de fournir de nouveaux revenus et opportunités [321], [320] et [322], *les systèmes communautaires portuaires (PCS)* qui rassemblent des composants hétérogènes d'acteurs publics et privés, de technologies, de systèmes, de processus et de normes au sein d'un port [320] et *l'innovation dans le transport maritime* ont présenté des solutions innovantes centrées sur le client [323] [324].

(2) **Applications des Big data et l'IAs**, dans cette catégorie, nous avons trouvé la *surveillance maritime* qui fournit un soutien aux politiques maritimes telles que la sécurité maritime, comme le soutage illicite [325], pour la détection d'anomalies dans le suivi des navires [326] et recherche et sauvetage [327], dans ce groupe aussi, nous avons trouvé des études sur la détection d'anomalies, en utilisant l'exploration de données, l'apprentissage statistique et automatique [328] par exemple [329] ont utilisé les réseaux bayésiens (BN) comme algorithme d'apprentissage automatique pour la détection d'anomalies dans le suivi des navires.

(3) **Efficacité énergétique**, les chercheurs ont utilisé l'IA pour obtenir une meilleure efficacité énergétique dans le transport maritime sous différents angles. Par exemple [330] ont utilisé une vitesse optimale des bateaux de navigation intérieure basée sur des algorithmes de

(clustering K-means) afin de réduire la consommation d'énergie des navires et l'impact négatif sur l'environnement.

(4) **L'analyse prédictive** est le sujet le plus dominant dans les recherches maritimes, allant de la prédiction de l'échec de la propulsion des navires à la prédiction des effets toxiques sur les eaux côtières. Par exemple, dans la performance des navires : [331] ont utilisé le (Support Vector Machine) SVM pour prédire le risque de défaillance d'un système de propulsion de navire. [332] sur la base de modèles machine learning ML non supervisés One-Class SVM (OCSVM) et Global KNN (GKNN), ils ont essayé de prédire l'état de la coque des navires. Et pour le système de surveillance visuelle [333], des modèles de (Convolutional Noron Network CNN) ont été utilisés pour améliorer la précision de la reconnaissance visuelle des navires maritimes et des véhicules terrestres. De plus [334], ils ont utilisé CNN et les auto-encodeurs (Convolutional Long Short Term Memory Selectional Auto Encoders CMSAE) afin de prévoir les déversements d'hydrocarbures maritimes à l'aide d'images radar aéroportées à visée latérale.

2. Matériels et méthodes

2.1. Réseaux de neurones artificiels ANN

La fondation de la théorie de ANN a été présentée en 1943 par les neurologues et scientifiques McCulloch et Pitts [335]. À cet égard, les ANNs sont considérés comme une méthode de modélisation mathématique qui imite le cerveau humain et ses structures de réseau de neurones afin de simuler les systèmes physiques correspondants [336] [337]. En ce sens, les algorithmes ANN peuvent être classés en réseaux de neurones à propagation vers l'avant (Feedforward) et en réseaux de neurones à propagation vers l'arrière (Backpropagation FBNN), chaque catégorie contenant différents cadres, comme le montre la figure 36.

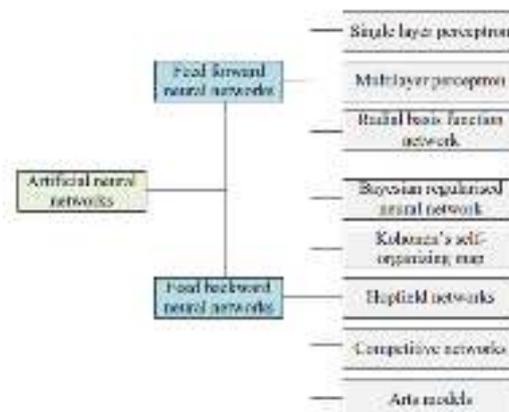


Figure 36 : Classification des ANNs [337]

[338] En général, le réseau de neurones à propagation vers l'avant (feed forward neural network FFNN) représente la situation où le traitement de l'information dans le réseau implique la saisie de données à partir des unités d'entrée et passe à travers le réseau, suivant d'une couche à une autre jusqu'à ce qu'il arrive aux unités de sortie. Normalement, ANN fonctionne comme un classificateur, sans rétroaction entre les couches [339]. Dans FFNN, les informations transmises ne circulent que dans un seul sens, des nœuds d'entrée, vers les nœuds cachés s'il y en a, puis vers les nœuds de sortie. Avec ce comportement, ils sont appelés réseaux de neurones feedforward.

En d'autres parts, le Feedback Neural Network (FBNN) ou ce qu'on appelle le Back-Propagation ANN (BPANN) souvent utilisé dans l'apprentissage supervisé. Le FBNN est similaire à la structure du FFNN à l'exception du renvoi des informations erronées pour la modification itérative des valeurs de poids jusqu'à ce que l'erreur ne puisse plus s'améliorer pour obtenir une variable de sortie plus précise [340]. Une structure BPNN typique est illustrée dans la section 4.

Les origines de l'algorithme de Back-Propagation ANN (BPANN) remontent aux années 1970, mais il était inconnu jusqu'en 1986 où un article célèbre a été publié par David Rumelhart, Geoffrey Hinton et Ronald Williams [341] [342], où ils décrivent l'énorme impact de la Back-Propagation ANN (BPANN) qui fonctionne plus rapidement et permet d'utiliser des réseaux de neurones pour résoudre certains problèmes insolubles. L'algorithme de BPANN est aujourd'hui l'algorithme le plus utilisé dans les réseaux de neurones [343].

Bien qu'il n'y ait pas un accord entre les chercheurs sur la façon de créer une structure optimale d'un ANN, les chercheurs utilisent les méthodes empiriques pour trouver une structure optimale de ANN mais ça reste une méthode non optimale et qui consomme beaucoup de ressources.

Si le nombre de couches cachées dans un ANN est supérieur à ce qu'il devrait être, cela peut amener l'ANN à mémoriser et à diminuer sa précision de prédiction par rapport aux nouvelles données et en tombe dans le surapprentissage [344]. Un nombre insuffisant de couches cachées peut entraîner un ANN insuffisant pour résoudre le problème. Un autre point important dans l'établissement d'ANN est la détermination des neurones dans les couches. Dans la couche d'entrée, il y a autant de neurones que le nombre d'entrées, et dans la couche de sortie, il y a autant de neurones que la sortie souhaitée. Cependant, ce qui se passe dans les couches cachées est inconnu en raison de la nature de l'ANN, et les neurones ne peuvent pas être calculés dans les couches cachées. Les chercheurs utilisent souvent la méthode empirique pour résoudre ce problème aussi [345].

La particularité non linéaire des modèles ANNs fournit une solution plus réaliste. Grâce à ces fonctionnalités, ANN a la capacité de faire des prédictions et elles sont fréquemment utilisées dans les domaines de prédiction car elles donnent de meilleurs résultats que les méthodes traditionnelles.

ANN a de nombreux algorithmes et de nouvelles approches depuis son tout premier jour [337], [340], [346], [347]. Les équations suivantes montrent les calculs pour un ANN qui utilise la Back-Propagation (BPANN). Dans l'équation (1), W_i indique les poids de l'ANN et X_i Indique la valeur d'entrée.

$$net_i = \sum_i^n W_i X_i \quad (1)$$

Une fois la sortie net_i du neurone calculé, la fonction sigmoïde, en tant que fonction de transfert dérivée dont la sortie est comprise entre 0 et 1 [348], est utilisée comme dans l'équation (2) où net_i Est la sortie du neurone. De plus, nous avons utilisé la fonction de cout d'entropie croisée binaire (the binary cross-entropy cost function) pour améliorer l'apprentissage du modèle.

$$f(net_i) = \frac{1}{1 + \exp(-net_i)} \quad (2)$$

$$E_i = -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [y_m \times \log(h_\theta(x_m)) + (1 - y_m) \times \log(1 - h_\theta(x_m))] \quad (3)$$

M : nombre d'exemples d'apprentissage ; y_m : étiquette cible pour l'exemple d'entraînement m ; x_m : entrée pour l'exemple d'apprentissage m ;

h_θ : modèle avec poids de réseau de neurones θ

Par la suite, le Back-Propagation est utilisé pour modifier les poids en fonction de l'équation (3). BPANN est utilisé pour améliorer le taux d'apprentissage et réduire le phénomène de sur-apprentissage et la méthode de décrochage (dropout) [344], qui est basé sur le décrochage aléatoire (randomly dropping) de différents neurones des réseaux de neurones pendant l'entraînement. Cette technique est devenue un outil puissant pour éviter le sur-apprentissage et elle est souvent utilisée dans les recherches aujourd'hui [349].

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le réseau de neurones artificiels (ANN) comme technique de prédiction du facteur de risque des retards des navires dans le quai des ports maritimes, ce choix est basé sur la capacité de l'ANN à traiter les données avec une grande instabilité plus

précisément comme décrit, ce qui comble le vide des modèles de prévision traditionnels. De plus, on a ajouté un méta heuristique pour optimiser la structure de notre ANN et sortir avec une précision plus optimale de notre cas.

2.2. Méta-heuristiques

Au cours des dernières années, plusieurs méthodes d'optimisation non déterministes, appelées méta-heuristiques, ont été développées pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles et surmonter les faibles capacités de recherche globale de nombreux algorithmes d'optimisation déterministes conventionnels. Les méta-heuristiques reposent sur un ensemble de principes communs qui permettent de concevoir des algorithmes de solution permettant de pallier les faiblesses précitées. La plupart des méta-heuristiques ont les caractéristiques suivantes : elles sont inspirées de la nature, elles n'utilisent pas la matrice gradient, elles utilisent des composants stochastiques et elles ont de nombreux paramètres qui doivent être adaptés au problème [350]. Les méta-heuristiques ont de meilleures chances de surmonter l'obstacle des locaux minima puisque leur noyau de base est basé sur une recherche de voisinage. Ils peuvent accepter une dégradation temporaire de la situation, lors d'un changement de configuration pour extraire le processus d'un piège dans un local minimum et lui permettre d'explorer une autre valeur optimale. On cite ici les méta-heuristiques les plus utilisées :

- Algorithme de recherche de mites (MSA)
- Optimiseur de loup gris
- Algorithme de recherche de corbeau (CSA)
- L'optimisation des colonies de fourmis (ACO)
- Optimisation par essais particuliers
- L'algorithme génétique (AG)
- La recherche tabou (RT)
- Optimiseur de (JAYA)
- Optimiseur (WOA)

Chacune de ces méta-heuristiques représente une famille de méthodes. Certaines caractéristiques communes apparaissent dans presque toutes les méta-heuristiques, comme l'utilisation de la diversification pour forcer l'exploration de l'espace de recherche, et l'utilisation de l'intensification, pour explorer des régions prometteuses.

2.2.1. Algorithmes basés sur la mémoire et sans mémoire

Parmi les fonctions des algorithmes méta-heuristiques est l'utilisation et la non-utilisation de la mémoire ou l'historique pour guider la future recherche d'une solution optimale. On générale, les algorithmes sans mémoire suivent un processus de recherche similaire à la méthode de Markov pour trouver une solution. Par contre d'autres méthodes se basent sur la mémoire, qui est aujourd'hui reconnue comme l'une des capacités fondamentales des algorithmes méta-heuristiques et évolutifs avancés.

2.2.2. Exploration et exploitation

Deux caractéristiques importantes distinguent aujourd'hui les algorithmes d'optimisation : l'exploitation qui représente la capacité de recherche dans l'espace et l'exploration qui représente la recherche de bonnes solutions pour avoir une solution plus précise.

2.2.3. Quelques exemples.

2.2.3.1. Algorithme de recherche de mites (MSA)

Les lépidoptères (papillons et mites) constituent le deuxième ordre le plus important de la classe des insectes, qui représentent plus de 53 % de toutes les espèces sur terre. Les mites et d'autres insectes nocturnes essaient de se cacher pendant la journée, et dans la nuit ils utilisent la technique de navigation céleste pour s'orienter dans l'obscurité et exploiter les sources de nourriture. Les papillons de nuit (mites) volent en ligne droite sur une longue distance en orientant leur locomotion dans un angle constant par rapport à la lumière ponctuelle lointaine céleste ce qu'est appelé la phototaxie, par exemple le clair de lune, également connu sous le nom de réaction de la boussole lumineuse. Néanmoins, une telle orientation souffre d'un mouvement de direction transversale en raison de pistes en spirale inutiles autour d'une source de lumière artificielle à proximité [351], [352], [353].

L'algorithme de recherche de mites (MSA) a été proposé par [354], en se basant sur la simulation du phénomène de la phototaxie et Levy flight [354]. On considère la source de lumière comme la meilleure papillon (solution) à l'intérieur de la population, aussi, les papillons qui se rapprochent du meilleur papillon survolent leurs positions en utilisant Levy flight. D'un autre côté, les papillons qui sont loin du meilleur papillon voleront vers lui directement en ligne droite et ce sont les résultats de la phototaxie. Les caractéristiques précédentes des papillons représentent les capacités d'exploration et d'exploitation de l'algorithme de recherche de MSA.

Le modèle mathématique de l'algorithme de recherche de mites (MSA) fournit une population aléatoire de papillons (solutions), ensuite à l'aide de la fonction fitness il cherche sur la

solution optimale. Les papillons les plus proches du meilleur papillon survolent en utilisant les Levy flight comme dans l'équation (4) suivante :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \frac{S_{max}}{t^2} \quad (4)$$

Dans cette équation (4) x_i^t est la position du $i^{ème}$ papillon à l'itération t . alors que S_{max} représente le pas de marche maximum, en utilisant le paramètre s , qui est défini en utilisant la fonction gamma Γ comme l'équation (5) nous indique :

$$\Gamma(s) = \frac{(1 - \beta)\Gamma(\beta - 1) \sin\left(\frac{\pi * (\beta - 1)}{2}\right)}{\pi s^\beta}, s \geq 0 \quad (5)$$

Où $\beta = 1,5$ représente le paramètre de la distribution de Levy flight. De plus, les papillons qui sont loin de la source de lumière vont voler en ligne vers cette source ou vers la position finale au-delà de cette source selon la probabilité ($Prob_s$) équation (6).

$$x_i^{k+1} = \begin{cases} \lambda \times (x_i + \phi * (x_b - x_i)), & \text{if } Prob_s \leq 0.5 \\ \lambda \times \left(x_i + \frac{1}{\phi} * (x_b - x_i)\right), & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

Où x_b Représente la meilleure position de papillon, tandis que λ et ϕ sont respectivement l'échelle et le facteur d'accélération.

```

1: Input: The number of solutions  $N$ , maximum number
of iterations  $t_{max}$ , the dimension  $dim$ 
2: Output: The best solution  $x_b$ 
3: Initialize the maximum of walk  $S_{max}$ , the index  $\beta$ ,
acceleration factor  $\phi$ 
4: Generate a random population  $X$  with  $N$  size and
dimension  $dim$ 
5: Compute the fitness of each solution  $x_i \in X$ ,  $i =$ 
 $1, 2, \dots, N$ 
6: while ( $t < t_{max}$ ) do
7:   Sort the moths based on the fitness function values
8:   for  $k = 1$  to  $N/2$  do
9:     Update  $x_i$  using Levy flights as in Equation (8)
10:    Compute the fitness function of  $x_i$ .
11:   end for
12:   for  $k = N/2 + 1$  to  $N$  do
13:     Update  $x_i$  using Equation (10).
14:     Compute the fitness function of  $x_i$ .
15:   end for
16:   Update  $t = t + 1$ 
17: end while

```

Figure 37 : Moth Search Algorithm

2.2.3.2. Optimiseur de loup gris

Dans cette section, les étapes de l'optimisation du loup gris (GWO) [355] sont décrites. Le GWO simule les comportements des loups dans la nature lors du processus de capture de la

proie. Le GWO a trois groupes de solutions nommés α , β et γ , chacun ayant sa propre tâche et représentant respectivement les trois premières meilleures solutions, tandis que les autres solutions sont appelées le groupe μ .

GWO commence par définir la valeur initiale d'un ensemble de solutions X et évalue la valeur de fitness pour chacune d'elles et détermine X_α , X_β et X_γ . Par la suite, les solutions sont mises à jour en utilisant un ensemble d'approches, telles que la technique d'encerclement, et elle est formulée comme illustré dans l'équation (7) [355].

$$\begin{aligned} X^{t+1} &= X_{pr}^t - B \times D, & B &= 2b \times q_1 - b, \\ D &= |A \times X_{pr}^t - X^t|, & A &= 2q_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Où A et B désignent les paramètres de coefficient, tandis que q_1 et q_2 font référence à des nombres aléatoires générés à partir de $[0, 1]$. La valeur de b diminue séquentiellement de 2 à 0 avec une augmentation des itérations comme :

$$b = 2 - 2 \times t/t_{max} \quad (8)$$

Où t_{max} fait référence au nombre total d'itérations. La deuxième stratégie dans GWO est appelée chasse, et cette solution peut être mise à jour en utilisant les équations suivantes [355] :

$$X^{t+1} = \frac{(X_1 + X_2 + X_3)}{3} \quad (9)$$

$$X_1 = X_\alpha^t - B_1 \times (D_\alpha), X_2 = X_\beta^t - B_2 \times (D_\beta) \quad (10)$$

$$X_3 = X_\gamma^t - B_3 \times (D_\gamma) \quad (11)$$

$$D_\alpha = |A_1 \times X_\alpha^t - X^t|, D_\beta = |A_2 \times X_\beta^t - X^t|, D_\gamma = |A_3 \times X_\gamma^t - X^t|, \quad (12)$$

$$\text{Where } A_k = 2q_2, k = 1,2,3 \text{ and } B_k = 2b \times q_1 - b \quad (13)$$

Les étapes de GWO sont répertoriées dans l'algorithme 2 [355].

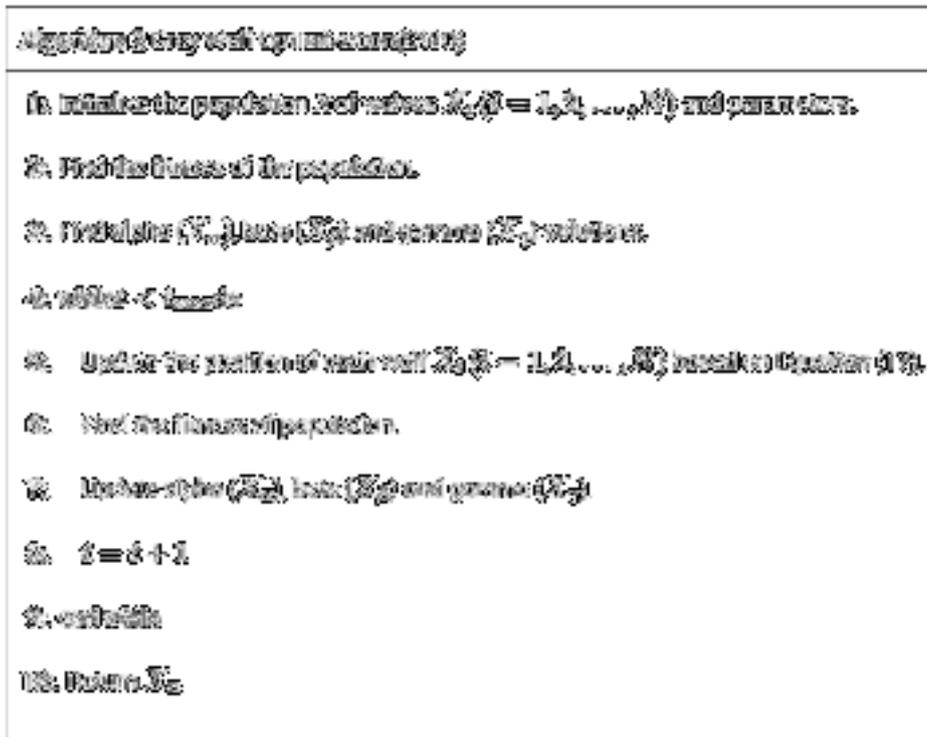


Figure 38 : GWO Algorithm

2.2.3.3. Algorithme Sinus Cosinus

De manière générale, les techniques d'optimisation basées sur la population démarrent le processus d'optimisation avec un ensemble de solutions aléatoires. Cet ensemble aléatoire est évalué de manière répétée par une fonction objectif et amélioré par un ensemble de règles qui est le noyau d'une technique d'optimisation. Étant donné que les techniques d'optimisation basées sur la population recherchent et des problèmes d'optimisation de manière stochastique, il n'y a aucune garantie de trouver une solution en une seule fois.

Cependant, avec un nombre suffisant de solutions aléatoires et d'étapes d'optimisation (itérations), la probabilité de trouver l'optimum global augmente.

En général, dans les algorithmes d'optimisation on trouve la division du processus d'optimisation en deux phases : exploration et exploitation [356]. Dans la première phase, un algorithme d'optimisation combine les solutions aléatoires dans l'ensemble de solutions avec un taux élevé d'aléa pour trouver les régions prometteuses de l'espace de recherche. Dans la phase d'exploitation, cependant, il y a des changements graduels dans les solutions aléatoires, et les variations aléatoires sont considérablement inférieures à celles de la phase d'exploration. Les équations de mise à jour de position suivantes sont proposées pour les deux phases équation (14-15) :

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \quad (14)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t| \quad (15)$$

Où X_i^t est la position de la solution courante dans la ième dimension à la t-ième itération, $r_1 / r_2 / r_3$ sont des nombres aléatoires, P_i est la position du point de destination dans la ième dimension, et $||$ Indique la valeur absolue.

Ces deux équations sont combinées pour être utilisées comme suit :

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \times \sin(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, & r_4 < 0,5 \\ X_i^t + r_1 \times \cos(r_2) \times |r_3 P_i^t - X_i^t|, & r_4 > 0,5 \end{cases} \quad (16)$$

Où r_4 est un nombre aléatoire dans $[0,1]$

Comme le montrent les équations ci-dessus, il existe quatre paramètres principaux dans SCA : r_1 , r_2 , r_3 et r_4 . Le paramètre r_1 dicte les régions de position suivante (ou direction de mouvement) qui pourraient être soit dans l'espace entre la solution et la destination, soit à l'extérieur de celui-ci. Le paramètre r_2 Définit la distance à laquelle le mouvement doit être vers ou vers la destination. Le paramètre r_3 donne des poids aléatoires pour la destination afin d'accentuer ($r_3 > 1$) ou d'atténuer ($r_3 < 1$) de façon stochastique l'effet du dessalement dans la définition de la distance. Enfin, le paramètre r_4 Bascule également entre les composants sinus et cosinus dans l'équation. (16).

En raison de l'utilisation du sinus et du cosinus dans cette formulation, cet algorithme est appelé Sine Cosine Algorithm (SCA). Les effets du sinus et du cosinus sur les équations. (14) et (15) est illustré à la figure 39 :

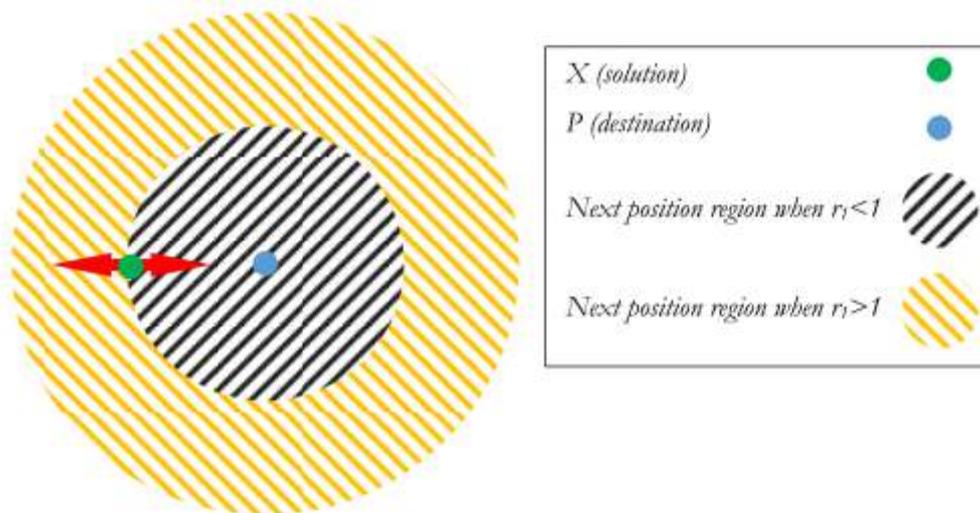


Figure 39 : Effects of sine and cosine

La figure 39 montre comment les équations proposées définissent un espace entre deux solutions dans l'espace de recherche. Il convient de noter que cette équation peut être étendue

à des dimensions supérieures, bien qu'un modèle bidimensionnel soit illustré à la figure. 39. Le modèle cyclique de la fonction sinus et cosinus permet de repositionner une solution autour d'une autre solution. Ceci peut garantir l'exploitation de l'espace défini entre deux solutions. Pour explorer l'espace de recherche, les solutions doivent également pouvoir rechercher en dehors de l'espace entre leurs destinations correspondantes. Ceci peut être réalisé en modifiant la plage des fonctions sinus et cosinus, comme illustré à la Figure 40.

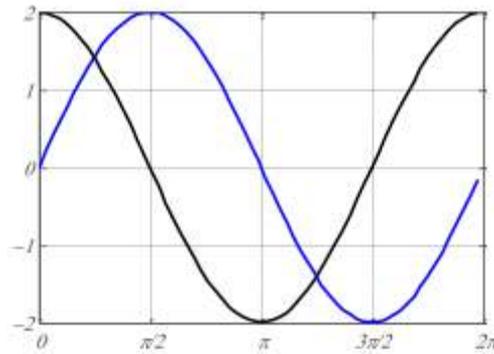


Figure 40 : Sine and cosine with range of [-2,2]

Un modèle conceptuel des effets des fonctions sinus et cosinus avec la plage dans [-2, 2] est illustré dans la figure 40. Cette figure montre comment la modification de la plage du sinus et du cosinus nécessite une solution pour mettre à jour sa position en dehors de l'espace entre lui-même et une autre solution. Le caractère aléatoire est également obtenu en définissant un nombre aléatoire pour r_2 dans $[0, 2\pi]$ dans l'équation (16). Ce mécanisme garantit donc l'exploration de l'espace de recherche.

Un algorithme doit être capable d'équilibrer l'exploration et l'exploitation pour trouver les régions prometteuses de l'espace de recherche et éventuellement converger vers l'optimum global. Afin d'équilibrer l'exploration et l'exploitation, la plage de sinus et de cosinus dans les équations. (15) à (16) est modifiée de manière adaptative à l'aide de l'équation (17) suivante :

$$r_1 = a - t \frac{a}{T} \quad (17)$$

Où t est l'itération actuelle, T est le nombre maximal d'itérations et a est une constante.

La figure 41 montre comment cette équation diminue la plage des fonctions sinus et cosinus au cours des itérations.

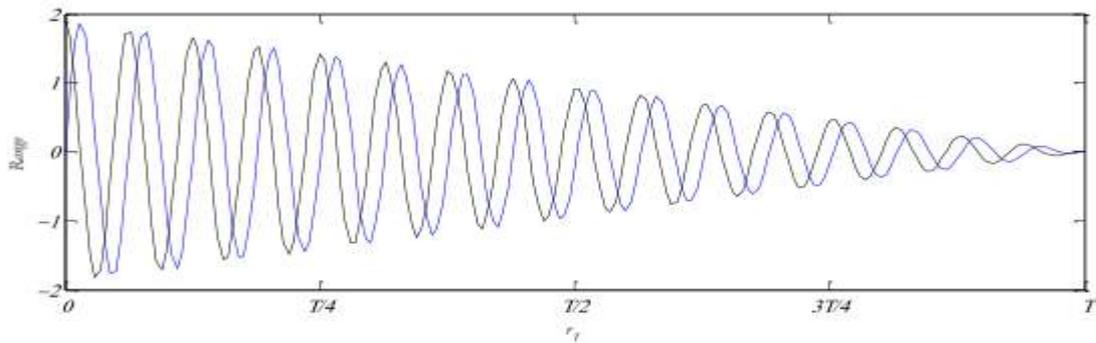


Figure 41 : Decreasing pattern for range of sine and cosine (a=3)

On peut déduire de la figure 41 que l'algorithme SCA explore l'espace de recherche lorsque les plages de fonctions sinus et cosinus sont en $(1,2]$ et $[-2,-1)$. Cependant, cet algorithme exploite l'espace de recherche lorsque les plages sont dans l'intervalle de $[-1,1]$.

Après tout, le pseudo-code de l'algorithme SCA est présenté dans la figure suivante :

```

Initialize a set of search agents (solutions) (X)
Do
  Evaluate each of the search agents by the objective function
  Update the best solution obtained so far ( $P=X^*$ )
  Update  $r_1, r_2, r_3,$  and  $r_4$ 
  Update the position of search agents using Eq. (3.3)
While (t < maximum number of iterations)
Return the best solution obtained so far as the global optimum

```

Figure 42 : General steps pf the SCA algorithm

Cette figure 42 montre que l'algorithme SCA démarre le processus d'optimisation par un ensemble de solutions aléatoires. L'algorithme enregistre ensuite les meilleures solutions obtenues jusqu'à présent, les affecte comme point de destination et met à jour les autres solutions par rapport à celui-ci. Pendant ce temps, les gammes de fonctions sinus et cosinus sont mises à jour pour mettre l'accent sur l'exploitation de l'espace de recherche à mesure que le compteur d'itérations augmente. L'algorithme SCA termine le processus d'optimisation lorsque le compteur d'itérations dépasse le nombre maximal d'itérations par défaut. Cependant, toute autre condition de terminaison peut être considérée comme le nombre maximum d'évaluations de fonction ou la précision de l'optimum global obtenu.

Avec les opérateurs ci-dessus, l'algorithme proposé est théoriquement capable de déterminer l'optimum global des problèmes d'optimisation pour les raisons suivantes :

- SCA crée et améliore un ensemble de solutions aléatoires pour un problème donné, de sorte qu'il bénéficie intrinsèquement d'une exploration élevée et d'un évitement des optima locaux par rapport à d'autres algorithmes basés sur une solution unique.
- Différentes régions de l'espace de recherche sont explorées lorsque les fonctions sinus et cosinus renvoient une valeur supérieure à 1 ou inférieure à -1.
- Les régions prometteuses de l'espace de recherche sont exploitées lorsque le sinus et le cosinus renvoient une valeur comprise entre -1 et 1.
- L'algorithme SCA passe en douceur de l'exploration à l'exploitation en utilisant le changement de gamme adaptatif dans les fonctions sinus et cosinus.
- La meilleure approximation de l'optimum global est stockée dans une variable comme point de destination et n'est jamais perdue lors de l'optimisation.
- Étant donné que les solutions mettent toujours à jour leurs positions autour de la meilleure solution obtenue jusqu'à présent, il y a une tendance vers les meilleures régions des espaces de recherche lors de l'optimisation
- puisque l'algorithme proposé considère le problème d'optimisation comme des boîtes noires, il est facilement incorporable à des problèmes dans différents domaines sous réserve d'une formulation correcte du problème.

2.2.3.4. Algorithme de recherche de corbeau (CSA)

Algorithme de recherche de corbeau

CSA suit ces règles :

- (1) chaque corbeau fait partie de l'ensemble du groupe ;
- (2) Un corbeau peut se souvenir de l'emplacement de sa nourriture cachée (cachette);
- (3) Les corbeaux peuvent se suivre et voler de la nourriture cachée ; et
- (4) Un corbeau peut protéger sa nourriture cachée contre le vol avec une certaine probabilité.

Supposons qu'il y ait N corbeaux dans un espace de recherche à d dimensions, et que chaque corbeau représente une solution au problème d'optimisation. La position du corbeau i dans la t^{ième} itération est notée : $xt(i) = [xt(i, 1), xt(i, 2), \dots, xt(i, j), \dots, xt(i, d)]$ ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, d$; $t = 1, 2, \dots, t_{max}$; t_{max} est le nombre maximal d'itérations).

Chaque corbeau possède un pool de mémoire utilisé pour stocker la cachette, et la cachette du corbeau i dans la t^{ième} itération est $mt(i)$; pendant ce temps, $mt(i)$ est la meilleure position

actuelle trouvée. Au cours de l'itération, les corbeaux se déplacent pour trouver une meilleure position (cachette) dans l'espace de recherche.

On suppose que le corbeau j se déplace vers sa nourriture cachée à la $t^{\text{ième}}$ itération. Pendant ce temps, le corbeau i décide de suivre le corbeau j jusqu'à sa cachette $m_t(j)$. Dans ce cas, deux états peuvent se produire :

-Le corbeau j ne perçoit pas que le corbeau i le suit, et le résultat est que le corbeau i s'approche de la cachette du corbeau j. L'équation de mise à jour de la position du corbeau i dans cet état est l'équation (18) suivante :

$$x_{t+1}(i) = x_i(i) + rand \times fl_t(i) \times [m_t(j) - x_t(i)] \quad (18)$$

Où $rand$ est un nombre aléatoire uniforme sur $[0,1]$, et $fl_t(i)$ est la longueur du vol du corbeau i à la $t^{\text{ième}}$ itération. La valeur de $fl_t(i)$ influence la capacité de recherche. Les corbeaux effectuent des recherches globales lorsque la valeur de $fl_t(i)$ est relativement grande ; sinon, ils effectuent des recherches locales.

-Le corbeau j perçoit que le corbeau i le suit. Pour protéger sa nourriture cachée contre le vol, le corbeau j trompera le corbeau i pour qu'il aille n'importe où ailleurs dans l'espace de recherche au hasard.

En résumé, l'équation de mise à jour de la position de Crow i peut être exprimée comme suit :

$$x_{t+1}(i) = \begin{cases} x_i(i) + rand \times fl_t(i) \times [m_t(j) - x_t(i)], & r_j \geq AP_t(j) \\ a \text{ random position} & otherwise \end{cases} \quad (19)$$

Où $r_j \in [0,1]$ est un nombre aléatoire uniforme, et $AP_t(j)$ indique la probabilité de prise de conscience du corbeau j à la $t^{\text{ième}}$ itération, c'est-à-dire la probabilité que le corbeau j perçoive que le corbeau i le suit. Pendant ce temps, $AP_t(j)$ est le paramètre principal qui contrôle la capacité de traversée et la capacité de décalage de CSA. En diminuant la valeur de l'AP, CSA a tendance à rechercher une région locale.

Ainsi, la capacité de traversée de CSA est améliorée. Cependant, en augmentant la valeur de l'AP, CSA a tendance à rechercher l'espace à l'échelle mondiale. Ainsi, la capacité de décalage de CSA est améliorée.

Le processus de réalisation du CSA est le suivant :

- Initialisation des paramètres de l'algorithme. Définissez les paramètres relatifs, tels que le nombre de corbeaux N, le nombre maximum d'itérations t_{max} , la durée du vol et la probabilité de prise de conscience AP.

- Initialisation de N corbeaux et des pools de mémoire. Générer aléatoirement la position $x(i, j)$ ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, d$) des corbeaux dans l'espace de recherche d-dimensionnel ; chaque corbeau représente une solution au problème d'optimisation. Puisqu'il n'y a pas d'expérience à l'itération initiale, on suppose que la position d'initialisation est la cachette, c'est-à-dire les pools de mémoire.
- Évaluation de la condition physique. La position de chaque corbeau est introduite dans la fonction de fitness pour calculer la valeur de fitness.
- Mise à jour du poste. Le corbeau i sélectionne au hasard un corbeau j ($i \neq j$), puis le suit et se déplace vers la cachette du corbeau j . La nouvelle position du corbeau i est obtenue avec équation (19).
- Vérifier la faisabilité de la nouvelle position. Si la nouvelle position du corbeau i (c'est-à-dire $x(i)$) remplit la condition suivante ($\text{limite inférieure} \leq x$; $\text{nouveau}(i) \leq \text{limite supérieure}$), alors la nouvelle position du corbeau i est faisable et le corbeau i se déplacera vers la nouvelle position ; sinon, corbeau i restera dans la position actuelle.
- Évaluation de la condition physique des nouvelles positions.
- Renouvellement des pools de mémoire. Le pool mémoire de corbeau i est renouvelé comme suit :

$$m_{t+1}(i) = \begin{cases} x_{t+1}(i) & f[x_{t+1}(i)] < f[m_t(i)] \\ m_t(i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

Où f indique la fonction objective.

- Jugement du critère de terminaison. Déterminez la valeur de fitness optimale actuelle et la position correspondante. Mettre en œuvre l'étape 9 si l'exigence de précision est satisfaite ou si le nombre maximal d'itérations est atteint ; sinon, répétez l'étape 4-étape 7 figure 43.
- sortie de l'optimum global et de la position correspondante ; l'algorithme se termine.

L'organigramme du CSA est illustré dans les figures 43 et 44.

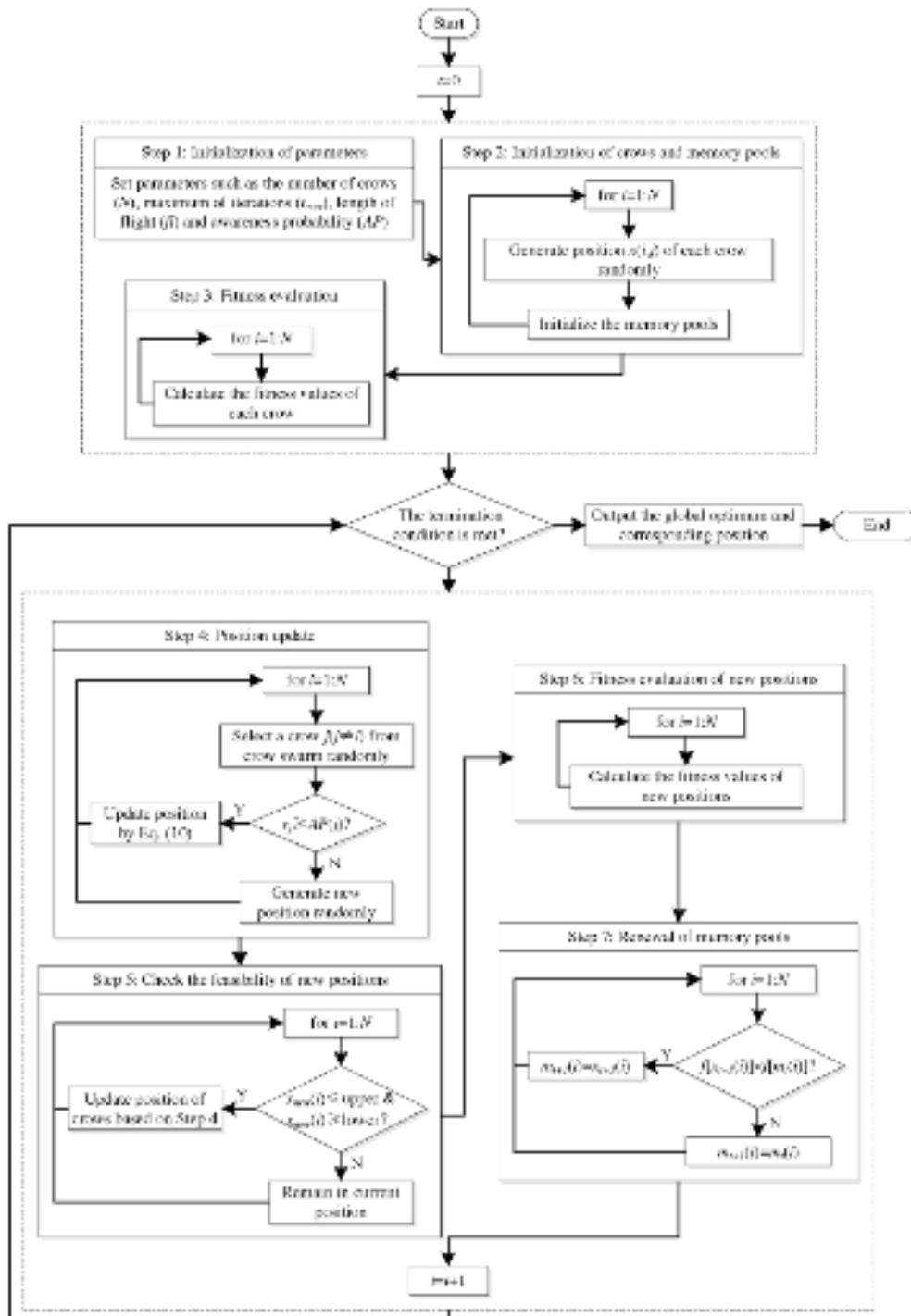


Figure 43 : Flow chart of the CSA

```

1: Randomly initialize the position of a flock of ( $N_p$ ) crows
   in the search space
2: Evaluate the position of the crows
3: Initialize the memory of each crow
4: while ( $iter \leq iter_{max}$ ) do
5:   for  $i = 1$  to  $N_p$  do
6:     Randomly choose one of the crows to follow (for
       example  $j$ )
7:     Define an awareness probability
8:     if ( $r_j \geq AP^{j,iter}$ ) then
9:        $x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter})$ 
10:    else
11:       $x^{i,iter+1} =$  a random position of search space
12:    end if
13:  end for
14:  Check the feasibility of new positions
15:  Evaluate the new position of the crows
16:  Update the memory of crows
17: end while

```

Figure 44 : Crow Search Algorithm

2.2.3.5. JAYA

L'algorithme Jaya est un nouvel algorithme d'optimisation globale basé sur la population proposée par Rao [357]. L'algorithme est conçu sur la logique que toute solution de la population donnée devrait toujours se diriger vers la meilleure solution et s'éloigner de la pire solution. L'avantage de cet algorithme est qu'il ne contient qu'une seule équation et qu'il ne contient aucun paramètre spécifique à l'algorithme à régler pour obtenir une solution optimale [357]. Par conséquent, il est facile à comprendre et différent des autres algorithmes méta-heuristiques. La description mathématique de l'algorithme de Jaya est la suivante. Soit $f(u)$ la fonction objective à optimiser. Au stade initial, certaines solutions $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ sont générées aléatoirement dans le domaine de recherche, où m est la taille de la population. Ces solutions initiales sont évaluées par la fonction objective, et la meilleure solution $u_{meilleure}$ et la pire solution u_{pire} est fondée. Ensuite, ces solutions effectuent une recherche cycle par cycle, jusqu'à ce que l'objectif de génération maximale ou d'optimisation soit atteint. A toute itération i , une solution de la population est modifiée comme suit équation (21) :

$$v_{j,k} = u_{j,k} + r_{1,j}(u_{j,best} - |u_{j,k}|) - r_{2,j}(u_{j,worst} - |u_{j,k}|) \quad (21)$$

Où $u_{j,best}$ est la valeur de la variable j pour le meilleur candidat et $u_{j,worst}$ est la valeur de la variable j pour le pire candidat. $v_{j,k}$ est la valeur mise à jour de $u_{j,k}$, et $r_{1,j}$ et $r_{2,j}$ sont deux nombres aléatoires pour la $j^{\text{ème}}$ variable lors de la $i^{\text{ème}}$ itération dans l'intervalle $[0, 1]$.

$r_{1,j}$ Indique la tendance de la solution à se rapprocher de la meilleure solution, et $r_{2,j}$ indique la tendance de la solution à éviter la pire solution Les nombres aléatoires r_1 et r_2 assurent une bonne exploration de l'espace de recherche.

La valeur absolue de la solution candidate $|u_{j,k}|$ considérée dans l'équation (21) améliore encore la capacité d'exploration de l'algorithme. La nouvelle solution générée sera évaluée par la fonction objectif. Si la nouvelle solution est meilleure que la solution d'origine, remplacez l'ancienne solution par la nouvelle. Sinon, conservez la solution d'origine telle quelle. Cela signifie que $v_{j,k}$ est accepté s'il donne une meilleure valeur de fonction. Toutes les solutions acceptées à la fin de l'itération sont conservées et d'autres recherches sont effectuées sur la base de ces solutions à l'itération suivante. Dans l'algorithme proposé, la solution obtenue pour un problème donné se dirige vers la meilleure solution et évite la pire solution.

La figure 45 montre l'organigramme de l'algorithme de Jaya.

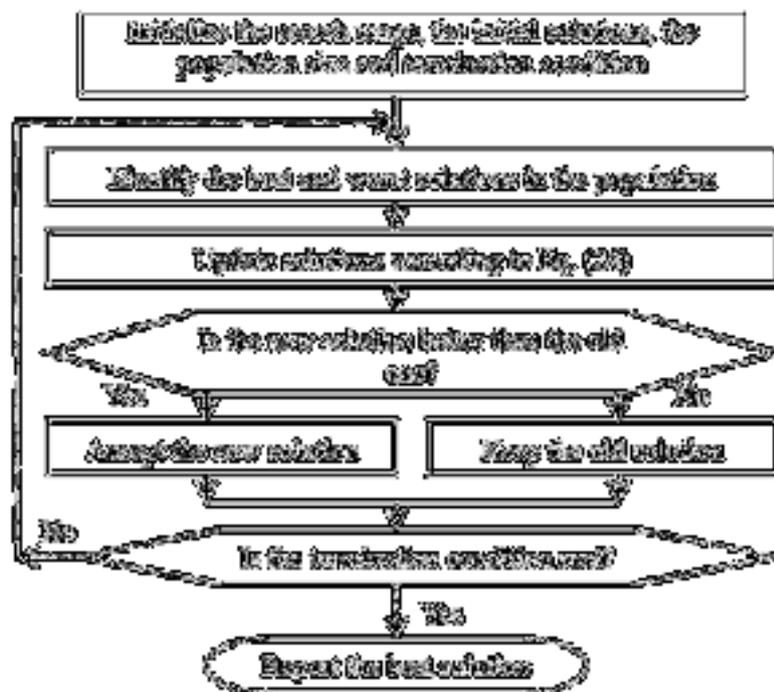


Figure 45 : Flow chart of jaya algorithm

2.2.3.6. Whale Optimization Algorithm WOA

Seyedali Mirjalili et Andrew Lewis ont proposé un algorithme méta-heuristique basé sur la population, à savoir WOA [358], [359], qui imite le comportement social des baleines à bosse. Après avoir atteint la position de la proie, les baleines à bosse plongent douze mètres plus bas

et traînent en spirale avec des bulles vers la surface. La figure 47 montre le comportement de chasse au filet à bulles des baleines à bosse.

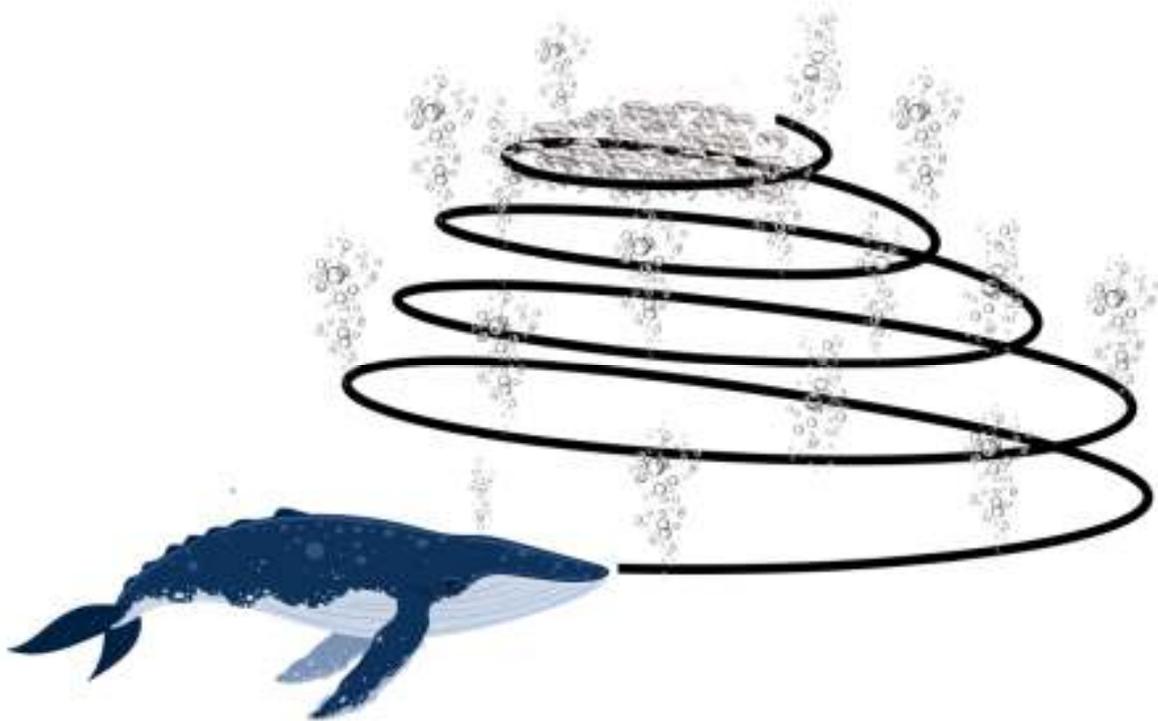


Figure 46 : Le comportement de chasse au filet à bulles des baleines à bosse [359]

L'encerclement des proies, la phase d'attaque du Bubble-net et la chasse aux proies sont les trois étapes de chasse des baleines à bosse. Le modèle mathématique de WOA est donné dans les sections suivantes.

2.2.3.6.a. Encercler la proie

Les baleines à bosse peuvent identifier l'emplacement de la proie et les encercler. Puisque la position optimale dans l'espace de recherche n'est pas connue dès le début. L'algorithme WOA suppose que la meilleure solution candidate actuelle est la proie cible la plus proche de l'optimum [358]. Après l'identification du meilleur agent de recherche, les autres agents de recherche tenteront de rafraîchir leurs zones vers le meilleur agent de recherche. Ce comportement est représenté par les équations (22 – 23) suivantes :

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (22)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (23)$$

Où t indique l'itération courante, A et C sont des coefficients vecteurs, \vec{X}^* est la position vecteur de la meilleure solution obtenue jusqu'à l'instant, $\vec{X}(t)$ est la position vecteur, et $\|$ est la valeur absolue. Il faut mentionner ici que X^* devrait être mis à jour à chaque itération s'il existe une meilleure solution.

Les vecteurs A et C ont calculé selon les équations (24-25) :

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (24)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (25)$$

Où \vec{a} diminué linéairement de 2 à 0 au cours des itérations (dans les deux phases d'exploration et d'exploitation) et \vec{r} est un vecteur aléatoire dans $[0,1]$.

Phase d'exploitation (Méthode d'attaque au filet à bulles)

Les baleines à bosse nagent d'un endroit à un autre, la cible à l'intérieur d'un cercle rétréci en forme de spirale. Le modèle mathématique est le suivant :

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} ; p < 0.5 \\ \vec{D}^T \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) ; p \geq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

Où $p \in [0, 1]$, b est une constante pour définir la forme de la spirale logarithmique La figure 47 montre le mécanisme de recherche par filet à bulles de WOA.

Phase d'exploration (recherche de proies)

En plus de la méthode du filet à bulles, les baleines à bosse chassent arbitrairement des cibles. Son modèle mathématique est lié à l'équation (27-28), sauf qu'un agent de recherche arbitraire plutôt que l'agent le plus exceptionnel est nommé pour escorter la recherche.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}rand - \vec{X}| \quad (27)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}rand - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (28)$$

Où $\vec{X}rand$ est une trajectoire de localisation arbitraire avec $A > 1$. Certains emplacements probables d'un endroit à l'autre pour une réponse spécifique sont indiqués dans la figure 47.

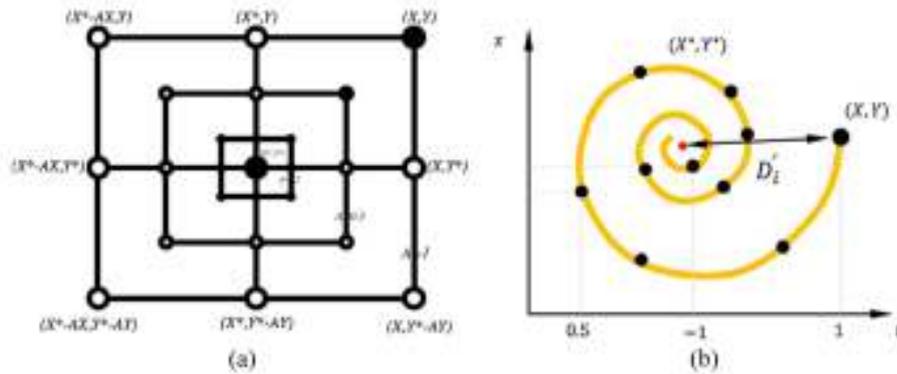


Figure 47 : Bubble net search mechanism implemented in WOA : (a) shrinking encircling mechanism and (b) spiral updating position[358], [359]

```

Initialize the whales population  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
Calculate the fitness of each search agent
 $X^*$  ← the best search agent
while ( $t <$  maximum number of iterations)
  for each search agent
    Update  $a$ ,  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    if1 ( $p < 0.5$ )
      if2 ( $|A| < 1$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.1)
      else if2 ( $|A| \geq 1$ )
        Select a random search agent ( $X_{rand}$ )
        Update the position of the current search agent by the Eq. (2.8)
      end if2
    else if1 ( $p \geq 0.5$ )
      Update the position of the current search by the Eq. (2.5)
    end if1
  end for
  Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
  Calculate the fitness of each search agent
  Update  $X^*$  if there is a better solution
   $t = t + 1$ 
end while
return  $X^*$ 

```

Figure 48 : Pseudo- code of the WOA algorithm[358], [359]

3. Collecte et traitement des données

Dans cette étude, nous avons suivi un processus simple figure 49 commençant par combiner trois ensembles de données de unctadstat.unctad.org, le premier et l'ensemble de données principal contient 25 colonnes les colonnes principales sont : l'attribut binaire du retard des navires dans les ports maritimes qui est considéré dans notre cas comme variable dépendante (variable de classification), pays, ports maritimes, âge moyen des navires, taille moyenne des navires, taille maximale des navires, capacité de charge moyenne par navire, capacité de charge maximale des navires, capacité moyenne de charge des conteneurs (TEU) par porte-conteneurs et la capacité maximale de transport de conteneurs (TEU) des porte-conteneurs. Le deuxième ensemble de données représente l'indice de connectivité des ports de chaque pays qui contient quatre colonnes, les pays, la connectivité maximale, la connectivité

minimale et la connectivité moyenne. De plus, nous ajoutons le troisième ensemble de données avec le débit annuel de conteneurs de chaque pays. Enfin, nous avons combiné tous les jeux de données d'arbres pour des données plus significatives pour notre recherche avec 3535 lignes.

1 éliminer les NA ou les valeurs manquantes : la première étape consiste à gérer ces NA dans l'ensemble de données, afin d'éviter les erreurs dans les modèles. En général, il existe certaines méthodes que nous pouvons utiliser pour traiter les NA (Han et Kang, 2022) par exemple nous pouvons utiliser la moyenne ou la médiane pour imputer les valeurs manquantes, prédire les manquants si la nature des données le permet, ou même supprimer les NA. Dans notre cas, nous éliminons les AN pour assurer l'exactitude et la crédibilité de notre résultat.

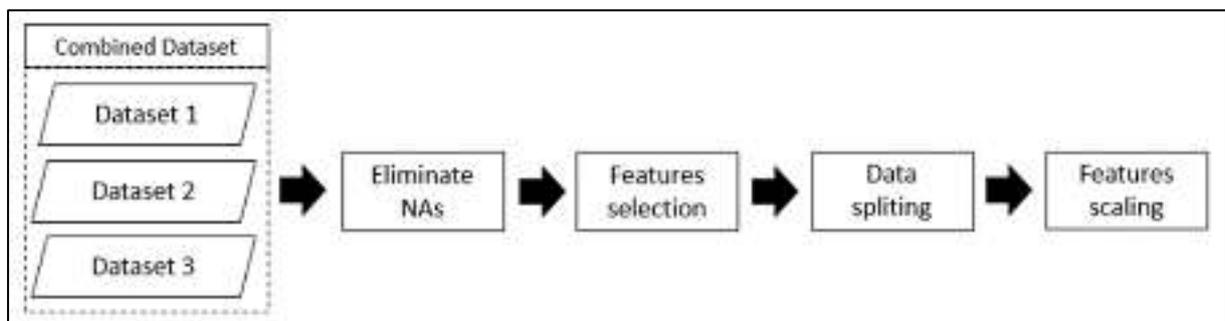


Figure 49 : Phases de traitement de données

2 élection des caractéristiques : dans cette phase, nous avons essayé d'identifier la corrélation entre la variable dépendante et les caractéristiques d'entrée. Il s'agit ici d'améliorer la précision du modèle en se concentrant sur les caractéristiques ayant une forte influence sur le temps médian au port (Kardani et al., 2022).

3 épartitionnement des données : à cette phase, nous devons diviser l'ensemble de données sur l'ensemble de données d'entraînement utilisé pour l'entraînement du modèle et l'ensemble de données de test pour tester la précision de notre modèle.

4 énormalisation des données : dans cette étape, nous avons normalisé la gamme de fonctionnalités afin d'assurer un bon fonctionnement du modèle.

4. Cadrage du modèle proposé

Le modèle supervisé proposé est décrit comme suit : au début de la phase d'apprentissage, le modèle reçoit l'ensemble d'apprentissages prenant les caractéristiques d'entrée et donnant la sortie générée qui représente la valeur binaire prévue du risque de retard des navires dans les ports maritimes, puis une comparaison est faite entre la sortie générée et le résultat réel. À ce stade, la rétro-propagation basée sur la fonction d'erreur (la comparaison entre la sortie

générée et le résultat réel) modifie le poids de chaque nœud dans le modèle ANN figure 50, en même temps la technique d'abandon (the dropout method) [344] est appliquée afin d'améliorer le taux d'apprentissage et éviter le phénomène de sur-apprentissage(overfitting), ce processus figure 50 est répété jusqu'à ce que le modèle devienne plus précis. Dans la phase de test du modèle, nous pouvons utiliser de nombreux indicateurs de performance comme par exemple la précision, le score F1, la matrice de confusion afin de juger de la performance du modèle proposé.

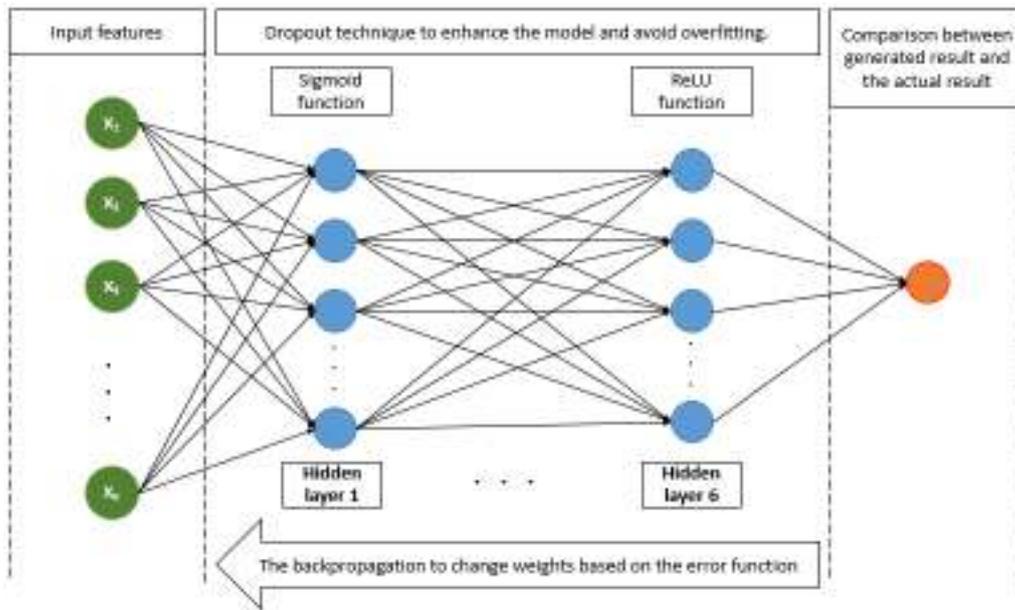


Figure 50 : Illustration of the proposed ANN model with backpropagation

Parmi les inconvénients ici c'est la difficulté de trouver l'architecture optimale de ce modèle c'est-à-dire le nombre des couches cachées (hidden layers) optimales, le nombre des neurones optimaux dans chaque couche et l'optimisateur optimale de notre réseau de neurones. Pour cela, on a optimisé ce modèle par l'ajout d'une hybridation basée sur le concept de (hyper parametric tuning / optimizer) [360] [361] ce qui signifie l'utilisation d'une méta-heuristique inspirée de la nature pour trouver une architecture optimale et assurée une précision plus élevée de notre modèle de ANN figure 51.

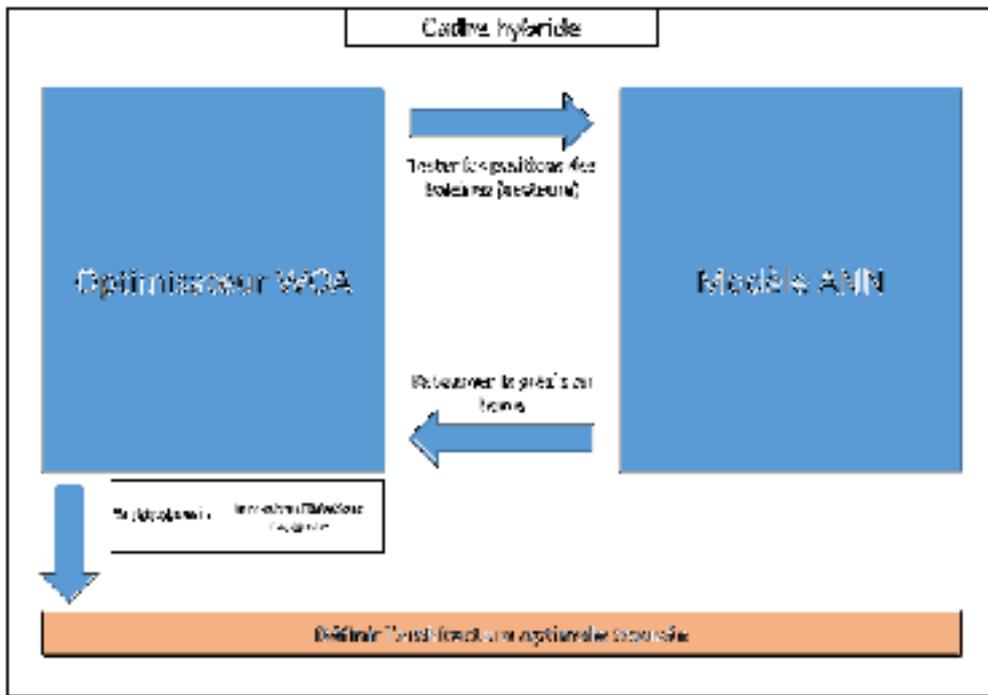


Figure 51 : Le cadre hybride de WOA-ANN

Dans ce sens, on a choisi l'optimisateur de la baleine WOA (Whale Optimizer Algorithm).

Le principe est simple, on a créé un vecteur tableau 26 qui contient comme entrées :

L : Le nombre des couches,

N_i : Nombre des neurones dans la couche i ,

O : L'optimisateur choisi, (Adam, SGD ou RMSprop)

Lr : Taux d'apprentissage (Learning rate),

Et une sortie qui représente la précision barre (1- précision) puisque la fonction de l'optimisation ici est une fonction de minimisation pour trouver les entrées optimales (proie).

L'optimisateur WOA commence par la génération aléatoire des baleines (vecteurs) avec la précision trouvée de chaque baleine tableau 26. Ensuite, on considère la précision barre minimale (best position) dans l'itération 0 pour changer les valeurs des baleines (les positions des baleines) on se base sur l'algorithme WOA figure 48 et on passe à l'itération 1 et ainsi de suite jusqu'à le nombre d'itérations maximal fixé pour fermer la boucle, et sortir avec l'architecture optimale $\{L, N_1, N_2, \dots, N_i, O, Lr\}$ de notre modèle.

Tableau 26 : L'itération 0 dont la génération aléatoire des baleines (vecteurs)

Itération 0								
N° de la baleine	L	N_1	N_2	...	N_i	O	Lr	Précision barre
Baleine 1	L_1	$N_{1,1}$	$N_{2,1}$	...	$N_{i,1}$	O_1	Lr_1	P_1
Baleine 2	L_2	$N_{1,2}$	$N_{2,2}$	...	$N_{i,2}$	O_2	Lr_2	P_2
...
Baleine n	L_n	$N_{1,n}$	$N_{2,n}$	...	$N_{i,n}$	O_n	Lr_n	P_n

5. Discussion des résultats numériques

Dans cette section, nous étudions l'efficacité du cadre hybride proposé pour prévoir le risque des retards des navires dans le quai du port maritime. Les expériences ont été effectuées en utilisant un PC avec un processeur Intel (R) Core (TM) i5 à 3,30 GHz, 6 Go de mémoire. L'ensemble des algorithmes ont été programmés dans Python 3.

Dans cette expérience on appui sur le résultat du modèle proposé à travers une comparaison qui inclut les modèles de Machine Learning traditionnels connus : Linear Discriminant Analysis LDA [362], Support Vector Classification SVC [363], BernoulliNB [364], Linear SVC [365], le GaussianNB et le Gradient Boosting Classifier GBC. Afin de comparer les performances de notre modèle introduit sur la base de certaines mesures d'évaluation, comme mentionné dans les sections suivantes.

Dans notre étude, nous avons utilisé un ensemble d'outils mathématiques et statistiques. Après avoir déterminé les modèles mathématiques, le langage de programmation Python est utilisé afin d'implémenter les modèles dans la plate-forme Anaconda. Les bibliothèques utilisées sont : la bibliothèque Pandas pour le traitement des données selon les objectifs de l'étude, Numpy pour toutes les manipulations de tables, Matplotlib pour les présentations graphiques et d'autres bibliothèques comme sklearn, Keras et Tensorflow qui contient des outils efficaces pour l'analyse prédictive des données.

Les expériences sont exécutées pour 20 essais différents. Nous avons utilisé l'ensemble de données combiné pour évaluer l'adéquation de notre modèle WOA-ANN proposé avec le problème traité. En outre, d'autres modèles connus sont utilisés pour comparer les performances du modèle WOA-ANN proposé. Pour chaque modèle, les mesures d'évaluation considérées étaient : 1) La précision, c'est-à-dire le rapport entre les observations correctement

prédites et les observations réelles. 2) Recall (RS), représente la prédiction correcte des vrais risques de retard divisée par le nombre de toutes les prédictions qui auraient dû être identifiées comme correcte. Et 3) F1 Score (F1S), qui est la moyenne harmonique de la précision (la prédiction correcte des vrais risques de retard divisée par le nombre de tous les vrais risques de retard, y compris ceux qui ne sont pas identifiés par le modèle) et Recall (RS) Tableau27. En outre, nous avons également montré la courbe ROC AUC pour distinguer les performances des modèles mentionnés figure 52, le ROC AUC illustre à quel point le modèle peut différencier les classes, si le modèle peut prédire 0 classes comme 0 et 1 classes comme 1 Plus l'AUC (Area Under the Curve) est élevée, plus les performances du modèle sont meilleures.

Tableau 27 : Les F1S, RS et Accuracy des algorithmes de classification de notre cas

Models	F1 Score F1S	Recall RS	Accuracy
SVC	52,56%	77,23%	90,57%
KNN classifier	81,35%	84,70%	96,34%
BernoulliNB	55,05%	56,97%	91,36%
LinearDiscriminantAnalysis	71,81%	71,47%	89,36%
LinearSVC	73,04%	72,66%	81,87%
GaussianNB	71,81%	75,79%	79,30%
GradientBoostingClassifier	66,67%	77,14%	94,01%
Decision Tree Classifier	85,55%	87,5 %	97,12%
WOA-ANN	86,18%	88,78%	98,5%

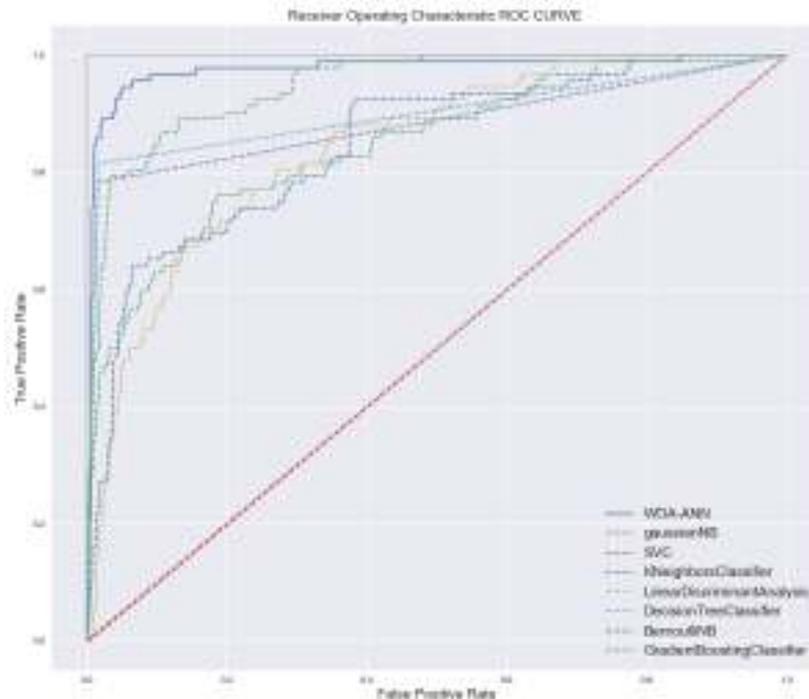


Figure 52 : Les performances des modèles ML traditionnels avec WOA-ANN selon la courbe ROC AUC

Le but de cette comparaison est d'avoir une idée claire sur la position du modèle WOA-ANN proposé avec certains modèles connus. Ce qui valide le résultat et l'utilisation future de ce modèle dans le domaine de la prédiction de risques de retard. Comme le montre le tableau 27, le modèle WOA-ANN proposé atteint une précision de 98.5 %, un RS de 88.78 % et un score F1 de 86.18%. Ce qui est considéré comme la meilleure performance parmi tous les autres modèles de cette comparaison. De plus, la figure 52. Illustre la grande capacité des modèles WOA-ANN à prédire le risque de retard des navires dans le quai de port maritime par rapport aux autres modèles. Ce résultat garantit que le modèle WOA-ANN proposé pourrait être utilisé avec un niveau de précision acceptable dans le problème étudié.

6. Analyse comparative dans l'ensemble de données de classification

6.1. Classification de l'ensemble de données Cancer

L'ensemble de données sur le cancer du sein compte 699 instances et 9 attributs tels que l'épaisseur des touffes, l'uniformité de la taille des cellules, l'uniformité de la forme des cellules et l'adhérence marginale. La sortie est égale à 2 pour les cancers bénins et à 4 pour les

cancers malins. Le tableau 28 montre l'application de notre modèle ainsi les huit modèles traditionnels de ML.

Tableau 28 : Les F1S, RS et Accuracy des algorithmes de classification de l'ensemble de données Cancer

Models	F1 Score F1S	Recall RS	Accuracy
SVC	0.21	0.29	0.77
KNN classifier	0.31	0.37	0.77
BernoulliNB	0.54	0.54	0.82
LinearDiscriminantAnalysis	0.22	0.28	0.75
LinearSVC	0.23	0.33	0.77
GaussianNB	0.35	0.21	0.35
GradientBoostingClassifier	0.11	0.16	0.73
Decision Tree Classifier	0.37	0.31	0.70
WOA-ANN	0.67	0.75	0.91

6.2. Classification de Service de transfusion sanguine

Cette étude a adopté la base de données des donneurs du centre de services de transfusion sanguine de la ville de Hsin-Chu à Taiwan. Le centre de transfusion sanguine se localise à côté d'une université de la ville de Hsin-Chu pour recueillir le sang donné environ tous les trois mois. Dans cette base de données, on a 748 donneurs au hasard. Ces 748 données sur les donneurs comprenaient chacune R (Récence - mois depuis le dernier don), F (Fréquence - nombre total de dons), M (Monétaire - total du sang donné en c.c.), T (Temps - mois depuis le premier don), et une variable binaire représentant s'il/elle a donné du sang en mars 2007 (1 signifie il/elle a donné du sang ; 0 signifie il/elle n'a pas donné de sang). Le tableau 29 montre l'application de notre modèle ainsi les huit modèles traditionnels de ML.

Tableau 29 : Les F1S, RS et Accuracy des algorithmes de classification de Service de transfusion sanguine

Models	F1 Score F1S	Recall RS	Accuracy
SVC	0.17	0.66	0.74
KNN classifier	0.42	0.47	0.71

BernoulliNB	0.10	0.12	0.72
LinearDiscriminantAnalysis	0.16	0.57	0.73
LinearSVC	0.13	100%	0.74
GaussianNB	0.39	0.60	0.75
GradientBoostingClassifier	0.40	0.66	0.76
Decision Tree Classifier	0.37	0.42	0.69
WOA-ANN	0.59	0.66	0.88

6.3. Classification de l'âge de l'ormeau (abalone) à partir de mesures collectées

Prédire l'âge de l'ormeau à partir de mesures physiques. L'âge de l'ormeau est déterminé en coupant la coquille à travers le cône, en la colorant et en comptant le nombre d'anneaux à travers un microscope - une tâche ennuyeuse et longue. D'autres mesures, plus faciles sont utilisées pour prédire l'âge. Des informations supplémentaires, telles que les conditions météorologiques et l'emplacement (la disponibilité de la nourriture) peuvent être nécessaires pour prédire l'âge. Le tableau 30 montre l'application de notre modèle ainsi les huit modèles traditionnels de ML.

Tableau 30 : Les F1S, RS et Accuracy des algorithmes de classification de l'âge de l'ormeau à partir de mesures collectées

Models	F1 Score F1S	Recall RS	Accuracy
SVC	0.98	0.98	0.97
KNN classifier	0.98	0.98	0.96
BernoulliNB	0.97	0.94	0.94
LinearDiscriminantAnalysis	0.98	0.98	0.97
LinearSVC	0.98	0.97	0.96
GaussianNB	0.95	100%	0.91
GradientBoostingClassifier	0.97	0.94	0.94
Decision Tree Classifier	0.97	0.97	0.95
WOA-ANN	0.99	0.98	0.96

6.4. Classification de revenu s'il va dépasser 50 000 \$ par année

L'extraction a été effectuée par Barry Becker à partir de la base de données du recensement de 1994. Un ensemble d'enregistrements raisonnablement propres a été extrait dans le but de déterminer si une personne gagne plus de 50 000 par an ou non. Le tableau 31 montre l'application de notre modèle ainsi les huit modèles traditionnels de ML.

Tableau 31 : Les F1S, RS et Accuracy des algorithmes de classification de revenu s'il dépasse 50 000 \$ par année

Models	F1 Score F1S	Recall RS	Accuracy
SVC	0.63	0.73	0.84
KNN classifier	0.43	0.42	0.72
BernoulliNB	0.59	0.49	0.75
LinearDiscriminantAnalysis	0.60	0.72	0.83
LinearSVC	0.31	0.84	0.79
GaussianNB	0.41	0.64	0.79
GradientBoostingClassifier	0.66	0.75	0.85
Decision Tree Classifier	0.61	0.60	0.81
WOA-ANN	0.76	0.79	0.82

Conclusion

Le risque de congestion des quais est l'une des causes principales des problèmes d'allocation des quais (BAP), l'analyse prédictive de ce risque aura un impact positif sur la performance de toutes les opérations portuaires [305], [306]. Dans ce sens, nous nous basons dans cette étude sur l'utilisation d'un algorithme d'IA pour prédire le risque de retard des navires à quai du port maritime, nous avons utilisé 3535 lignes d'un ensemble de données combiné qui relie le risque traité avec un ensemble de caractéristiques significatives : pays, ports maritimes, âge moyen des navires, taille moyenne et maximale des navires, capacité de charge moyenne et maximale par navire, capacité moyenne de transport de conteneurs (TEU) par porte-conteneurs, capacité maximale de transport de conteneurs (TEU) des porte-conteneurs, max et indice de connectivité min et le débit annuel de conteneurs de chaque pays.

Après le traitement de l'ensemble de données, nous avons proposé un algorithme ANN amélioré (figure 51) pour prédire le risque de retard des navires dans le quai du port maritime. Ensuite, nous avons appliqué un ensemble de modèles connus : LDA, SVC, BernoulliNB,

Linear SVC, GaussianNB, GBC. Afin d'avoir une idée claire de la performance de notre modèle WOA-ANN proposé. Comme la montre le tableau 27 et la figure 52, le WOA-ANN proposé réalise les meilleures performances dans les métriques choisies parmi les modèles proposés dans la prévision des risques dans le système étudié, ce qui signifie que notre modèle est capable à anticiper le risque de retard des navires dans le quai des ports maritimes avec une précision acceptable, ce qui améliore la performance de toutes les opérations des ports maritimes.

Cette étude représente un début pour les chercheurs et les praticiens dans le domaine de l'évaluation des risques dans le port maritime à l'aide d'algorithmes d'IA, pour développer des algorithmes d'IA encore plus précis, qui pourraient être utilisés pour améliorer les performances et la précision de la prédiction et éviter les locaux minimums.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Rappel de la problématique

Traditionnellement, les ports maritimes ont été considérés comme les principales interfaces commerciales dans la chaîne logistique globale. Les challenges apparus avec le développement du commerce international comme : Le manque d'espace ; Congestion aux points d'accès des ports maritimes ; l'augmentation des coûts de transport et l'impact environnemental négatif...nécessitent une solution adéquate telle que le port sec qui est défini dans la littérature comme un terminal intérieur connecté directement à un port maritime avec des moyens de transport de grande capacité, où les clients peuvent déposer et/ou récupérer leurs conteneurs comme si ils sont au port maritime. Il est important de reconnaître la fonction des ports secs en termes de ce qu'ils peuvent fournir pour assurer un système de transport efficace et durable. Ils permettent potentiellement une réduction des tonnes-kilomètres globales à travers la canalisation de marchandises sur des liaisons à haut volume et ils contribuent ainsi à un renforcement du transport ferroviaire, une réduction des émissions, et une réduction de la congestion en particulier dans les zones portuaires.

Le but de cette étude était de fournir une contribution pour comprendre le système PSPM. Notre travail de recherche s'est concentré sur les problématiques de ce système qui représente un maillon indispensable du transport multimodal, à savoir une revue littérature systématique qui illustre les pistes de recherche qui existent dans le système PSPM, un modèle multi critère pour l'évaluation des risques dans le système étudié et une plateforme intelligente qui utilise un modèle capable à prévoir la possibilité d'avoir des risques en appliquant ce modèle sur le risque des retards des navires dans le quai de port maritime. L'objectif visé de la recherche est de proposer des modèles théoriques capables d'aider les gestionnaires du système PSPM à prendre des décisions stratégiques et tactiques. Ces décisions doivent aider à augmenter l'efficacité et l'efficacité de ce système.

Apports de la recherche

Dans notre recherche, nous avons commencé notre travail de recherche par une revue littérature systématique approfondie sur 674 articles mené autour du concept de port sec. Cette étude a montré l'intérêt que présente la problématique auprès de la communauté scientifique à travers le monde, le développement du concept depuis son apparition, le développement du cycle de vie du port sec, les différents types de port sec, les thèmes de recherche existants, les différents modèles développés et les pays les plus intéressés par le concept de port sec. Par la suite en se basant sur le résultat de RLS on a choisi dans cette étude le thème de gestion de

risques dans le système PSPM puisque ce thème est très critique et il a été le mois traité selon notre RLS. Dans ce sens, on a ajouté une deuxième RLS (2332 articles) sur le système en entier avec ses trois parties port maritime, rail et port sec afin d'identifier les facteurs de risques de PSPM ainsi les méthodes et les outils utilisés pour traiter les risques dans ce système. Ensuite, on a proposé un modèle multi critère capable à évaluer l'importance des trois parties de PSPM (port maritime, rail et port sec), les catégories de risques et les facteurs de risques. L'objectif de ce modèle est de présenter une référence des risques et méthodes existants, l'utilité de chaque méthode et un modèle multicritère qui facilite le traitement des risques et qui est utilisable dans tous les systèmes multicritères. De plus, cette étude entre aussi dans le cadre de l'industrie 4.0 à travers d'une contribution qui présente une plateforme intelligente qui rassemble un BPANN et un méta-heuristique inspiré de la nature pour fournir un modèle performant capable à anticiper les risques dans le système de PSPM. L'application de cette plateforme est validée par une étude de cas sur le risque des retards des navires dans le quai du port maritime en comparant notre modèle avec six modèles traditionnels de Machine Learning, ce qui montre que notre modèle est plus efficace et précis.

Perspectives de notre thèse

Cette étude se concentre principalement sur la relation entre le port sec et le port maritime en ce qui concerne les marchandises conteneurisées et l'impact de ces relations sur la concurrence entre les ports maritimes. Ces deux entités dans la pratique interagissent alternativement comme un fournisseur et un client en fonction du flux logistique des conteneurs et la gamme de services offerts par les ports secs. En effet, ce travail offre de multiples perspectives de développement vu la complexité de l'environnement du transport multimodal et les diverses pistes d'amélioration possibles. Il ya un certain nombre d'aspects et tendances liés aux ports secs qui sont dignes d'attention supplémentaire, car ils peuvent constituer un potentiel important pour le développement futur du système PSPM. Cependant, nous ne pouvons pas considérer ce travail comme entièrement achevé. Il existe plusieurs pistes de recherche très importante à traiter, à titre d'exemple : l'impact environnemental positif de l'implantation d'un port sec et comment le système port sec port maritime réduit l'émission de CO2 d'une manière remarquable dans un cadre connu aujourd'hui sous le terme de (Green PSPM), les recherches dans cette piste sont timide par apport d'autres pistes ; le développement de cycle de vie de port sec en relation avec port maritime et comment on peut assurer la durabilité du PSPM par apport la concurrence et éviter le cannibalisme entre les port sec ; une autre piste de recherche primordiale c'est la gestion de localisation de port sec qui représente un enjeu critique avec de nouveaux critères qui s'apparaitre avec le niveau de concurrence élevé aujourd'hui ; le PSPM dans le cadre de l'industrie 4.0 ou ce qu'on peut nommer PSPM 4.0 ce

qui peut révolutionner presque tous les thèmes de recherche qui existent je cite à titre d'exemple l'utilisation de IA pour améliorer la performance des services et opérations de PSPM selon plusieurs critères identifiés, dans ce sens on peut utiliser des algorithmes intelligents capables a anticipé le niveau de performance si on change des paramètres d'entrée. Ou on peut appliquer une classification intelligente des PSPM selon plusieurs entré ou même un classement non supervisé selon d'algorithme de clustering... on peut développer des chats bots qui se basent sur programmation neuro linguistique PNL capable a guidé les opérateurs dans leurs travaux en respectant les consignes nécessaires et en assurant la performance exigée... sans oublié la révolution d'IA dans la gestion visuelle on trouve aujourd'hui des navires intelligents et autonomes on peut utiliser ces algorithmes pour assurer l'efficacité des opérations par exemple l'accostage des navires... surement, selon l'évolution des recherches scientifiques dans le système PSPM on peut constater que le domaine est encore riche de l les recherches scientifiques dans le système PSPM sont riches et pleins de perspectives.

RÉFÉRENCES :

- [1] P. Hirst, G. Thompson, et S. Bromley, *Globalization in Question (3rd edition)*. Cambridge, UK / Malden, MA, USA: Polity, 2009. Consulté le : 21 janvier 2020. [En ligne]. Disponible sur : <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0745641520.html>
- [2] UNCTAD, *REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2018*. 2018.
- [3] H. Haralambides et G. Gujar, « The Indian dry ports sector, pricing policies and opportunities for public-private partnerships », *Research in Transportation Economics*, vol. 33, n° 1, p. 51-58, janv. 2011, doi: 10.1016/j.retrec.2011.08.006.
- [4] R. V. den Berg et P. W. D. Langen, « Towards an ‘inland terminal centred’ value proposition », *Maritime Policy & Management*, vol. 42, n° 5, p. 499-515, juill. 2015, doi : 10.1080/03088839.2014.928955.
- [5] F. Bentaleb, C. Mabrouki, et A. Semma, « Dry Port Development: A Systematic Review », p. 75-96, 2015.
- [6] M. Fender et F. Baron, *le supply chain management*, Dunod. 2014.
- [7] *maritime report*. 2019.
- [8] Y. Hayut, « Inland container terminal—function and rationale », *Maritime Policy & Management*, vol. 7, n° 4, p. 283-289, janv. 1980, doi: 10.1080/03088838000000042.
- [9] J. Woxenius, V. Roso, et K. Lumsden, « The dry port concept—connecting seaports with their hinterland by rail », 2004. [En ligne]. Disponible sur : https://www.pol.gu.se/digitalAssets/1344/1344857_2004_iclsp_dalian_wox-ros-lum.pdf
- [10] J. Woxenius, « Generic Framework for Transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature », *Transport Reviews*, vol. 27, n° 6, p. 733-749, nov. 2007, doi: 10.1080/01441640701358796.
- [11] C. Nash et B. Matthews, *Measuring the Marginal Social Cost of Transport*. Elsevier, 2005.
- [12] UNCTAD, *Review of Maritime Transport 2019*. 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_en.pdf
- [13] C. Mabrouki, F. Bentaleb, et A. Mousrij, « A decision support methodology for risk management within a port terminal », *Safety Science*, vol. 63, p. 124-132, mars 2014, doi : 10.1016/j.ssci.2013.09.015.
- [14] S. Hanaoka et M. B. Regmi, « Promoting intermodal freight transport through the development of dry ports in Asia: An environmental perspective », *IATSS Research*, vol. 35, n° 1, p. 16-23, juill. 2011, doi : 10.1016/j.iatssr.2011.06.001.
- [15] F. E. Santarremigia, G. D. Molero, S. Poveda-Reyes, et J. Aguilar-Herrando, « Railway safety by designing the layout of inland terminals with dangerous goods connected with the rail transport system », *Safety Science*, vol. 110, p. 206-216, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.03.001.
- [16] M. Hervás-Peralta, S. Poveda-Reyes, G. D. Molero, F. E. Santarremigia, et J.-P. Pastor-Ferrando, « Improving the Performance of Dry and Maritime Ports by Increasing Knowledge about the Most Relevant Functionalities of the Terminal Operating System (TOS) », *Sustainability*, vol. 11, n° 6, Art. n° 6, janv. 2019, doi : 10.3390/su11061648.
- [17] L. Lättilä, V. Henttu, et O.-P. Hilmola, « Hinterland operations of sea ports do matter: Dry port usage effects on transportation costs and CO2 emissions », *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 55, p. 23-42, août 2013, doi: 10.1016/j.tre.2013.03.007.
- [18] W. Li, O.-P. Hilmola, et Y. Panova, « Container Sea Ports and Dry Ports: Future CO2 Emission Reduction Potential in China », *Sustainability*, vol. 11, n° 6, Art. n° 6, janv. 2019, doi : 10.3390/su11061515.

- [19] V. Roso, « Evaluation of the dry port concept from an environmental perspective: A note », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 12, n° 7, p. 523-527, oct. 2007, doi: 10.1016/j.trd.2007.07.001.
- [20] N. Lamii, F. Bentaleb, M. Fri, K. Douaioui, C. Mabrouki, et E. A. Semma, « Systematic Review of Literature on Dry Port Concept Evolution », *Trans. Marit. Sci.*, vol. 9, n° 2, Art. n° 2, oct. 2020, doi: 10.7225/toms.v09.n02.009.
- [21] UNCTAD, *Handbook on the Management and Operation of Dry Ports*. 1991.
- [22] A. Jaržemskis et A. V. Vasiliauskas, « Research on dry port concept as intermodal node », *Transport*, vol. 22, n° 3, p. 207-213, janv. 2007, doi : 10.1080/16484142.2007.9638126.
- [23] V. Roso, J. Woxenius, et K. Lumsden, « The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland », *Journal of Transport Geography*, vol. 17, n° 5, p. 338-345, sept. 2009, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008.
- [24] K. Y. A. Ng et G. C. Gujar, « The spatial characteristics of inland transport hubs: evidences from Southern India », *Journal of Transport Geography*, vol. 17, n° 5, p. 346-356, sept. 2009, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2008.07.010.
- [25] P. Witte, B. Wiegmans, et A. K. Y. Ng, « A critical review on the evolution and development of inland port research », *Journal of Transport Geography*, vol. 74, p. 53-61, janv. 2019, doi : 10.1016/j.jtrangeo.2018.11.001.
- [26] T. G. Crainic, P. Dell’Olmo, N. Ricciardi, et A. Sgalambro, « Modeling dry-port-based freight distribution planning », *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 55, p. 518-534, juin 2015, doi : 10.1016/j.trc.2015.03.026.
- [27] T. Notteboom et J.-P. Rodrigue, « Inland terminals within North American and European supply chains », in *Transport and communications bulletin for Asia and the Pacific*, 2009, p. 1-39.
- [28] V. Roso, « Factors influencing implementation of a dry port », *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 38, n° 10, p. 782-798, janv. 2008, doi: 10.1108/09600030810926493.
- [29] A. Bask, V. Roso, D. Andersson, et E. Hämäläinen, « Development of seaport–dry port dyads: two cases from Northern Europe », *Journal of Transport Geography*, vol. 39, p. 85-95, juill. 2014, doi : 10.1016/j.jtrangeo.2014.06.014.
- [30] Y.-C. Tsao et V.-V. Thanh, « A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment », *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 124, p. 13-39, avr. 2019, doi: 10.1016/j.tre.2019.02.006.
- [31] G. Wilmsmeier, J. Monios, et B. Lambert, « The directional development of intermodal freight corridors in relation to inland terminals », *Journal of Transport Geography*, vol. 19, n° 6, p. 1379-1386, nov. 2011, doi : 10.1016/j.jtrangeo.2011.07.010.
- [32] Y. Wang, « Reaserch on Sustainable Development of Inland Port - Hinterland System Based on Life-Cycle Theory », *Advanced Materials Research*, p. 2485-2488, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.962-965.2485.
- [33] F. Bentaleb, M. Fri, C. Mabrouki, et A. Semma, « Dry port-seaport system development: Application of the product life cycle theory », *Journal of Transportation and Logistics*, vol. 1, n° 2, Art. n° 2, oct. 2016, doi: 10.22532/jtl.267840.
- [34] R. Vernon, « INTERNATIONAL INVESTMENT AND INTERNATIONAL TRADE IN THE PRODUCT CYCLE**The preparation of this article was financed in part by a grant from the Ford Foundation to the Harvard Business School to support a study of the implications of United States foreign direct investment. This paper is a byproduct of the hypothesis-building stage of the study. », in *International Economic Policies and their Theoretical Foundations (Second Edition)*, J. M. Letiche, Éd. Boston : Academic Press, 1992, p. 415-435. doi: 10.1016/B978-0-12-444281-8.50024-6.

- [35] S. Awad-Núñez, N. González-Cancelas, F. Soler-Flores, et A. Camarero-Orive, « A Methodology for Measuring Sustainability of Dry Ports Location Based on Bayesian Networks and Multi-criteria Decision Analysis », *Transportation Research Procedia*, vol. 13, p. 124-133, janv. 2016, doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.013.
- [36] K. Komchornrit, « The Selection of Dry Port Location by a Hybrid CFA-MACBETH-PROMETHEE Method: A Case Study of Southern Thailand », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 33, n° 3, p. 141-153, sept. 2017, doi: 10.1016/j.ajsl.2017.09.004.
- [37] L. C. Nguyen et T. Notteboom, « A Multi-Criteria Approach to Dry Port Location in Developing Economies with Application to Vietnam », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 32, n° 1, p. 23-32, mars 2016, doi: 10.1016/j.ajsl.2016.03.003.
- [38] V. Roso, N. Brnjac, et B. Abramovic, « Inland Intermodal Terminals Location Criteria Evaluation: The Case of Croatia », *Transportation Journal*, vol. 54, n° 4, p. 496-515, 2015, doi : 10.5325/transportationj.54.4.0496.
- [39] H. T. Abdoukarim, S. H. Fatouma, et B. Kalgora, « The Selection of Dry Port Location by Analytic Network Process Model: A Case Study of Dosso-Niger », *Journal of Transportation Technologies*, vol. 09, n° 02, p. 146, mars 2019, doi : 10.4236/jtts.2019.92009.
- [40] B. Ka, « Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to China Dry Port Location Selection », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 27, n° 2, p. 331-353, août 2011, doi: 10.1016/S2092-5212(11)80015-5.
- [41] J. Wei, A. Sun, et J. Zhuang, « The Selection of Dry Port Location with the Method of Fuzzy-ANP », in *Advances in Wireless Networks and Information Systems*, Q. Luo, Éd. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010, p. 265-273. doi: 10.1007/978-3-642-14350-2_33.
- [42] J. Li et B. Jiang, « Cooperation Performance Evaluation between Seaport and Dry Port; Case of Qingdao Port and Xi'an Port », *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, vol. 1, p. 99-109, déc. 2014, doi: 10.1016/j.enavi.2014.12.009.
- [43] F. Bentaleb, C. Mabrouki, et A. Semma, « Dry Port Location Problem: A Hybrid Multi-Criteria Approach », *Journal of ETA Maritime Science*, p. 73_90, 2016.
- [44] Z. Gong et N. Liu, « Mitigative and adaptive investments for natural disasters and labor strikes in a seaport–dry port inland logistics network », *Maritime Policy & Management*, vol. 47, n° 1, p. 92-108, janv. 2020, doi : 10.1080/03088839.2019.1675195.
- [45] P. Cortés, J. Muñuzuri, J. Nicolás Ibáñez, et J. Guadix, « Simulation of freight traffic in the Seville inland port », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 15, n° 3, p. 256-271, mars 2007, doi: 10.1016/j.simpat.2006.11.004.
- [46] V. Henttu, L. Lättilä, et O.-P. Hilmola, « OPTIMIZATION OF RELATIVE TRANSPORT COSTS OF A HYPOTHETICAL DRY PORT STRUCTURE », 2011.
- [47] V. Roso et K. Lumsden, « A review of dry ports », *Marit Econ Logist*, vol. 12, n° 2, p. 196-213, juin 2010, doi : 10.1057/mel.2010.5.
- [48] T. Rožić, K. Rogić, et I. Bajor, « Research Trends of Inland Terminals: A Literature Review », *Promet - Traffic&Transportation*, vol. 28, n° 5, p. 539-548, oct. 2016, doi: 10.7307/ptt.v28i5.2090.
- [49] W.-K. K. Hsu, « Assessing the Safety Factors of Ship Berthing Operations », *The Journal of Navigation*, vol. 68, n° 3, p. 576-588, mai 2015, doi: 10.1017/S0373463314000861.
- [50] P. L. Pallis, « Port Risk Management in Container Terminals », *Transportation Research Procedia*, vol. 25, 2017, Consulté le: 17 août 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://cyberleninka.org/article/n/29120>
- [51] K. Klockner et Y. Toft, « Accident Modelling of Railway Safety Occurrences: The Safety and Failure Event Network (SAFE-Net) Method », *Procedia Manufacturing*, vol. 3, p. 1734-1741, janv. 2015, doi : 10.1016/j.promfg.2015.07.487.

- [52] G. Langella, P. Iodice, A. Amoresano, et A. Senatore, « Marine Engines Emission and Dispersion in Fuel Switching Operation: A Case Study for the Port of Naples », *Energy Procedia*, vol. 101, p. 368-375, nov. 2016, doi : 10.1016/j.egypro.2016.11.047.
- [53] H. S. Loh, Q. Zhou, V. V. Thai, Y. D. Wong, et K. F. Yuen, « Fuzzy comprehensive evaluation of port-centric supply chain disruption threats », *Ocean & Coastal Management*, vol. 148, p. 53-62, nov. 2017, doi : 10.1016/j.ocecoaman.2017.07.017.
- [54] A. John, R. Riahi, D. Paraskevadakis, A. Bury, Z. Yang, et J. Wang, « A new approach for evaluating the disruption risks of a seaport system », in *Safety and Reliability: Methodology and Applications*, T. Nowakowski, M. Młyńczak, A. Jodejko-Pietruczuk, et S. Werbińska-Wojciechowska, Éd. CRC Press, 2014, p. 591-598. doi : 10.1201/b17399-83.
- [55] A. John, Z. Yang, R. Riahi, et J. Wang, « A risk assessment approach to improve the resilience of a seaport system using Bayesian networks », *Ocean Engineering*, vol. 111, p. 136-147, janv. 2016, doi : 10.1016/j.oceaneng.2015.10.048.
- [56] F. J. Joubert et L. Pretorius, « Using Monte Carlo simulation to create a ranked check list of risks in a portfolio of railway construction projects », *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 28, n° 2, p. 133-148, août 2017, doi: 10.7166/28-2-1604.
- [57] X. Gou et J. S. L. Lam, « Risk analysis of marine cargoes and major port disruptions », *Marit Econ Logist*, juill. 2018, doi: 10.1057/s41278-018-0110-3.
- [58] N. Yan, X. Chen, et Y. Li, « Assessment of overturning risk of high-speed trains in strong crosswinds using spectral analysis approach », *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, p. 103-118, mars 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2017.12.024.
- [59] X. Zhao, H. Yan, et J. Zhang, « A critical review of container security operations », *Maritime Policy & Management*, vol. 44, n° 2, p. 170-186, févr. 2017, doi : 10.1080/03088839.2016.1253883.
- [60] Z. Wang et C. Guo, « Minimizing the risk of seaport operations efficiency reduction affected by vessel arrival delay », *Industrial Management & Data Systems*, août 2018, doi: 10.1108/IMDS-12-2017-0563.
- [61] Z. A. Kadir *et al.*, « Risk Management Framework for Handling and Storage of Cargo at Major Ports in Malaysia towards Port Sustainability », *Sustainability*, vol. 12, n° 2, Art. n° 2, janv. 2020, doi: 10.3390/su12020516.
- [62] W.-J. Tseng, J.-F. Ding, et M.-H. Li, « Risk management of cargo damage in export operations of ocean freight forwarders in Taiwan », *Proceedings of the IMechE*, vol. 229, n° 3, p. 232-247, août 2015, doi: 10.1177/1475090213513755.
- [63] K. Bergheim, M. B. Nielsen, K. Mearns, et J. Eid, « The relationship between psychological capital, job satisfaction, and safety perceptions in the maritime industry », *Safety Science*, vol. 74, p. 27-36, avr. 2015, doi : 10.1016/j.ssci.2014.11.024.
- [64] V. Arslan, R. E. Kurt, O. Turan, et L. De Wolff, « Safety Culture Assessment and Implementation Framework to Enhance Maritime Safety », *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 3895-3904, janv. 2016, doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.477.
- [65] X. Bellsolà Olba, W. Daamen, T. Vellinga, et S. P. Hoogendoorn, « Risk Assessment Methodology for Vessel Traffic in Ports by Defining the Nautical Port Risk Index », *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, n° 1, Art. n° 1, janv. 2020, doi: 10.3390/jmse8010010.
- [66] R. Sciarrillo, D. Zuzolo, D. Cicchella, F. Iannone, G. Cammino, et C. Guarino, « Contamination and ecological risk assessment of the seaport of Naples (Italy): Insights from marine sediments », *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 210, p. 106449, mars 2020, doi : 10.1016/j.gexplo.2019.106449.
- [67] F. Bentaleb, C. Mabrouki, et A. Semma, « A Multi-Criteria Approach for Risk Assessment of Dry Port-Seaport System », *Supply Chain Forum: An International Journal*, vol. 16, n° 4, p. 32-49, janv. 2015, doi: 10.1080/16258312.2015.11728692.

- [68] T. J. Leonard, P. Gallo, et S. Véronneau, « Security challenges in United States sea ports: an overview », *J Transp Secur*, vol. 8, n° 1, p. 41-49, juin 2015, doi : 10.1007/s12198-015-0155-9.
- [69] H. Chen, K. Cullinane, et N. Liu, « Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network », *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 97, p. 282-301, janv. 2017, doi: 10.1016/j.tre.2016.10.008.
- [70] T. Yuan, P. Xiang, H. Li, et L. Zhang, « Identification of the main risks for international rail construction projects based on the effects of cost-estimating risks », *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, p. 122904, nov. 2020, doi : 10.1016/j.jclepro.2020.122904.
- [71] R. D. McIntosh et A. Becker, « Applying MCDA to weight indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for U.S. North Atlantic ports », *Environ Syst Decis*, vol. 40, n° 3, p. 356-370, sept. 2020, doi : 10.1007/s10669-020-09767-y.
- [72] Y. Zhang et J. S. L. Lam, « Estimating the economic losses of port disruption due to extreme wind events », *Ocean & Coastal Management*, vol. 116, p. 300-310, nov. 2015, doi : 10.1016/j.ocecoaman.2015.08.009.
- [73] J.-Y. Pak, G.-T. Yeo, S.-W. Oh, et Z. Yang, « Port safety evaluation from a captain's perspective: The Korean experience », *Safety Science*, vol. 72, p. 172-181, févr. 2015, doi : 10.1016/j.ssci.2014.09.007.
- [74] J. S. L. Lam, C. Liu, et X. Gou, « Cyclone risk mapping for critical coastal infrastructure: Cases of East Asian seaports », *Ocean & Coastal Management*, vol. 141, p. 43-54, juin 2017, doi : 10.1016/j.ocecoaman.2017.02.015.
- [75] Z. Yang, Z. Yang, J. Yin, et Z. Qu, « A risk-based game model for rational inspections in port state control », *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, vol. 118, p. 477-495, oct. 2018, doi: 10.1016/j.tre.2018.08.001.
- [76] J. I. Morgan, R. Abbott, P. Furness, et J. Ramsay, « UK rail workers' perceptions of accident risk factors: An exploratory study », *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 55, p. 103-113, sept. 2016, doi: 10.1016/j.ergon.2016.08.003.
- [77] A. J. Filtness et A. Naweed, « Causes, consequences and countermeasures to driver fatigue in the rail industry: The train driver perspective », *Applied Ergonomics*, vol. 60, p. 12-21, avr. 2017, doi : 10.1016/j.apergo.2016.10.009.
- [78] L. Tsao, J. Chang, et L. Ma, « Fatigue of Chinese railway employees and its influential factors: Structural equation modelling », *Applied Ergonomics*, vol. 62, p. 131-141, juill. 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2017.02.021.
- [79] V. Başhan, H. Demirel, et M. Gul, « An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety », *Soft Comput*, vol. 24, n° 24, p. 18749-18764, déc. 2020, doi : 10.1007/s00500-020-05108-y.
- [80] J. Liu, H. Zhou, et H. Sun, « A three-dimensional risk management model of port logistics for hazardous goods », *Maritime Policy & Management*, vol. 46, n° 6, p. 715-734, août 2019, doi: 10.1080/03088839.2019.1627435.
- [81] A. Cem Kuzu, E. Akyuz, et O. Arslan, « Application of Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) to maritime industry: A risk analysing of ship mooring operation », *Ocean Engineering*, vol. 179, p. 128-134, mai 2019, doi : 10.1016/j.oceaneng.2019.03.029.
- [82] Y. Huang et P. H. A. J. M. van Gelder, « Collision risk measure for triggering evasive actions of maritime autonomous surface ships », *Safety Science*, vol. 127, p. 104708, juill. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104708.
- [83] V. Bolbot, G. Theotokatos, E. Boulougouris, et D. Vassalos, « A novel cyber-risk assessment method for ship systems », *Safety Science*, vol. 131, p. 104908, nov. 2020, doi : 10.1016/j.ssci.2020.104908.

- [84] D. Bazaras et R. Palsaitis, « Factors of Emergency Situations Risks Management in the BSR Ports », *Procedia Engineering*, vol. 178, p. 501-506, janv. 2017, doi : 10.1016/j.proeng.2017.01.094.
- [85] L. Filina-Dawidowicz, R. Iwańkiewicz, et W. Rosochacki, « Risk measures of load loss during service of refrigerated containers in seaports », *Archives of Transport*, vol. Vol. 34, iss. 2, 2015, doi: 10.5604/08669546.1169208.
- [86] S. Laapotti, « Comparison of fatal motor vehicle accidents at passive and active railway level crossings in Finland », *IATSS Research*, vol. 40, n° 1, p. 1-6, juill. 2016, doi: 10.1016/j.iatssr.2015.12.003.
- [87] S. Nayak, S. Tripathy, et A. Dash, « Role of non technical skill in human factor engineering: a crucial safety issue in Indian Railway », *Int J Syst Assur Eng Manag*, vol. 9, n° 5, p. 1120-1136, oct. 2018, doi : 10.1007/s13198-018-0715-z.
- [88] B. Hani Tabai, M. Bagheri, V. Sadeghi-Firoozabadi, et N. N. Sze, « Evaluating the impact of train drivers' cognitive and demographic characteristics on railway accidents », *Safety Science*, vol. 110, p. 162-167, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.03.027.
- [89] P. Hughes, D. Shipp, M. Figueres-Esteban, et C. van Gulijk, « From free-text to structured safety management: Introduction of a semi-automated classification method of railway hazard reports to elements on a bow-tie diagram », *Safety Science*, vol. 110, p. 11-19, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.03.011.
- [90] Y.-H. Cheng, « Railway safety climate: a study on organizational development », *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 25, n° 2, p. 200-216, avr. 2019, doi: 10.1080/10803548.2017.1361591.
- [91] Q. Gao, D. Wang, M. Rückert, et X. Jiang, « Violation causes from the perspectives of managers and workers in Chinese railway systems: An exploratory study », *Safety Science*, vol. 94, p. 41-51, avr. 2017, doi : 10.1016/j.ssci.2017.01.001.
- [92] S. Corrigan, A. Kay, M. Ryan, M. E. Ward, et B. Brazil, « Human factors and safety culture: Challenges and opportunities for the port environment », *Safety Science*, mars 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.03.008.
- [93] M. Curcuruto, M. A. Griffin, R. Kandola, et J. I. Morgan, « Multilevel safety climate in the UK rail industry: A cross validation of the Zohar and Luria MSC scale », *Safety Science*, vol. 110, p. 183-194, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.02.008.
- [94] C. Bardon et B. L. Mishara, « Systematic Review of the Impact of Suicides and Other Critical Incidents on Railway Personnel », *Suicide and Life-Threatening Behavior*, vol. 45, n° 6, p. 720-731, 2015, doi: 10.1111/sltb.12164.
- [95] B. L. Mishara et C. Bardon, « Characteristics of railway suicides in Canada and comparison with accidental railway fatalities: Implications for prevention », *Safety Science*, vol. 91, p. 251-259, janv. 2017, doi : 10.1016/j.ssci.2016.06.017.
- [96] C. Bardon et B. L. Mishara, « Development of a Comprehensive Programme to Prevent and Reduce the Negative Impact of Railway Fatalities, Injuries and Close Calls on Railway Employees », *J Occup Rehabil*, vol. 25, n° 3, p. 557-568, sept. 2015, doi : 10.1007/s10926-014-9562-1.
- [97] H. H. Mabrouk, « "CLASCA": Learning System for Classification and Capitalization of Accident Scenarios of Railway », *Journal of Engineering Research and Application*, vol. 6, n° 8, p. 91-98, 2016.
- [98] G. J. M. Read, P. M. Salmon, M. G. Lenné, et N. A. Stanton, « Walking the line: Understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis », *Applied Ergonomics*, vol. 53, p. 209-227, mars 2016, doi : 10.1016/j.apergo.2015.10.004.
- [99] A. Borsos, M. Gabor, et C. Koren, « Safety Ranking of Railway Crossings in Hungary », *Transportation Research Procedia*, vol. 14, 2016, Consulté le : 17 août 2019. [En ligne]. Disponible sur : <https://cyberleninka.org/article/n/1416806>

- [100] C. Liang, M. Ghazel, O. Cazier, et E.-M. El-Koursi, « A new insight on the risky behavior of motorists at railway level crossings: An observational field study », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 108, p. 181-188, nov. 2017, doi : 10.1016/j.aap.2017.08.030.
- [101] C. Liang et M. Ghazel, « A risk assessment study on accidents at French level crossings using Bayesian belief networks », *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, vol. 25, n° 2, p. 162-172, avr. 2018, doi: 10.1080/17457300.2017.1416480.
- [102] C. Liang, M. Ghazel, O. Cazier, et E.-M. El-Koursi, « Analyzing risky behavior of motorists during the closure cycle of railway level crossings », *Safety Science*, vol. 110, p. 115-126, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.12.008.
- [103] G. Bureika, E. Gaidamauskas, J. Kupinas, M. Bogdevičius, et S. Steišūnas, « Modelling the assessment of traffic risk at level crossings of Lithuanian railways », *Transport*, vol. 32, n° 3, p. 282-290, juill. 2017, doi: 10.3846/16484142.2016.1244114.
- [104] C. Liang, M. Ghazel, O. Cazier, et E.-M. El-Koursi, « Risk analysis on level crossings using a causal Bayesian network based approach », *Transportation Research Procedia*, vol. 25, p. 2167-2181, janv. 2017, doi : 10.1016/j.trpro.2017.05.418.
- [105] S. Zhao, A. Iranitalab, et A. J. Khattak, « A clustering approach to injury severity in pedestrian-train crashes at highway-rail grade crossings », *Journal of Transportation Safety & Security*, vol. 11, n° 3, p. 305-322, mai 2019, doi : 10.1080/19439962.2018.1428257.
- [106] M. Zhang, A. J. Khattak, J. Liu, et D. Clarke, « A comparative study of rail-pedestrian trespassing crash injury severity between highway-rail grade crossings and non-crossings », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 117, p. 427-438, août 2018, doi : 10.1016/j.aap.2018.02.001.
- [107] C. Liang, M. Ghazel, O. Cazier, et E.-M. El-Koursi, « Developing accident prediction model for railway level crossings », *Safety Science*, vol. 101, p. 48-59, janv. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.08.013.
- [108] D. Wu et W. Zheng, « Formal model-based quantitative safety analysis using timed Coloured Petri Nets », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 176, p. 62-79, août 2018, doi: 10.1016/j.ress.2018.03.035.
- [109] B. Djordjević, E. Krmac, et T. J. Mlinarić, « Non-radial DEA model: A new approach to evaluation of safety at railway level crossings », *Safety Science*, vol. 103, p. 234-246, mars 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.12.001.
- [110] P. M. Salmon *et al.*, « STAMP goes EAST: Integrating systems ergonomics methods for the analysis of railway level crossing safety management », *Safety Science*, vol. 110, p. 31-46, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.02.014.
- [111] X. Wang, J. Liu, A. J. Khattak, et D. Clarke, « Non-crossing rail-trespassing crashes in the past decade: A spatial approach to analyzing injury severity », *Safety Science*, vol. 82, p. 44-55, févr. 2016, doi : 10.1016/j.ssci.2015.08.017.
- [112] P. Skládáná, P. Skládáný, P. Tučka, M. Bidovský, et B. Sulíková, « Trespassing Railway Property – Typology of Risk Localities », *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 2091-2100, janv. 2016, doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.224.
- [113] M. Guo, W. Wei, G. Liao, et F. Chu, « The impact of personality on driving safety among Chinese high-speed railway drivers », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 92, p. 9-14, juill. 2016, doi: 10.1016/j.aap.2016.03.014.
- [114] G. He, A. P. J. Mol, L. Zhang, et Y. Lu, « Environmental risks of high-speed railway in China: Public participation, perception and trust », *Environmental Development*, vol. 14, p. 37-52, avr. 2015, doi : 10.1016/j.envdev.2015.02.002.
- [115] M. Radziemska *et al.*, « Environmental impact assessment of risk elements from railway transport with the use of pollution indices, a biotest and bioindicators », *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 0, n° 0, p. 1-24, mars 2020, doi: 10.1080/10807039.2020.1736984.

- [116] H. Zhang, M. Yuan, Y. Liang, B. Wang, W. Zhang, et J. Zheng, « A risk assessment based optimization method for route selection of hazardous liquid railway network », *Safety Science*, vol. 110, p. 217-229, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.04.003.
- [117] W. Huang, Y. Zhang, B. Zuo, Y. Yu, G. J. De Dieu, et Y. Xu, « Using an expanded Safety Failure Event Network to analyze railway dangerous goods transportation system risk-accident », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 65, p. 104122, mai 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104122.
- [118] W. Huang, R. Zhang, M. Xu, Y. Yu, Y. Xu, et G. J. De Dieu, « Risk state changes analysis of railway dangerous goods transportation system: Based on the cusp catastrophe model », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 202, p. 107059, oct. 2020, doi : 10.1016/j.ress.2020.107059.
- [119] C. Visintin, N. Golding, R. van der Ree, et M. A. McCarthy, « Managing the timing and speed of vehicles reduces wildlife-transport collision risk », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 59, p. 86-95, mars 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.12.003.
- [120] E. Matsika, C. O'Neill, U. Battista, M. Khosravi, A. de S. Laporte, et E. Munoz, « Development of Risk Assessment Specifications for Analysing Terrorist Attacks Vulnerability on Metro and Light Rail Systems », *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 1345-1354, janv. 2016, doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.207.
- [121] B. Misnevs, A. Melikyan, et D. Bazaras, « Hazard Assessment of Weather Factors for the Occurrence of an Emergency on the Railway », *Procedia Computer Science*, vol. 77, p. 40-47, janv. 2015, doi : 10.1016/j.procs.2015.12.357.
- [122] G. Wang, T. Xu, T. Tang, T. Yuan, et H. Wang, « A Bayesian network model for prediction of weather-related failures in railway turnout systems », *Expert Systems with Applications*, vol. 69, p. 247-256, mars 2017, doi: 10.1016/j.eswa.2016.10.011.
- [123] L.-R. Lagadec, L. Moulin, I. Braud, B. Chazelle, et P. Breil, « A surface runoff mapping method for optimizing risk assessment on railways », *Safety Science*, vol. 110, p. 253-267, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.05.014.
- [124] S. L. Binti Sa'adin, S. Kaewunruen, et D. Jaroszweski, « Risks of Climate Change with Respect to the Singapore-Malaysia High Speed Rail System », *Climate*, vol. 4, n° 4, p. 65, déc. 2016, doi : 10.3390/cli4040065.
- [125] S. Dindar, S. Kaewunruen, et J. M. Sussman, « Climate Change Adaptation for GeoRisks Mitigation of Railway Turnout Systems », *Procedia Engineering*, vol. 189, p. 199-206, janv. 2017, doi : 10.1016/j.proeng.2017.05.032.
- [126] I. V. Sanchis, R. I. Franco, P. S. Zuriaga, et P. M. Fernández, « Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network », *Transportation Research Procedia*, vol. 45, p. 5-12, janv. 2020, doi : 10.1016/j.trpro.2020.02.056.
- [127] Z. Yang *et al.*, « Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 61, p. 444-458, juin 2018, doi : 10.1016/j.trd.2017.03.004.
- [128] P. Bubeck, L. Dillenardt, L. Alfieri, L. Feyen, A. H. Thielen, et P. Kellermann, « Global warming to increase flood risk on European railways », *Climatic Change*, vol. 155, n° 1, p. 19-36, juill. 2019, doi: 10.1007/s10584-019-02434-5.
- [129] R. Macciotta, C. D. Martin, D. M. Cruden, M. Hendry, et T. Edwards, « Rock fall hazard control along a section of railway based on quantified risk », *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 11, n° 3, p. 272-284, juill. 2017, doi: 10.1080/17499518.2017.1293273.
- [130] W.-D. Wang, J. Li, et Z. Han, « Comprehensive assessment of geological hazard safety along railway engineering using a novel method: a case study of the Sichuan-Tibet railway, China », *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 11, n° 1, p. 1-21, janv. 2020, doi: 10.1080/19475705.2019.1699606.

- [131] L. Chang *et al.*, « Hybrid belief rule base for regional railway safety assessment with data and knowledge under uncertainty », *Information Sciences*, vol. 518, p. 376-395, mai 2020, doi : 10.1016/j.ins.2019.12.035.
- [132] W. Zhu, K. Liu, M. Wang, et E. E. Koks, « Seismic Risk Assessment of the Railway Network of China's Mainland », *Int J Disaster Risk Sci*, vol. 11, n° 4, p. 452-465, août 2020, doi : 10.1007/s13753-020-00292-9.
- [133] J. Liu, F. Schmid, W. Zheng, et J. Zhu, « Understanding railway operational accidents using network theory », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 189, p. 218-231, sept. 2019, doi: 10.1016/j.ress.2019.04.030.
- [134] H. Hadj-Mabrouk, « Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents », *Urban Rail Transit*, vol. 5, n° 2, p. 104-122, juin 2019, doi : 10.1007/s40864-019-0102-3.
- [135] R. Macciotta, C. D. Martin, N. R. Morgenstern, et D. M. Cruden, « Quantitative risk assessment of slope hazards along a section of railway in the Canadian Cordillera—a methodology considering the uncertainty in the results », *Landslides*, vol. 13, n° 1, p. 115-127, févr. 2016, doi : 10.1007/s10346-014-0551-4.
- [136] V. van der Vlies, M. Berrevoets, et D. Tretjakova, « Back on track: Creating a robust institutional framework for rail transport of hazardous substances in the Netherlands », *Safety Science*, vol. 110, p. 242-252, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.10.002.
- [137] R. Macciotta, S. Robitaille, M. Hendry, et C. D. Martin, « Hazard ranking for railway transport of dangerous goods in Canada », *Case Studies on Transport Policy*, vol. 6, n° 1, p. 43-50, mars 2018, doi : 10.1016/j.cstp.2017.11.006.
- [138] W. Huang, B. Shuai, B. Zuo, Y. Xu, et E. Antwi, « A systematic railway dangerous goods transportation system risk analysis approach: The 24 model », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 61, p. 94-103, sept. 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2019.05.021.
- [139] W. Huang et Y. Zhang, « Railway Dangerous Goods Transportation System Risk Assessment: An Approach Combining FMEA With Pessimistic–Optimistic Fuzzy Information Axiom Considering Acceptable Risk Coefficient », *IEEE Transactions on Reliability*, p. 1-18, 2020, doi : 10.1109/TR.2020.2973431.
- [140] M. Novales, D. Bertrand, et L. Fontaine, « A proposed new approach to light rail safety management in Spain and other countries », *Safety Science*, vol. 118, p. 740-751, oct. 2019, doi : 10.1016/j.ssci.2019.06.010.
- [141] S. Dindar, S. Kaewunruen, et M. An, « Identification of appropriate risk analysis techniques for railway turnout systems », *Journal of Risk Research*, vol. 21, n° 8, p. 974-995, août 2018, doi : 10.1080/13669877.2016.1264452.
- [142] A. Naweed, S. Rainbird, et C. Dance, « Are you fit to continue? Approaching rail systems thinking at the cusp of safety and the apex of performance », *Safety Science*, vol. 76, p. 101-110, juill. 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.02.016.
- [143] A. Naweed, S. Rainbird, et J. Chapman, « Investigating the formal countermeasures and informal strategies used to mitigate SPAD risk in train driving: Ergonomics: , No 6 », vol. 58, n° 6, p. 883-896, 2015, doi : <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.1001448>.
- [144] R. Madigan, D. Golightly, et R. Madders, « Application of Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) to UK rail safety of the line incidents », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 97, p. 122-131, déc. 2016, doi : 10.1016/j.aap.2016.08.023.
- [145] R. A. H. E. L. Rashidy, P. Hughes, M. Figueres-Esteban, C. Harrison, et C. Van Gulijk, « A big data modeling approach with graph databases for SPAD risk », *Safety Science*, vol. 110, p. 75-79, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.11.019.
- [146] S. Dindar, S. Kaewunruen, M. An, et J. M. Sussman, « Bayesian Network-based probability analysis of train derailments caused by various extreme weather patterns on

- railway turnouts », *Safety Science*, vol. 110, p. 20-30, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.12.028.
- [147] S. Kaeni, M. Khalilian, et J. Mohammadzadeh, « Derailment accident risk assessment based on ensemble classification method », *Safety Science*, vol. 110, p. 3-10, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.11.006.
- [148] X. Liu, M. Rapik Saat, et C. P. L. Barkan, « Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 98, p. 1-9, janv. 2017, doi : 10.1016/j.aap.2016.09.012.
- [149] V. Singhal *et al.*, « Artificial Intelligence Enabled Road Vehicle-Train Collision Risk Assessment Framework for Unmanned Railway Level Crossings », *IEEE Access*, vol. 8, p. 113790-113806, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3002416.
- [150] L. Wang, M. An, Y. Qin, et L. Jia, « A Risk-Based Maintenance Decision-Making Approach for Railway Asset Management », *Int. J. Soft. Eng. Knowl. Eng.*, vol. 28, n° 04, p. 453-483, avr. 2018, doi: 10.1142/S0218194018400065.
- [151] W. Huang *et al.*, « Fault Tree and Fuzzy D-S Evidential Reasoning combined approach: An application in railway dangerous goods transportation system accident analysis », *Information Sciences*, vol. 520, p. 117-129, mai 2020, doi : 10.1016/j.ins.2019.12.089.
- [152] H. Alyami, Z. Yang, R. Riahi, S. Bonsall, et J. Wang, « Advanced uncertainty modelling for container port risk analysis », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, p. 411-421, févr. 2019, doi : 10.1016/j.aap.2016.08.007.
- [153] Sunaryo et M. A. Hamka, « Safety Risks Assessment on Container Terminal Using Hazard Identification and Risk Assessment and Fault Tree Analysis Methods », *Procedia Engineering*, vol. 194, p. 307-314, janv. 2017, doi : 10.1016/j.proeng.2017.08.150.
- [154] F. E. Santarremigia, G. D. Molero, S. Poveda-Reyes, et J. Aguilar-Herrando, « Railway safety by designing the layout of inland terminals with dangerous goods connected with the rail transport system », *Safety Science*, vol. 110, p. 206-216, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.03.001.
- [155] C.-H. Chang, J. Xu, et D.-P. Song, « Risk analysis for container shipping: from a logistics perspective », *The International Journal of Logistics Management*, mai 2015, doi: 10.1108/IJLM-07-2012-0068.
- [156] PMI, *PMBOK® Guide*. 2021. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/PMBOK>
- [157] D. L. Olson et D. Dash Wu, « A review of enterprise risk management in supply chain », *Kybernetes*, vol. 39, n° 5, p. 694-706, janv. 2010, doi: 10.1108/03684921011043198.
- [158] B. Leitner, « A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis », *Procedia Engineering*, vol. 187, p. 150-159, janv. 2017, doi : 10.1016/j.proeng.2017.04.361.
- [159] Z. Wang, G. Su, M. Skitmore, J. Chen, A. P. C. Chan, et B. Xia, « Human Error Risk Management Methodology for Rail Crack Incidents », *Urban Rail Transit*, vol. 1, n° 4, p. 257-265, déc. 2015, doi : 10.1007/s40864-016-0032-2.
- [160] B. Van Weyenberge, X. Deckers, R. Caspeele, et B. Merci, « Development of a Risk Assessment Method for Life Safety in Case of Fire in Rail Tunnels », *Fire Technol*, vol. 52, n° 5, p. 1465-1479, sept. 2016, doi : 10.1007/s10694-015-0469-y.
- [161] Z. Boudi, R. Ben-Ayed, E. M. El Koursi, S. Collart-Dutilleul, T. Nolasco, et M. Haloua, « A CPN/B method transformation framework for railway safety rules formal validation », *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 9, n° 2, p. 13, mars 2017, doi: 10.1007/s12544-017-0228-x.
- [162] A. Di Febbraro, D. Giglio, et N. Sacco, « On analyzing the vulnerabilities of a railway network with Petri nets », *Transportation Research Procedia*, vol. 27, p. 553-560, janv. 2017, doi : 10.1016/j.trpro.2017.12.144.

- [163] H. Song et E. Schnieder, « Evaluating Fault Tree by means of Colored Petri nets to analyze the railway system dependability », *Safety Science*, vol. 110, p. 313-323, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.08.017.
- [164] M. Rydstedt Nyman et M. Johansson, « Merits of using a socio-technical system perspective and different industrial accident investigation methods on accidents following natural hazards – A case study on pluvial flooding of a Swedish railway tunnel 2013 », *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 13, p. 189-199, sept. 2015, doi: 10.1016/j.ijdr.2015.06.004.
- [165] P. Metaxatos et P. S. Sriraj, « Pedestrian Safety at Rail Grade Crossings: Focus Areas for Research and Intervention », *Urban Rail Transit*, vol. 1, n° 4, p. 238-248, déc. 2015, doi: 10.1007/s40864-016-0030-4.
- [166] A. Becker et M. R. Caldwell, « Stakeholder Perceptions of Seaport Resilience Strategies: A Case Study of Gulfport (Mississippi) and Providence (Rhode Island) », *Coastal Management*, vol. 43, n° 1, p. 1-34, janv. 2015, doi: 10.1080/08920753.2014.983422.
- [167] R. Forsberg, « Conditions affecting safety on the Swedish railway – Train drivers' experiences and perceptions », *Safety Science*, vol. 85, p. 53-59, juin 2016, doi : 10.1016/j.ssci.2015.12.015.
- [168] D. Guo, G. He, et Z. Lian, « Environmental risk perception and public trust—from planning to operation for China's high-speed railway », *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 11, n° 9, p. 696-706, oct. 2017, doi: 10.1080/15568318.2017.1306761.
- [169] D. Romero-Faz et A. Camarero-Orive, « Risk assessment of critical infrastructures – New parameters for commercial ports », *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, vol. 18, p. 50-57, sept. 2017, doi: 10.1016/j.ijcip.2017.07.001.
- [170] J.-L. Wybo, « Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents », *Safety Science*, vol. 110, p. 268-275, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.03.022.
- [171] J. Bagiński, B. Flisiuk, W. Górka, D. Rogowski, et T. Stęclik, « Multi-criteria Decision Analysis in the Railway Risk Management Process », in *Beyond Databases, Architectures and Structures. Paving the Road to Smart Data Processing and Analysis*, 2019, p. 126-138.
- [172] J. Kwesi-Buor, D. A. Menachof, et R. Talas, « Scenario analysis and disaster preparedness for port and maritime logistics risk management », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, p. 433-447, févr. 2019, doi : 10.1016/j.aap.2016.07.013.
- [173] M. Guo, S. Liu, F. Chu, L. Ye, et Q. Zhang, « Supervisory and coworker support for safety: Buffers between job insecurity and safety performance of high-speed railway drivers in China », *Safety Science*, vol. 117, p. 290-298, août 2019, doi : 10.1016/j.ssci.2019.04.017.
- [174] J. Kowalski et M. Polonski, « Identification of risk investment using the risk matrix on railway facilities », *Open Engineering*, vol. 8, n° 1, p. 506-512, 2018, doi: 10.1515/eng-2018-0057.
- [175] P.-H. Tseng et N. Pilcher, « Maintaining and researching port safety: a case study of the port of Kaohsiung », *Eur. Transp. Res. Rev.*, vol. 9, n° 3, p. 34, juin 2017, doi : 10.1007/s12544-017-0250-z.
- [176] H. ju Kim, J. young Jeong, J. wook Kim, et J. kyung Oh, « A Factor Analysis of Urban Railway Casualty Accidents and Establishment of Preventive Response Systems », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 218, p. 131-140, mai 2016, doi: 10.1016/j.sbspro.2016.04.016.
- [177] N. Azad, E. Hassini, et M. Verma, « Disruption risk management in railroad networks: An optimization-based methodology and a case study », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 85, p. 70-88, mars 2016, doi: 10.1016/j.trb.2016.01.001.

- [178] Y. Zhang et J. S. L. Lam, « Estimating economic losses of industry clusters due to port disruptions », *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 91, p. 17-33, sept. 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.05.017.
- [179] J. Zhang, Â. P. Teixeira, C. G. Soares, X. Yan, et K. Liu, « Maritime Transportation Risk Assessment of Tianjin Port with Bayesian Belief Networks », *Risk Analysis*, vol. 36, n° 6, p. 1171-1187, 2016, doi : 10.1111/risa.12519.
- [180] S. Dindar, S. Kaewunruen, M. An, et M. H. Osman, « Natural Hazard Risks on Railway Turnout Systems », *Procedia Engineering*, vol. 161, p. 1254-1259, janv. 2016, doi : 10.1016/j.proeng.2016.08.561.
- [181] Z. L. Yang et Z. Qu, « Quantitative maritime security assessment: a 2020 vision », *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 27, n° 4, p. 453-470, oct. 2016, doi: 10.1093/imaman/dpw005.
- [182] J. S. L. Lam et J. A. Lassa, « Risk assessment framework for exposure of cargo and ports to natural hazards and climate extremes », *Maritime Policy & Management*, vol. 44, n° 1, p. 1-15, janv. 2017, doi : 10.1080/03088839.2016.1245877.
- [183] C. Okeahalam et K. Otwombe, « Socioeconomic development and the risk of maritime piracy », *J Transp Secur*, vol. 9, n° 3, p. 125-160, déc. 2016, doi : 10.1007/s12198-016-0171-4.
- [184] M. Figueres-Esteban, P. Hughes, et C. van Gulijk, « Visual analytics for text-based railway incident reports », *Safety Science*, vol. 89, p. 72-76, nov. 2016, doi : 10.1016/j.ssci.2016.05.009.
- [185] Q. Zhan, W. Zheng, et B. Zhao, « A hybrid human and organizational analysis method for railway accidents based on HFACS-Railway Accidents (HFACS-RAs) », *Safety Science*, vol. 91, p. 232-250, janv. 2017, doi : 10.1016/j.ssci.2016.08.017.
- [186] K. Fang, G. Y. Ke, et M. Verma, « A routing and scheduling approach to rail transportation of hazardous materials with demand due dates », *European Journal of Operational Research*, vol. 261, n° 1, p. 154-168, août 2017, doi: 10.1016/j.ejor.2017.01.045.
- [187] Q. Li et J. S. L. Lam, « Conflict resolution for enhancing shipping safety and improving navigational traffic within a seaport: vessel arrival scheduling », *Transportmetrica A : Transport Science*, vol. 13, n° 8, p. 727-741, sept. 2017, doi: 10.1080/23249935.2017.1326068.
- [188] X. Cao et J. S. L. Lam, « Simulation-based catastrophe-induced port loss estimation », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 175, p. 1-12, juill. 2018, doi: 10.1016/j.ress.2018.02.008.
- [189] K. Li et S. Wang, « A network accident causation model for monitoring railway safety », *Safety Science*, vol. 109, p. 398-402, nov. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.06.008.
- [190] Z. Fang, H. Yu, R. Ke, S. Shaw, et G. Peng, « Automatic Identification System-Based Approach for Assessing the Near-Miss Collision Risk Dynamics of Ships in Ports », *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20, n° 2, p. 534-543, févr. 2019, doi : 10.1109/TITS.2018.2816122.
- [191] J. Zhang, Â. P. Teixeira, C. Guedes Soares, et X. Yan, « Quantitative assessment of collision risk influence factors in the Tianjin port », *Safety Science*, vol. 110, p. 363-371, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.05.002.
- [192] Z. Yang, Z. Yang, et J. Yin, « Realising advanced risk-based port state control inspection using data-driven Bayesian networks », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 110, p. 38-56, avr. 2018, doi: 10.1016/j.tra.2018.01.033.
- [193] L. R. Shapiro, M.-H. Maras, L. Velotti, S. Pickman, H.-L. Wei, et R. Till, « Trojan horse risks in the maritime transportation systems sector », *J Transp Secur*, vol. 11, n° 3, p. 65-83, déc. 2018, doi : 10.1007/s12198-018-0191-3.

- [194] L. Sun, Y. Huang, Y. Chen, et L. Yao, « Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing, China », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 108, p. 12-24, févr. 2018, doi: 10.1016/j.tra.2017.12.008.
- [195] M. Lecue et R. M. Darbra, « Accidents in European ports involving chemical substances: Characteristics and trends », *Safety Science*, vol. 115, p. 278-284, juin 2019, doi : 10.1016/j.ssci.2019.02.015.
- [196] H. S. Cho, J. S. Lee, et H. C. Moon, « Maritime Risk in Seaport Operation: A Cross-Country Empirical Analysis with Theoretical Foundations », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 34, n° 3, p. 240-247, sept. 2018, doi: 10.1016/j.ajsl.2018.09.010.
- [197] N. Barnatt et A. Jack, « Safety analysis in a modern railway setting », *Safety Science*, vol. 110, p. 177-182, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2018.08.005.
- [198] T. Kececi et O. Arslan, « SHARE technique: A novel approach to root cause analysis of ship accidents », *Safety Science*, vol. 96, p. 1-21, juill. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2017.03.002.
- [199] J.-L. Zhou et Y. Lei, « Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents' causes in China », *Safety Science*, vol. 110, p. 47-58, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.12.027.
- [200] Ö. Uğurlu, S. Erol, et E. Başar, « The analysis of life safety and economic loss in marine accidents occurring in the Turkish Straits », *Maritime Policy & Management*, vol. 43, n° 3, p. 356-370, avr. 2016, doi : 10.1080/03088839.2014.1000992.
- [201] A. L. Lehnert et K. J. Kearfott, « A flag-based algorithm and associated neutron interrogation system for the detection of explosives in sea-land cargo containers », *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 112, p. 13-21, juill. 2015, doi: 10.1016/j.radphyschem.2015.02.026.
- [202] J. M. Rocha, A. A. Henriques, et R. Calçada, « Probabilistic assessment of the train running safety on a short-span high-speed railway bridge », *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 12, n° 1, p. 78-92, janv. 2016, doi: 10.1080/15732479.2014.995106.
- [203] J. Deng, X. Liu, G. Jing, et Z. Bian, « Probabilistic risk analysis of flying ballast hazard on high-speed rail lines », *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 93, p. 396-409, août 2018, doi : 10.1016/j.trc.2018.06.003.
- [204] G. Walker et A. Strathie, « Leading indicators of operational risk on the railway: A novel use for underutilised data recordings », *Safety Science*, vol. 74, p. 93-101, avr. 2015, doi : 10.1016/j.ssci.2014.11.017.
- [205] A. Jamshidi *et al.*, « A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment », *Risk Analysis*, vol. 37, n° 8, p. 1495-1507, 2017, doi: 10.1111/risa.12836.
- [206] M. An, Y. Qin, L. M. Jia, et Y. Chen, « Aggregation of group fuzzy risk information in the railway risk decision making process », *Safety Science*, vol. 82, p. 18-28, févr. 2016, doi : 10.1016/j.ssci.2015.08.011.
- [207] D. Tadic *et al.*, « The evaluation and enhancement of quality, environmental protection and seaport safety by using FAHP », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 17, n° 2, p. 261-275, févr. 2017, doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-261-2017>.
- [208] B. Jiang, J. Li, et S. Shen, « Supply Chain Risk Assessment and Control of Port Enterprises: Qingdao port as case study », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 34, n° 3, p. 198-208, sept. 2018, doi: 10.1016/j.ajsl.2018.09.003.
- [209] A. Mentés, H. Akyildiz, M. Yetkin, et N. Turkoglu, « A FSA based fuzzy DEMATEL approach for risk assessment of cargo ships at coasts and open seas of Turkey », *Safety Science*, vol. 79, p. 1-10, nov. 2015, doi : 10.1016/j.ssci.2015.05.004.

- [210] Ü. Özdemir et A. Güneroğlu, « Strategic Approach Model for Investigating the Cause of Maritime Accidents », *I*, vol. 27, n° 2, p. 113-123, avr. 2015, doi : 10.7307/ptt.v27i2.1461.
- [211] B. Wu, X. Yan, Y. Wang, et C. Guedes Soares, « Selection of maritime safety control options for NUC ships using a hybrid group decision-making approach », *Safety Science*, vol. 88, p. 108-122, oct. 2016, doi : 10.1016/j.ssci.2016.04.026.
- [212] F. Z. Akiyanova *et al.*, « An integrated risk assessment of the environmental hazards influence on Kazakhstan section (from Khorgas and Dostyk dry ports to Aktau seaport) of the international transport corridor », *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 107, p. 012046, janv. 2018, doi: 10.1088/1755-1315/107/1/012046.
- [213] E. Petrova, « Road and railway transport in Russia: safety and risks », *AES Bioflux*, vol. 7, n° 2, 2015, [En ligne]. Disponible sur : <http://www.aes.bioflux.com.ro/docs/2015.259-271>
- [214] A. Burlando, A. D. Cristea, et L. M. Lee, « The Trade Consequences of Maritime Insecurity: Evidence from Somali Piracy », *Review of International Economics*, vol. 23, n° 3, p. 525-557, 2015, doi : 10.1111/roie.12183.
- [215] O. A. Valdez Banda, M. Hänninen, J. Lappalainen, P. Kujala, et F. Goerlandt, « A method for extracting key performance indicators from maritime safety management norms », *WMU J Marit Affairs*, vol. 15, n° 2, p. 237-265, oct. 2016, doi : 10.1007/s13437-015-0095-z.
- [216] H. Ghomi, M. Bagheri, L. Fu, et L. F. Miranda-Moreno, « Analyzing injury severity factors at highway railway grade crossing accidents involving vulnerable road users: A comparative study », *Traffic Injury Prevention*, vol. 17, n° 8, p. 833-841, nov. 2016, doi : 10.1080/15389588.2016.1151011.
- [217] K. A. Freeborough *et al.*, « Landslide Hazard Assessment for National Rail Network », *Procedia Engineering*, vol. 143, p. 689-696, janv. 2016, doi : 10.1016/j.proeng.2016.06.104.
- [218] C. Pyrgidis, E. Papacharitou, et A. Eleftheriadis, « Risk Management at Railroad Grade Crossings: Proposal for a Decision Support System », *Transportation Research Procedia*, vol. 14, p. 1394-1402, janv. 2016, doi : 10.1016/j.trpro.2016.05.212.
- [219] A. Morant, A. Gustafson, P. Söderholm, P.-O. Larsson-Kräik, et U. Kumar, « Safety and availability evaluation of railway operation based on the state of signalling systems », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231, n° 2, p. 226-238, févr. 2017, doi: 10.1177/0954409715624466.
- [220] A. Gill et P. Smoczyński, « Layered model for convenient designing of safety system upgrades in railways », *Safety Science*, vol. 110, p. 168-176, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.11.024.
- [221] K. Klockner et Y. Toft, « Railway accidents and incidents: Complex socio-technical system accident modelling comes of age », *Safety Science*, vol. 110, p. 59-66, déc. 2018, doi : 10.1016/j.ssci.2017.11.022.
- [222] D. Sun, Y. Jia, Y. Yang, H. Li, et L. Zhao, « Fuzzy-Bayesian-network-based Safety Risk Analysis in Railway Passenger Transport », *I*, vol. 46, n° 3, p. 135-141, janv. 2018, doi: 10.3311/PPtr.11489.
- [223] Y. Wang, U. A. Weidmann, et H. Wang, « Using catastrophe theory to describe railway system safety and discuss system risk concept », *Safety Science*, vol. 91, p. 269-285, janv. 2017, doi : 10.1016/j.ssci.2016.08.026.
- [224] B. Roets, M. Verschelde, et J. Christiaens, « Multi-output efficiency and operational safety: An analysis of railway traffic control centre performance », *European Journal of Operational Research*, vol. 271, n° 1, p. 224-237, nov. 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2018.04.045.

- [225] E. Castillo *et al.*, « A Markovian–Bayesian Network for Risk Analysis of High Speed and Conventional Railway Lines Integrating Human Errors », *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 31, n° 3, p. 193-218, 2016, doi: 10.1111/mice.12153.
- [226] E. Castillo, Z. Grande, et A. Calviño, « Bayesian Networks-Based Probabilistic Safety Analysis for Railway Lines », *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 31, n° 9, p. 681-700, 2016, doi: 10.1111/mice.12195.
- [227] A. Jamshidi *et al.*, « Probabilistic Defect-Based Risk Assessment Approach for Rail Failures in Railway Infrastructure », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 3, p. 73-77, janv. 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.013.
- [228] J. T. Liu, T. Tang, J. B. Zhu, et L. Zhao, « An extended system-theoretic hazard analysis method for the safety of high-speed railway train control systems », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231, n° 8, p. 821-834, sept. 2017, doi: 10.1177/0954409716664931.
- [229] C. Li, T. Tang, M. M. Chatzimichailidou, G. T. Jun, et P. Waterson, « A hybrid human and organisational analysis method for railway accidents based on STAMP-HFACS and human information processing », *Applied Ergonomics*, vol. 79, p. 122-142, sept. 2019, doi : 10.1016/j.apergo.2018.12.011.
- [230] G. J. M. Read, A. Naweed, et P. M. Salmon, « Complexity on the rails: A systems-based approach to understanding safety management in rail transport », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 188, p. 352-365, août 2019, doi : 10.1016/j.ress.2019.03.038.
- [231] P. Liu, L. Yang, Z. Gao, S. Li, et Y. Gao, « Fault tree analysis combined with quantitative analysis for high-speed railway accidents », *Safety Science*, vol. 79, p. 344-357, nov. 2015, doi : 10.1016/j.ssci.2015.06.017.
- [232] H. W. Guo et Y. G. Wei, « Study on the Safety Management System of High-Speed Railway », *Applied Mechanics and Materials*, 2015, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.744-746.1838>.
- [233] H. E. Mutikanga, S. K. Sharma, et K. Vairavamoorthy, « Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management », *Water Resource Manage*, vol. 25, n° 14, p. 3947, août 2011, doi : 10.1007/s11269-011-9896-9.
- [234] B. Roy et D. Bouyssou, *Decision-aid: an elementary introduction with emphasis on multiple criteria*. Citeseer, 1991.
- [235] F. Cavallaro, « An Integrated Multi-Criteria System to Assess Sustainable Energy Options: An Application of the Promethee Method », Social Science Research Network, Rochester, NY, SSRN Scholarly Paper ID 666741, févr. 2005. doi: 10.2139/ssrn.666741.
- [236] A. Guitouni et J.-M. Martel, « Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method », *European Journal of Operational Research*, vol. 109, n° 2, p. 501-521, sept. 1998, doi: 10.1016/S0377-2217(98)00073-3.
- [237] A. Ishizaka et P. Nemery, *Multi-Criteria Decision Analysis - Methods and Software*. John Wiley & Sons, 2013. Consulté le : 20 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : <http://thuvienso.bvu.edu.vn/handle/TVDHBRVT/14951>
- [238] J. Malczewski, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, 1999.
- [239] C. COELLO, G. B. LAMONT, et D. A. VAN VELDHUIZEN, *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems.*, vol. 5. New York, NY, 2007.
- [240] V. T'Kindt et J.-C. Billaut, *Multicriteria Scheduling : Theory, Models and Algorithms*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [241] W. A. Lodwick et E. Untiedt, « Introduction to Fuzzy and Possibilistic Optimization | SpringerLink », 2010. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-13935-2_2 (consulté le 20 décembre 2021).

- [242] C. Carlsson et R. Fullér, « Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 78, n° 2, p. 139-153, mars 1996, doi: 10.1016/0165-0114(95)00165-4.
- [243] C. A. B. e Costa, *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*. Springer Science & Business Media, 1990.
- [244] C. Gencer et D. Gürpınar, « Analytic network process in supplier selection: A case study in an electronic firm », *Applied Mathematical Modelling*, vol. 31, n° 11, p. 2475-2486, nov. 2007, doi: 10.1016/j.apm.2006.10.002.
- [245] S. H. Ghodsypour et C. O'Brien, « A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming », *International Journal of Production Economics*, vol. 56-57, p. 199-212, sept. 1998, doi : 10.1016/S0925-5273(97)00009-1.
- [246] J. Zhang, G. Hegde, J. Shang, et X. Qi, « Evaluating emergency response solutions for sustainable community development by using fuzzy multi-criteria group decision making approaches: IVDHF-TOPSIS and IVDHF-VIKOR », *Sustainability*, vol. 8, n° 4, p. 291, 2016.
- [247] Y. Ju, A. Wang, et X. Liu, « Evaluating emergency response capacity by fuzzy AHP and 2-tuple fuzzy linguistic approach », *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 8, p. 6972-6981, 2012.
- [248] X. Zhang, J. Wang, H. Zhang, et J. Hu, « A heterogeneous linguistic MAGDM framework to classroom teaching quality evaluation », *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ*, vol. 13, p. 4929-4956, 2017.
- [249] Y. Xu, « Model for evaluating the mechanical product design quality with dual hesitant fuzzy information », *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 30, n° 1, p. 1-6, 2016.
- [250] B. Öztayşi et C. Kahraman, « Evaluation of renewable energy alternatives using hesitant fuzzy TOPSIS and interval type-2 fuzzy AHP », in *Renewable and Alternative Energy: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, IGI Global, 2017, p. 1378-1412.
- [251] H.-C. Liu, J.-X. You, C. Lu, et Y.-Z. Chen, « Evaluating health-care waste treatment technologies using a hybrid multi-criteria decision making model », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, p. 932-942, 2015.
- [252] X. Qi, C. Liang, et J. Zhang, « Generalized cross-entropy based group decision making with unknown expert and attribute weights under interval-valued intuitionistic fuzzy environment », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 79, p. 52-64, 2015.
- [253] M. Ghazanfari, S. Rouhani, et M. Jafari, « A fuzzy TOPSIS model to evaluate the Business Intelligence competencies of Port Community Systems », *Polish Maritime Research*, vol. 21, n° 2, p. 86-96, 2014.
- [254] S. Rouhani, M. Ghazanfari, et M. Jafari, « Evaluation model of business intelligence for enterprise systems using fuzzy TOPSIS », *Expert Systems with Applications*, vol. 39, n° 3, p. 3764-3771, 2012.
- [255] T. L. Saaty, « A scaling method for priorities in hierarchical structures », *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, n° 3, p. 234-281, juin 1977, doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [256] E. H. Forman et S. I. Gass, « The Analytic Hierarchy Process—An Exposition | Operations Research », 2001. <https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/opre.49.4.469.11231> (consulté le 20 décembre 2021).
- [257] A. Ishizaka, C. Pearman, et P. Nemery, « AHPSort: an AHP-based method for sorting problems », *International Journal of Production Research*, vol. 50, n° 17, p. 4767-4784, sept. 2012, doi: 10.1080/00207543.2012.657966.

- [258] C.-C. Lin, W.-C. Wang, et W.-D. Yu, « Improving AHP for construction with an adaptive AHP approach (A3) », *Automation in Construction*, vol. 17, n° 2, p. 180-187, janv. 2008, doi : 10.1016/j.autcon.2007.03.004.
- [259] S. Opananon et P. Lertsanti, « Impact analysis of logistics facility relocation using the analytic hierarchy process (AHP) », *International Transactions in Operational Research*, vol. 20, n° 3, p. 325-339, 2013, doi: 10.1111/itor.12002.
- [260] N. Bhushan et K. Rai, *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [261] R. Medjoudj, A. Laifa, et D. Aissani, « Decision making on power customer satisfaction and enterprise profitability analysis using the Analytic Hierarchy Process », *International Journal of Production Research*, vol. 50, n° 17, p. 4793-4805, sept. 2012, doi: 10.1080/00207543.2012.660794.
- [262] M. Hua Lu, C. N. Madu, C. Kuei, et D. Winokur, « Integrating QFD, AHP and Benchmarking in Strategic Marketing », *Journal of Business & Industrial Marketing*, vol. 9, n° 1, p. 41-50, janv. 1994, doi : 10.1108/08858629410053470.
- [263] N. K. Kwak, C. W. Lee, et J. H. Kim, « An MCDM model for media selection in the dual consumer/industrial market », *European Journal of Operational Research*, vol. 166, n° 1, p. 255-265, oct. 2005, doi: 10.1016/j.ejor.2004.02.016.
- [264] M. A. Badri, « Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem », *International Journal of Production Economics*, vol. 62, n° 3, p. 237-248, sept. 1999, doi: 10.1016/S0925-5273(98)00249-7.
- [265] R. Ramanathan et L. S. Ganesh, « Using AHP for resource allocation problems », *European Journal of Operational Research*, vol. 80, n° 2, p. 410-417, janv. 1995, doi: 10.1016/0377-2217(93)E0240-X.
- [266] M. J. Schniederjans et R. L. Wilson, « Using the analytic hierarchy process and goal programming for information system project selection », *Information & Management*, vol. 20, n° 5, p. 333-342, mai 1991, doi : 10.1016/0378-7206(91)90032-W.
- [267] H. Wang, M. Xie, et T. N. Goh, « A comparative study of the prioritization matrix method and the analytic hierarchy process technique in quality function deployment », *Total Quality Management*, vol. 9, n° 6, p. 421-430, août 1998, doi: 10.1080/0954412988361.
- [268] T. L. Saaty, J. W. France, et K. R. Valentine, « Modeling the graduate business school admissions process », *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 25, n° 2, p. 155-162, janv. 1991, doi : 10.1016/0038-0121(91)90013-H.
- [269] M. K. Masozera, J. R. R. Alavalapati, S. K. Jacobson, et R. K. Shrestha, « Assessing the suitability of community-based management for the Nyungwe Forest Reserve, Rwanda », *Forest Policy and Economics*, vol. 8, n° 2, p. 206-216, mars 2006, doi: 10.1016/j.forpol.2004.08.001.
- [270] M. A. Greiner, J. W. Fowler, D. L. Shunk, W. M. Carlyle, et R. T. McNutt, « A hybrid approach using the analytic hierarchy process and integer programming to screen weapon systems projects », *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 50, n° 2, p. 192-203, mai 2003, doi : 10.1109/TEM.2003.810827.
- [271] W. Ho, « Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review », *European Journal of Operational Research*, vol. 186, n° 1, p. 211-228, avr. 2008, doi: 10.1016/j.ejor.2007.01.004.
- [272] A. Shanian et O. Savadogo, « A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV », *Electrochimica Acta*, vol. 51, n° 25, p. 5307-5315, 2006.
- [273] P. Chatterjee, S. Mondal, S. Boral, A. Banerjee, et S. Chakraborty, « A novel hybrid method for non-traditional machining process selection using factor relationship and

- Multi-Attributive Border Approximation Method », *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 15, n° 3, p. 439-456, 2017.
- [274] J. P. Brans, « L'ingénierie de la décision la méthode Promethee, Instruments et Perspectives Avenir », *Presses del Universitete Lavel*, p. 183-213, 1982.
- [275] J.-P. Brans et P. Vincke, « Note—A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making) », *Management science*, vol. 31, n° 6, p. 647-656, 1985.
- [276] J.-P. Brans et B. Mareschal, « The PROMETHEE VI procedure: how to differentiate hard from soft multicriteria problems », *null*, vol. 4, n° 3, p. 213-223, janv. 1995, doi : 10.1080/12460125.1995.10511652.
- [277] M. Behzadian, S.-M. Hosseini-Motlagh, J. Ignatius, M. Goh, et M. M. Sepehri, « PROMETHEE Group Decision Support System and the House of Quality », *Group Decis Negot*, vol. 22, n° 2, p. 189-205, mars 2013, doi : 10.1007/s10726-011-9257-3.
- [278] S. Ghazinoory, M. Daneshmand-Mehr, et A. Azadegan, « Technology selection: application of the PROMETHEE in determining preferences—a real case of nanotechnology in Iran », *J Oper Res Soc*, vol. 64, n° 6, p. 884-897, juin 2013, doi : 10.1057/jors.2012.45.
- [279] M. Tavana, M. Behzadian, M. Pirdashti, et H. Pirdashti, « A PROMETHEE-GDSS for oil and gas pipeline planning in the Caspian Sea basin », *Energy Economics*, vol. 36, p. 716-728, mars 2013, doi : 10.1016/j.eneco.2012.11.023.
- [280] B. Roy et D. Bouyssou, *Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas*. 1993.
- [281] C. Macharis, J. Springael, K. De Brucker, et A. Verbeke, « PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP », *European Journal of Operational Research*, vol. 153, n° 2, p. 307-317, mars 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00153-X.
- [282] J.-P. Brans, « The space of freedom of the decision maker modelling the human brain », *European Journal of Operational Research*, vol. 92, n° 3, p. 593-602, 1996.
- [283] P. T. Harker et L. G. Vargas, « The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process », *Management Science*, vol. 33, n° 11, p. 1383-1403, nov. 1987, doi: 10.1287/mnsc.33.11.1383.
- [284] C. A. B. e Costa et J.-C. Vansnick, « MACBETH—An interactive path towards the construction of cardinal value functions », *International transactions in operational Research*, vol. 1, n° 4, p. 489-500, 1994.
- [285] C. A. Bana e Costa, J.-M. De Corte, et J.-C. Vansnick, « On the Mathematical Foundations of MACBETH », in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, S. Greco, M. Ehrgott, et J. R. Figueira, Éd. New York, NY: Springer, 2016, p. 421-463. doi: 10.1007/978-1-4939-3094-4_11.
- [286] C. Bana e Costa et J.-C. Vansnick, « Cardinal value measurement with MACBETH », janv. 2000, doi : 10.1007/978-1-4757-4919-9_21.
- [287] V. Belton et T. Stewart, *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [288] F. A. F. Ferreira et S. P. Santos, « Comparing trade-off adjustments in credit risk analysis of mortgage loans using AHP, Delphi and MACBETH », *International Journal of Strategic Property Management*, vol. 20, n° 1, p. 44-63, janv. 2016, doi: 10.3846/1648715X.2015.1105321.
- [289] T. L. Saaty, « Decision making with the analytic hierarchy process », *IJSSCI*, vol. 1, n° 1, p. 83, 2008, doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- [290] C.-L. Hwang et K. Yoon, « Multiple attribute decision making: a state of the art survey », *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 186, 1981.
- [291] A. John, D. Paraskevadis, A. Bury, Z. Yang, R. Riahi, et J. Wang, « An integrated fuzzy risk assessment for seaport operations », *Safety Science*, vol. 68, p. 180-194, oct. 2014, doi : 10.1016/j.ssci.2014.04.001.

- [292] A. Kokangül, U. Polat, et C. Dağsuyu, « A new approximation for risk assessment using the AHP and Fine Kinney methodologies », *Safety Science*, vol. 91, p. 24-32, janv. 2017, doi : 10.1016/j.ssci.2016.07.015.
- [293] J. Barzilai, « Deriving weights from pairwise comparison matrices », *J Oper Res Soc*, vol. 48, n° 12, p. 1226-1232, déc. 1997, doi : 10.1057/palgrave.jors.2600474.
- [294] E. U. Choo et W. C. Wedley, « A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices », *Computers & Operations Research*, vol. 31, n° 6, p. 893-908, mai 2004, doi: 10.1016/S0305-0548(03)00042-X.
- [295] B. Golany et M. Kress, « A multicriteria evaluation of methods for obtaining weights from ratio-scale matrices », *European Journal of Operational Research*, vol. 69, n° 2, p. 210-220, sept. 1993, doi: 10.1016/0377-2217(93)90165-J.
- [296] G. Kou et C. Lin, « A cosine maximization method for the priority vector derivation in AHP », *European Journal of Operational Research*, vol. 235, n° 1, p. 225-232, mai 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2013.10.019.
- [297] T. L. Saaty, « What is the Analytic Hierarchy Process? », in *Mathematical Models for Decision Support*, G. Mitra, H. J. Greenberg, F. A. Lootsma, M. J. Rijkaert, et H. J. Zimmermann, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, p. 109-121. doi: 10.1007/978-3-642-83555-1_5.
- [298] N. V. Kumar et L. S. Ganesh, « A simulation-based evaluation of the approximate and the exact eigenvector methods employed in AHP », *European Journal of Operational Research*, vol. 95, n° 3, p. 656-662, déc. 1996, doi: 10.1016/0377-2217(95)00302-9.
- [299] J. Benítez, X. Delgado-Galván, J. A. Gutiérrez, et J. Izquierdo, « Balancing consistency and expert judgment in AHP », *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 54, n° 7, p. 1785-1790, oct. 2011, doi: 10.1016/j.mcm.2010.12.023.
- [300] D. Cao, L. C. Leung, et J. S. Law, « Modifying inconsistent comparison matrix in analytic hierarchy process: A heuristic approach », *Decision Support Systems*, vol. 44, n° 4, p. 944-953, mars 2008, doi: 10.1016/j.dss.2007.11.002.
- [301] R. Decker, M. Meißner, et S. W. Scholz, « Detecting and Debugging Erroneous Statements in Pairwise Comparison Matrices », in *Operations Research Proceedings 2007*, Berlin, Heidelberg, 2008, p. 277-282. doi: 10.1007/978-3-540-77903-2_43.
- [302] T. L. Saaty, « Decision making with the analytic hierarchy process », *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, n° 1, p. 83-98, janv. 2008, doi: 10.1504/IJSSci.2008.01759.
- [303] D. G. Fernández-Ávila, M. X. Rojas, et D. Rosselli, « The Delphi method in rheumatology research: are we doing it right? », *Revista Colombiana de Reumatología (English Edition)*, vol. 27, n° 3, p. 177-189, juill. 2020, doi : 10.1016/j.rcreue.2019.04.007.
- [304] UNCTAD, *REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2021*. S.I. : UNITED NATIONS, 2021.
- [305] K. Chargui, T. Zouadi, A. El Fallahi, M. Reghioui, et T. Aouam, « Berth and quay crane allocation and scheduling with worker performance variability and yard truck deployment in container terminals », *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, vol. 154, p. 102449, oct. 2021, doi: 10.1016/j.tre.2021.102449.
- [306] C. Bierwirth et F. Meisel, « A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals », *European Journal of Operational Research*, vol. 244, n° 3, p. 675-689, août 2015, doi: 10.1016/j.ejor.2014.12.030.
- [307] N. Saeed et O. I. Larsen, « Application of queuing methodology to analyze congestion: A case study of the Manila International Container Terminal, Philippines », *Case Studies on Transport Policy*, vol. 4, n° 2, p. 143-149, juin 2016, doi : 10.1016/j.cstp.2016.02.001.

- [308] A. Dolgui, D. Ivanov, et B. Sokolov, « Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature », *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 1-2, p. 414-430, janv. 2018, doi : 10.1080/00207543.2017.1387680.
- [309] P. Sen, « Optimal priority assignment in queues: application to marine congestion problems », *Maritime Policy & Management*, vol. 7, n° 3, p. 175-184, janv. 1980, doi: 10.1080/03088838000000019.
- [310] S. M. Easa, « Approximate queueing models for analyzing harbor terminal operations », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 21, n° 4, p. 269-286, août 1987, doi: 10.1016/0191-2615(87)90027-0.
- [311] J. A. Berg-Andreassen et A. K. Prokopowicz, « Conflict of Interest in Deep-Draft Anchorage Usage—Application of QT », *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 118, n° 1, p. 75-86, janv. 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:1(75).
- [312] C.-H. Laih, B. Lin, et K.-Y. Chen, « Effects of the optimal port queuing pricing on arrival decisions for container ships », *Applied Economics*, vol. 39, n° 14, p. 1855-1865, août 2007, doi: 10.1080/00036840500447765.
- [313] C.-H. Laih et K.-Y. Chen, « Economics on the optimal n-step toll scheme for a queuing port », *Applied Economics*, vol. 40, n° 2, p. 209-228, janv. 2008, doi: 10.1080/00036840600749870.
- [314] B. Dragović, N. K. Park, et Z. Radmilović, « Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches », *Maritime Policy & Management*, vol. 33, n° 3, p. 281-299, juill. 2006, doi: 10.1080/03088830600783277.
- [315] M. Kiani, S. Bonsall, J. Wang, et A. Wall, « A break-even model for evaluating the cost of container ships waiting times and berth unproductive times in automated quayside operations », *WMU J Marit Affairs*, vol. 5, n° 2, p. 153-179, oct. 2006, doi : 10.1007/BF03195102.
- [316] S. Munisamy, « Timber terminal capacity planning through queuing theory », *Marit Econ Logist*, vol. 12, n° 2, p. 147-161, juin 2010, doi : 10.1057/mel.2010.3.
- [317] Z. H. Munim, M. Dushenko, V. J. Jimenez, M. H. Shakil, et M. Imset, « Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions », *Maritime Policy & Management*, vol. 47, n° 5, p. 577-597, juill. 2020, doi: 10.1080/03088839.2020.1788731.
- [318] Y. Riahi, T. Saikouk, A. Gunasekaran, et I. Badraoui, « Artificial intelligence applications in supply chain: A descriptive bibliometric analysis and future research directions », *Expert Systems with Applications*, vol. 173, p. 114702, juill. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.114702.
- [319] T.-P. Liang et Y.-H. Liu, « Research Landscape of Business Intelligence and Big Data analytics: A bibliometrics study », *Expert Systems with Applications*, vol. 111, p. 2-10, nov. 2018, doi : 10.1016/j.eswa.2018.05.018.
- [320] L. Heilig, E. Lalla-Ruiz, et S. Voß, « Digital transformation in maritime ports: analysis and a game theoretic framework », *Netnomics*, vol. 18, n° 2, p. 227-254, déc. 2017, doi : 10.1007/s11066-017-9122-x.
- [321] M. Fruth et F. Teuteberg, « Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? », *Cogent Business & Management*, vol. 4, n° 1, p. 1411066, janv. 2017, doi : 10.1080/23311975.2017.1411066.
- [322] P.-L. Sanchez-Gonzalez, D. Díaz-Gutiérrez, T. J. Leo, et L. R. Núñez-Rivas, « Toward Digitalization of Maritime Transport? », *Sensors*, vol. 19, n° 4, Art. n° 4, janv. 2019, doi : 10.3390/s19040926.
- [323] X. Zhang et J. S. L. Lam, « A fuzzy Delphi-AHP-TOPSIS framework to identify barriers in big data analytics adoption: case of maritime organizations », *Maritime Policy & Management*, vol. 46, n° 7, p. 781-801, oct. 2019, doi : 10.1080/03088839.2019.1628318.

- [324] Z. Tian, F. Liu, Z. Li, R. Malekian, et Y. Xie, « The Development of Key Technologies in Applications of Vessels Connected to the Internet », *Symmetry*, vol. 9, n° 10, Art. n° 10, oct. 2017, doi : 10.3390/sym9100211.
- [325] G. Yeo, S. H. Lim, L. Wynter, et H. Hassan, « MPA-IBM Project SAFER: Sense-Making Analytics for Maritime Event Recognition », *INFORMS Journal on Applied Analytics*, vol. 49, n° 4, p. 269-280, juill. 2019, doi: 10.1287/inte.2019.0997.
- [326] L. Cheng, Z. Yan, Y. Xiao, Y. Chen, F. Zhang, et M. Li, « Using big data to track marine oil transportation along the 21st-century Maritime Silk Road », *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 62, n° 4, p. 677-686, avr. 2019, doi : 10.1007/s11431-018-9335-1.
- [327] H. T. Pham et H. Lee, « Developing a Green Route Model for Dry Port Selection in Vietnam », *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 35, n° 2, p. 96-107, juin 2019, doi: 10.1016/j.ajsl.2019.06.002.
- [328] A. Sidibé et G. Shu, « Study of Automatic Anomalous Behaviour Detection Techniques for Maritime Vessels », *The Journal of Navigation*, vol. 70, n° 4, p. 847-858, juill. 2017, doi: 10.1017/S0373463317000066.
- [329] D. Handayani, W. Sediono, et A. Shah, « ANOMALY DETECTION IN VESSEL TRACKING – A BAYESIAN NETWORKS (BNs) APPROACH », *International Journal of Maritime Engineering*, vol. 157, n° A3, Art. n° A3, 2015, doi: 10.5750/ijme.v157iA3.956.
- [330] X. Yan, K. Wang, Y. Yuan, X. Jiang, et R. R. Negenborn, « Energy-efficient shipping: An application of big data analysis for optimizing engine speed of inland ships considering multiple environmental factors », *Ocean Engineering*, vol. 169, p. 457-468, déc. 2018, doi : 10.1016/j.oceaneng.2018.08.050.
- [331] A. Coraddu, L. Oneto, A. Ghio, S. Savio, D. Anguita, et M. Figari, « Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 230, n° 1, p. 136-153, févr. 2016, doi: 10.1177/1475090214540874.
- [332] A. Coraddu, S. Lim, L. Oneto, K. Pazouki, R. Norman, et A. J. Murphy, « A novelty detection approach to diagnosing hull and propeller fouling », *Ocean Engineering*, vol. 176, p. 65-73, mars 2019, doi : 10.1016/j.oceaneng.2019.01.054.
- [333] B. Solmaz, E. Gundogdu, V. Yucesoy, A. Koç, et A. A. Alatan, « Fine-grained recognition of maritime vessels and land vehicles by deep feature embedding », *IET Computer Vision*, vol. 12, n° 8, p. 1121-1132, 2018, doi : 10.1049/iet-cvi.2018.5187.
- [334] A.-J. Gallego, P. Gil, A. Pertusa, et R. B. Fisher, « Semantic Segmentation of SLAR Imagery with Convolutional LSTM Selectional AutoEncoders », *Remote Sensing*, vol. 11, n° 12, Art. n° 12, janv. 2019, doi: 10.3390/rs11121402.
- [335] W. S. McCulloch et W. Pitts, « A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity », *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, n° 4, p. 115-133, déc. 1943, doi: 10.1007/BF02478259.
- [336] İ. Güven et F. Şimşir, « Demand forecasting with color parameter in retail apparel industry using artificial neural networks (ANN) and support vector machines (SVM) methods », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 147, p. 106678, sept. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106678.
- [337] A. Xu, H. Chang, Y. Xu, R. Li, X. Li, et Y. Zhao, « Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review », *Waste Management*, vol. 124, p. 385-402, avr. 2021, doi : 10.1016/j.wasman.2021.02.029.
- [338] O. I. Abiodun, A. Jantan, A. E. Omolara, K. V. Dada, N. A. Mohamed, et H. Arshad, « State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey », *Heliyon*, vol. 4, n° 11, p. e00938, nov. 2018, doi : 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.

- [339] M. T. Hagan et M. B. Menhaj, « Training feedforward networks with the Marquardt algorithm », *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 5, n° 6, p. 989-993, nov. 1994, doi : 10.1109/72.329697.
- [340] D. A. Otchere, T. O. Arbi Ganat, R. Gholami, et S. Ridha, « Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models », *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 200, p. 108182, mai 2021, doi: 10.1016/j.petrol.2020.108182.
- [341] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, et R. J. Williams, « Learning representations by back-propagating errors », *Nature*, vol. 323, n° 6088, p. 533-536, oct. 1986, doi : 10.1038/323533a0.
- [342] M. A. Nielsen, « Neural Networks and Deep Learning », 2015, Consulté le : 26 janvier 2022. [En ligne]. Disponible sur : <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>
- [343] R. Chalisgaonkar, J. Kumar, et P. Pant, « Prediction of machining characteristics of finish cut WEDM process for pure titanium using feed forward back propagation neural network », *Materials Today: Proceedings*, vol. 25, p. 592-601, janv. 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.260.
- [344] Q. Chen, W. Zhang, K. Zhu, D. Zhou, H. Dai, et Q. Wu, « A novel trilinear deep residual network with self-adaptive Dropout method for short-term load forecasting », *Expert Systems with Applications*, vol. 182, p. 115272, nov. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115272.
- [345] R. Shankar, K. R. Balasubramanian, S. P. Sivapirakasam, et K. Ravikumar, « ANN and RSM models approach for optimization of HVOF coating », *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, p. 9201-9206, janv. 2021, doi : 10.1016/j.matpr.2020.01.211.
- [346] M. Hemmat Esfe, M. H. Kamyab, et D. Toghraie, « Statistical review of studies on the estimation of thermophysical properties of nanofluids using artificial neural network (ANN) », *Powder Technology*, vol. 400, p. 117210, mars 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2022.117210.
- [347] H. K. Ghritlahre et R. K. Prasad, « Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems - A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 84, p. 75-88, mars 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.01.001.
- [348] Y. Kumar, L. Singh, V. S. Sharanagat, et A. Tarafdar, « Artificial neural network (ANNs) and mathematical modelling of hydration of green chickpea », *Information Processing in Agriculture*, vol. 8, n° 1, p. 75-86, mars 2021, doi: 10.1016/j.inpa.2020.04.001.
- [349] G. Huang, Y. Sun, Z. Liu, D. Sedra, et K. Q. Weinberger, « Deep Networks with Stochastic Depth », in *Computer Vision – ECCV 2016*, Cham, 2016, p. 646-661. doi : 10.1007/978-3-319-46493-0_39.
- [350] I. Boussaïd, J. Lepagnot, et P. Siarry, « A survey on optimization metaheuristics », *Information Sciences*, vol. 237, p. 82-117, juill. 2013, doi: 10.1016/j.ins.2013.02.041.
- [351] D. Oliva *et al.*, « Opposition-based moth swarm algorithm », *Expert Systems with Applications*, vol. 184, p. 115481, déc. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115481.
- [352] K. D. Frank, « Impact of Outdoor Lighting on Moths », *International Astronomical Union Colloquium*, vol. 112, p. 51-51, ed 1991, doi: 10.1017/S0252921100003687.
- [353] K. J. Gaston, J. Bennie, T. W. Davies, et J. Hopkins, « The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal », *Biological Reviews*, vol. 88, n° 4, p. 912-927, 2013, doi : 10.1111/brv.12036.
- [354] G.-G. Wang, « Moth search algorithm: a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems », *Memetic Comp.*, vol. 10, n° 2, p. 151-164, juin 2018, doi : 10.1007/s12293-016-0212-3.
- [355] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, et A. Lewis, « Gray Wolf Optimizer », *Advances in Engineering Software*, vol. 69, p. 46-61, mars 2014, doi : 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

- [356] M. Črepinšek, S.-H. Liu, et M. Mernik, « Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey », *ACM Comput. Surv.*, vol. 45, n° 3, p. 35:1-35:33, juill. 2013, doi: 10.1145/2480741.2480752.
- [357] F. Kang, J. Li, et J. Dai, « Prediction of long-term temperature effect in structural health monitoring of concrete dams using support vector machines with Jaya optimizer and salp swarm algorithms », *Advances in Engineering Software*, vol. 131, p. 60-76, mai 2019, doi : 10.1016/j.advengsoft.2019.03.003.
- [358] S. Mirjalili et A. Lewis, « The Whale Optimization Algorithm », *Advances in Engineering Software*, vol. 95, p. 51-67, mai 2016, doi : 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [359] A. Vijaya Lakshmi et P. Mohanaiah, « WOA-TLBO: Whale optimization algorithm with Teaching-learning-based optimization for global optimization and facial emotion recognition », *Applied Soft Computing*, vol. 110, p. 107623, oct. 2021, doi : 10.1016/j.asoc.2021.107623.
- [360] D. J. Kalita, V. P. Singh, et V. Kumar, « A dynamic framework for tuning SVM hyper parameters based on Moth-Flame Optimization and knowledge-based-search », *Expert Systems with Applications*, vol. 168, p. 114139, avr. 2021, doi : 10.1016/j.eswa.2020.114139.
- [361] R. Valarmathi et T. Sheela, « Heart disease prediction using hyper parameter optimization (HPO) tuning », *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 70, p. 103033, sept. 2021, doi: 10.1016/j.bspc.2021.103033.
- [362] G. E. Castro Guzman et A. Fujita, « Convolution-based linear discriminant analysis for functional data classification », *Information Sciences*, vol. 581, p. 469-478, déc. 2021, doi : 10.1016/j.ins.2021.09.057.
- [363] T. Liu, L. Jin, C. Zhong, et F. Xue, « Study of thermal sensation prediction model based on support vector classification (SVC) algorithm with data preprocessing », *Journal of Building Engineering*, vol. 48, p. 103919, mai 2022, doi : 10.1016/j.jobbe.2021.103919.
- [364] S. Ding, R. Li, et S. Wu, « A novel composite forecasting framework by adaptive data preprocessing and optimized nonlinear grey Bernoulli model for new energy vehicles sales », *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 99, p. 105847, août 2021, doi: 10.1016/j.cnsns.2021.105847.
- [365] D. Wang, X. Zhang, M. Fan, et X. Ye, « Hierarchical mixing linear support vector machines for nonlinear classification », *Pattern Recognition*, vol. 59, p. 255-267, nov. 2016, doi: 10.1016/j.patcog.2016.02.018.