



HAL
open science

Impact de l'intégration du concept du produit intelligent sur la plateforme de la chaîne logistique du conteneur

Mohamed Yassine Samiri

► To cite this version:

Mohamed Yassine Samiri. Impact de l'intégration du concept du produit intelligent sur la plateforme de la chaîne logistique du conteneur. Autre [cs.OH]. Normandie Université; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc), 2018. Français. NNT : 2018NORMMLH02 . tel-01735029

HAL Id: tel-01735029

<https://theses.hal.science/tel-01735029>

Submitted on 15 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité : Informatique

Préparée au sein de « l'Université Le Havre Normandie et de l'Université Cadi Ayyad de Marrakech »

Impact de l'intégration du concept du produit intelligent sur la plateforme de la chaîne logistique du conteneur

Présentée et soutenue par
Mohamed Yassine SAMIRI

Thèse soutenue publiquement le 10-02-2018
devant le jury composé de

M. Abdelhamid Benaini	Professeur, Université de Normandie, France.	Président
M. Mohammed Sadgal	Professeur, Université Cadi Ayyad, Maroc.	Examinateur
M. Djamel Benslimane	Professeur, Université C.B. Lyon1, France.	Rapporteur
M. Ladjel Bellatreche	Professeur, École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, France.	Rapporteur
M. Abdelkrim Haqiq	Professeur, Université Hassan 1 ^{er} , Maroc.	Rapporteur
M. Abdelaziz El Fazziki	Professeur, Université Cadi Ayyad, Maroc.	Co-directeur
M. Jaouad Boukachour	HDR, IUT-Le Havre, Université de Normandie le Havre, France.	Co-directeur

Thèse codirigée par M. Jaouad BOUKACHOUR et M. Abdelaziz EL FAZZIKI, Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre et Laboratoire Ingénierie des Systèmes Informatiques à la FSSM

Remerciements

À mes parents, qui se sont dévoués corps et âmes tout au long de mes années d'études. Je remercie pareillement ma famille et mes amis pour leur soutien.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Djamal BENSLIMANE, Professeur à l'université Claude Bernard Lyon 1, à Monsieur Ladjel BELLATRECHE Professeur à l'Université de Poitier, et à Monsieur Abdelkrim HAQIQ professeur à l'université de Settat, d'avoir accepté de rapporter cette thèse

Toute ma gratitude s'adresse à Monsieur Abdelhamid BENAINI, professeur à l'université du Havre, d'avoir accepté d'examiner ce travail et présider le jury. Je remercie également Monsieur Mohamed SADGAL, professeur à l'université Cadi Ayyad, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à mes encadreur Monsieur Jaouad BOUKACHOUR, Maître de conférences HDR à l'université du Havre et monsieur Abdelaziz EL FAZZIKI, professeur à l'université Cadi Ayyad, pour leur encadrement, conseils, confiance et pour le soutien qu'ils ont su m'accorder durant toutes ces années.

Je tiens à remercier très chaleureusement Monsieur Mehdi NAJIB, sans oublier mes collègues du laboratoire de mathématiques appliquées du Havre (LMAH) et du laboratoire d'ingénierie des Systèmes d'information (LISI).

Merci à tous !

ملخص الرسالة

أحدثت عملية النقل بالحاويات ثورة في التجارة الدولية في القرن العشرين. وكان لإدخال الحاوية، كوسيلة معيارية لنقل البضائع، أثر عميق على التجارة البحرية وأدى إلى تغيير جذري في أداء الموانئ. وفي الواقع، واصلت الموانئ نموها من خلال بناء محطات حاويات جديدة وأيضا من خلال تحسين خدماتها عن طريق الحد من التأخير وتكاليف التسليم. وفي الوقت نفسه، حظيت إدارة المخاطر في محطات الحاويات بقدر كبير من الاهتمام في السنوات الأخيرة بسبب زيادة الأنشطة الاحتياطية و التهريب . وقد اقترح المجتمع الدولي عدة مبادرات لتحسين أمن النقل البحري. ومع ذلك، فإن تقييم مخاطر الحاويات لا يزال مهمة صعبة، ويرجع ذلك في كثير من الأحيان إلى نقص المعلومات او عدم صحتها. ومن ناحية أخرى، أصبح الحد من البصمة الأكلوجية من أهم الأولويات في مجال نقل الحاويات. وفي مواجهة هذا التحدي الإيكولوجي، يجب على الفاعلين في سلسلة الخدمات اللوجستية للحاويات تحسين بنيتهم التحتية والتفكير في وسائط نقل بري للحاويات ذات بصمة إكلوجية أقل من وسائط نقل الديزل التقليدية، دون أن يكون لها تأثير على الأداء. الهدف الأول من هذه الرسالة يركز على تحسين أداء عملية تفتيش الحاويات. وبالتالي، نقترح نهجا تكييفيا جديدا لتحديد أولوية تفتيش الحاويات تم تنزيله على شكل خوارزمية. هذا النهج يستغل مفهوم المنتج الذكي وكذلك المنطق الضبابي وتقنيات التنقيب في البيانات. ويستند هذا النهج إلى ثلاث مراحل. المرحلة الأولى هي تحسين تدفق المعلومات وضمان صحتها من خلال استغلال مفهوم المنتج الذكي. وبالتالي نقترح نموذجا متقدما للحاوية الذكية. والمرحلة الثانية هي إعطاء الأولوية لتفتيش الحاويات عن طريق تحديد درجة خطورة الحاويات باستخدام المنطق الضبابي. و المرحلة الأخيرة هي إعطاء الأولوية لتفتيش الحاويات واستخدام نتائج التفتيش لضبط دقة خوارزمية تفتيش الحاويات والتكيف مع عوامل الخطر الجديدة باستخدام تقنية التنقيب في البيانات. من أجل التحقق من صحة النهج المقترح، تم إجراء دراسة حالة توضيحية فضلا عن دراسة مقارنة مع النهج البديلة الأخرى. ويركز الهدف الثاني من هذه الرسالة على مشروع الشاحنة الخضراء GreenTruck الذي يهتم بشكل خاص بشركات النقل البري للحاويات لمسافات قصيرة في منطقة الميناء. هذا المشروع يهدف انتقال أسطول جرارات الديزل إلى جرارات كهربائية ذات بطاريات قابلة لإعادة الشحن. ويركز المشروع على استغلال أوقات الانتظار القصيرة للجرارات، مثل رفع و نقل الحاويات من أجل إعادة شحن البطارية تلقائيا. وهكذا قمنا في هذه الدراسة باستكشاف التقنيات والأساليب المختلفة لإعادة شحن بطاريات الجرارات الكهربائية مع مراعاة القيود التشغيلية، وتقييم الجدوى الاقتصادية لهذا المشروع و البنية التحتية الكهربائية اللازمة. وقد مكنت أداة للمحاكاة من قياس حجم البطاريات ومحطات الشحن ، بالإضافة إلى تزويد صناع القرار بنتائج تقنية واقتصادية مع رسوم ثلاثية الأبعاد ورسوم بيانية.

Résumé

La conteneurisation a révolutionné le commerce international au 20^{ème} siècle. L'introduction du conteneur, comme moyen standard de transport de marchandise, a profondément impacté le commerce maritime et a radicalement changé le fonctionnement des ports. En effet, les ports n'ont cessé de se développer par la construction de nouveaux terminaux à conteneurs (TC) et également par l'amélioration de leurs services par la réduction des délais et des coûts de livraison. En parallèle, la gestion des risques dans les TC a reçu beaucoup d'attention ces dernières années en raison de l'augmentation des activités frauduleuses liées aux conteneurs. La communauté internationale a proposé plusieurs initiatives pour améliorer la sécurité du transport maritime. Cependant, l'évaluation des risques des conteneurs reste une tâche difficile, souvent due à des informations incomplètes ou ambiguës sur les conteneurs. D'autres parts, la réduction de l'empreinte écologique sur l'environnement est devenue une préoccupation majeure en matière de transport conteneurisé. Face à cet enjeu écologique, les acteurs du dernier kilomètre de la chaîne logistique du conteneur doivent améliorer et optimiser leur infrastructure et penser des modes de transports terrestre de conteneurs ayant une empreinte environnementale moindre que les modes de transports classiques à diesel, sans toutefois impacter les performances.

Dans cette optique, le premier objectif de cette thèse se focalise autour l'amélioration de la performance du processus d'inspection des conteneurs. Ainsi, nous proposons une nouvelle approche adaptative de la priorisation d'inspection des conteneurs. Nous avons nommé cette approche APRICOIN (Adaptive PRIoritizing Container INspection). Cette approche exploite le concept du produit intelligent ainsi que de la logique floue et les techniques de fouille de données. Cette approche est basée sur trois étapes. La première étape vise l'amélioration du flux informationnel et en assurant sa véracité et ce moyennant les capacités du conteneur intelligent. Ainsi on propose un descriptif enrichi du conteneur (DEC). La deuxième étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs en lui attribuant un score de risque à l'aide de la logique floue. La dernière étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs et exploiter les résultats d'inspection afin d'ajuster la précision de l'algorithme APRICOIN et s'adapter aux nouveaux facteurs de risque moyennant les techniques de fouille de données. Afin de valider l'approche proposée, une étude de cas illustratif a été réalisée ainsi qu'une étude comparative avec d'autres approches alternatives. Le deuxième objectif de cette thèse se focalise sur le projet green Truck qui vise particulièrement les transporteurs routiers de conteneurs à courtes distances dans la zone portuaire en assurant une transition énergétique de la flotte de tracteurs diesel vers des tracteurs électriques à batteries rechargeables. Le projet s'intéresse à une technique récente de rechargement des batteries, à savoir le « Biberonnage ». Cette technologie est inspirée du fonctionnement de certains bus électriques. Elle consiste à exploiter les courts temps d'attentes du véhicule, comme par exemple la montée et la descente des passagers pour le cas des bus, afin de recharger automatiquement la batterie du véhicule. Ainsi dans cette thèse on a exploré les différentes techniques et modes de rechargement rapide des batteries de tracteurs routiers électriques compte tenu des contraintes d'exploitation, et

d'évaluer la faisabilité économique de la mise en œuvre d'un système comprenant le véhicule et l'infrastructure électrique. L'outil de simulation Anylogic a permis de dimensionner les batteries et les bornes de recharge des véhicules électriques, en plus de fournir aux décideurs des résultats technico-économiques avec des représentations animées et graphiques en 3D.

Résumé en anglais

Containerization revolutionized international trade in the 20th century. The introduction of the container, as a standard means of transporting goods, has had a profound impact on maritime trade and has radically changed the functioning of ports. Indeed, ports have continued to grow through the construction of new container terminals (CT) and also by improving their services by reducing delays and delivery costs. At the same time, risk management in CTs has received a lot of attention in recent years due to an increase in fraudulent container activities. The international community has proposed several initiatives to improve the security of maritime transport. However, the risk assessment of containers remains a difficult task, often due to incomplete or ambiguous container information. On the other hand, reducing the ecological footprint on the environment has become a major concern in containerized transport. Faced with this ecological challenge, the last-mile players in the container logistics chain must improve and optimize their infrastructure and think of new land transport modes of containers with a lower environmental footprint than conventional diesel transport modes, without having an impact on performance.

With this in mind, the first objective of this thesis focuses on improving the performance of the container inspection process. Thus, we propose a new adaptive approach to container inspection prioritization. We named this approach APRICOIN (Adaptive PRIoritizing Container INspection). This approach exploits the concept of intelligent product as well as fuzzy logic and data mining techniques. This approach is based on three stages. The first step is to improve the information flow and to ensure this truthfulness by means of the capabilities of the intelligent container. Thus we propose an enriched description of the container (DEC). The second step is to prioritize container inspection by assigning a risk score using fuzzy logic. The final step is to prioritize the inspection of the containers and use the inspection results to adjust the accuracy of the APROCOIN algorithm and to adapt to the new risk factors using the data mining technique. In order to validate the proposed approach, an illustrative case study was conducted as well as a comparative study with other alternative approaches. The second objective of this thesis focuses on the green truck project, which is particularly aimed at short-haul container road hauliers in the port area by ensuring an energy transition from the fleet of diesel tractors to electric tractors with rechargeable batteries. It consists in exploiting the short wait times of the vehicle, in order to automatically recharge the vehicle's battery. Thus, in this thesis, we have explored the different techniques and methods of recharging batteries of electric road tractors taking into account operating constraints, and evaluate the economic feasibility of implementing such system. The Anylogic simulation was used to size the batteries and the charging stations of electric vehicles. In addition technical and economic results with 3D animated and graphic representations was provided.

Introduction Générale

Cadre général

L'introduction du conteneur comme standard de transport dans la chaîne logistique mondiale a révolutionné le commerce international au 20^{ème} siècle. Cette standardisation a profondément impacté le commerce maritime et a radicalement changé le fonctionnement des ports. Au cours des trois dernières décennies, le transport conteneurisé s'est multiplié par seize, passant de 102 millions de tonnes chargées en 1980 à 1 687 millions de tonnes chargées en 2015 (UNCTAD 2016). En effet, les ports ainsi que les navires porte-conteneurs n'ont cessé de se développer en termes de capacité et également par l'amélioration de leurs services et la réduction des délais et des coûts de livraison. L'augmentation des volumes de trafic des conteneurs et la taille des navires, les contraintes de ressources et la forte concurrence ont exercé une pression sur les TCs pour gérer efficacement leurs ressources.

La conteneurisation a ainsi rendu vulnérable les TCs aux intrusions et au détournement de leur fonctionnement (Dahlman et al. 2005). Par exemple, un conteneur peut subir une altération de son contenu pour un trafic de marchandises illicite (drogues, armes, ...). En analysant les archives des incidents maritimes liés aux conteneurs transportant de la matière illicite ou dangereuse entre 1998 et 2008, (Ellis 2011) a identifié que 91% des causes qui ont contribué à ces accidents sont liées à des opérations de packaging et de chargement des marchandises des conteneurs avant l'arrivée du conteneur au port. En revanche, les organismes qui sont derrière ces actes illicites utilisent souvent l'arme de la corruption et font preuve de beaucoup d'innovation pour prendre une longueur d'avance sur les autorités.

D'autres parts, la réduction d'empreinte écologique du transport conteneurisé est devenue récemment une préoccupation majeure pour les différents acteurs de la chaîne logistique. Dans cette optique, l'Union Européenne encourage les modes de transport écologiques dans le cadre de sa stratégie visant l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution d'émissions de gazes à effet de serre (Energy 2006). Face

à cet enjeu écologique, les acteurs de la chaîne logistique doivent améliorer et optimiser leur infrastructure et penser à des modes de transports terrestre de conteneurs ayant une empreinte environnementale moindre que les modes de transports classiques à diesel, sans toutefois impacter les performances de la chaîne logistique.

Problématique

Compte tenu du volume important des échanges maritimes, l'utilisation des conteneurs n'est pas sans poser problème. D'après (Su et al. 2015), la majorité des travaux dans la littérature concernant les TCs a tendance de traiter le côté opérationnel et l'amélioration l'efficacité (Cullinane et al. 2006). Un domaine qui a reçu moins d'attention est la gestion du risque dans un TC. L'une des rares études de ce genre a été effectuée au Taiwan (Shang et Tseng 2010) sur la gestion du risque et la sûreté dans un TC. En pratique, chaque TC dispose d'un département de sécurité qui assure l'organisation et l'application des précautions de sécurité. Toutefois, on trouve rarement une stratégie structurée ou des outils ou systèmes qui ont été développés pour la gestion des risques dans un TC. Toutefois les risques liés aux TCs peuvent être désastreux et catastrophiques. Par contre, l'introduction de mesures sécuritaire dans le fonctionnement d'un TC peut induire un impact sur sa performance est ainsi sa compétitivité. L'aspect sur lequel se focalise cette thèse coté gestion des risques peut être formulé comme suit :

Comment améliorer la gestion des risques liés au transport conteneurisé, particulièrement le ciblage et l'inspection des conteneurs à risque sans affecter la compétitivité et la performance du TCs ?

D'autres questions sous-jacentes de ce problème peuvent être posées :

- Comment rendre plus efficace le processus de ciblage des conteneurs à risque sans avoir à augmenter la capacité d'inspection ni générer des retards ?
- Comment exploiter les technologies de l'information, et notamment le concept du produit intelligent pour améliorer le flux informationnel liée au conteneur ?

- Comment utiliser les techniques de fouille de données pour extraire les connaissances cumulées des agents de la douane dans le ciblage des conteneurs à risque est les exploiter efficacement ?
- Comment utiliser efficacement ces connaissances extraites et les exploiter pleinement dans le ciblage des conteneurs à risque ?
- Comment mettre à jours ces connaissances extraites et les adapter aux facteurs de risques émergents ou obsolètes ?
- Comment mettre en place une stratégie adaptive de ciblage de conteneurs à risque qui prend en compte tous ces aspects ?

L'aspect environnemental qui est devenu une priorité dans le transport conteneurisé fait face à de nombreuses contraintes liées exigences écologique et du maintien de la performance. Ce compromis à pousser le port du Havre à s'engager avec ses partenaires dans des projets pour la réduction de son empreinte écologique. Le projet Green truck s'inscrit dans cette optique.

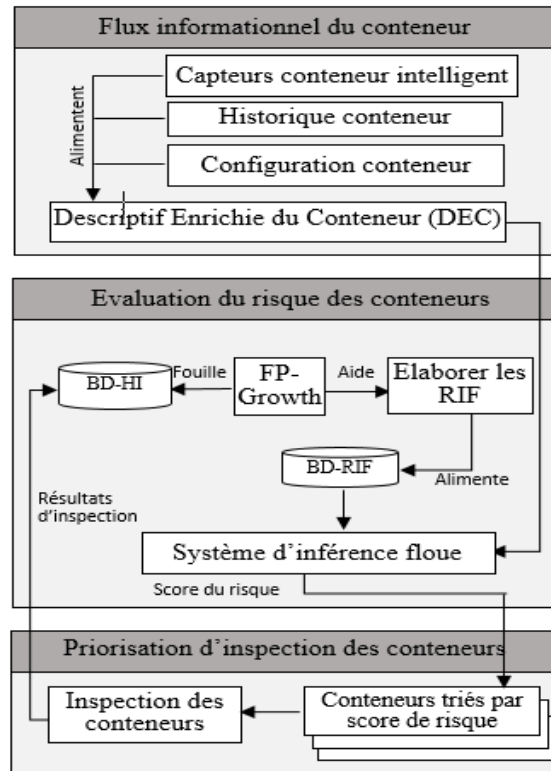
Le projet green Truck vise particulièrement les transporteurs routiers de conteneurs à courtes distances dans la zone portuaire en assurant une transition énergétique de la flotte de tracteurs à diesel vers des tracteurs électriques à batteries rechargeables. La problématique prise en compte dans cette thèse est comme suit :

- Quelles sont les différentes techniques et mode de rechargements rapides des batteries pour tracteurs routiers électriques ?
- Comment dimensionner la batterie nécessaire afin de prendre en compte les contraintes d'exploitation ?
- Comment définir le nombre de bornes de rechargement ?
- Comment exploiter les outils de simulation afin de choisir la configuration donnant le meilleur compromis ?
- Est-ce qu'une telle exploitation est faisable économiquement ?

Contributions

1^{ère} contribution : Une approche adaptative pour la priorisation d'inspection des conteneurs à risque

La communauté internationale a proposé plusieurs initiatives pour améliorer la sécurité du transport maritime. Cependant, l'évaluation des risques des conteneurs reste une tâche difficile, souvent due à des informations incomplètes ou ambiguës sur les conteneurs. En outre, le processus d'évaluation doit être adapté de manière continue pour faire face aux facteurs de risque émergents. D'autre part, l'inspection des conteneurs à haut risque est généralement entravée par une faible capacité d'inspection ce qui entraîne un problème majeur : comment prioriser l'inspection des conteneurs suspects si leur nombre dépasse la capacité d'inspection du TC ? Prioriser l'inspection des conteneurs suspects peut être la réponse. En d'autres termes, c'est la possibilité de classer les conteneurs suivant l'ordre de leur degré ou score de risque. Ce score permet aux douanes de prioriser l'inspection des conteneurs à haut risque. Toutefois, le calcul d'un tel score nécessite la quantification des risques liés aux conteneurs. Par conséquent, l'amélioration de la précision de la quantification des risques des conteneurs est essentielle en enrichissant le flux d'information lié au processus de transport du conteneur et en assurant sa véracité, tout en s'adaptant aux nouveaux facteurs de risques. Ainsi nous proposons une nouvelle approche adaptative de la priorisation d'inspection des conteneurs. Nous avons nommé cette approche APRICOIN (Adaptive PRIoritizing Container INspection). Cette approche est basée sur trois étapes. La première étape vise l'amélioration du flux informationnel et en assurant sa véracité et ce moyennant les capacités du conteneur intelligent. Ainsi on propose un descriptif enrichi du conteneur (DEC). La deuxième étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs en lui attribuant un score de risque à l'aide de l'algorithme APRICOIN. La dernière étape consiste à prioriser l'inspection des



Principales étapes de l'approche APRICOIN

conteneurs et exploiter les résultats d'inspection afin d'ajuster la précision de l'algorithme APRICOIN et s'adapter aux nouveaux facteurs de risque.

2^{ème} contribution : Modélisation et validation par simulation de modèle de tracteur électrique pour le transport de conteneur (Projet Green truck)

Le projet green Truck vise particulièrement les transporteurs routiers de conteneurs à courtes distances dans la zone portuaire en assurant une transition énergétique de la flotte de tracteurs diesel vers des tracteurs électriques à batteries rechargeables. Le projet s'intéresse à une technique récente de rechargement des batteries, à savoir le « Biberonnage ». Cette technologie est inspirée du fonctionnement de certains bus électriques. Elle consiste à exploiter les courts temps d'attentes du véhicule, comme par exemple la montée et la descente des passagers pour le cas des bus, afin de recharger automatiquement la batterie du véhicule. Toutefois, les trajets doivent être répétitifs et courts afin de limiter le nombre de borne de rechargement. L'intérêt de cette technique est double : l'autonomie du véhicule est illimitée (tant qu'il y a des bornes à disposition) et la taille de la batterie est réduite en poids et en coût.

Dans cette étude, les tracteurs routiers transportent des conteneurs entre des lieux définis de la zone portuaire (terminaux maritimes, parking des transporteurs, dépôts de vides) et à chaque origine destination, les tracteurs sont immobilisés pour permettre la manutention du conteneur ou satisfaire les procédures administratives. Ce projet a donc pour objet d'explorer les différentes techniques et modes de rechargement rapide des batteries de tracteurs routiers électriques compte tenu des contraintes d'exploitation, et d'évaluer la faisabilité économique de la mise en œuvre d'un système comprenant le véhicule et l'infrastructure électrique.

Organisation de la thèse

Ce document est scindé en deux parties : La première partie « État de l'art et concepts de base » et la deuxième partie « Contributions ».

La première partie « État de l'art et concepts de base »

Cette partie est composée de deux chapitres :

Chapitre 1 : Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu sur la conteneurisation, ses effets et les enjeux du transport maritime. Nous présentons ensuite l'organisation et le fonctionnement d'un TC. Nous mettons également l'accent sur les différentes problématiques de gestions dont le but d'améliorer la performance des activités portuaires dans un TC. Par ailleurs, nous présentons l'organisation du port du Havre et ses principaux TC, nous nous intéressons particulièrement au terminal multimodal. Enfin, nous abordons le terrain d'étude de la thèse, à savoir, la logistique portuaire et plus particulièrement la gestion des risques liés au passage portuaire du conteneur les TC.

Chapitre 2 : Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base, les méthodes, et les outils utilisés lors du développement des solutions proposées liés à la gestion des risques et au transport des conteneurs. Avant de nous concentrer sur les travaux qui ont abordés le conteneur intelligent et sa mise en œuvre, nous allons nous pencher sur le concept du produit intelligent, sa classification et les outils de sa mise en œuvre. Ensuite, nous abordons les techniques de fouille de données, et notamment l'extraction des motifs fréquents et les règles d'association. En outre, nous mettons le point sur les

concepts de base de la logique floue et finirons par une revue des méthodes et les outils de simulation.

La deuxième partie « Contributions »

Cette partie est composée de deux chapitres :

Chapitre 1 : Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche adaptative de la priorisation d'inspection des conteneurs. Nous avons nommé cette approche APRICOIN (Adaptive PRIoritizing Container INspection). Cette approche est basée sur trois étapes. La première étape vise l'amélioration du flux informationnel et en assurant sa véracité et ce moyennant les capacités du conteneur intelligent. Ainsi on propose un descriptif enrichi du conteneur (DEC). La deuxième étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs en lui attribuant un score de risque à l'aide de l'algorithme APRICOIN. La dernière étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs et exploiter les résultats d'inspection afin d'ajuster la précision de l'algorithme APRICOIN et s'adapter aux nouveaux facteurs de risque.

Chapitre 2 : Dans ce chapitre on explore les différentes techniques et modes de rechargement rapide des batteries de tracteurs routiers électriques compte tenu des contraintes d'exploitation, et d'évaluer la faisabilité économique de la mise en œuvre d'un système comprenant le véhicule et l'infrastructure électrique.

Table des matières

ملخص الرسالة.....	5
Résumé	6
Résumé en anglais	8
Introduction Générale	9
Liste des tableaux.....	20
Liste des figures	21
Première partie : État de l’art et concepts de base	23
Chapitre 1 : Le passage portuaire du conteneur et la gestion des risques	24
1. Introduction.....	25
2. Passage portuaire du conteneur	25
2.1. La conteneurisation.....	25
2.1.1. Histoire de la conteneurisation.....	25
2.1.2. Le conteneur.....	26
2.2. Le terminal à conteneurs	28
2.2.1. Organisation d’un terminal a conteneur	29
2.2.1.1. Zone des opérations portuaires.....	31
2.2.1.2. Zone de stockage	31
2.2.1.3. Zone des opérations terrestres.....	32
2.2.2. Les problématiques de gestion d’un TC.....	33
2.3. Le Port du Havre	34
2.3.1. Le terminal multimodal.....	36
3. La logistique portuaire et la gestion des risques	38
3.1. La chaîne logistique.....	38
3.1.1. La chaîne logistique portuaire	38
3.1.2. La performance de la chaîne logistique portuaire	40
3.1.2.1. Les indicateurs de performance	42
3.2. La gestion des risques	43
3.2.1. Définitions et terminologie.....	43
3.2.2. Standards pour la gestion des risques.....	47
3.2.3. Processus de gestion de risque	49
3.2.3.1. Identification du risque	50

3.2.3.2.	Évaluation du risque.....	51
Approche quantitative.....		51
Approche qualitative.....		52
3.2.3.3.	Traitement du risque.....	52
3.2.3.4.	Méthodes de gestion des risques.....	53
Méthodes quantitatives.....		54
Méthodes qualitatives.....		54
Méthodes hybrides.....		56
3.3.	La gestion des risques dans les terminaux à conteneurs.....	56
3.3.1.	Le risque dans les terminaux à conteneurs.....	56
3.3.2.	Gestion des risques dans un terminal à conteneurs.....	58
3.3.2.1.	Le ciblage des conteneurs à risque.....	59
3.3.2.2.	L'inspection des conteneurs.....	62
3.3.2.3.	La matière dangereuse dans les TC.....	64
Chapitre 2 : Concepts de base et outils.....		68
1.	Introduction.....	69
2.	Le produit intelligent.....	69
2.1.	Définition et classification.....	69
2.2.	Mise en œuvre.....	71
2.3.	Le produit intelligent et la performance.....	73
3.	Le conteneur intelligent.....	73
3.1.	Vers une identification numérique du conteneur.....	73
3.2.	L'Inception du conteneur intelligent.....	76
4.	Fouille de données.....	80
4.1.	Extraction des motifs fréquents et des règles d'association.....	81
5.	La logique floue.....	83
5.1.	Système de logique floue.....	85
5.1.1.	Définition des variables linguistiques.....	86
5.1.2.	Définition des fonctions d'appartenance.....	87
5.1.3.	Élaboration de la base des règles.....	87
5.1.4.	L'inférence floue.....	88
6.	La simulation.....	90
6.1.	Définition et objectifs.....	90

6.2.	Types de simulation.....	92
6.3.	La vérification, validation et calibration du modèle simulé.....	93
6.3.1.	La vérification.....	93
6.3.2.	La validation.....	94
6.3.3.	La calibration.....	94
6.4.	Outils de simulation.....	95
7.	Conclusion.....	96
Deuxième partie : Contributions.....		98
Chapitre 1 : Système De priorisation de l’inspection des conteneurs à risque.....		99
1.	Introduction.....	100
2.	L’analyse des risques.....	101
3.	L’approche proposée.....	102
3.1.	Amélioration du flux informationnel du conteneur.....	105
3.1.1.	Vers un conteneur intelligent : Le descriptif enrichi du conteneur.....	105
3.2.	L’évaluation des risques liés aux conteneurs.....	108
3.2.1.	Extraction des critères clé du DEC.....	108
3.3.	Le système d’inférence flou.....	114
3.3.1.	Les règles d’inférence floue.....	114
3.3.2.	Le processus d’inférence floue.....	115
3.4.	L’algorithme APRICOIN.....	118
4.	Étude illustrative : Terminale multimodale du Havre.....	122
4.1.	Application.....	122
4.2.	Résultats.....	125
5.	Conclusion.....	129
Chapitre 2 : Logistique verte du dernier kilomètre : Le projet Green Truck.....		131
1.	Introduction.....	132
2.	Tracteurs électriques : Veille technologique.....	133
3.	Le projet Green Truck.....	136
3.1.	Présentation du projet.....	136
3.2.	Modélisation du tracteur électrique pour le transport des conteneurs.....	139
3.2.1.	Caractérisation et modélisation des trajets.....	139
3.2.2.	Dimensionnement de la batterie et des bornes de recharge.....	140
3.2.3.	La construction et la vérification du modèle de simulation du tracteur.....	147

3.2.3.1.	Modélisation et implémentation des routes	148
3.2.3.2.	Modélisation et implémentation du tracteur électrique	149
3.2.3.3.	Modélisation et implémentation des stations de recharge.....	152
3.2.3.4.	La construction de l'interface graphique et de la 3D.....	153
3.2.3.5.	Vérification de la simulation.....	153
3.2.4.	Validation des résultats	154
4.	Calcul économique des différentes techniques et comparaison avec l'exploitation actuelle.....	155
4.1.	Technologie par induction	155
4.2.	Technologie par conduction.....	157
4.3.	Comparaison économique entre la solution électrique et l'exploitation classique	159
4.3.1.	Résultats de la technologie par induction.....	161
4.3.2.	Résultats de la technologie par conduction	163
4.4.	Coût en €/ (tonne.km)	165
5.	Conclusion	165
	Conclusion Générale	167
	Bibliographie.....	169

Liste des tableaux

Tableau 1.1. 1	Activité des 15 premiers TCs entre 2011 et 2015	29
Tableau 1.1. 2	Les Indicateurs de performance proposés dans un TC (Yann, 2012).....	43
Tableau 1.1. 3	Description des méthodes déterministes de gestion des risques.	55
Tableau 1.1. 4	Liste des standards et initiatives relatives à la sécurité des TC	59
Tableau 2.1. 1	Liste des critères d'un DEC.....	106
Tableau 2.1. 2	Tableau de conversion du DEC.....	108
Tableau 2.2. 1	Comparaison entre les résultats du logiciel DOTE et le simulateur Anylogic	154
Tableau 2.2. 2	détails du scénario simulé.....	154
Tableau 2.2. 3	Caractéristiques et prix de la technologie par induction.....	156
Tableau 2.2. 4	Stations au niveau T.Duboc	156
Tableau 2.2. 5	Stations au niveau TDF.....	157
Tableau 2.2. 6	caractéristiques et prix de la technologie par conduction	157
Tableau 2.2. 7	Stations au niveau T.Duboc.	158
Tableau 2.2. 8	Stations au niveau TDF.....	158
Tableau 2.2. 9	Coût et caractéristiques de la batterie.....	159
Tableau 2.2. 10	Consommation du tracteur diesel.....	159
Tableau 2.2. 11	Maintenance du tracteur diesel	159
Tableau 2.2. 12	Variation des coûts de batterie et énergie électrique et diesel	160
Tableau 2.2. 13	hypothèses proposées selon la capacité de la batterie	160
Tableau 2.2. 14	Coûts selon le tonnage (Induction avec 70 Wh/ (tonne.km)).....	161
Tableau 2.2. 15	Coûts selon le tonnage (Induction avec 65 Wh/ (tonne.km)).....	162
Tableau 2.2. 16	Coûts selon le tonnage (Conduction avec 70 Wh/ (tonne.km))	163
Tableau 2.2. 17	Coûts selon le tonnage (Conduction avec 65 Wh/ (tonne.km))	164

Liste des figures

Figure 1.1.1 Les types de conteneurs.....	26
Figure 1.1.2 Trafic mondial de conteneurs. Source (UNCTAD 2016)	27
Figure 1.1. 3 Organisation d'un TC.....	30
Figure 1.1. 4 Le port du Havre.....	34
Figure 1.1. 5Volume de trafic conteneurisé dans les ports du nord d'Europe (2015)	36
Figure 1.1. 6 Comparatif de la part de trafic modal de conteneurs des ports de la range nord	36
Figure 1.1. 7 Disposition et vue aérienne du TMM	37
Figure 1.1. 8 Ancien et actuel système logistique du port du Havre	37
Figure 1.1. 9 Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC (Nidra, 2002).....	39
Figure 1.1. 10 Principales taches du processus d'acheminement de conteneurs	40
Figure 1.1. 11 Image rayon-x d'un conteneur scanné (PEO Radiation Technology).....	63
Figure 1.1. 12 Scanner embarqué (VeriSpreader).....	63
Figure 1.1. 13 Système d'inspection par rayon-x.....	63
Figure 1.1. 14 Classification des matières dangereuses.....	66
Figure 1.1. 15 La matrice de compatibilité entre les classes de matières dangereuses	67
Figure 1.2. 1 Classification du PI proposée par Meyer et al.	71
Figure 1.2. 2 Un exemple classique du PI (Wong et al. 2002).....	72
Figure 1.2. 3 Exemple des codes d'identification d'un conteneur (comex-mag.com)	74
Figure 1.2. 4 Prototype du conteneur intelligent proposé dans le cadre du projet « Intelligente Container » 2014.	79
Figure 1.2. 5 Concept du conteneur intelligent selon Kim et al. (Kim et al, 2008).....	79
Figure 1.2. 6 Processus de fouille de données. Source (Papon 2016).....	80
Figure 1.2. 7 Plage des valeurs en logique Booléenne (a) et en logique floue (b).....	84
Figure 2.1. 1 L'arbre de défaillance du scénario à risque : Un conteneur frauduleux contournant l'inspection des douanes	102
Figure 2.1. 2 Principales étape de l'approche APRICOIN	104
Figure 2.1. 3 DEC initiale vs DEC booléen.....	109
Figure 2.1. 4 La fonction DECversBOOL	110
Figure 2.1. 5 Aperçu d'un ensemble de DEC	111
Figure 2.1. 6 Aperçu d'un ensemble de DEC booléens	111
Figure 2.1. 7 L'algorithme FP-Growth.....	112
Figure 2.1. 8 Aperçue d'une Fp-Tree	114
Figure 2.1. 9 Les étapes du processus d'inférence floue.....	115
Figure 2.1. 10 Exemple de fonctions d'appartenance	116
Figure 2.1. 11 Les fonctions d'appartenance du critère Transporteur	118
Figure 2.1. 12 L'algorithme APRICOIN.....	121
Figure 2.1. 13 Aperçu du processus d'analyse multicritère AHP	124
Figure 2.1. 16 Evolution de la précision de l'approche APRICOIN , Apriori et AHP	127
Figure 2.1. 14 Nombre de règles générées par l'approche APRICOIN et Apriori	127
Figure 2.1. 15 Evolution des ensembles de critères fréquents.....	127
Figure 2.2. 1 Cartographie des sites et des trajets de la zone portuaire du GPMH.....	140
Figure 2.2. 2 Aperçu du logiciel DOTE et les résultats d'optimisation obtenus	147
Figure 2.2. 3 Étapes du processus d'implémentation des trajets sous Anylogic	148
Figure 2.2. 4 Diagramme d'activités du tracteur électrique sur Anylogic.....	151
Figure 2.2. 5 Aperçu des paramètres de vitesse du tracteur électrique.	151
Figure 2.2. 6 Aperçu de l'interface de la simulation.	153

Figure 2.2. 7 Illustration des coûts selon le tonnage (Induction avec 70 Wh/ (tonne.km))	161
Figure 2.2. 8 Illustration des coûts selon le tonnage (Induction avec 65 Wh/ (tonne.km))	162
Figure 2.2. 9 Illustration des coûts selon le tonnage (Conduction avec 70 Wh/ (tonne.km)).....	163
Figure 2.2. 10 Illustration des coûts selon le tonnage (Conduction avec 65 Wh/ (tonne.km)).....	164

Première partie :
État de l'art et concepts de base

Chapitre 1 : Le passage portuaire du conteneur et la gestion des risques

1. Introduction

La conteneurisation a révolutionné le commerce international au 20^{ème} siècle. L'introduction du conteneur, comme moyen standard de transport de marchandise, a profondément impacté le commerce maritime et a radicalement changé le fonctionnement des ports. En effet, les ports n'ont cessé de se développer par la construction de nouveaux terminaux à conteneurs (TC) et également par l'amélioration de leurs services par la réduction des délais et des coûts de livraison. Dans ce chapitre, nous donnons un aperçu sur la conteneurisation, ses effets et les enjeux du transport maritime. Nous présentons ensuite l'organisation et le fonctionnement d'un TC. Nous mettons également l'accent sur les différentes problématiques de gestions dont le but d'améliorer la performance des activités portuaires dans un TC. Par ailleurs, nous présentons l'organisation du port du Havre et ses principaux TC, nous nous intéressons particulièrement au terminal multimodal. Enfin, nous abordons le terrain d'étude de la thèse, à savoir, la logistique portuaire et plus particulièrement la gestion des risques liés au passage portuaire du conteneur les TC.

2. Passage portuaire du conteneur

2.1. La conteneurisation

2.1.1. Histoire de la conteneurisation

La conteneurisation est un système intermodal de transport de marchandises utilisant des conteneurs standards. Un conteneur est « *une boîte conçue pour le transport de marchandises, suffisamment solide pour un usage répété, généralement empilable et dotée d'éléments permettant le transfert entre modes [de transport]* » (Hinkelman et Shippey 2005). Avant la conteneurisation, le seul moyen connu pour manutentionner les marchandises consistait à les placer dans des caisses en bois ou des sacs. Ce processus est appelé « break-bulk » et fut utilisé jusqu'à la moitié du XX^{ème} siècle. Le chargement et déchargement des navires représentait une tâche laborieuse et prenait beaucoup de temps. Pendant la seconde guerre mondiale, des conteneurs de taille standard furent utilisés par l'armée américaine pour transporter efficacement les marchandises.

Toutefois, ce n'est qu'au début des années 1950 que l'américain Malcom McLean a eu l'idée qu'il serait plus simple et rapide d'avoir un conteneur qui pourrait être soulevé d'un véhicule directement sur un navire, sans avoir à en décharger le contenu. Ses idées étaient basées sur la théorie selon laquelle l'efficacité pourrait être considérablement améliorée grâce à un système d'intermodalisme dans lequel le même conteneur, avec la même cargaison, peut être transporté avec un minimum d'interruption par différents modes de transport pendant son voyage. Les conteneurs pouvaient être déplacés sans problème entre les navires, les camions et les trains. La mise en œuvre de cette idée conduisit à une révolution dans le transport de marchandises et le commerce international au cours des 50 années qui suivirent.

2.1.2. Le conteneur

Les dimensions du conteneur sont standardisées par la norme ISO 668 :1995. Les conteneurs standards ont une longueur équivalent vingt pieds (EVP) ou équivalent quarante pieds (EQP). Les dimensions du conteneur EVP sont 20' x 8' x 8.5' (6.1m x 2.44 x 2.56m) et 40' x 8' x 8.5' (12.2m x 2.44m x 2.59m) pour le conteneurs EQP. Toutefois, la hauteur des conteneurs peut varier. La figure 1.1.1 montre les différentes formes de conteneurs.

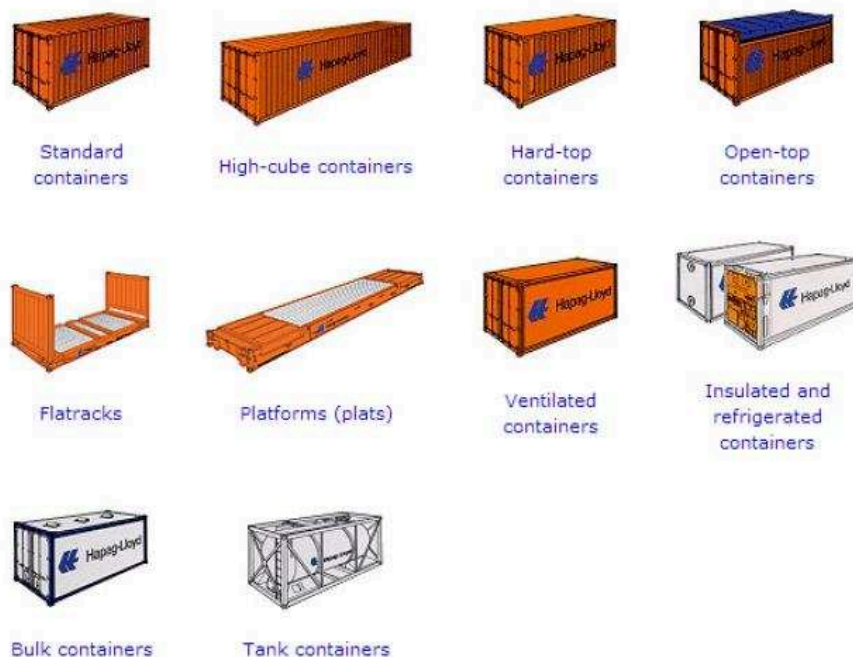


Figure 1.1.1 Les types de conteneurs

Les conteneurs jouent un rôle majeur dans le transport intermodal où les marchandises sont déplacées «*en utilisant deux modes de transport ou plus mais dans la même unité de chargement ou le même véhicule routier, et sans empotage ni dépotage.*» (Economic Commission for Europe; 2001). Outre l'efficacité du processus de chargement et déchargement, les conteneurs améliorent et simplifient la planification et le contrôle et servent de protection contre les fausses manipulations durant la manutention, vols et dégradations.

Au cours des trois dernières décennies, le transport conteneurisé s'est multiplié par seize, passant de 102 millions de tonnes chargées en 1980 à 1 687 millions de tonnes chargées en 2015. En 1980, il représentait 2,7% du trafic maritime total (mesuré en tonnes chargées) et en 2015 pour 16,7%(UNCTAD 2016). La figure 1.1.2 - tirée du Secrétariat de la UNCTAD (united nations conference on trade and development) - montre le trafic de conteneurs de 1996 à 2016 mesuré en EVPs et la variation annuelle en pourcentage. Le transport maritime a augmenté avec un taux annuel moyen impressionnant de 6% à 16% au cours des quinze dernières années. Seulement, pendant la crise de 2008, le transport conteneurisé a chuté de 10%, mais s'est rétabli ensuite.

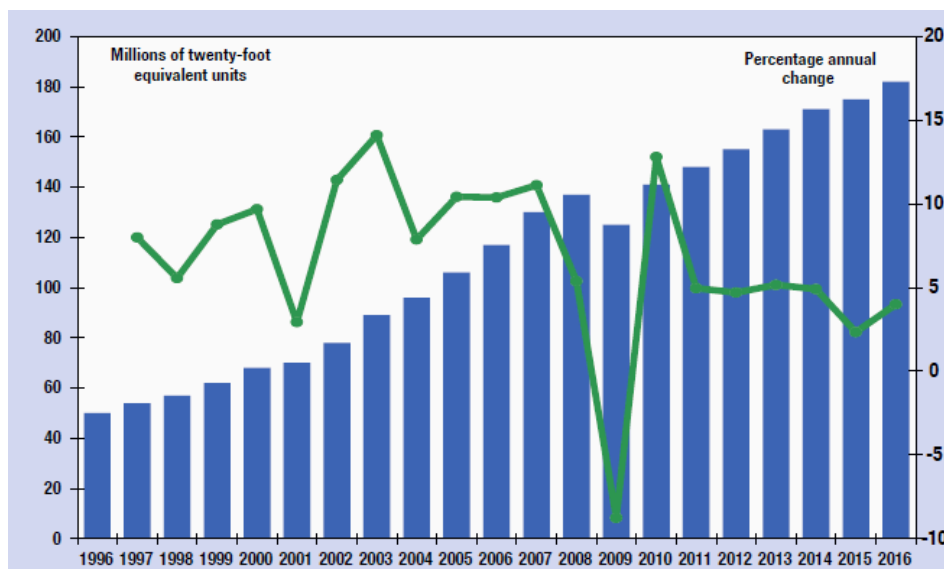


Figure 1.1.2 Trafic mondial de conteneurs. Source (UNCTAD 2016)

Pour accompagner la croissance accrue du transport conteneurisé, le nombre et la taille des navires porte-conteneurs ont augmenté de façon continue. La capacité totale des navires porte-conteneurs a augmenté de 1,2 million d'EVP en 1987 à 18,4

millions d'EVP en 2015. La capacité moyenne par navire est passée de 1155 EVP en 1987 à 5184 EVP en 2016 (UNCTAD 2016). Les plus grands navires porte-conteneurs en service en 2015 sont dotés d'une capacité de chargement de 19 224 EVP (¹MSC-Oscar de la *Mediterranean Shipping Company*).

Le transport conteneurisé a amené une ère de transport multimodal en favorisant l'intégration l'utilisation de plusieurs modes de transports, notamment par camions, navires (barges) et trains. Toutefois, ce mode de transport ne pourrait subsister sans le développement et l'adaptation des infrastructures des ports et des TC. Le vif intérêt pour ce mode de transport a favorisé la construction de nouveaux TC capable d'accueillir les grands navires porte-conteneurs avec des connexions multimodales.

2.2. Le terminal à conteneurs

Le TC est un système complexe de transfert de conteneurs et d'interfaçage avec les modes de transports terrestres et maritimes. L'objectif principal d'un TC est d'optimiser, en termes de coûts et de temps, les activités liées à la manutention et à l'expédition des conteneurs. Les TCs transfèrent les conteneurs entre les navires porte-conteneurs et les modes de transport terrestre (camions, trains et barges) de la façon la plus efficace. Trois types de flux de conteneurs sont distingués : les conteneurs d'import qui arrivent sur les navires porte-conteneurs et partent pour les modes de transport terrestre, les conteneurs d'export qui arrivent via les modes de transport terrestre et repartent sur les navires porte-conteneurs et les conteneurs de transbordement qui arrivent et repartent via les navires porte-conteneurs. Les TCs traitent également des types de conteneurs spécifiques, tels que les conteneurs de matière dangereuse, réfrigérés et vides.

Le tableau 1.1.1 présente les 20 ports de conteneurs les plus actifs au monde en termes de EVP manipulés (« Top 50 World Container Ports | World Shipping Council » s. d.). Nous notons que le volume total traité en 2015 a augmenté de 13.4% par rapport à 2011.

¹ Mediterranean Shipping Company

Rang	Port	Volume 2015 (EVP)	Volume 2014 (EVP)	Volume 2013 (EVP)	Volume 2012 (EVP)	Volume 2011 (EVP)
1	Shanghai, China	36.54	35.29	33.62	32.53	31.74
2	Singapore	30.92	33.87	32.6	31.65	29.94
3	Shenzhen, China	24.20	24.03	23.28	22.94	22.57
4	Ningbo- Zhoushan, China	20.63	19.45	17.33	16.83	14.72
5	Hong Kong, S.A.R., China	20.07	22.23	22.35	23.12	24.38
6	Busan, South Korea	19.45	18.65	17.69	17.04	16.18
7	Qingdao, China	17.47	16.62	15.52	14.50	13.02
8	Guangzhou Harbor, China	17.22	16.16	15.31	14.74	14.42
9	Jebel Ali, Dubai, United Arab Emirates	15.60	15.25	13.64	13.30	13.00
10	Tianjin, China	14.11	14.05	13.01	12.30	11.59
11	Rotterdam, Netherlands	12.23	12.30	11.62	11.87	11.88
12	Port Klang, Malaysia	11.89	10.95	10.35	10.00	9.60
13	Kaohsiung, Taiwan, China	10.26	10.59	9.94	9.78	9.64
14	Antwerp, Belgium	9.65	8.98	8.59	8.64	8.66
15	Dalian, China	9.45	10.13	10.86	8.92	6.40

Tableau 1.1. 1 Activité des 15 premiers TCs entre 2011 et 2015

Les TCs sont constamment confrontés à ajuster leur capacité pour répondre à la demande. Par conséquent, de nombreuses possibilités se présentent pour de nouvelles approches en matière de conception de TC, notamment en matière de matériels de manutention.

2.2.1. Organisation d'un terminal a conteneur

Dans la littérature, on trouve plusieurs organisations de TC. (Henesey 2006) propose un TC divisé en quatre zones :

- 1- L'interface maritime : elle constitue le point de départ et d'arrivée des navires.
- 2- La zone de transport interne : au niveau de cette zone, les conteneurs sont transportés par les véhicules à partir des zones d'échange vers les zones de stockage.

- 3- La zone de stockage : elle est composée d'un nombre de voies appelées baies permettant l'empilement des conteneurs. Elle peut être équipée par des grues (Cranes) et des chariots cavaliers.
- 4- La zone de transfert des conteneurs ou interface terrestre : après une certaine période passée dans la zone de stockage, les conteneurs stockés vont être chargés afin de les transporter par différents modes de transport.

Selon (Carlo, Vis, et Roodbergen 2014), un TC peut être divisé en cinq zones, à savoir le poste d'amarrage, le quai, la zone de transport, la zone de stockage et l'entrée du TC. Le poste d'amarrage et le quai sont considérés comme étant l'interface maritime, tandis que la zone de stockage et l'entrée du TC sont considérées comme interface terrestre. La zone de transport se trouve à l'intersection des interfaces maritimes et terrestres. Sommairement, un TC peut être réparti en trois zones principales : la zone des opérations maritimes, la zone de stockage, et la zone des opérations terrestres. La figure 1.1.3 de (Voß, Stahlbock, et Steenken 2004) présente une vue globale sur l'organisation d'un TC avec ses trois zones et le matériel de manutention utilisé pour chaque zone. Crainic et Kim (Crainic et Kim 2007) identifient trois types d'opérations de manutention dans ces terminaux : (1) les opérations portuaires qui comprennent l'amarrage, le déchargement et le chargement des porte-conteneurs, (2) les opérations de réception et d'expédition en provenance ou partant vers les autres modes de transport (camions, trains), (3) les activités de manutention et d'entreposage des conteneurs dans la cour du terminal. Ces activités sont effectuées à l'intérieur de trois zones d'opérations distinctes.

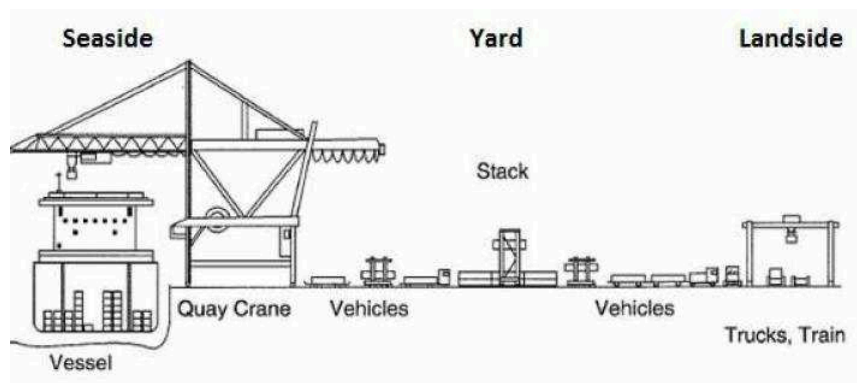


Figure 1.1. 3 Organisation d'un TC

2.2.1.1. Zone des opérations portuaires

Appelée aussi zone de quai, c'est une zone qui assure l'amarrage des navires porte-conteneurs pour le chargement et le déchargement. Les grues de quai ou les portiques chargent et déchargent les conteneurs sur ou depuis le navire (voir Figure 1.1.3). Avec l'émergence des méga-navires porte-conteneurs, les TCs investissent pour s'équiper de portiques toujours plus grands avec une portée pouvant aller jusqu'à 72 mètre ainsi que d'une levée de 52 au-dessus des quais. Ces investissements sont nécessaires pour minimiser le temps de service et d'attente des navires et ainsi assurer la compétitivité du port.

Pour le transport des conteneurs depuis cette zone, différents véhicules de transport peuvent être utilisés : les chariots cavaliers et les camions avec remorques sont les plus courants. Les chariots cavaliers (voir figure 1.1.3) sont des véhicules capables de récupérer un conteneur à son origine, de le transporter et de le poser à sa destination. Dans la plupart des TCs, ce sont les dockers qui font usage de ce matériel. Cependant, dans quelques TCs, comme les terminaux de Rotterdam, le transport des conteneurs est automatisé moyennant des véhicules à guidage automatique (AGV) (voir figure 1.1.3).

2.2.1.2. Zone de stockage

C'est une zone pour l'entreposage des conteneurs transitant par le TC. Une zone de stockage se compose de plusieurs blocs. Chaque bloc se compose de plusieurs rangées de conteneurs, chacune constituée de baies. Les chariots cavaliers ou les grues à portique roulants sont utilisés pour exécuter les tâches d'entreposage et de récupération des conteneurs. Les chariots cavaliers peuvent empiler des conteneurs jusqu'à 4 étages de haut. Les grues à portique couvrent de 8 à 12 rangées de conteneurs et empilent des conteneurs de 4 à 10 étages de haut. Dans ce cas, les tâches de transport sont exécutées par des camions avec remorques, AGV ou des chariots cavaliers équipés.

Selon (Lee & Kim, 2013), on a généralement deux configurations principales des zones de stockage qui diffèrent selon le niveau d'automatisation. La première

configuration, utilisée dans les zones de stockage non-automatisé, a des blocs positionnés parallèlement au quai. Typiquement, une ou plusieurs lignes dans chaque bloc sont réservées en tant que voies de véhicules de transfert (par exemple des camions). Dans cette configuration, la grue à portique se déplace pour ramasser (ou déposer) des conteneurs vers (à partir) du véhicule de transfert. La deuxième configuration est généralement utilisée dans les zones de stockage automatisées. Outre les blocs qui sont positionnés perpendiculairement au quai, cette configuration se distingue principalement par les points d'entrée et sorties situés aux deux extrémités des blocs de stockage. Généralement, les AGV sont utilisés pour récupérer et déposer des conteneurs sur les points d'entrée et de sorties.

2.2.1.3. Zone des opérations terrestres

C'est une zone interface entre le TC et les autres modes de transport. C'est la zone où se déroulent toutes les opérations de réception et d'expédition des conteneurs entrant ou sortant du TC. Les trains, les camions, et les barges sont les principales modes de transports utilisés. La gestion des entrées et des sorties des camions est généralement assurée par la guérite du TC. Les camions sont chargés/déchargés par des chariots cavaliers ou des chariots à prise par le haut qui transportent le conteneur depuis ou vers son emplacement. En ce qui concerne les trains, les opérations chargement/déchargement sont effectuées par des ponts roulants. Le transport des conteneurs entre les wagons et leur emplacement se fait à l'aide de chariots cavaliers, de camions, ou d'AVG.

L'agencement et les équipements de manutention influencent grandement le fonctionnement des TC. Ce choix dépend des caractéristiques du TC. Les grues de triage utilisent plus efficacement les zones d'entreposage disponibles puisque les conteneurs sont empilés plus haut. Les chariots cavaliers offrent plus de souplesse. Les terminaux automatisés utilisant des ponts roulants et des AGV qui réduisent la main-d'œuvre, mais nécessitent des investissements élevés. Plusieurs études présentent différents équipements de manutention et d'agencements de TC et évaluent l'impact sur la performance du terminal (par exemple, (Ioannou1 et Julia 2008; Brinkmann 2011; Wiese, Suhl, et Kliewer 2011; *Design and Operation of Automated Container Storage*

Systems | Nils Kemme | Springer s. d.) , Brinkmann, 2011, Wiese et al, 2011, Kemme, 2013).

2.2.2. Les problématiques de gestion d'un TC

L'augmentation des volumes de trafic des conteneurs et la taille des navires, les contraintes de ressources et la forte concurrence ont exercé une pression sur les TCs pour gérer efficacement leurs ressources. Ce besoin d'efficacité a promulgué l'utilisation des technologies de l'information et des méthodes d'optimisation pour surmonter les problématiques de gestion qui se posent.

Au niveau de la zone des opérations portuaire, on distingue trois problématiques majeures. La première est la planification de l'amarrage des navires et l'allocation des quais. Le but est de minimiser le temps de chargement/déchargement des navires afin d'éviter les files d'attentes des navires. Une revue des différentes méthodes et les tendances relatives au problème d'allocation des quais est présenté par Christian.B et al (Christian.B et al, 2010). La deuxième problématique concerne l'allocation des grues de quai pour le chargement/déchargement des conteneurs. Ce problème vise à déterminer quelle grue servira quel navire et quelle partie du navire. Fedtke et Boysen (Fedtke et Boysen 2017) proposent une classification des différentes approches dans la littérature pour la planification de l'allocation des grues de quai. La troisième problématique concerne la planification des opérations de transport des conteneurs entre le quai et la zone de stockage. Cette problématique consiste à minimiser le nombre de véhicules de transport de conteneurs qui seront affectés pour assurer le transport des conteneurs vers la zone de stockage. Toutefois, les délais d'attentes des grues de quai dues à l'absence de véhicules de transport doivent être pris en compte. Koo et col (Koo et col, 2005) proposent un modèle pour déterminer le nombre de véhicules optimal pour le transport de conteneurs des grues de quais vers la zone de stockage.

Au niveau de la zone de stockage des conteneurs, les conteneurs sont empilés afin d'utiliser efficacement la surface dédiée au stockage. Par conséquent, on a un accès direct qu'au conteneur le plus haut de chaque pile. Si un autre conteneur doit être

recupéré, les conteneurs au-dessus doivent être déplacés. Ces mouvements improductifs ne peuvent pas être évités complètement car peu d'informations sur les récupérations futures sont connues lorsqu'un conteneur doit être stocké. La problématique majeure concerne la façon dont les conteneurs seront entreposés dans les piles de la zone de stockage afin de minimiser les manutentions improductives des conteneurs. Différentes stratégies d'entreposage ont été proposées dans la littérature. Duinkerken et al. (Duinkerken, Evers, et Ottjes 2001) comparent l'efficacité des différentes stratégies de gestion d'entreposage à l'aide de la simulation.

Les principales problématiques abordées au niveau de la zone des opérations terrestres se focalisent sur la minimisation du temps de déplacement des véhicules de manutention et de transport interne et la réduction des temps d'attente des véhicules de transport externe. Le but est de décider comment allouer les équipements de transport aux différentes tâches et comment planifier le transport des conteneurs sur les équipements alloués.

2.3. Le Port du Havre

Fondé au début du 16^{ème} siècle par le roi de France François 1er, le port du Havre fête ses 500 ans en 2017. Avec sa situation géographique stratégique à l'embouchure de la Seine, le port du Havre est le premier port en France au niveau du commerce extérieur avec un trafic de conteneurs de plus de 2.56 millions d'EVP en 2015. Le port du Havre reçoit environ 6000 navires par an (porte-conteneurs, paquebots, etc.), soit une trentaine d'entrées/sorties quotidienne de navires. Sur une surface de 10.300

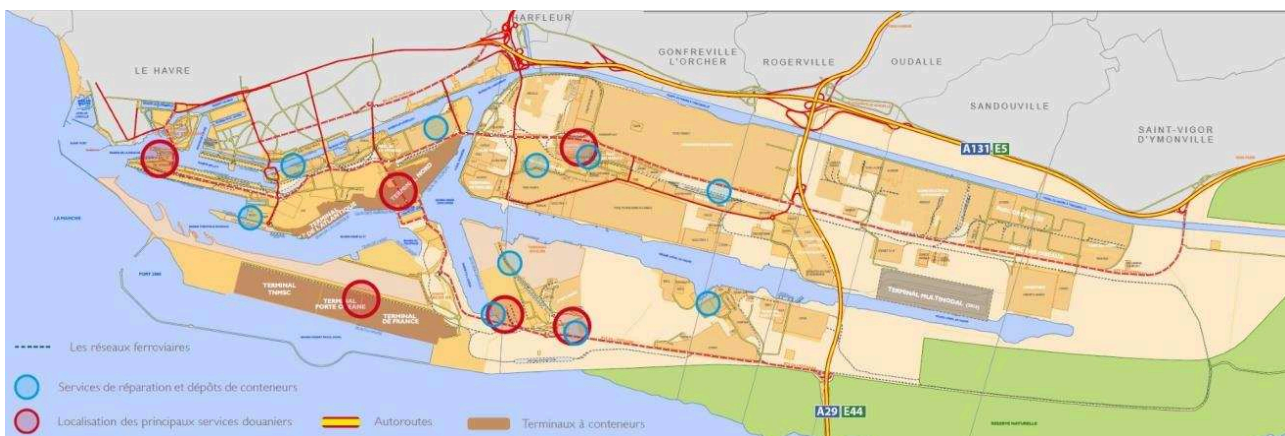


Figure 1.1. 4 Le port du Havre

hectares (figure 1.1.4), il comporte plusieurs plates-formes logistiques et une large zone industrialo-portuaire. Ce port est aussi un port de transbordement et de feederling de par sa position géographique. Il est situé à l'entrée de l'axe de navigation Manche/Mer du nord par lequel transite le quart des échanges maritimes de la planète.

Le port du Havre est connecté à un réseau de transport multimodale par la route, le fluvial et le ferroviaire. Néanmoins, le transport routier constitue la majorité (87%) du trafic de conteneur du port du Havre, au contraire des ports concurrents. Toutefois, le port du Havre reste un hub privilégié de par sa connexion à un arrière-pays (Hinterland) riche (Bassin de Paris) qui représente un nœud de connexion essentiel au niveau du marché français et européen. Récemment, le port du Havre s'est associé aux ports de Rouen et de Paris pour former le 1^{er} ensemble portuaire de France sous le nom HAROPA (HAVre ROUen PARis). HAROPA constitue un GIE (Groupement d'Intérêt Économique) qui ambitionne d'être un guichet unique pour le système de transport et de logistique proposant une offre de service globale de bout en bout. Malgré les qualités de ce port, il lutte pour rester dans le top 10 des ports Européens. L'encouragement du transport massifié, et la réduction des gaz à effet de serre sont considérés comme un atout majeur pour la compétitivité du port.

Le port du Havre dispose de plusieurs terminaux maritimes, principalement pour le transport conteneurisé, le transport de produit en vrac liquides et solides (terminal minéralier, terminal pétrolier, terminal sucrier, etc.) et le transport de voitures et de passagers paquebots. Le trafic de conteneurs est celui qui apporte le plus de bénéfices pour le port, il présente ainsi un fort potentiel de croissance. Les principaux terminaux à conteneurs sont : les terminaux nord (Quais de l'Atlantique, Amériques, Europe), le port 2000 qui comporte le terminal de France (TDF), le terminal de la porte océane (TPO), les terminaux de Normandie associés à Mediterranean Shipping Company (TNMSC) et le terminal multimodale (TMM) récemment inauguré. La figure 1.1.5 montre le classement du port du Havre parmi les ports européens en matière de volume de trafic conteneurisé.

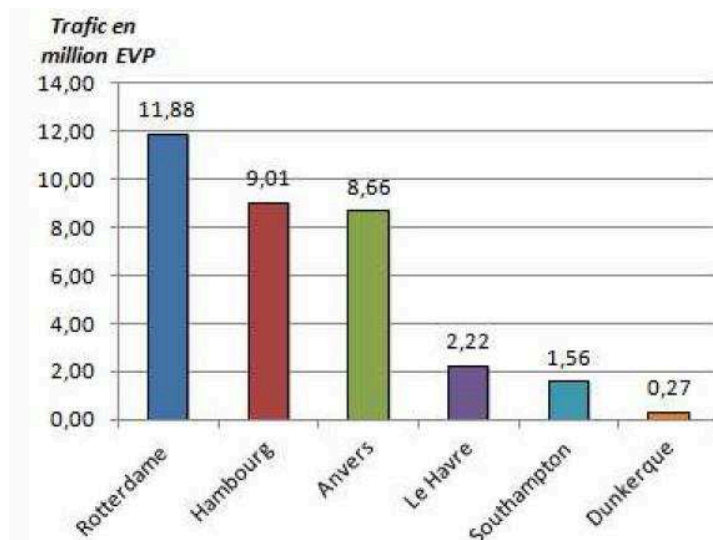


Figure 1.1. 5 Volume de trafic conteneurisé dans les ports du nord d' Europe (2015)

(« Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports » 2015)

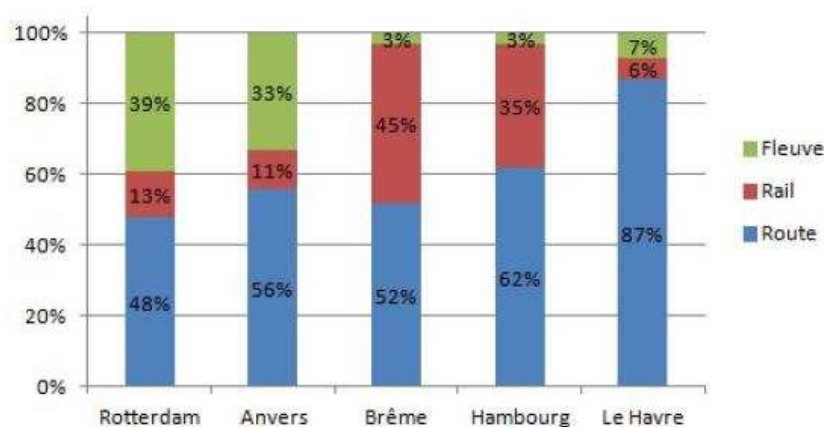
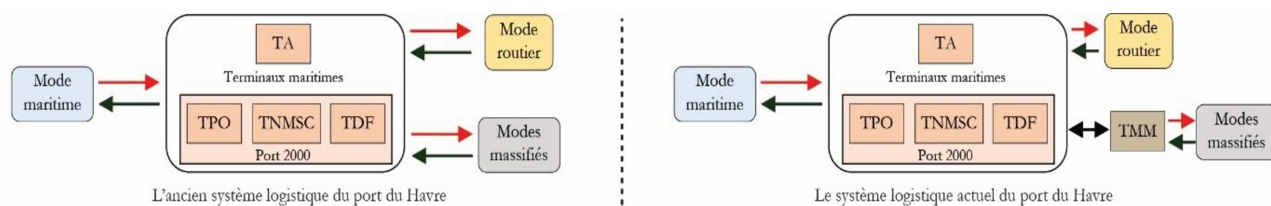


Figure 1.1. 6 Comparatif de la part de trafic modal de conteneurs des ports de la range nord

(« Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports » 2015)

2.3.1. Le terminal multimodal

Le port a investi dans la construction du terminal multimodale (TMM) pour privilégier les modes de transport massifié et équilibrer la répartition modale du trafic de conteneurs. La figure 1.1.6 montre la situation déséquilibrée du port du Havre en faveur du transport routier par rapport aux autres ports concurrents. Mis en service en Juin 2015 avec une capacité de 200.000 conteneurs par an, le TMM vise le développement des flux de transport de conteneurs par le rail et la voie navigable. Le TMM est ainsi une plate-forme intermédiaire qui assure la collecte et la livraison de conteneurs en utilisant une nouvelle gestion des transferts de conteneurs par trains,



- Le flux de conteneurs Import.
- ← Le flux de conteneurs Export.
- ↔ Le transfert de conteneurs.
- TA : Terminal Atlantique.
- TPO : Terminal Porte océane.
- TDF : terminal De France.
- TNMSC : Terminal de Normandie Mediterranean Shipping Company.

Figure 1.1. 8 Ancien et actuel système logistique du port du Havre

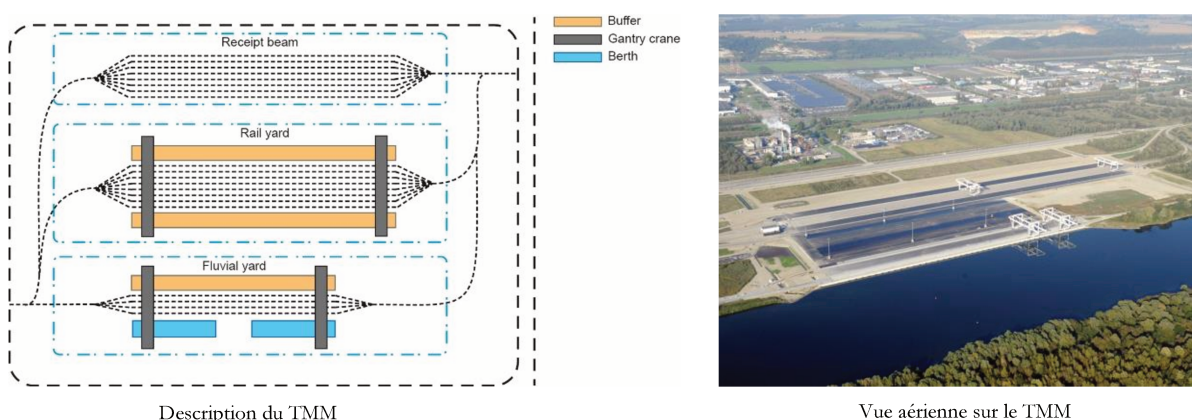


Figure 1.1. 7 Disposition et vue aérienne du TMM

barges fluviales et route. Malgré quelques difficultés opérationnelles, le TMM a traité environ 80.000 conteneurs en 2016 (HAROPA - Ports de Paris Seine Normandie s. d.). Selon Haropa, tous les opérateurs de transport ferroviaires et fluviaux ont désormais basculé leur activité sur le TMM, les conditions sont réunies pour que l'activité se développe. La figure 1.1.7 compare l'ancien et l'actuel système logistique du port du Havre. La figure 1.1.8 montre une vue aérienne ainsi que la disposition du TMM. Pour plus de détails, veuillez se référer à (Leriche et al. 2015) et (Oudani, 2016).

Sur 60 hectares, le TMM comporte une zone de stockage de conteneurs, une cour ferroviaire, une cour fluviale, et un faisceau de réception. La cour ferroviaire se compose de 8 voies ferrées sous portiques et de 2 zones buffer. La cour fluviale se compose d'un quai fluvial équipé de 3 portiques. Le quai fluvial a une capacité de deux postes à quai et comporte 3 voies ferrées est une zone de stockage. Le faisceau de réception se compose d'un faisceau ferroviaire de 6 voies qui accueillent les trains

grandes lignes est servent pour le stationnement des wagons, et un garage de locomotive.

3. La logistique portuaire et la gestion des risques

3.1. La chaîne logistique

Avant de passer à la définition de la chaîne logistique, nous donnons d'abord la signification du terme logistique. Le terme logistique est d'origine grec et vient du mot « logistico » qui signifie administratif. Historiquement, la logistique a émergé du domaine militaire où elle fait référence aux différents techniques qui assurent le ravitaillement et le transport au sein des armées. Vers le début des années quatre-vingts, la logistique est considérée comme un nouveau domaine de recherche (Dornier 2005).

On trouve plusieurs définitions de la chaîne logistique, mais elles partagent de nombreux points communs. La définition la plus populaire est peut-être donnée par Christopher M, dans le livre de Klaus et Muller (Klaus et Müller 2012): *«Le réseau d'organisation impliqué, en amont et en aval, dans les différents processus et activités qui produisent de la valeur sous forme de produits et de services livrés aux clients finaux»*. Selon A-Zouggar (Amrani-Zouggar 2009) : *« La chaîne logistique peut être considérée comme un ensemble d'activités en réseaux dont l'exécution est corrélée par les flux qu'elles échangent, visant à satisfaire au mieux les besoins exprimés par un ensemble de clients »*. On trouve aussi la définition de Cheyroux (Cheyroux 2003) qui définit la chaîne logistique comme suit : *« C'est un réseau de sites, indépendants ou pas, participant aux activités d'approvisionnement, de fabrication, de stockage et de distribution liées à la commercialisation d'un produit ou d'un service »*. L'utilisation du terme « réseau » suggère que les acteurs impliqués dans une chaîne logistique pourraient non seulement effectuer des activités complémentaires, mais également poursuivre des objectifs communs. Une chaîne logistique peut être définie alors comme un réseau constitué par un ensemble d'acteurs participant aux différentes activités et qui collaborent afin d'améliorer leur performance.

3.1.1. La chaîne logistique portuaire

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

La figure 1.1.9 montre les différents acteurs de la chaîne logistique d'un TC :

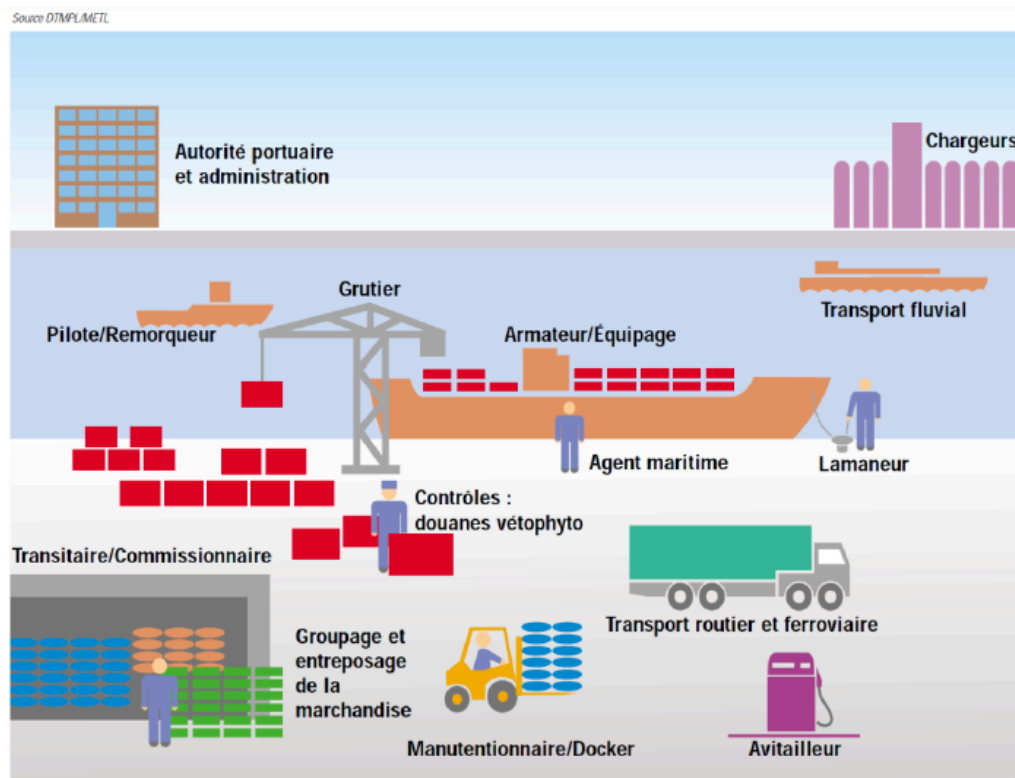


Figure 1.1. 9 Les acteurs de la chaîne logistique portuaire dans un TC (Nidra, 2002)

- Le docker qui se charge et décharge le navire.
- Le transporteur interne qui transporte les conteneurs au sein du terminal.
- L'acconier qui s'occupe de la préparation juridique et matérielle des opérations de réception, de déplacement et d'entreposage des conteneurs.
- L'armateur qui assure le transport maritime des conteneurs.
- Le consignataire qui est mandaté par l'armateur, il agit au nom et pour le compte de l'armateur. Il doit assurer toutes les opérations de réception ou de livraison des conteneurs et ainsi effectuer les missions confiées par l'armateur.

Il y a également d'autres acteurs pour assurer les services liés à la gestion des navires comme :

- les sociétés d'avitaillement ;

- les sociétés de réparation et de maintenance de conteneurs ;
- les entreprises de récupération des déchets des navires.

Enfin, l'opérateur portuaire ou l'autorité portuaire dont la mission consiste à gérer et contrôler le port. Ainsi, l'autorité portuaire contrôle toutes les opérations à l'intérieur du port et prend en compte la gestion des installations portuaires, l'accueil et le départ des navires, et assure le respect des règlements. La chaîne logistique portuaire est donc définie comme un ensemble d'acteurs impliqués directement dans les flux amont et aval de conteneurs.

Les flux en amont et en val de conteneurs définissent l'enchaînement logique du processus de la chaîne logistique portuaire du conteneur. Plusieurs tâches sont combinées afin d'acheminer le conteneur à son client final. La figure 1.1.10 étale les principales taches du processus de pré- et post-acheminements portuaires de conteneurs.

3.1.2. La performance de la chaîne logistique portuaire

La notion de performance a évolué au cours des cinquante dernières années, principalement en raison d'une forte augmentation de la concurrence entre les entreprises. Trois phases principales peuvent être distinguées. De 1945 à 1975, la demande a dépassé l'offre. La performance a été évaluée uniquement avec une perspective de coût. De 1975 à 1990, l'offre s'est équilibrée puis a dépassé la demande.

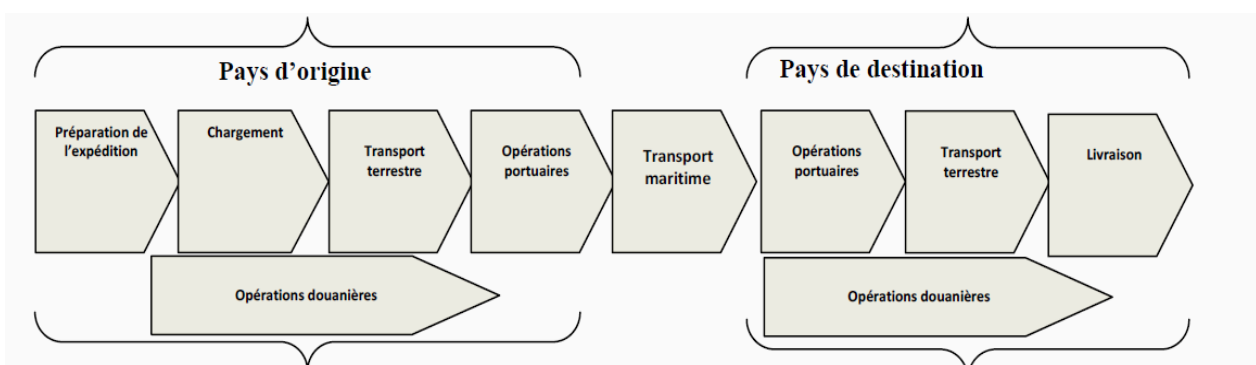


Figure 1.1. 10 Principales taches du processus d'acheminement de conteneurs

La notion de performance a commencé à inclure d'autres critères, tels que la fiabilité, la qualité et le délai de livraison. Depuis 1990 jusqu'à présent, une vision de

performance beaucoup plus large a émergé. Désormais, la notion de performance comprend également des aspects environnementaux et sociaux. Dans la théorie des parties prenantes, (Freeman 2010), qui est une alternative à la vision traditionnelle et au modèle entrée-sortie de l'entreprise, l'entreprise doit satisfaire toutes les parties prenantes qui ont des intérêts coopératifs et concurrentiels. Les parties prenantes comprennent les fournisseurs, les clients, les actionnaires, les employés, les investisseurs, les collectivités, le gouvernement, les créanciers, les médias et la société. Étant donné que l'intérêt des différentes parties prenantes peut souvent diverger, le rendement dépend étroitement de ce qui doit être satisfait. La performance est ainsi devenue une notion relative. Cette caractéristique est clairement présentée dans l'extrait suivant d'un rapport de la Commission du développement durable des Nations Unies : "*Nous mesurons ce que nous valorisons et apprécions ce que nous mesurons*". La notion de performance est ainsi devenue une notion relative qui devrait inclure plusieurs dimensions. C'est dans ce contexte que le concept du Supply Chain Management « SCM » a émergé au cours des années 1980 (Humez 2008). Le concept SCM vise l'amélioration de l'efficacité et de l'efficience dans un contexte stratégique pour obtenir des avantages compétitifs qui rapportent du profit (Mentzer, Flint, et Hult 2001).

De nos jours, la performance de la chaîne logistique portuaire devient un problème majeur pour les autorités portuaire en raison du phénomène de la mondialisation (Botta-Genoulaz 2005). La performance de la chaîne logistique portuaire devrait être évaluée sur chaque tâche de son processus et surtout au niveau des TCs. La performance des TCs dépend des décisions aussi bien stratégiques que tactiques et opérationnelles prises par les gestionnaires de la chaîne logistique portuaire. Comme dans une entreprise, l'enjeu majeur pour un TC est de rester compétitif. Pour atteindre cet objectif, le pilotage des flux de conteneurs à des coûts réduits et la satisfaction des clients par le respect des délais est une nécessité incontournable. Dans ce contexte, la performance d'un TC dépend fortement de la coordination entre ses acteurs qui nécessite une bonne maîtrise du flux opérationnel au sein du TC. D'après (Su et al. 2015), le flux opérationnel dans un TC peut être résumé en quatre flux : (1) L'obtention des informations des compagnies de transport,

y compris la date d'arrivée/sortie des conteneurs et les détails concernant les conteneurs à charger et à décharger, etc.; (2) La planification de la date d'arrivée/départ des navires en fonction de la disponibilité des quais et de la cour, (3) La gestion en temps réel des opérations de manutention au sein du TC et (4) Les rapports de données et l'analyse des informations obtenues à partir des opérations effectuées.

3.1.2.1. Les indicateurs de performance

La notion d'indicateur de performance représente une variable quantifiée et pertinente pour l'évaluation de l'efficacité par rapport à l'objectif, ainsi que le pilotage et l'aide à la prise de décision. Dans le domaine portuaire, et précisément dans les TCs, la performance est traditionnellement évaluée en fonction des indicateurs de trois piliers : Le premier est le pilier opérationnel qui comprend des indicateurs comme les délais et le niveau de service, le deuxième est le pilier économique qui comporte des indicateurs comme les coûts et les investissements, et le pilier environnemental qui comprend des indicateurs comme la consommation des ressources et l'impact écologique. Les indicateurs du pilier opérationnel permettent à l'autorité portuaire de suivre les acteurs assurant le fonctionnement du TC et la planification des opérations à savoir l'allocation des quais au navires, la planification de chargement / déchargement des conteneurs et l'inspection des conteneurs suspects. Les indicateurs du pilier économique permettent d'avoir des informations concernant le rendement financier et les investissements ainsi que le niveau de service. Les indicateurs du pilier environnemental, appelé aussi performance écologique, donne des informations sur l'empreinte écologique d'un TC à savoir les différentes émissions à de gaz à effet de serre. L'impact écologique est aujourd'hui largement pris en compte par les acteurs portuaires afin de protéger les terres, l'air et les eaux (Merk et al. 2011). Le tableau 1.1.2

résume l'ensemble des indicateurs de performance dans un TC que nous avons proposé.

Ces indicateurs de performances cités sont généralement contradictoires, c'est-à-dire qu'il existe un compromis entre l'efficacité opérationnelle, économique, et environnementale (Nahmias et Cheng 2009).

	Critère	Indicateur de performance	Métrique
Pilier Opérationnel	Séjours de navires	Temps d'attente dans le quai	Jour/navire
	Flux de navires	Nombre d'arrivées de navires	Nombre
	Flux de conteneurs	Nombre de conteneurs manutentionnés	Conteneur /heur
	Taux d'inspection des conteneurs	% des conteneurs inspectés	%
Pilier Économique	Performance financière	Coût des opérations	Euro/tonne
	Niveau de service	% des conteneurs délivré a temps	%
Pilier Environnemental	Consommation énergétique	Utilisation d'énergie	Kj/tonne
	Consommation des ressources	Utilisation de matériel	Nombre /tonne
	Réchauffement climatique	Émission de gazes à effet de serre	Kg(CO2) /ton

Tableau 1.1. 2 Les Indicateurs de performance proposés dans un TC (Yann, 2012)

3.2. La gestion des risques

3.2.1. Définitions et terminologie

Avant de passer à la définition de la gestion des risques, on doit d'abord définir le risque. Le dictionnaire Larousse définit le risque comme « *Possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme un mal ou un dommage* ». La notion du risque est liée à des événements indésirables qui peuvent se produire dans le futur. Selon (Khan et Burnes 2007), l'origine du mot risque vient du mot italien « risicar » qui signifie oser .

La notion du risque n'a toujours pas été facile à définir dans la littérature, ainsi elle a fait l'objet de plusieurs interprétations. (March et Shapira 1987) considèrent le risque comme un plan cartésien, avec l'axe x étant les conséquences possibles du risque et l'axe y étant la fréquence du risque. Dans cette définition, les éléments majeurs du risque sont sa fréquence (ou sa probabilité divisée par le nombre total d'occurrences) et ses conséquences (ou sa sévérité). Wu (T. Wu, Blackhurst, et Chidambaram 2006) donne une autre définition du risque à savoir que « *le risque ne peut exister sans faire référence aux butes, attentes, et contraintes associés à un projet* ». Cette définition est plus proche et pratique pour le monde des affaires et des entreprises. D'autres définitions lient le risque aux incertitudes. Selon (Al-Bahar et Crandall 1990), l'incertitude est à l'origine du risque. Ainsi leur définition du risque est « *la chance d'exposition à un événement qui affectera défavorablement ou positivement des objectifs en conséquence d'incertitude* ». Le risque est défini selon l'ISO 31000 comme l'effet de l'incertitude sur les objectifs et la génération d'un écart positif ou négatif par rapport à ce qui est attendu.

Cette définition reconnaît que nous tous opérons dans un monde incertain. Chaque fois que nous essayons d'atteindre un objectif, nous n'obtenons pas toujours les résultats attendus. Parfois, nous obtenons des résultats positifs et parfois nous obtenons des résultats négatifs et parfois nous obtenons les deux. Pour cette raison, nous devons réduire l'incertitude autant que possible. L'incertitude (ou le manque de certitude) est un état ou une condition qui implique une déficience de l'information et conduit à une connaissance ou une compréhension insuffisante ou incomplète.

Dans le contexte de la gestion des risques, l'incertitude existe chaque fois que la connaissance ou la compréhension d'un événement, d'une conséquence ou d'une probabilité est insuffisante ou incomplète. Toutefois, nous estimons qu'un risque qui pourrait apporter des conséquences positives doit être considéré comme une opportunité et non pas un risque. (Su et al. 2015; Kaplan et Garrick 1981) préconisent ce même point de vue en définissant le risque comme une incertitude qui génère des dommages. Ceci indique clairement que l'incertitude n'entraîne toujours pas un risque, à moins que l'incertitude elle-même ne soit préjudiciable. Ainsi nous adoptons

la définition du risque comme les dommages aux objectifs planifiés qui peuvent être générés par les conséquences négatives de l'incertitude.

La gestion des risques, comme elle peut être interprétée directement, est la façon de gérer les incertitudes résultant à des conséquences préjudiciables. Puis, on trouve plusieurs définitions dans la littérature. Paté-Cornell (Paté-Cornell 2012) définit la gestion des risques comme « *la prise de décisions sous l'incertitude qui peut être atténuée par l'analyse décision* ». En outre, Hubbard (Hubbard 2009) utilise une phrase simple pour définir l'objectif de la gestion des risques, soit « *saisir intelligemment ses chances* ». Shang et Tseng (Shang et Tseng 2010) considèrent que l'objectif principal de la gestion des risques est de développer un système de contrôle de risque. Ils préconisent que les entreprises doivent mesurer la fréquence et la gravité des dommages probables, prendre des mesures préventives, et de ne pas négliger les risques au niveau de la gestion financière.

Sung (Sung, 2005) définit quant à lui la gestion des risques comme l'utilisation de ressources limitées pour minimiser les répercussions. Dans cette définition, les ressources sont prises en considération dans la gestion des risques. C'est le résultat du fait que les ressources (humaines, matérielles, en temps, ou financières) ne sont pas infinies. Haimès et al, (Haimès, Kaplan, et Lambert 2002) définissent la gestion des risques comme l'identification des options de traitement des scénarios de risques tout en estimant le coût et l'impact sur la performance. Ward (Ward 2003) définit quant à lui la gestion des risques comme l'amélioration de la performance organisationnelle à travers l'identification et l'évaluation des risques qui impactent la performance. Les définitions préconisées par Sung, Haimès et al, et Ward abordent les facteurs de ressources, de coût, et de performance. Ainsi, la définition qu'on adopte est que la gestion des risques est l'art de maîtriser et de réduire le risque à un niveau acceptable, tout en utilisant une quantité raisonnable de ressources qui ne freinera pas l'accomplissement des objectifs de l'organisation.

Il existe plusieurs notions liées à la terminologie du risque, qui ont des sens très proches mais contrairement à ce qu'on pense généralement, elles ne sont pas interchangeables. Il est donc important d'expliquer chaque terme.

Menace : c'est l'intention de nuire à la santé de quelqu'un ou d'infliger des dommages matériels à une entité selon la définition de Wikipédia (« Menace » 2016). En d'autres termes, c'est la manifestation d'une violence qui laisse prévoir quelque chose de dangereux et de nuisible (définition du dictionnaire Larousse).

Danger : une menace susceptible d'altérer significativement l'intégrité d'un événement ou d'une situation. C'est une propriété qui caractérise une source potentielle de dommage avec sa faible probabilité d'occurrence.

Aléas : tournure imprévisible/imprévue d'un événement ou d'une activité. Un aléa est aussi défini comme la probabilité spatio-temporelle d'une occurrence d'un danger.

Préjudice : dommage causé aux biens ou atteinte portée aux droits, aux intérêts, au bien-être de quelqu'un (définition du dictionnaire Larousse).

Enjeu : concerne toute entité ou éléments qui sont soumis à des préjudices potentiels présents dans une zone à risque. L'enjeu est étroitement lié aux degrés de l'exposition et de la vulnérabilité face à la survenance d'un risque.

Risque : Généralement, il est présenté comme la coexistence d'un aléa et d'un enjeu « risque = aléa * expositions des enjeux * vulnérabilités des enjeux ». L'exposition est la disposition des enjeux par rapport à l'aléa, c'est-à-dire, est ce qu'ils sont près ou loin de la zone touchée par le risque. Tandis que la vulnérabilité est définie par le degré de dommages apportés aux enjeux et par la résistance des enjeux à l'aléa. Par exemple, une inondation fluviale (Menace, Risque), l'aléa (Danger) est la crue du cours d'eau, les enjeux sont les personnes et les biens qui sont établis sur ses rives et donc exposés à l'effet de la crue (l'exposition), enfin la vulnérabilité se mesure particulièrement à la hauteur, à la solidité et à l'étanchéité des immeubles face au débordement (« Risque majeur » 2017).

Prévention : consiste à spécifier des mesures destinées à minimiser la probabilité d'occurrence du risque par l'élimination de ses causes et le traitement de ses conséquences.

Sûreté : est la résistance d'un système face aux risques issus d'actions volontaires engagées par des acteurs externes dont le but est de contourner ses mesures de contrôles.

Sécurité : contrairement à la sûreté, la sécurité porte sur la prévention des événements accidentels non intentionnels issus du fonctionnement interne d'un système caractérisé par un danger potentiel qui peut affecter son environnement.

3.2.2. Standards pour la gestion des risques

Les entreprises sont exposées à divers risques financiers, opérationnels, stratégiques, ou autres, qui sont susceptibles d'affecter l'accomplissement de leurs objectifs. Ainsi, la nécessité de gérer de façon efficace les risques s'est imposée. Depuis le milieu des années 1990, la gestion des risques, communément appelé ERM (Enterprise Risk Management), est devenue un concept et une fonction de gestion au sein des entreprises. Ensuite, l'ERM a intéressé plus de praticiens et de chercheurs. Dans la pratique, l'ERM reçoit également beaucoup d'attention en réponse à la nécessité de sa mise en œuvre. En conséquence, un certain nombre de standards et frameworks ont été développés, tels que celui de l'*International Standard Organisation* (ISO) ISO 31000. Parmi les standards, nous pouvons citer :

ISO 31000 : L'ISO 31000 est une famille de normes relatives à la gestion des risques proposé par le groupe de travail du conseil de gestion technique de l'ISO sur la gestion des risques. Cette norme n'est pas destinée aux certifications. L'objectif de l'ISO 31000: 2009 est de fournir des principes et des directives génériques sur la gestion des risques. L'ISO 31000 cherche à fournir un paradigme universellement reconnu aux praticiens et aux entreprises qui utilisent des processus de gestion des risques pour remplacer la myriade de normes, méthodologies et paradigmes existants qui diffèrent selon les industries, les matières et les régions. L'ISO 31000 est essentiellement inspiré de la norme AS/NZS 4360:2004.

Les deux principaux composants du processus de gestion des risques ISO 31000 sont les suivants :

- Le cadre de travail (*framework*) qui guide la structure générale et le fonctionnement de la gestion des risques dans une organisation. Le cadre de travail ISO 31000 reflète le cycle PDCA (plan, do, check, act). La norme stipule toutefois que « *Ce cadre ne vise pas à prescrire un système de gestion, mais plutôt à aider l'organisation à intégrer la gestion des risques dans son système global de gestion* ». Cette déclaration devrait encourager

les organisations à être flexibles dans l'intégration des éléments du cadre au besoin. Les principaux éléments de ce cadre de travail comprennent : La politique et la gouvernance qui démontrent l'engagement de l'organisation ; La conception de programme pour la gestion des risques de façon continue ; La mise en œuvre de la structure et le programme de gestion des risques ; Le suivi et examen de la structure et de la performance du système de gestion ; L'amélioration continue de la performance du système global de gestion.

- Le processus d'évaluation des risques, qui décrit la méthode réelle d'identification, d'analyse et de traitement des risques. Le processus réel d'évaluation des risques nécessite d'abord la définition de ce que l'ISO 31000 appelle le « contexte ». Le contexte est une combinaison des environnements externe et interne, tous deux considérés par rapport aux objectifs et aux stratégies de l'organisation. Les autres étapes du processus d'évaluation impliquent le développement de techniques pour identifier, analyser et évaluer des risques spécifiques. Bien que plusieurs méthodes et techniques documentées existent, tous devraient inclure les éléments clés suivants :
 - Identification des risques : Identification des sources d'un risque particulier, domaines d'impact et événements potentiels, y compris leurs causes et conséquences ; Classification de la source comme interne ou externe
 - Analyse de risque : Identification des conséquences potentielles et des facteurs qui influent sur les conséquences ; L'évaluation de la probabilité ; L'identification et évaluation des contrôles actuellement en place.
 - Évaluation du risque : Comparaison des risques identifiés avec les critères de risque établis ; Les décisions prises pour traiter ou accepter les risques en tenant compte des exigences internes, juridiques, réglementaires et externes des parties.

IEEE 1540:2001: Cette norme, proposée par l'*Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE), décrit un processus de gestion des risques lors de l'acquisition, de l'approvisionnement, du développement, des opérations et de la maintenance du logiciel. L'IEEE 1540 :2001 donne un aperçu et décrit le but, la portée et le champ d'application, ainsi que la prescription des critères de conformité. Elle décrit comment

la gestion des risques peut être appliquée au cycle de vie du logiciel et prescrit les exigences pour un processus de gestion des risques. Bien que la norme soit écrite pour la gestion du risque dans les projets logiciels, elle peut également être utile pour la gestion des risques au niveau des systèmes et des organisations.

IEC 62198:2013: La *International Electrotechnical Commission* (IEC) propose la norme IEC 62198: 2013 qui fournit des principes et des lignes directrices génériques sur la gestion des risques et de l'incertitude dans les projets. En particulier, il décrit une approche systématique de la gestion des risques dans les projets basés sur l'ISO 31000. Des conseils sont fournis sur les principes de gestion des risques dans les projets, le cadre et les exigences organisationnelles pour la mise en œuvre de la gestion des risques et le processus de gestion efficace des risques. Cette norme n'est pas destinée aux certifications. La deuxième édition de cette norme est maintenant alignée sur ISO 31000.

3.2.3. Processus de gestion de risque

La gestion du risque a pour objectif de passer d'un risque inacceptable vers un risque acceptable. Ceci est effectué à travers un processus contenant plusieurs étapes exécutées dans un ordre précis. Bien avant l'émergence du standard ISO 31000, il existait une multitude de processus de gestion des risques dans la littérature (Su et al. 2015). Par exemple, (Eloff, Labuschagne, et Badenhorst 1993) décrivent la gestion des risques en proposant un modèle simple et générique sous forme d'un cycle continue comprenant cinq principales étapes : l'identification du risque, l'analyse du risque, l'évaluation du risque, la résolution du risque et la surveillance du risque. Un autre modèle de gestion de risque a été développé par (Tummala et Mak 2001) et consiste en cinq principaux éléments : L'identification du risque, la mesure du risque, l'estimation du risque, l'évaluation du risque, et la surveillance du risque. Ce modèle est très similaire à celui proposé par (Leung, Santos, et Haimés 2003). Toutefois, les deux étapes, l'analyse du risque et l'évaluation du risque, sont parfois combinées en une seule étape dans d'autres travaux comme (Leung, Santos, et Haimés 2003), tandis que d'autres travaux combinent les étapes d'analyse du risque et la mesure du risque dans l'étape d'analyse du risque. De même, (Al-Bahar et Crandall 1990) ont proposé un

nouveau modèle pour la gestion des risques pour les projets de construction. Leur modèle se compose de quatre étapes : L'identification du risque, l'analyse du risque et l'évaluation du risque.

En se basant sur les modèles discutés, on peut conclure que l'identification du risque est une étape primordiale dans la gestion du risque. Sans une bonne compréhension du risque, on ne peut gérer le risque. Néanmoins, il y a un consensus sur les étapes d'identification, d'évaluation et de traitement des risques, préconisé par le standard ISO 31000. Par contre, l'ISO 31000 fait abstraction sur la mise en œuvre du processus de gestion de risque. Ainsi, il faut appliquer l'approche adéquate pour chaque cas d'étude. Dans ce qui suit, nous fournirons les détails de la mise en œuvre des trois principales étapes de l'ISO 31000.

3.2.3.1. Identification du risque

L'objectif principal de la gestion de risque est de déterminer les incertitudes futures pour pouvoir anticiper les éventuels scénarios à risque. Ainsi, un risque ne peut être maîtrisé que s'il a été correctement identifié. L'étape de l'identification du risque est critique dans la gestion des risques.

Cette étape vise à décrire et analyser en profondeur les causes et conséquences du risque. L'identification demande une connaissance solide de l'organisation, ses ressources, et de son environnement juridique, social, politique et culturel, mais aussi, une compréhension précise des objectifs opérationnels et stratégiques.

L'identification des risques demande également une approche méthodique afin de garantir l'identification de toutes les activités de l'organisation et de chaque risque qui en découle. Pour faciliter la tâche d'identification du risque, le standard ISO 31000 a défini les questions suivantes :

- Qu'est ce qui peut générer des risques, quand et où ?
- Pourquoi et comment, ces risques sont générés ?
- Quels sont les outils et les techniques adéquats pour identifier les risques ?

Il existe d'autres méthodes et techniques d'identification des risques. Hillson (Hillson 2006) les catégorise en trois groupes :

- Méthodes basées sur l'analyse des situations à risques déjà arrivées

- Méthodes basées sur l'analyse de situations actuelles afin de relever les risques
- Méthodes créatives qui incitent la réflexion à travers un brainstorming sur les éventuels risques.

Le brainstorming reste l'un des méthodes les plus utilisées dans l'étape de l'identification des risques (T. Wu, Blackhurst, et Chidambaram 2006). Toutefois, la réussite du brainstorming dépend fortement des connaissances et de l'expérience des membres participants.

Certains travaux comme (T. Wu, Blackhurst, et Chidambaram 2006) parlent de description des risques qui facilite l'évaluation des risques. La description des risques consiste à structurer les risques identifiés sous forme d'un tableau afin d'assurer que les risques identifiés ont été décrits avec précision.

3.2.3.2. Évaluation du risque

Consiste à hiérarchiser et comparer les risques identifiés selon leur importance, c'est-à-dire, mesurer le niveau des risques et les traiter par ordre de priorité. En particulier, les risques seront quantifiés au niveau de leur gravité, probabilité d'occurrence et leur impact. Ainsi, il existe deux approches principales : l'approche quantitative et l'approche qualitative. Le choix de l'approche dépend de plusieurs facteurs, à savoir, la complexité du risque et son niveau de détail ainsi que la quantité et la qualité des données relatives au risque.

Approche quantitative

L'évaluation quantitative du risque cherche à quantifier les risques en se basant sur des valeurs numériques associées à la probabilité de l'occurrence et aux conséquences du risque. Généralement, l'évaluation quantitative du risque se base sur le calcul de la relation entre la probabilité de défaillance (PoF, probability of failure) et les conséquences de défaillance (CoF, consequence of failure) calculé par la formule suivante :

$$\text{Risque} = \text{PoF} \times \text{CoF}$$

Dans la littérature (Jovanovic 1982) propose un framework destiné à l'industrie énergétique fournissant une méthode pour déterminer efficacement le PoF. En outre, (Yong Bai et Bai 2014) propose une modélisation des CoF pour l'industrie

pétrolière. Le PoF et les CoF peuvent être aussi caractérisés par des modèles de distribution mathématiques comme la distribution binomiale. Toutefois, cette caractérisation dépend principalement des statistiques et des connaissances en relation avec le risque.

Approche qualitative

L'approche de l'évaluation qualitative quantifie le risque en se basant sur des valeurs subjectives qui estiment la probabilité et l'impact du risque. Elle remplace l'approche quantitative lorsque la quantification numérique est inefficace à cause de manque d'information par exemple. C'est ainsi que l'approche qualitative s'avère adéquate en cas d'insuffisance de donnée permettant une analyse numérique du risque. Cette approche utilise des catégories pour quantifier la probabilité du risque ainsi que l'impact du risque. Il n'existe pas un standard qui définit le choix de ces catégories, mais elles sont généralement définies en se basant sur l'expérience. Les catégories utilisées pour quantifier la probabilité d'occurrence de risque les plus utilisés sont :

- Très fréquente
- Fréquente
- Modérée
- Occasionnelle
- Improbable
- Très improbable

Les catégories utilisées pour quantifier l'impact de risque les plus utilisés sont :

- Majeur
- Critique
- Grave
- Significatif
- Négligeable

Généralement, l'évaluation qualitative du risque aboutit à une matrice de classification qualitative du risque. Cette matrice, nommée aussi matrice de criticité, donne une vue détaillée sur le risque.

3.2.3.3. Traitement du risque

Le traitement du risque porte sur la spécification et l'implémentation des mesures capables de minimiser le risque, mais avant il faut déterminer un seuil de tolérance, *i.e.*, à quel niveau un risque est acceptable ? L'acceptabilité du risque est une notion subjective. Généralement dans les organisations, c'est la direction qui définit le seuil d'acceptabilité du risque. Toutefois, plusieurs méthodes sont utilisées comme outils d'aide à la décision pour définir le seuil d'acceptabilité. On trouve notamment la méthode de la courbe d'acceptabilité qui peut être déterminée par le diagramme de Farmer (Desroches, Baudrin, et Dadoun 2009). Le diagramme de Farmer a comme abscisse la gravité des conséquences du risque, et comme ordonnée la probabilité du risque.

3.2.3.4. Méthodes de gestion des risques

Les méthodes de gestion de risque ne contiennent pas forcément les trois principales phases du processus de gestion des risques à savoir l'identification, l'évaluation et le traitement des risques. Ces méthodes peuvent comporter une seule phase, deux ou l'ensemble des trois phases (Gningue 2011). Ainsi, selon (Desroches, Baudrin, et Dadoun 2009) ces méthodes peuvent être classifiées selon le type de données utilisées (qualitatives ou quantitatives), le type de raisonnement (déductive ou inductive), et la dynamique de l'approche (statique ou dynamique). Dans le travail de Tixier (Tixier et al. 2002) on trouve deux principales classes de méthodes, soit les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. Toujours selon Texier, chaque classe est divisée en sous classe, soit les méthodes déterministes, méthodes probabilistes, ou méthodes hybrides. D'autres travaux comme (P. K. Marhavidas, Koulouriotis, et Mitrakas 2011; P. K. Marhavidas et Koulouriotis 2012) proposent un classement sous deux catégories : La première catégorie est celle des méthodes déterministes qui englobe les méthodes qualitative, quantitatives et hybrides , et la deuxième catégorie celle de méthodes stochastiques qui englobe les méthodes statistiques classiques et le méthodes de modélisation de prévision des accidents. Dans ce travail, on a choisi la classification proposée par Marhavidas et ainsi nous nous contentant de présenter les méthodes déterministes en relation avec l'évaluation des risques.

Méthodes quantitatives

L'objectif principal des méthodes quantitatives d'analyse de risque est d'obtenir des résultats sous format numériques qui reflètent la probabilité du risque et de ses conséquences (Petru 2013). Les méthodes quantitatives dépendent fortement de la disponibilité des données pour réaliser une évaluation quantitative. La qualité des données et les ressources sont aussi des facteurs importants pour les méthodes quantitatives. Les méthodes quantitatives présentent généralement les résultats sous forme d'indicateurs (Rot 2008). Le tableau 1.1.3 présente les méthodes quantitatives de gestion des risques les plus connus.

Méthodes qualitatives

Les méthodes qualitative de gestion des risques ont pour objectif d'évaluer les facteurs de risque identifiés en se basant sur leur impact qu'ils peuvent avoir (Petru 2013) . Ces méthodes n'utilisent pas des données numériques et elles sont caractérisé par l'utilisation d'index subjectives. Les résultats sont sous forme de description. L'utilisation d'experts pour une évaluation de risque qualitative est conseillée

Type	Méthodes/Framework	Domaine d'application
Quantitative	ISSRM (Information System Security Review Methodology)	Les organisations gouvernementales et leurs systèmes d'informations (Azuma 2008)
	PRAT (Proportional Risk Assessment Technique)	L'évaluation proportionnelle du risque est utilisée pour évaluer la sévérité des risques et leurs fréquences d'occurrence (P. K. Marhavilas, Koulouriotis, et Mitrakas 2011).
	QRA (Quantitative Risk Assessment)	L'évaluation quantitative du risque est appliquée dans le domaine d'industrie nucléaire (Pasman et renies, 2013)
Qualitatives	WRA(Weighted Risk Analysis)	L'analyse des risques pondérés est utilisée pour comparer plusieurs risques en se basant sur une seule dimension (Suddle 2009).
	FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)	L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets est appliqué au domaines d'ingénierie et d'industrie militaire pour identifier les sources de danger (F. I. Khan et Haddara 2003).
	Check-list	Les listes de control sont applicable dans tous les domaines où l'intervention humaine est majeur (P.-K. Marhavilas, Koulouriotis, et Gemeni 2011).
	HAZOP (HAZard and OPerability study)	Appliqué dans l'industrie afin d'analyser un le risque pour le personnel ou les équipements (Crawley et Tyler 2015).
Hybrides	SURE (Stakeholder Uniplanar Risk Evaluation)	L'évaluation uni planaire des risques relatives aux intervenants est appliquée dans le gestion des risques opérationnelle dans les terminaux a conteneurs (Su et al. 2015).
	HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point)	L'analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise est une méthode appliqué dans le domaine agro-alimentaire pour maîtriser la sécurité sanitaire (Mortimore et Wallace 2013).
	AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, Effets et Conséquences)	L'AMDEC est utilisée pour l'évaluation des risques liée aux défaillances dans les processus et les produits (Teoh et Case 2004).

Tableau 1.1. 3 Description des méthodes déterministes de gestion des risques.

(Coleman et Marks 1999). Le tableau 1.1.3 présente les méthodes qualitatives de gestion des risques les plus connus.

Méthodes hybrides

Entre l'évaluation de risque quantitative et qualitative, il y'a l'évaluation hybride ou semi quantitative de risque. Dans certain cas, les seules données disponibles sont issues d'opinions d'experts. Alors que dans une analyse purement quantitative des risques, toute information ignorée peut engendrer des résultats erronés (Altenbach 1995). Afin d'augmenter le taux d'utilisation des résultats comparatifs (Gningue 2011), beaucoup de méthodes hybrides ont été proposé. Ces méthodes se basent souvent sur méthodes qualitatives, mais se réfèrent aux méthodes quantitatives soit à l'axe des fréquences des risques, soit à l'axe des conséquences des risques, ou les deux (Gningue 2011).

3.3. La gestion des risques dans les terminaux à conteneurs

3.3.1. Le risque dans les terminaux à conteneurs

D'après (Su et al. 2015), la majorité des travaux dans la littérature concernant les TCs a tendance de traiter le côté opérationnel et l'amélioration l'efficacité (Cullinane et al. 2006). Un domaine qui a reçu moins d'attention est la gestion du risque dans un TC. L'une des rares études de ce genre a été effectuée au Taiwan (Shang et Tseng 2010) sur la gestion du risque et la sûreté dans un TC. En pratique, chaque TC dispose d'un département de sécurité qui assure l'organisation et l'application des précautions de sécurité. Toutefois, il n'y a aucune stratégie structurée ou des outils ou systèmes qui ont été développés pour la gestion des risques dans un TC. Toutefois les risques liés aux TCs peuvent être désastreux et catastrophiques. En 2003, le port Busan en Corée du sud a été gravement impacté par un ouragan. Onze gigantesques grues de quai se sont effondrées et n'ont pas pu être remises en service. Cette catastrophe n'a pas généré uniquement des pertes matérielles, mais aussi des pertes financières énormes en impactant la compétitivité du port. Avec le grand nombre de risques auxquels un TC est confronté, (Su et al. 2015) a résumé ces risques en six catégories :

a) Catastrophe naturelle: Les catastrophes naturelles incluent les ouragans, les tremblements de terres, les tsunamis, les inondations, etc. Ce type de risque n'est pas causé par l'homme, et d'habitude imprévisible. Comme les conséquences peuvent

parfois être dévastatrices, certains de ces risques sont considérés comme des cas de force majeure et sont exclus de nombreuses assurances. Ainsi, les TCs assument seuls les conséquences.

b) Accident causé par un événement externe : Un événement externe se réfère aux incidents involontairement causés par une personne ou une partie externe. Par exemple, un navire entre en collision avec la structure du quai ou un véhicule s'écrase dans la passerelle du terminal. Ce type de risque est causé par le facteur humain, et la prévision préalable de tels accidents n'est pas possible. Les incidents causés par des clients tels que les compagnies d'expédition doivent également être classés dans cette catégorie. Par exemple, le transport de la matière dangereuse non déclarée ou le trafic illicite et contrebande.

c) Accident causé par le personnel : Le facteur humain peut être à l'origine de déclenchement des événements indésirables au niveau des ports, Lu et Yang (Lu et Yang 2010). Ce type de risque est causé directement ou indirectement par le personnel employé par le TC. Par exemple, la chute des conteneurs empilés causée par une mauvaise manipulation d'un opérateur de l'équipement. La conséquence de ce type de risque est plus imminente. Outre les conséquences financières, le TC pourrait également être assujéti à des obligations légales.

d) Défaillance des équipements : Le fonctionnement d'un TC implique de nombreux équipements, tels que des grues de quai, des grues à portique, des chariots cavaliers et autres. La défaillance des équipements est inévitable, même s'il existe de bons systèmes de maintenance préventive. Une fois qu'un équipement est hors usage, il n'est pas facile de trouver un remplacement immédiat, en particulier pour les grues de quai et les grues à portique. Les conséquences de ce type de risque sont le coût élevé de réparation et de maintenance et les plaintes fréquentes des clients, qui peuvent éventuellement provoquer une perte de compétitivité.

e) Défaillance du système d'information : L'exploitation de TCs se base sur le système d'information afin d'améliorer l'efficacité, de réduire la main-d'œuvre et de faciliter la communication avec d'autres acteurs, tels que les clients et les douanes. Avec le grand

volume de conteneurs à manipuler chaque jour, la défaillance du système d'information d'un TC peut être désastreuse. La fiabilité et la sécurité du système en conséquence sont l'un des principales tâches de gestion des risques dans les terminaux à conteneurs.

f) Problèmes sociaux : Outre les accidents induits par le personnel mentionné dans le point (c), les personnes qui travaillent dans un TC peuvent causer un autre risque sous forme de mouvement sociale, généralement motivé par les conditions de travail. En se reportant au point (e), même avec un système informatique sophistiqué en place, un TC nécessite encore des centaines, voire des milliers, de travailleurs, comme les opérateurs de grues, des tracteurs. Les syndicats qui soutiennent ces mouvements sociaux et grèves sont présents dans tous les TC importants. Les mouvements sociaux et grèves constituent donc une menace importante pour les opérations des TC et leurs actes sont séparés des accidents involontaires tels que définis au point (c).

3.3.2. Gestion des risques dans un terminal à conteneurs

Le transport de marchandises par conteneur est efficace et économique mais il est aussi vulnérable aux intrusions et au détournement de son fonctionnement (Dahlman et al. 2005). Par exemple, un conteneur peut subir une modification de son contenu pour un trafic de marchandises illicites (drogues, armes, ...), en effet, selon (Orphan et al. 2005), le risque potentiel d'une attaque terroriste impliquant un conteneur est considérable, de plus elle peut causer un arrêt total de la chaîne logistique globale. En analysant les archives des incidents maritimes liés aux conteneurs de matières dangereuses entre 1998 et 2008, (Ellis 2011) a identifié que 91% des causes qui ont contribué à ces accidents sont liées à des opérations de packaging et de chargement des marchandises des conteneurs avant l'arrivée du conteneur au port. En revanche, les organismes qui sont derrière ces actes illicites utilisent souvent l'arme de la corruption et font preuve de beaucoup d'innovation pour prendre une longueur d'avance sur les autorités. D'ailleurs, la structure réticulaire et la répartition géographique de ce réseau de transport criminel rendent la distinction des conteneurs à haut risque plus difficile, en effet, des sociétés de transport de conteneurs se cachent

derrière des activités honnêtes et localisées dans des importants centres financiers (Londres, Hong-Kong), peuvent tromper la vigilance des autorités portuaires.

3.3.2.1. Le ciblage des conteneurs à risque

Le processus de ciblage et d'inspection des conteneurs est considéré comme la principale mesure pour détecter les conteneurs transportant des marchandises illicites (NAJIB 2014). Cependant, jusqu'au l'attaque du 11 Septembre 2001, les chercheurs et les organisations internationales n'ont pas pris au sérieux la sécurité des TCs, notamment le ciblage et l'inspection des conteneurs à risque. Les événements du 11 septembre ont poussé activement la communauté scientifique et les organismes de normalisation à examiner et mettre à jour les normes de sécurité existantes et à introduire de nouvelles normes. Ainsi, les organismes internationaux et les industriels ont proposé plusieurs codes et initiatives pour améliorer la sécurité du transport maritime et des plates-formes portuaires. Les auteurs dans (UNCTAD 2016), (Zopounidis et Pardalos 2013), (Orphan et al. 2005) ont détaillé les principales normes de sécurité introduites après le 11 septembre. Papa (Papa 2013) a présenté une comparaison entre les différentes initiatives de sécurité prises aux États-Unis et en Europe et donne une description détaillée de chaque initiative. Parmi ces initiatives nous citons, l'initiative de sécurité des conteneurs (CSI - Container Security Initiative), le code international pour la sûreté des navires et des installations portuaires (ISPS), le C-TPAT (Customs Trade Partnership Against Terrorism). Le tableau 1.1.4 présente une liste des principales normes et initiatives de sécurité proposées ou révisées.

Standard / Initiative	Année
Customs Trade Partnership Against Terrorism (C-TPAT)	2001
Container Security Initiative (CSI)	2002
Maritime Transportation Security Act (MTSA)	2002
The International Code for the Security of Ships and Port Facility (ISPS)	2004
Protocol of 2005 to the Convention for the Suppression of Unlawful Acts (SUA)	2005
Megaport Initiative	2010
H.R.1(House Resolution One) « 100% scanning»	2012

Tableau 1.1. 4 Liste des standards et initiatives relatives à la sécurité des TC

Le partenariat C-TPAT entre les services des douanes et du commerce pour lutter contre le terrorisme, vise à inciter les participants à mettre en œuvre des politiques, des plans et des procédures propres à assurer l'intégrité de l'ensemble de leur chaîne logistique (Gningue 2011). Les compagnies C-TPAT bénéficient d'une réduction de la probabilité d'inspection de leurs expéditions au niveau des ports américains et des procédures douanières accélérées. Toutefois, l'initiative la plus liée à la sécurité des conteneurs est la CSI. Cette initiative préconise l'identification et l'inspection des conteneurs suspects avant leur expédition aux États-Unis. Le Service des douanes et de la protection des frontières des États-Unis (en anglais U.S. Customs and Border Protection ou CBP) en collaboration avec l'organisation mondiale des douanes (OMD), sont derrière la mise en œuvre du CSI. La CBP s'appuie sur diverses ressources d'information pour cibler les conteneurs à haut risque. Plus précisément, la CBP a établi les règles 10 + 2 (CBP 2009) qui demandent aux importateurs de fournir 10 éléments de données, tels que le pays d'origine, et deux éléments de données sur le navire transporteur, tels que la position du conteneur dans le navire. La CBP utilise un système automatisé de ciblage appelé ATS (Automatic Targeting System) (GAO 2007). ATS est un outil d'aide à la décision pour aider à cibler les conteneurs pour leur inspection. Il utilise des règles pondérées pour attribuer un score de risque aux conteneurs.

Cependant, les normes et les initiatives de sécurité citées ne détaillent pas leurs mises en œuvre et applications et n'évaluent pas l'incidence de leur intégration sur la performance des TCs (Longo 2010). Par exemple, la CSI ignore les méthodologies d'établissement et l'évaluation de leur impact sur la compétitivité des TCs. (Najib, Fazziki, et Boukachour 2014) proposent une simulation du processus d'inspection des conteneurs avec un pourcentage d'inspection différent, et ils ont utilisé le temps de livraison des conteneurs comme l'un des indicateurs de performance. (Lewis, Erera, et White III 2003) proposent une approche heuristique du compromis entre les inspections des conteneurs et l'heure de départ des navires. Une étude sur l'impact de la mise en œuvre de la loi du scanning à 100% sur les douanes de l'Union Européenne a été menée par (Carluer, Yann, et Olivier 2008). Les contraintes d'infrastructure portuaire et des ressources douanières ainsi que la mesure des coûts directs et indirects

généralisés par le scanning à 100 % dans l'Union Européenne, seraient susceptibles d'entraver la mise en œuvre du scanning à 100 %. Cette étude a confirmé que la loi "100% scanning" n'améliorerait pas la sûreté dans les TC, en plus elle aurait un impact économique disproportionné. D'autres études (Longo 2010, 2012; Longo et Mirabelli 2008), ont été menées à l'aide d'approches basées sur la simulation et montrent que le pourcentage d'inspection ne doit pas dépasser un pourcentage à un chiffre. Inspecter tout conteneur entrant n'est pas à l'avantage des terminaux, car cela causera énormément de retard et des pertes financières.

D'autres études ont été réalisées sur les technologies et comment elles peuvent améliorer les techniques d'inspection et contribuer à améliorer la sécurité des conteneurs. (Hargather et al. 2011) ont proposé une technique non intrusive pour détecter les particules explosives dans des conteneurs utilisant des capteurs d'aspiration d'air (Janssens-Maenhout, De Roo, et Janssens 2010) s'est basé sur la mesure du niveau de radioactivité dans le conteneur pour empêcher la contrebande d'armes chimiques. (Ramirez-Marquez 2008) propose une stratégie d'identification de conteneur suspecte basée sur une inspection non intrusive à l'aide de capteurs qui balayent le conteneur. (Rizzo et al. 2011) ont développé une solution basée sur l'intégration des étiquettes RFID pour la création de scellés capables d'enregistrer des tentatives non autorisées d'ouverture de conteneurs qui peuvent compromettre le contenu du conteneur.

La littérature examinée montre qu'il y a un manque d'études sur la façon d'améliorer l'efficacité de l'inspection en priorisant l'inspection des conteneurs par la quantification des risques. La plupart des études examinées souhaitent maximiser le pourcentage d'inspection plutôt que d'améliorer le processus de ciblage. En ce qui concerne le ciblage de conteneurs à haut risque, une étude menée par Longo (Longo 2010) propose un indice de risque des conteneurs, mais ne fournit pas une solution viable sur la manière de calculer cet indice. L'ATS utilisé par CBP s'appuie principalement sur les informations de renseignement pour ajuster ses règles pondérées pour l'évaluation des scores de risque (GAO 2007). D'autres études se concentrent davantage sur l'aspect technologique, par exemple sur le concept du

conteneur intelligent (Sallez et al. 2016) et sur la façon dont cela peut recueillir des informations pertinentes et contribuer ainsi à réduire les menaces auxquelles sont exposés les conteneurs, ce qui est précieux pour la quantification des risques. Par conséquent, il est grandement nécessaire d'améliorer le processus d'inspection, éventuellement sans affecter les performances du TC.

3.3.2.2. L'inspection des conteneurs

Tout conteneur jugé suspect est saisi et inspecté par les agents des douanes. Cependant il existe à travers le monde des lois qui régissent ces activités. Par exemple en France, on trouve la charte des contrôles douaniers qui cadre et facilite le contrôle effectué par les agents des douanes. Selon (Douanes et droits indirects 2015), la charte constitue un moyen qui permet aux différents opérateurs de mieux connaître les pouvoirs de l'administration des douanes. Certes, dépourvue de tout effet réglementaire ou légal, cette charte fixe les obligations et droits tant des douanes que des acteurs de la chaîne de transport conteneurisé.

L'inspection des conteneurs est réalisée soit lors de l'emportages au port de départ, soit au port de destination lors du dépotage. Toutefois, il n'est pas possible d'inspecter manuellement l'intégrité de tous les conteneurs transitant par un TC. Ce qui rend indispensable l'utilisation de technique de détection et d'imagerie avec les rayons. *« Pour être efficaces et faire en sorte que le processus ne ralentisse pas la circulation des marchandises, les administrations douanières devraient utiliser des technologies modernes pour inspecter les envois à haut risque. Ces technologies comprennent notamment les appareils de radiographie à large spectre, les appareils à rayons gamma et les dispositifs de détection des rayonnements. La préservation de l'intégrité du fret et des conteneurs, notamment par le recours à des technologies modernes, constitue également une composante essentielle de ce pilier. »* (OMD 2015).



Figure 1.1. 13 Système d'inspection par rayon-x



Figure 1.1. 12 Scanner embarqué (VeriSpreader)

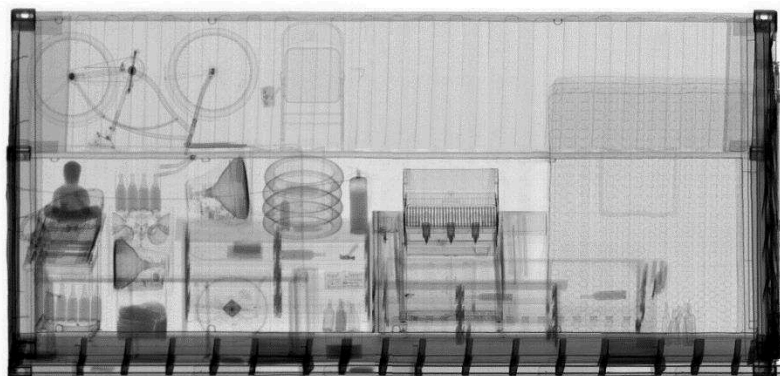


Figure 1.1. 11 Image rayon-x d'un conteneur scanné (PEO Radiation Technology)

En cas de doute, les douanes procèdent à une inspection manuelle du conteneur. Ainsi, on distingue deux types d'inspection : non-intrusif et intrusif. L'inspection non-intrusive est toujours privilégiée. Parfois, il arrive qu'un conteneur subisse successivement ces deux types inspections (Lewis, Erera, et White III 2003; Dubreuil 2008) :

Inspection non intrusive : Ce type d'inspection donne la possibilité de voir le contenu des conteneurs à distance et sans dépotage. Le principal avantage de ce type d'inspection est le gain énorme en temps par rapport à une inspection manuelle. Généralement, les douanes utilisent des équipements d'inspection utilisant du matériel émettant des rayons x ou gamma et des détecteurs de radiation. La figure 1.1.11 montre un exemple d'un scanner à rayons x. La capacité de ces scanners peut atteindre plus de 300 conteneurs par heure (Nidaye, 2016). Il existe encore des scanners plus rapides capables de scanner les conteneurs en cours de leur chargement/déchargement. La figure 1.1.12 montre un exemple d'un scanner embarqué à une grue de quai et qui scanne un conteneur lors de son dépotage depuis un porte conteneur. Ces équipements permettent aux autorités douanières d'avoir une image visuelle du contenu d'un conteneur. La figure 1.1.13 montre un exemple d'une de ces images à rayons x.

Inspection intrusive : Le deuxième type est une inspection manuelle, habituellement motivée par une fausse déclaration de conteneur ou manque d'informations. Les agents douaniers ouvrent le conteneur pour contrôler de plus près son contenu afin de démasquer tout produit illicite dissimulé.

3.3.2.3. La matière dangereuse dans les TC

Une matière est considérée comme dangereuse si elle présente un risque pour la santé, l'environnement et/ou les biens. La gravité de la matière dangereuse dépend de sa nature chimique et/ou physique. Le transport des matières dangereuses suit des réglementations strictes défini par plusieurs organisations mondiales. Elle peut s'effectuer par voie routière, ferrée, maritime, fluviale ou aérienne. Chaque type de transport est régi par un ensemble de législations. Par ailleurs, la gravité des accidents impliquant une matière dangereuse ne vient pas seulement des effets immédiatement

ressentis mais aussi des effets secondaires qui peuvent être à long terme, par exemple, pollutions des eaux ou des sols, propagation aérienne des gazes toxique, etc.

Les matières dangereuses sont réparties en neuf classes dont certaines comportent des classes subsidiaires. Cette classification proposée par l'Organisation des Nations Unies (ONU) est basée sur l'acuité de leur impact. En plus, à chaque matière dangereuse est associée une étiquette pour qu'elle soit facilement reconnaissable. Cette étiquette est une sorte de symbole encadrée par un losange collé sur les unités de transport pendant l'acheminement des matières dangereuses. La figure 1.1.14 montre les différentes classes de matière dangereuse.

La classification proposée par l'ONU spécifie les règles de ségrégation qui doivent être respectées lors du stockage des matières dangereuses. Ces règles sont présentées sous forme d'une matrice (figure 1.1.15) qui précise la distance de sécurité qui doit séparer les matières dangereuses dans la même zone de stockage.













Classe	Matières	Principaux risques	Exemple
Classe 1	 Les explosives	Explosion	Détonateurs, explosifs de mine, dynamite ...
Classe 2	 Les gaz	Eclatement du récipient, intoxication, brûlure, explosion	Azote, CO2, oxygène, butane, chlore, ammoniac, aérosols, ...
Classe 3	 Matières liquides inflammables	Incendie, explosion	Essences, alcools, gazole, solvants
Classe 4.1	 Matière solide inflammable.	Incendie Explosion	Souffre
Classe 4.2	 Matière sujette d'inflammation spontanée		Métaux-alkyles
Classe 4.3	 Matière qui, au contact de l'eau dégage des gaz inflammable		Aluminium en poudre
Classe 5.1	 Matières comburantes	Incendie, explosion, réaction violente	Chlorates
Classe 5.2	 Peroxydes organiques		Peroxyde de zinc
Classe 6.1	 Matières toxiques	Toxicité et empoisonnement	Pesticides
Classe 6.2	 Matières infectieuses	Infection, maladie	Déchets hôpitaux
Classe 7	 Matières radioactives	Radioactivité, maladie, brûlure	Uranium
Classe 8	 Matières corrosives	Brûlure, corrosivité	Acide chlorhydrique, soude caustique, acide sulfurique, ...
Classe 9	 Matières et objets dangereux divers	Divers, pollution	Amiante, produits chauds ...

Figure 1.1. 14 Classification des matières dangereuses

Classes	1.1	1.4	2.1		2.2 (3)	2.3	3			4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
	1.2 1.3 1.5 1.6		D r y (1)	C i t e r n e		D r y (1) (2)	D r y (1)	C i t e r n e											
1.1 1.2 1.3 1.5 1.6	X	X	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
1.4	X	X	B	C	B	B	B	C	B	B	B	B	B	B	B	C	C	B	B
2.1	Dry (1)	D	B	B	C	A	B	B	C	A	B	A	B	B	A	C	B	A	0
	Citerne	D	C	C	C	B	C	C	C	B	C	B	C	C	B	C	C	B	B
2.2 (3)	D	B	A	B	0	A	A	B	A	B	A	B	B	0	B	A	0	0	
2.3	Dry (1) (2)	D	B	B	C	A	0	B	C	B	B	B	B	B	0	A	A	A	0
	3	D	B	B	C	A	B	B	C	A	B	A	B	B	A	C	B	A	0
3	Dry (1)	D	C	C	C	B	C	C	C	B	C	B	C	C	B	C	C	B	B
	Citerne	D	C	C	C	B	C	C	C	B	C	B	C	C	B	C	C	B	B
4.1	D	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B	B	0	C	B	A	0	
4.2	D	B	B	C	B	B	B	C	A	B	A	B	B	A	C	B	A	0	
4.3	D	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B	B	0	B	B	A	0	
5.1	D	B	B	C	B	B	B	C	B	B	B	B*	B	A	C	A	B	0	
5.2	D	B	B	C	B	B	B	C	B	B	B	B	B	A	C	B	B	0	
6.1	D	B	A	B	0	0	A	B	0	A	0	A	A	0	A	A	0	0	
6.2	D	C	C	C	B	A	C	C	C	C	B	C	C	A	A	C	C	A	
7	D	C	B	C	A	A	B	C	B	B	B	A	B	A	C	A	B	A	
8	D	B	A	B	0	A	A	B	A	A	A	B	B	0	C	B	0	0	
9	D	B	0	B	0	0	0	B	0	0	0	0	0	0	A	A	0	0	

Code	Séparation matérielle par des conteneurs sans MD		Pas de séparation matérielle
	Longitudinale	Transversale	
0	pas de séparation	pas de séparation	pas de séparation
A	6m (1EVP)	1 travée pleine de conteneurs	10m ou 2 travées vides
B	24m (4EVP)	3 travées pleines de conteneurs	30m ou 6 travées vides
C	36m (6EVP)	4 travées pleines de conteneurs	40m ou 8 travées vides
D	135m (6EVP)		
X	Regrouper les conteneurs de la classe 1 en ilot. Les ilots doivent être séparés par deux conteneurs en hauteur et en largeur.		
B*	la distance entre les ilots de la classe 5.6 est de 36,6m		

Figure 1.1. 15 La matrice de compatibilité entre les classes de matières dangereuses

Chapitre 2 : Concepts de base et outils

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous introduisons les concepts de base, les méthodes, et les outils utilisés lors du développement des solutions proposées liés à la gestion des risques et au transport des conteneurs. Avant de nous concentrer sur les travaux qui ont abordés le conteneur intelligent et sa mise en œuvre, nous allons nous pencher sur le concept du produit intelligent, sa classification et les outils de sa mise en œuvre. Ensuite, nous abordons les techniques de fouille de données, et notamment l'extraction des motifs fréquents et les règles d'association. En outre, nous mettons le point sur les concepts de base de la logique floue et finirons par une revue des méthodes et les outils de simulation.

2. Le produit intelligent

2.1. Définition et classification

Le développement des technologies d'auto-identification des produits est un des facteurs majeurs qui a donné naissance au concept du produit intelligent (PI). Toutefois, la notion de produit intelligent est encore plutôt indéfinie. Selon (Kiritsis 2011), une première question à laquelle il faut répondre d'abord, est ce que nous considérons être un produit ? Est-ce simplement un élément de valeur commerciale (consommable ou réutilisable) ? D'autre part, quels sont les éléments d'intelligence qui peuvent être associés à un produit ? Les réponses à ces questions peuvent être trouvées à travers les différentes définitions recueillies dans la littérature. Le travail de (Meyer, Främling, et Holmström 2009) représente une importante référence en matière de revue de littérature dans le domaine du produit intelligent.

Définition de McFarlane et al. : Selon (McFarlane et al. 2003), le concept du PI couvre la représentation physique et informationnelle d'un produit. Ce dernier est caractérisé par un identifiant unique, la communication avec l'environnement, la collecte des informations, le déploiement d'un langage pour la communication de ses caractéristiques, et la capacité de prendre des décisions.

Définition de KarKkaainen et al. : La définition proposée par (Kärkkäinen et al. 2003) est axée sur la capacité du PI à prendre des décisions. Ainsi, le PI doit avoir un identifiant

unique. Il doit partager ses d'information, soit sous forme de sources accessible, soit les inclure dans son identifiant. Et finalement, le PI doit pouvoir communiquer avec les systèmes d'information et avec les utilisateurs au besoin.

Définition de Venta et al. : (Ventä 2007) se sont focalisés sur la capacité du PI à percevoir son environnement et à réagir aux changements afin de maintenir un seuil de performance. Selon (Ventä 2007), le PI doit surveiller en permanence son état et son environnement. Il doit aussi réagir et s'adapter aux conditions environnementales et opérationnelles. Le PI doit maintenir des performances optimales dans des circonstances variables, également dans les cas exceptionnels. Enfin, le PI doit communiquer activement avec les utilisateurs, l'environnement ou avec d'autres produits et systèmes.

Partant des définitions citées auparavant, (Meyer, Främling, et Holmström 2009) ont proposé une classification du concept du PI suivant trois critères. Le premier critère est le niveau d'intelligence du produit afin de distinguer entre le produit qui gère ses informations, le produit qui notifie l'occurrence d'un problème et le produit qui analyse ses informations pour prendre une décision. Le deuxième critère est la localisation de l'intelligence d'un produit, est-elle embarquée au niveau du produit ou séparée physiquement du produit ? Le troisième critère est le niveau d'agrégation de l'intelligence d'un produit pour distinguer le PI composé qui gère les informations de ses composants, et le PI simple considéré comme une entité atomique. Une autre classification, plus restreinte, axée sur le niveau d'intelligence d'un produit a été proposée par (Wong et al. 2002). Elle classifie les PI en modèles communicatifs et en modèles décisionnels.

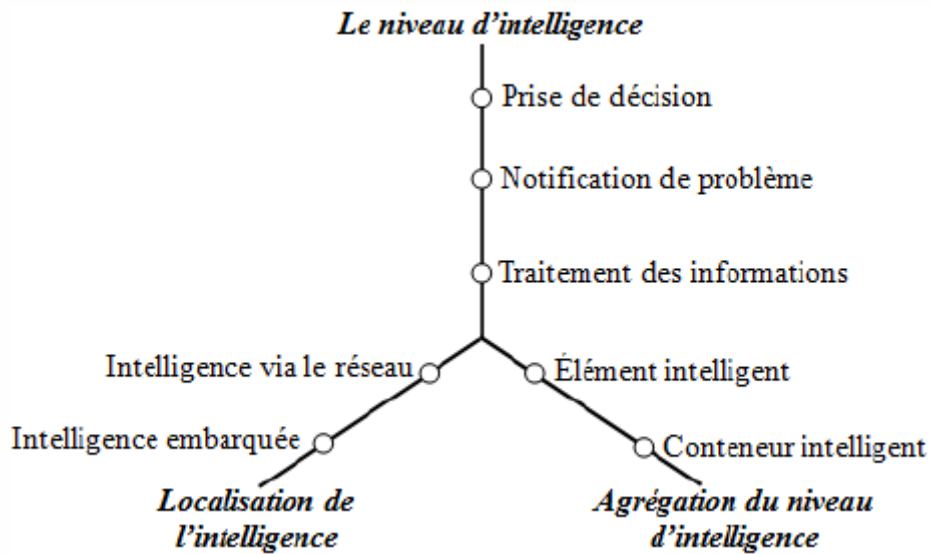


Figure 1.2. 1 Classification du PI proposée par Meyer et al.

2.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre du concept PI n'est pas basée sur un standard unique. Par ailleurs, les travaux que nous avons passés en revue abordent la mise en œuvre du PI d'un point de vue théorique par la proposition de nouveaux modèles conceptuels du PI et d'un point de vue expérimental par l'utilisation et l'agrégation parfois de diverses technologies. La fonctionnalité minimale d'un PI est sa capacité à gérer sa propre information. Des étiquettes et des lecteurs RFID (Identification par radio fréquence) et d'autres techniques sont généralement utilisées. D'ailleurs, l'exemple le plus classique du PI est celui proposé par (Wong et al. 2002). Il consiste en un pot de sauce de spaghetti intelligent. Ce pot est identifiable à l'aide d'un tag RFID, et est connecté à un agent et une base de données vis un réseau. Dans la même vision, (Främling et Nyman 2008) ont utilisé le système DIALOG basé sur un identifiant unique et un URI (ID@URI) pour lier le produit physique à un agent logiciel qui gère son cycle de vie. ID@URI est un identifiant proposé dans le cadre du projet de recherche DIALOG (« DIALOG » s. d.) qui lie les objets à leurs source d'information.

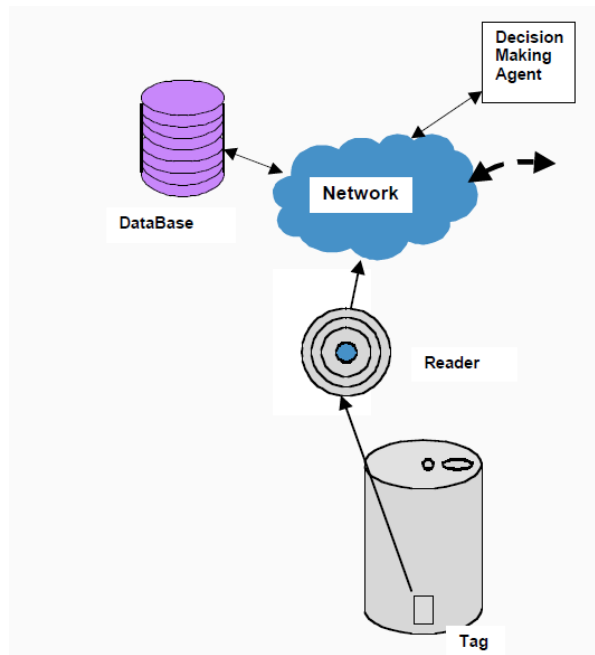


Figure 1.2. 2 Un exemple classique du PI (Wong et al. 2002)

D'autre part, on trouve aussi des mises en œuvre du PI dit actif, capable de mémoriser des informations, de communiquer, et de déclencher des événements ou d'avertir les utilisateurs lorsqu'un problème est détecté (par exemple, si le PI tombe en panne). (Sallez 2012) ont proposé un système de routage dynamique basé sur le PI actif. Leur solution est appliquée dans un système de production flexible (en anglais Flexible Manufacturing System –FMS). (Sallez et al. 2016) ont poussé encore les limites de leur système en lui dotant de capacités décisionnelles. Pour ce faire, ils ont proposé une entité décisionnelle locale appelée (MLDE, Machine Local Decision Entity) capable d'exécuter des algorithmes décisionnels.

Brennan et al., (Brennan et al. 2001) ont proposés un modèle de PI basé sur la combinaison des Holons et des agents. Le modèle présenté par (Yang, Moore, et Chong 2009) opte pour l'embarquement d'une unité de donnée au niveau du produit pour le connecter à des services via le réseau. (Malhéné et Deschamps 2010) ont exploité le PI pour le routage dynamique des livraisons et la sécurisation des flux de marchandises échangées. Une application du PI combiné avec les services mobiles a été réalisée par (Ngai et al. 2007) pour le suivi des conteneurs dans un dépôt.

2.3. Le produit intelligent et la performance

L'analyse de l'impact de l'implémentation du PI sur la performance est un élément important. Cependant, on note qu'un système de PIs a des indicateurs de performance classiques (coût, temps de calcul, taux de satisfaction, etc.). Ces indicateurs se révèlent insuffisants, comme dans le cas d'un système hautement autonome (McFarlan et al., 2013). Un bon exemple d'un tel cas est proposé par (Pach et al. 2012) où les produits peuvent changer leur rôle pour répondre aux besoins d'autres commandes. Ici, même si le délai moyen du système pour chaque commande est acceptable, un certain nombre de commandes devra faire face à de gros problèmes de délai qui affectent la satisfaction du client.

D'autre part, bien qu'il puisse y avoir des cas où les PIs peuvent se concurrencer les uns les autres, un PI apporte également des possibilités de synergies et de coopération. Par exemple, (Brintrup et al. 2011) envisage un système où les différents produits qui font partie d'une même commande communiquent et négocient en vue de prendre une décision collaborative qui devrait être bénéfique pour la commande elle-même.

3. Le conteneur intelligent

3.1. Vers une identification numérique du conteneur

L'identification des conteneurs est à l'origine de l'émergence du concept du conteneur intelligent. Le conteneur a été conçu de manière à faciliter le transport des marchandises par un ou plusieurs modes de transport. De plus, plusieurs problèmes se manifestent avec le grand nombre de conteneurs que les TCs sont contraints de manutentionner, plus particulièrement les problèmes de responsabilité juridique et opérationnelle. Ainsi, il devient impératif d'identifier chaque conteneur afin de connaître son parcours et sa destination, et de mieux se préserver contre les accidents, les vols, les pertes et autres incidents des conteneurs (Assongba 2014). À cette fin, l'ISO 6346 de 1995 (ISO6346, 1995) a été introduite afin de standardiser l'identification des conteneurs. Ce système d'identification consiste à mettre en place une fiche d'identification qui joue le rôle de « pièce d'identité » pour chaque conteneur. Cette

fiche d'identité est composée de plusieurs éléments caractéristiques qui doivent apparaître sur le conteneur (ISO 6346, 1995) :

- Le code du propriétaire,
- Le code d'identification de la catégorie d'équipement,
- Le numéro de série du conteneur,
- La série du conteneur,
- Le code du chiffre d'autocontrôle,
- Le code des dimensions,
- Le code de la marque d'exploitation.

La figure 1.2.3 montre l'emplacement de ces éléments d'indentification sur un conteneur.

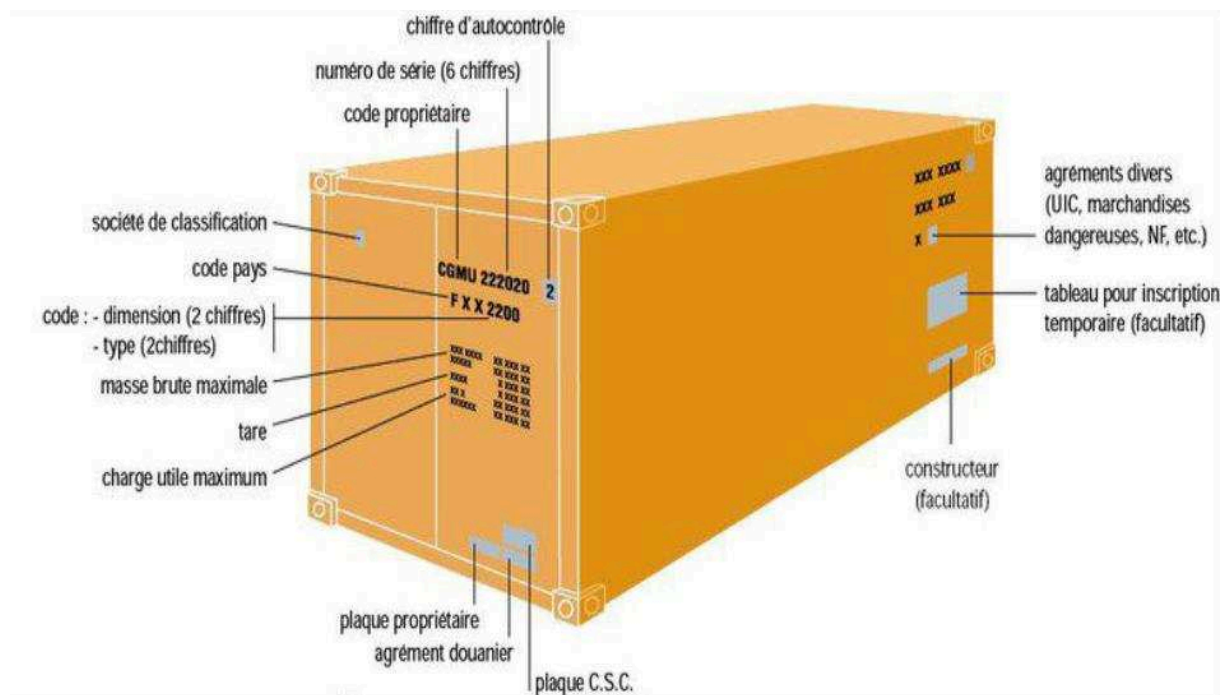


Figure 1.2. 3 Exemple des codes d'identification d'un conteneur (comex-mag.com)

L'ISO 6346 de 1995 a aussi un avantage d'ordre technique permettant l'identification du conteneur, à savoir son poids et sa position dans les zones de stockage ou sur les navires, et ainsi faciliter l'élaboration du plan de chargement/déchargement. Au niveau administratif, ce système d'identification facilite la reconnaissance des conteneurs par les douanes et la tâche en matière du choix de régime douanier correspondant au conteneur. Au niveau commercial, les codes de dimension et de catégories permettent de faciliter le choix des conteneurs par rapport

au type, le poids et les dimensions de la cargaison. Toutefois, même avec un tel système d'identification, les erreurs de positionnement des conteneurs persistent (Assongba 2014). De telles erreurs coûtent chères aux manutentionnaires qui doivent, par exemple, déplacer plusieurs conteneurs avant de retrouver celui à charger/décharger. Ces conséquences impactent la plupart du temps le destinataire final du conteneur en générant des retards dans la livraison, avaries dans certains cas ou pertes partielles ou totales dans d'autres cas. Ces conséquences ont poussé les organisations internationales de normalisation à introduire un nouveau système d'identification des conteneurs : l'identification numérique.

L'introduction de l'identification numérique a donné naissance au conteneur numérisé (Li 2008). Ce système d'identification se base sur les étiquettes électroniques implantées sur le conteneur. En plus des étiquettes, les conteneurs numérisés sont parfois accompagnés de matériel de géolocalisation et de scellé électronique. L'un des premiers systèmes d'identification numérique du conteneur est le Mobitag. Le système a été introduit à Marseille en 1998. Selon (Mercier 1998) « *le Mobitag se présente sous la forme d'un petit boîtier d'une centaine de grammes à fixer sur un conteneur, une remorque ou directement sur la marchandise. Doté d'une autonomie de cinq ans, il est équipé d'un minuscule émetteur-récepteur radio, d'un modem et d'une importante mémoire informatique à laquelle peuvent être reliés des capteurs de toute sorte. Véritable étiquette électronique cryptée et interrogeable à distance, la mémoire peut contenir des données aussi variées que le type de marchandise, les variations de température auxquelles la cargaison a été soumise, l'ouverture des portes du véhicule, sa vitesse ou encore sa position* ».

Après, le Mobitag, l'ISO standardise l'identification numérique des conteneurs en introduisant l'ISO 10891 de 2009 (ISO 10891, 2009). Cette nouvelle spécification technique, aidera à assurer le bon fonctionnement des étiquettes à base de technologie RFID (Radio Frequency IDentification) des conteneurs de transport, malgré les rudes conditions auxquelles les conteneurs sont confrontés durant leurs transports par mer, route et rail. L'objectif de l'ISO 10891 (ISO 10891, 2009) est d'optimiser les systèmes de contrôle des conteneurs en exigeant un ensemble de critères relatifs aux étiquettes des conteneurs :

- Disposer d'un système de codage des données d'identification des conteneurs et des informations permanentes connexes, mémorisées dans une étiquette fixée au conteneur ;
- Disposer d'un système de codage des données pour le transfert électronique des données d'identification des conteneurs et des informations connexes des étiquettes du conteneur à des systèmes de traitement automatique des données ;
- La description des données qui doivent figurer dans l'étiquette pour être transmises aux systèmes de traitement automatique des données ;
- Des critères de performance permettant d'assurer un fonctionnement cohérent et fiable de l'étiquette d'identification du conteneur au sein de la communauté internationale des transports ;
- L'emplacement de l'étiquette sur les conteneurs ;
- Les aspects visant à rendre impossible la modification et/ou l'effacement malveillant ou involontaire des informations contenues dans l'étiquette fixée sur le conteneur.

Ainsi, l'utilisation des étiquettes RFID va marquer le transport conteneurisé et donnera naissance à une nouvelle génération de conteneurs, dites conteneurs intelligents.

3.2. L'Inception du conteneur intelligent

Le conteneur équipé d'étiquettes électroniques a été testé pour la première fois en 2008 dans les ports chinois (Li 2008). Selon les données techniques, *« l'étiquette électronique possède une capacité de mémoire importante, une longue durée de vie, un niveau de sécurité satisfaisant, et est en outre dotée d'une fonction permettant de localiser le conteneur par l'intermédiaire de la localisation par satellite GPS, ce qui améliore considérablement l'efficacité du transport du conteneur, la fiabilité de la reconnaissance des informations liées au conteneur et de la lecture des informations liées au conteneur pendant le transport, et garantit ainsi la sécurité de la cargaison pendant le transport du conteneur »*. En effet, *« l'étiquette électronique est située sous un loquet de verrouillage placé sur l'avant droit de la porte du conteneur. La broche de verrouillage de l'étiquette électronique est insérée dans la poignée de la porte du conteneur et dans l'ouverture de la trappe de la plate-forme afin que ladite porte puisse*

être scellée. La broche de verrouillage est bloquée à l'aide d'un contre-écrou qui tourne dans la broche de verrouillage ou à l'extérieur de cette dernière. Un micro-processeur enregistre les informations relatives à l'ouverture et à la fermeture de la porte du conteneur. » (Li 2008). Ces étiquettes permettent de savoir, grâce aux informations transmises par la puce électronique, l'heure de chargement/déchargement de la cargaison du conteneur, et de la livraison du conteneur à quai au port de destination ; l'état des conteneurs en temps réel et l'heure à laquelle le conteneur a été ouvert ; détecter si le conteneur est ouvert illégalement durant son transport ; le lieu de la livraison de la cargaison au destinataire final (Assongba 2014).

Cette première expérimentation a eu lieu le 10 mars 2008 sur la ligne reliant le port de Shanghai au port de Savannah aux États-Unis. Les conteneurs embarqués à bord du navire en départ du port de Shanghai sont équipés des étiquettes électroniques. Selon (Li 2008), ces étiquettes sont susceptibles de lutter contre la surcharge en contrôlant le poids réel des conteneurs et ainsi réduire des défauts d'équilibre et de positionnement des conteneurs sur les navires et dans les zones de stockages des TCs. Parmi les autres avantages de ces étiquettes, il y'a : la garantie l'identification des contenus transportant de la matière dangereuse tout au long de la chaîne de transport conteneurisé ; la détection en temps réel des chutes de conteneurs ; La limitation du temps de recherche des conteneurs au fond des cales et sur les terminaux ; la réduction des litiges concernant le moment et le lieu de la livraison. (Li 2008). Les informations enregistrées et fournies par ces étiquettes permettront de responsabiliser les acteurs impliqués dans le transport maritime du conteneur en cas de litige ou d'accident.

D'autres projets et études ont introduit des concepts conteneurs intelligents. (Kim et al. 2008) ont proposé un conteneur intelligent équipé de différents capteurs (RFID, GPS, ...) et interconnecté à d'autres conteneurs via un réseau de capteurs sans fil pour améliorer la sécurité. Kim et al. profitent du fait que les conteneurs sont à proximité pendant leur transit ou empilés dans les zone de stockage des TCs. La figure 1.2.4 montre la communication entre les conteneurs empilés. Au lieu de se concentrer sur la sécurité de chaque conteneur individuel, Kim et al. suggèrent de créer un réseau

dynamique de conteneurs intelligents qui change avec chaque empotage/dépotage. En outre, la communication de ce réseau de conteneurs intelligent avec l'infrastructure océanique ou terrestre peut également être fournie de manière fiable et efficace. Kim et al. suggèrent que la sécurité des conteneurs sera renforcée par cette interaction entre les conteneurs en réseau. Le conteneur intelligent proposé comprend un module d'alerte qui se base sur la détection de l'état et de l'environnement du conteneur, comme la température, le feu, les chocs, l'humidité et la lumière, l'ouverture / fermeture de la porte, le suivi de l'emplacement des conteneurs et des conteneurs voisins. Ainsi, le module d'alerte notifie au serveur/centre de données via la communication à distance (Wifi, satellite, etc.) les conditions extrêmes ou les événements importants en collectant et en analysant les données des conteneurs voisins via les réseaux dynamiques de conteneurs. Ces conteneurs intelligents connectés peuvent aussi fournir une visibilité de bout en bout du conteneur et sa cargaison via les capacités de suivi et de détection fournies par les différents capteurs du conteneur intelligent proposé. Cette visibilité de bout en bout peut améliorer les performances et l'efficacité opérationnelles ainsi que la sécurité de la chaîne logistique du conteneur (Kim et al. 2008). Toutefois, l'un des problèmes majeurs qui subsiste est l'augmentation de la probabilité de détection des événements tout en réduisant le taux de fausses alertes.

(Haass et al. 2015), dans le cadre du projet Intelligent Container, ont mené une étude qui montre la capacité du conteneur intelligent à réduire les coûts de transport et l'émission du CO₂ en utilisant les informations qu'il rassemble à travers ses capteurs. La figure 1.2.5 montre le prototype du conteneur intelligent proposé. Ils ont utilisé un réseau de distribution existant de bananes et ont supposé que tous les conteneurs de bananes expédiés étaient « intelligents ». Ils ont développé un algorithme qui permet à chaque conteneur de prendre des décisions, par exemple, vers quel client doit-il être acheminé et par quel itinéraire, en se basant sur le niveau de mûrissement des bananes. La connaissance de l'état de la cargaison peut être utilisée pour contrôler les processus logistiques. Cela signifie que les bananes qui ont une longue vie verte seront transportées à plus longue distance et les bananes avec une vie verte plus courte seront transportées à un client plus près. D'autre part, si plusieurs

conteneurs intelligents provenant de la même ferme se rendent compte que les bananes qu'ils transportent commencent à mûrir, elles peuvent alerter le producteur afin qu'il récolte les bananes plus tôt. Par ailleurs, le conteneur intelligent peut mûrir les bananes à l'aide d'éthylène et ainsi, les bananes peuvent être transportées directement au client, en contournant le centre de maturation. De cette façon, les pertes alimentaires futures peuvent être réduites, entraînant une réduction supplémentaire des coûts de transport et des émissions de carbone. Cependant, ces avantages économiques et environnementaux sont accompagnés de certains coûts supplémentaires.

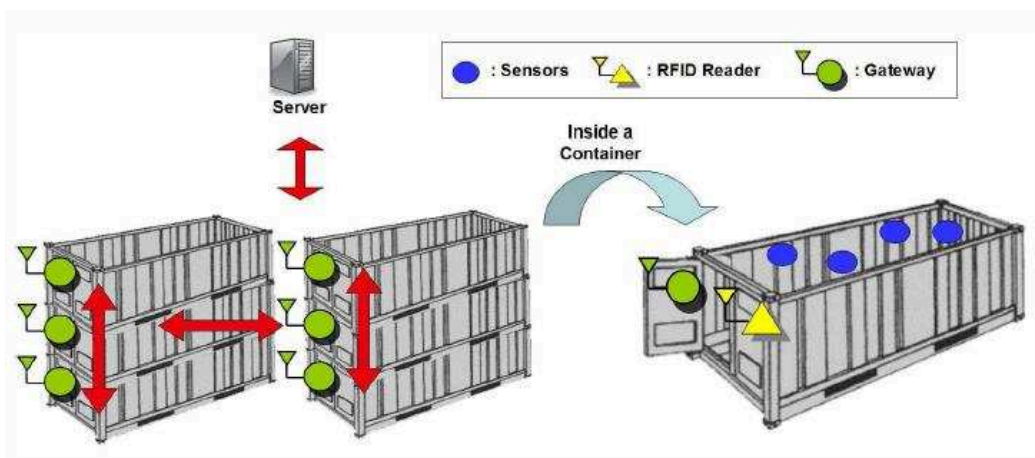


Figure 1.2. 5 Concept du conteneur intelligent selon Kim et al. (Kim et al, 2008)



Figure 1.2. 4 Prototype du conteneur intelligent proposé dans le cadre du projet « Intelligente Container » 2014.

4. Fouille de données

Avec le développement exponentiel des capacités de stockage des données informatisées, le besoin de nouveaux outils de fouille et d'analyse de données est devenu une nécessité. La fouille des données (data mining en anglais) a connu ses débuts dans les années 1990 (Frawley, Piatetsky-Shapiro, et Matheus 1991). Son objectif est généralement d'extraire des informations utiles à partir d'un grand volume de données. Cette discipline constitue une passerelle entre le domaine informatique et les statistiques. Ces outils vont permettre d'assister les experts des domaines concernés d'analyser leurs données et d'en extraire des connaissances qui seront utiles. La fouille de données est un processus itératif qui comprend plusieurs étapes (Papon 2016). et (Pennerath 2009) ont résumé ce processus en huit principales étapes. La figure 1.2.6 tirée de (Papon 2016) schématise ces huit étapes.

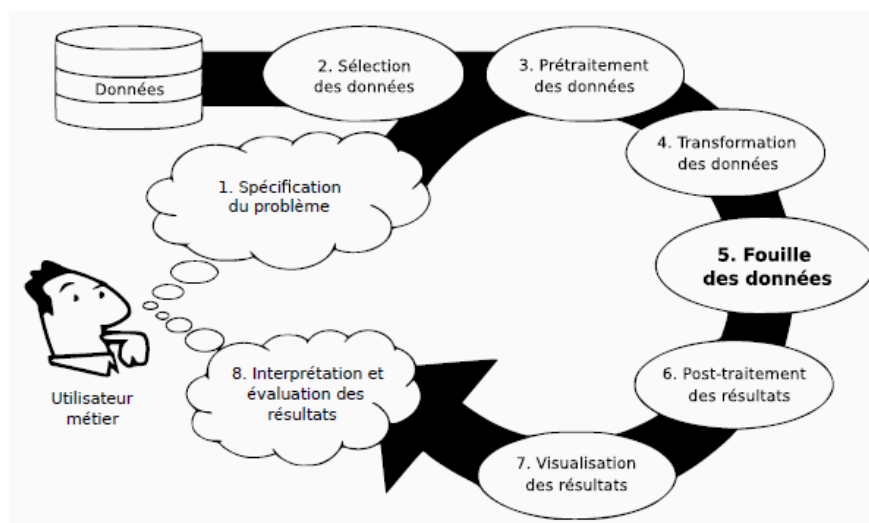


Figure 1.2. 6 Processus de fouille de données. Source (Papon 2016)

La première étape consiste à spécifier le problème en définissant à quoi doit on répondre. La deuxième étape vise à sélectionner les données utiles qui ont un lien avec le problème à traiter. La troisième étape, correspondant au prétraitement des données, consiste à améliorer la qualité des données en cas de redondance, de données manquantes ou de bruit.

La quatrième étape est le formatage des données. Ceci est nécessaire pour pouvoir appliquer certains algorithmes d'extraction de connaissances qui nécessitent un format spécifique de données. Par exemple, certains algorithmes nécessitent un

certain type de fichiers (fichier csv, base de données MySQL...), et également un certain type de données (binaires, continues, discrètes, etc.). Par exemple, dans le logiciel Weka (Hall et al. 2009), l'implémentation de l'algorithme d'extraction de règles d'association FP-Growth (Han et al., 2000) nécessite des données binaires pour s'exécuter tandis que celle de l'algorithme Apriori (Agrawal, Srikant, et others 1994) peut également travailler sur des données discrétisées.

La cinquième étape correspond à la fouille des données. Elle permet d'extraire des connaissances inconnues et utiles à partir des données en appliquant des algorithmes supervisés ou semi-supervisés. Le post-traitement est la sixième étape et permet d'améliorer la qualité des résultats générés à l'étape cinq. En effet, et notamment dans le cas des règles d'association, les résultats sont parfois retournés en quantité trop importante et rendent difficile l'analyse et l'identification de ceux qui sont réellement intéressants. Afin de résoudre ce problème, un post-traitement utilisant différentes mesures de qualité va aider l'expert à mieux évaluer les résultats et à supprimer la redondance présente dans ceux-ci. La septième étape est la visualisation des résultats. Cette étape permet de représenter sous forme visuelle des résultats difficilement intelligibles afin de faciliter la tâche de l'utilisateur dans leur compréhension. Et enfin, la huitième étape est l'interprétation et l'évaluation des résultats. Cette dernière étape va consister à expliquer les résultats obtenus avec les données de départ et vérifier si une réponse a pu être apportée à la question ouverte. Si les conclusions de cette étape ne sont pas en accord avec ce qui est attendu, le processus peut revenir à n'importe quelle étape afin de continuer et d'affiner l'analyse en cours.

Les connaissances extraites peuvent prendre différentes formes. Les motifs fréquents et les règles d'associations sont la forme la plus populaire de la fouille de données.

4.1. Extraction des motifs fréquents et des règles d'association

L'objectif de l'extraction des règles d'association est de découvrir les relations invisibles qui existent entre les données. Ce problème a été introduit pour la première

fois par (Agrawal et al., 1993) en abordant le problème du panier de la ménagère en analysant les données des grandes surfaces de distribution. Un exemple de règles d'associations dans le travail d'Agrawal et al. est *Thé, Café => Sucre* signifiant que si on a du thé et du café dans le panier de la ménagère, alors il y'a une grande probabilité qu'on y trouve du sucre. Ceci offre la possibilité de réaménager de manière efficace les rayons des grandes surfaces selon une stratégie marketing qui se base sur les préférences des ménagères. Ce problème a dès lors intéressé les chercheurs pour son important potentiel d'application dans divers domaines comme les systèmes de recommandation.

Le problème d'extraction des règles d'associations peut être résolu en employant un algorithme naïf. Cet algorithme naïf découvre tous les motifs fréquents, après il génère toutes les règles d'associations à partir des motifs fréquents découverts. Un motif fréquent est un ensemble d'items, ces items sont généralement des variables d'une base de données. Chaque motif fréquent a un support qui représente sa fréquence d'apparition dans la base de données. Le support sert aussi à calculer la confiance des règles d'association, et qui reflète la force de la règle. Cet algorithme naïf vérifie un par un le support de chaque motif fréquent découvert avec le support minimal, et vérifie la confiance de chaque règle d'association générée avec la confiance minimale. Toutefois, l'application de cet algorithme est étranglée par taille de la base de données traitée qui engendre des problèmes d'explosion combinatoire. Dans la littérature on trouve d'autres algorithmes qui surmontent ces lacunes, notamment l'algorithme de référence Apriori proposé par Agrawal et al (Agrawal, Srikant, et others 1994).

L'Algorithme Apriori se compose aussi de deux principales étapes, à savoir l'extraction des motifs fréquents et la construction des règles d'association. L'algorithme Apriori a apporté plusieurs améliorations dont l'utilisation du support afin de limiter l'espace de la recherche des motifs fréquents. Le support permet d'accélérer le processus de recherche des motifs fréquents. Pour l'étape de la génération des règles, Apriori utilise une propriété de la confiance pour éliminer d'avance certaines règles sans avoir à calculer leur confiance. Par exemple, si la

confiance de la règle $Z \Rightarrow X \setminus Z$ n'est pas valide alors la confiance de la règle $Y \Rightarrow X \setminus Y$ ne le sera pas non plus. En plus, si la confiance de la règle $Z \Rightarrow X \setminus Z$ est valide alors la confiance de la règle $Y \Rightarrow X \setminus Y$ le sera également (Papon 2016). Ensuite, chaque règle ayant une confiance supérieure ou égale au seuil minimal est ajoutée à l'ensemble des règles valides.

Toutefois, l'algorithme Apriori possède quelques faiblesses. La première faiblesse est le dilemme émanant du choix du seuil du support. Le choix d'un faible support peut engendrer un grand nombre de règles dont la majorité sera des règles redondantes. D'autre part, le choix d'un seuil de support élevé peut engendrer la perte de règles importantes ou de pépite de connaissance (Papon 2016) qui sont des règles ayant un faible support mais avec une confiance élevée. Ces règles apportent généralement des informations imprévues et surprenantes. La deuxième faiblesse est le calcul du support des motifs dans la base de données. C'est-à-dire que, pour chaque taille de motif, on doit balayer l'intégralité de la base de données. Par exemple, pour un motif possédant 100 items, l'algorithme a besoin de parcourir la base de données 100 fois, chose qui est assez coûteuse en termes de performance et essentiellement de mémoire utilisée. En effet, plusieurs versions améliorées et variantes de l'algorithme Apriori ont été proposées dans la littérature dont l'algorithme Eclat (Zaki et al. 1997) et l'algorithme FP-Growth (FP pour Frequent Patterns) (Han, Pei, et Yin 2000) parmi d'autres qui sont décrits dans (Y. Wu, Chen, et Chang 2009). Ces algorithmes comblent partiellement le point négatif de l'algorithme Apriori. Par exemple, l'algorithme Eclat facilite le calcul de support en stockant dans un ensemble la liste des transactions de la base de données contenant un item. Le support des motifs est ensuite calculé moyennant les intersections de ces ensembles. D'autre part, l'algorithme FP-Growth comble le balayage coûteux en mémoire en utilisant une structure compacte appelée FP-Tree (Frequent Patterns Tree). Ainsi, FP-Growth n'a pas besoin de balayer la base de données pour chaque motif et se contente de deux balayages.

5. La logique floue

L'apparition de la logique floue date de 1965, suite à la publication d'un article intitulé les ensembles flous (Lotfi A. Zadeh 1965). La logique floue a deux significations

différentes, la première la considère comme une extension de la logique multivaluée. Dans un sens plus large, la deuxième signification prédominante considère la logique floue comme un synonyme de la théorie des ensembles flous qui se rapporte à des classes d'objets avec des limites flous dans laquelle l'adhésion à un ensemble est spécifiée par un degré d'appartenance. La logique floue utilise le continuum de valeurs logiques entre 0 (complètement faux) et 1 (complètement vrai). Au lieu de considérer seulement les couleurs noir et blanc, la logique floue utilise le spectre des couleurs, en acceptant que les choses puissent être en partie vraies et en partie fausses en même temps. Comme le montre la figure 1.2.7, la logique floue ajoute une gamme de valeurs logiques à la logique booléenne. La logique floue et la théorie des ensembles flous ont évolué dans de nombreuses directions, avec des applications dans des domaines de recherche très variés où les techniques conventionnelles sont inefficaces. En fournissant la base d'une approche systématique du raisonnement approximatif (Lotfi A. Zadeh 1975), la théorie des ensembles flous a fini par avoir un impact significatif sur les domaines de la recherche, comme l'économie, la médecine, l'analyse des décisions et l'intelligence artificielle.

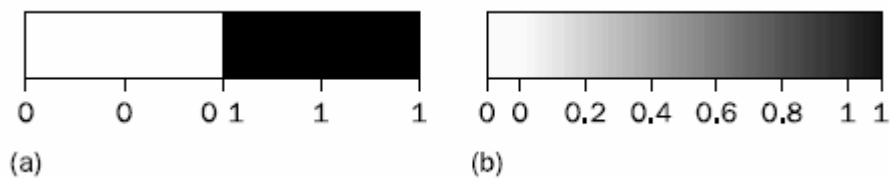


Figure 1.2. 7 Plage des valeurs en logique Booléenne (a) et en logique floue (b)

Trois étapes peuvent être identifiées dans les mathématiques des ensembles flous depuis son émergence: La fuzzification directe au cours des années 1960 (topologie floue, structures algébriques floues, telles que les groupes flous et espaces vectoriels flous, arithmétique floue, théorie des mesures floues, calcul relationnel flou), l'explosion des choix possibles dans le processus de généralisation au cours des années 1980 (la notion de nombre flou, la découverte de normes triangulaires et les normes communes, l'étude approfondie des opérations alternatives sur le niveau logique, c'est-à-dire, la négation, la disjonction, la conjonction, l'implication et aussi le

niveau de la théorie des ensembles flous, c.-à-d., la complémentation, l'union, l'intersection, l'inclusion) et actuellement, la standardisation, l'axiomatisation, la fuzzification et la représentation floue ainsi que la manipulation de l'imprécision et de l'incertitude (Kerre 1995).

Traditionnellement, les techniques utilisées pour la modélisation, le raisonnement et l'informatique sont déterministes et très précises. La logique bivalente indique qu'une déclaration peut être vraie ou fausse. Dans la théorie des ensembles traditionnels, un élément appartient à un ensemble ou non. Dans la théorie de l'optimisation classique, une solution est facultative ou non. Par contre, la logique floue ajoute à la logique bivalente la capacité de raisonner précisément avec des informations imparfaites, imprécises, incertaines, incomplètes, peu fiables, vagues ou partiellement vraies (Lotfi A. Zadeh 2009). Ce processus est un raisonnement humain pratiquement quotidien et c'est pourquoi la logique floue fait partie de l'Intelligence Artificielle. Bien que, les variables traditionnelles prennent des valeurs numériques, la logique floue traite des variables linguistiques. Les variables linguistiques sont les variables d'entrée ou de sortie du système dont les valeurs sont des mots ou des phrases du langage naturel et se décomposent habituellement en un ensemble de termes linguistiques. Dans ce qui suit, nous détaillerons le processus de la logique floue.

5.1. Système de logique floue.

Un système de logique floue (FLS en anglais pour Fuzzy Logic System) est conçu pour traiter des données déterministes par la logique floue et pour mettre en pratique les connaissances recueillies dans une base de règles floues. Cela implique la nécessité de fuzzification des données d'entrée afin de fournir un résultat déterministe par la défuzzification après le traitement. Les fonctions d'appartenance sont utilisées dans les étapes de fuzzification et délimitation d'un système logique flou. Leur rôle est de cartographier les variables nettes à des termes linguistiques flous dans la phase de fuzzification et de faire exactement le contraire dans la phase de défuzzification. Le module de fuzzification transforme les entrées, qui ont des valeurs nettes, dans des ensembles flous. Dans un FLS, la base des règles d'inférence est développée pour

manipuler les variables d'entrée. En général, les FLS intègrent plus d'une règle qui décrivent les connaissances. Le plus commun est la règle *Si-Alors*. Si un ensemble de conditions est satisfait, alors un ensemble de conséquences peut être déduit. L'évaluation des règles floues et l'agrégation des résultats des règles individuelles sont effectuées à l'aide d'opérations de configuration floues, ce processus s'appelle une inférence. Le résultat de l'étape d'inférence est une valeur floue, obtenue par l'agrégation de tous les ensembles flous de sortie dans un ensemble flou de sortie unique, obtenu en appliquant toutes les règles dans la base de règles. Pour obtenir une valeur nette, la défuzzification est effectuée conformément à la fonction d'appartenance de la variable de sortie. Le système logique Fuzzy peut être considéré comme un mappage non linéaire d'un ensemble de données d'entrée à une donnée de sortie scalaire (Mendel 1995). L'algorithme de FLS est résumé dans les étapes suivantes :

5.1.1. Définition des variables linguistiques

La logique floue se base sur les variables linguistiques pour le calcul en se concentrant sur l'utilisation de valeurs floues qui captent le sens des mots, le raisonnement humain et la prise de décision. Utiliser des valeurs linguistiques, telles que, haut et bas, rapide et lent, lourd et léger est la base des FLS. Par exemple, la déclaration « *La vitesse est grande* » implique que la variable linguistique *vitesse* prend la valeur linguistique *grande*. Dans les systèmes à logique flous, les variables linguistiques sont utilisées dans les règles floues. Par exemple :

Si la vitesse est grande
Alors la distance d'arrêt est grande

L'ensemble des valeurs possibles d'une variable linguistique représente l'univers du discours de cette variable. Par exemple, l'univers du discours de la variable linguistique *vitesse* pourrait avoir une portée comprise entre 0 et 260 km/h et peut inclure des sous-ensembles floues comme très lent, lent, moyen, rapide et très rapide. Chaque sous-ensemble flou représente également une valeur linguistique de la variable linguistique correspondante.

5.1.2. Définition des fonctions d'appartenance

Dans la théorie des ensemble classiques, un élément x d'un univers X caractérisé par une fonction $f_A(x)$ avec $f_A(x)=1$, si x est un élément de l'ensemble A , et $f_A(x)=0$, si x n'est pas un élément de A . Dans la théorie des ensembles flous, un ensemble flou A d'un univers X est défini par la fonction $U_A(x)$, nommée fonction d'appartenance de l'ensemble A :

$$U_A(x) : X \Rightarrow [0,1]$$

$$U_A(x) = 1, \text{ si } x \text{ appartient complètement à } A ;$$

$$U_A(x) = 0, \text{ si } x \text{ n'est pas dans } A ;$$

$$0 < U_A(x) < 1, \text{ si } x \text{ est partiellement dans } A.$$

La fonction d'appartenance permet de définir le continuum de choix possibles d'une variable linguistique dans son univers de discours. Pour tout élément x de l'univers X , la fonction d'appartenance U équivaut au degré auquel x est un élément de l'ensemble A . Ce degré, Une valeur entre 0 et 1, représente le degré d'appartenance, également appelé valeur d'appartenance, de l'élément x dans l'ensemble A .

Déterminer une fonction d'appartenance est une tâche primordiale. Un certain nombre de méthodes tirées de l'acquisition de connaissances peuvent être appliquées ici. Par exemple, l'une des approches les plus pratiques pour former des ensembles flous repose sur la connaissance tirée d'un expert. L'expert est sollicité pour son avis si divers éléments appartiennent à un ensemble donné. Une autre approche utile consiste à acquérir des connaissances auprès de plusieurs experts. Une nouvelle technique pour former des ensembles flous a récemment été introduite. Elle est basée sur des réseaux de neurones artificiels, qui apprennent le fonctionnement du système, puis dérivent les ensembles flous automatiquement.

5.1.3. Élaboration de la base des règles

En 1973, Lotfi Zadeh publie son deuxième article le plus influent (L. A. Zadeh 1973). Cet article décrit une nouvelle approche de l'analyse des systèmes complexes, dans laquelle Zadeh a suggéré de recueillir les connaissances humaines dans des règles

floues. Une règle floue peut-être définie comme une déclaration conditionnelle sous la forme :

Si x est A Alors y est B

Les variables x et y sont des variables linguistiques. Elles sont déterminées par des ensembles flous sur l'univers des discours X et Y respectivement. Une règle floue peut avoir plusieurs parties dans son antécédent. Le résultat d'une règle floue peut également inclure plusieurs parties.

Au cours des dernières années, plusieurs méthodes basées sur la technologie des réseaux de neurones ont été utilisées pour construire les règles floues. Les systèmes adaptatifs ou à base de réseaux de neurones peuvent trouver de nouvelles règles floues, ou modifier et régler les paramètres existants.

En général, un système expert flou ne comprend pas une mais plusieurs règles qui décrivent les connaissances des experts. La sortie de chaque règle est un ensemble flou, mais en général, on doit obtenir un seul résultat représentant la sortie du système expert. En d'autres termes, on veut obtenir une solution précise, pas floue. Pour obtenir un seul résultat pour la variable de sortie, un système flou agrège d'abord tous les ensembles flous de sortie dans un ensemble flou de sortie unique, puis définit l'ensemble flou résultant en un seul nombre. Dans les deux prochaines étapes, nous abordons les détails de ce processus.

5.1.4. L'inférence floue

Le raisonnement flou comprend deux parties distinctes : l'évaluation de l'antécédent de règle (la partie *Si* de la règle) et l'implication ou l'application du résultat à la conséquence (la partie *Alors* de la règle). Dans les systèmes classiques basés sur les règles, si l'antécédent de la règle est vrai, la conséquence est également vraie. Dans les systèmes flous, où l'antécédent est une déclaration floue, toutes les règles s'appliquent partiellement. Si l'antécédent est vrai pour un certain degré d'appartenance, le résultat est également vrai pour ce même degré.

La méthode d'inférence floue la plus utilisée est la méthode dite Mamdani. En 1974, le professeur Ebrahim Mamdani de l'Université de Londres a construit l'un des premiers systèmes flous pour contrôler une combinaison de machines à vapeur et de chaudières

(Mamdani 1974). Il a appliqué un ensemble de règles floues fournies par des opérateurs humains expérimentés.

Le processus d'inférence floue de style Mamdani se déroule en quatre étapes : la fuzzification des variables d'entrée, l'évaluation des règles, l'agrégation des sorties des règles et finalement la défuzzification.

La fuzzification

La première étape consiste à prendre les entrées nettes et déterminer dans quelle mesure ces entrées appartiennent à chacun des ensembles flous appropriés. L'entrée nette est toujours une valeur numérique limitée à l'univers du discours. Les intervalles de l'univers des discours peuvent être déterminés par des jugements d'experts. Par exemple, si nous devons examiner le risque impliqué dans le développement d'un projet, on peut demander à l'expert de donner des chiffres entre 0% et 100% qui représentent le financement du projet et le personnel du projet, respectivement. En d'autres termes, l'expert doit répondre à la mesure dans laquelle le financement du projet et le personnel du projet sont vraiment adéquats. Bien sûr, divers systèmes flous utilisent une variété d'entrées nettes. Alors que certaines des entrées peuvent être mesurées directement (hauteur, poids, vitesse, distance, température, pression, etc.), certaines d'entre elles ne peuvent être basées que sur des estimations d'experts. Une fois que les entrées nettes sont obtenues, elles sont fuzzifiées par rapport aux ensembles linguistiques appropriés. De cette manière, chaque entrée est fuzzifiée sur toutes les fonctions d'appartenance utilisées par les règles floues.

L'évaluation des règles

La deuxième étape consiste à prendre les entrées fuzzifiées et à les appliquer aux antécédents des règles floues. Si une règle floue a plusieurs antécédents, l'opérateur flou (ET ou OU) est utilisé pour obtenir un seul nombre qui représente le résultat de l'évaluation des antécédents. Ce résultat est ensuite appliqué à la fonction d'appartenance conséquente. Dans la littérature, on trouve plusieurs approches pour exécuter les opérateurs AND et OR (Cox 1999) et, bien sûr, différentes méthodes peuvent conduire à des résultats différents.

L'agrégation des sorties des règles

L'agrégation est le processus d'unification des résultats de toutes les règles. En d'autres termes, on prend les fonctions d'appartenance de toutes les règles consécutives et les combinons en un seul ensemble flou. Ainsi, l'entrée du processus d'agrégation est la liste des fonctions d'appartenance, et la sortie est un ensemble flou pour chaque variable de sortie.

La défuzzification

La dernière étape dans le processus d'inférence floue est la défuzzification. Le flou nous aide à évaluer les règles, mais la sortie finale d'un système flou doit être un nombre net. L'entrée pour le processus de défuzzification est l'ensemble flou de sortie agrégé, et la sortie est un nombre unique. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification (Cox 1999), mais probablement la plus populaire est la technique de centroïde. Mathématiquement, c'est le centre de gravité (COG) qui peut être exprimé comme :

En théorie, le COG est calculé sur un continuum de points dans la fonction globale d'appartenance de sortie, mais dans la pratique, une estimation raisonnable peut être obtenue en le calculant sur un échantillon de points.

6. La simulation

6.1. Définition et objectifs

La définition de la simulation proposée par (Treuil, Drogoul, et Zucker 2008) est l'une des définitions les plus courantes. La simulation selon Treuil est « *l'activité au cours de laquelle, selon un protocole et avec un objectif précis, on utilise un simulateur pour faire évoluer les entrées d'un modèle dynamique, l'exécuter, et en recueillir les sorties. Tout modèle écrit en respectant le méta-modèle associé au simulateur et comportant au moins un paramètre d'entrée peut se prêter à ce processus de simulation.* » La simulation est utilisée dans les cas où le test réel ne peut avoir lieu pour des raisons techniques, économiques, ou parfois éthiques. La simulation est l'imitation d'un système du monde réel que l'on désire observer ou étudier son évolution au fil du temps et son comportement envers les perturbations, et ce afin d'évaluer le système réel. Les maquettes sont le premier type de simulation utilisée. On nomme cette approche, l'approche analogique. Après, avec l'émergence de l'ère de l'informatique, la simulation informatique, dite approche

stochastique, a connu ses débuts pendant la Deuxième Guerre mondiale généralement pour combler les besoins militaires et particulièrement la simulation des aéronefs. Bien qu'il y ait deux approches, aujourd'hui, le terme simulation ne fait référence qu'à la simulation informatique. Avec l'évolution incessante de la puissance de calculs des ordinateurs et ainsi l'augmentation de la précision et de la fidélité des simulations, la communauté scientifique et les industriels ont de plus en plus recours à la simulation et parfois la simulation a même remplacé l'expérimentation réelle.

L'un des majeurs objectifs de la simulation est l'aide à la décision pour évaluer et valider un système, et de prévoir son comportement dans plusieurs scénarios avant son application réel. Aussi, la simulation permet de visualiser à travers une représentation en 2D/3D le système simulé. D'autre part, la simulation est un excellent moyen pour comprendre les causes et les conséquences d'un phénomène (Drogoul, Vanbergue, et Meurisse 2003). En outre, quand on étudie un système avec un comportement non-linaire et imprévisible, soumis à des contraintes spatio-temporelles et à des réactions de cause à effet pouvant donner naissance à des phénomènes émergents, en plus d'un état défini par des variables qui s'influencent, la définition du modèle mathématique lui-même devient une tâche difficile, en conséquence avoir une solution exacte aux problèmes peut être impossible, ce qui explique l'intérêt soutenu dont bénéficie la simulation informatique (Drogoul, Vanbergue, et Meurisse 2003).

(Law et Kelton 1991) a identifié huit problèmes pour lesquels la simulation est une excellente solution :

- La conception et l'analyse des systèmes de production,
- L'évaluation des exigences matérielles et logicielles d'un système informatique,
- L'évaluation d'un nouveau système ou une nouvelle tactique militaire,
- La définition des politiques de triage pour un système d'inventaire,
- La conception des systèmes de communication,
- La conception et l'évaluation des infrastructures de transport,
- La conception et l'évaluation des organismes de services de santé et sociaux,
- L'analyse des systèmes financiers ou économiques.

Selon (Borshchev 2013), les avantages de la simulation sont :

- Trouve des solutions à des problèmes très complexes, là où d'autres méthodes échouent,
- Le modèle de simulation est un système modulaire,
- Calcule à chaque instant l'état du système,
- Représente l'environnement réel du système d'étude,
- L'animation en 2D/3D du comportement du système,
- Enrichit le modèle par des histogrammes ou d'autres représentations graphiques des données de sorties,
- Les modèles de simulation sont plus convaincants qu'un autre type de modèles.

6.2. Types de simulation

On distingue trois types de simulation : la simulation continue basée sur la dynamique des systèmes, la simulation à événements directs, et la simulation à base d'agents. Chaque type se distingue par son niveau d'abstraction, son langage, et sa façon de conception des modèles à simuler. La simulation continue est utilisée pour les systèmes nécessitant un haut niveau d'abstraction. Introduite en 1961 par l'ingénieur chez IBM Geoffrey, la simulation continue représente l'évolution d'un système dans le temps, tout en prenant en compte les événements perturbateurs qui changent l'état du système. Dans cette approche, le système est considéré comme une séquence d'opérations exécutée par des entités. Les concepts utilisés sont : source, état, condition, boucle, file d'attente, fin, diagramme d'activités.

Pour la simulation à événements directs, elle est appliquée pour le développement des modèles de simulation nécessitant un niveau moyen d'abstraction. Cette méthode a été présentée au milieu des années 1950 par (Forrester, 2017), qui s'est inspiré des lois de circuit électrique en physique pour construire un modèle de simulation. Initialement développée pour aider les dirigeants d'entreprise à améliorer leur compréhension des processus industriels, de nos jours elle est utilisée pour l'analyse et la conception des politiques de ventes, d'achats, etc. Le modèle est formé par des composants (stocks) liés par des relations circulaires, entrelacées ou déterminées par le temps. Chaque composant est un ensemble d'entités vu comme une unité solide.

Pour la simulation à base d'agents, le niveau d'abstraction est relatif au niveau de détails de ou des agents utilisés. Ce type de simulation est assez jeune par rapport aux deux autres types. Son but est d'approfondir les connaissances sur le système simulé en représentant les aspects qui ne sont pas pris en compte par les approches traditionnelles. La simulation à base d'agents a évolué grâce à la modélisation orientée objet. Cependant, un modèle peut être subdivisé en plusieurs parties où chaque partie est implémentée à l'aide d'une approche, dans ce cas, le modèle de simulation est dit un modèle multi-approches.

6.3. La vérification, validation et calibration du modèle simulé

Souvent, la vérification et la validation sont confondues. Bien qu'il existe une nuance sémantique entre ces deux notions (vérification et validation), elles passent souvent à tort pour synonymes. Dans cette partie nous allons détailler ces deux notions importantes ainsi que la notion de calibration.

6.3.1. La vérification

La vérification d'un modèle de simulation est une étape primordiale dont l'objectif est de s'assurer que le modèle de simulation est correctement implémenté et reflète le comportement réel du système étudié tout en donnant des résultats raisonnables. Les activités de vérification d'un modèle de simulation servent à prouver que le processus d'implémentation s'est bien déroulé et que les exigences/besoins sont représentées sans défauts.

Souvent, la vérification de modèles de simulation se fait en utilisant diverses méthodes. Les méthodes les plus utilisées sont :

- Testes : On distingue trois types de testes : les tests unitaires des composant ou module de la simulation ; les tests d'intégration et de la cohérence du modèle ; le test de non -régression des erreurs.
- Débogage : Outre les erreurs syntaxiques/sémantiques, le débogage sert à détecter les erreurs d'exécution imprédictibles et qui émergent pendant

la compilation ou l'exécution du modèle. Souvent on fait recours au fichier log afin d'analyser l'arborescence des erreurs.

- Vérification de la représentation graphique : Vérifier si les animations 2D/3D se déroulent sans dysfonctionnement.

6.3.2. La validation

La validation vise à prouver que les objectifs tracés au début sont atteints, que les sorties du modèle sont fiables et que la représentation simplifiée est crédible. Fours donne ainsi la définition suivante : « C'est la confirmation par examen et collecte d'évidences objectives que les exigences à partir desquelles un "produit final" ou l'agrégation de "produits finaux" fonctionne comme attendu par l'intéressé (modélisateur, concepteur, client, ...) dans son environnement opérationnel ». Voici quelques méthodes qui permettent la validation des modèles de simulation :

- Degré de confiance : calculer la différence entre les sorties du modèle de simulation et les valeurs affichées par le système réel.
- Mesure de validité : sont des informations pertinentes qui mesurent le succès des activités critiques d'une organisation, par exemple, les indicateurs de performance. Pour chaque mesure observée, on fixe un domaine de validité, i.e., intervalle de valeurs tolérées. Par la suite, on vérifie que les valeurs données par la simulation sont dans cet intervalle.
- Réplication : consiste à lancer le modèle de simulation plusieurs fois en changeant le réglage de paramètres pour constater la variation au niveau des résultats. On peut considérer cette méthode comme une méthode de validation.

6.3.3. La calibration

Après la validation, les paramètres du modèle de simulation doivent être calibrés pour arriver aux meilleurs résultats. Le calibrage consiste donc à trouver les valeurs optimales en explorant l'espace de chaque paramètre. D'ailleurs, un

paramétrage erroné du modèle peut conduire à l'apparition de mauvais comportements (Calvez 2007).

6.4. Outils de simulation

Les modèles simulés sont conçus à l'aide d'un simulateur. Le simulateur est un logiciel qui facilite la conception et l'implémentation du modèle à simuler moyennant des outils et des modules ou de blocs de contrôle. Il y'a plusieurs facteurs qui permettent le choix d'un simulateur. (Law et Kelton 1991) a identifié six principaux critères à considérer lors du choix du simulateur.

- Capacités générales : à savoir si le simulateur propose un environnement de travail concis, riche et offrant des modules variés qui permettent une implémentation facile et flexible du modèle tout en minimisant le temps et les coûts. Offrir des outils de débogage efficace et l'exécution rapide du modèle.
- Configurations matérielles et logiciels requises : La quantité de ressource mémoire et processeur requise par le simulateur est importante. L'optimisation de l'usage des ressources par le simulateur est un critère important. D'autre part, la compatibilité avec les systèmes d'exploitation et aussi importante. La plupart des simulateurs sont disponibles seulement pour le système d'exploitation Windows, rare ceux qui ont des versions compatibles avec tout type de système.
- Qualité d'animation graphique : La qualité et le réalisme des productions 2D et 3D est un élément clé du choix du simulateur. La visualisation en 3D avec plusieurs angles de prise de vue est devenue très importante, car il rend le modèle plus fidèle à la réalité.
- Lois de probabilité : la génération des nombres aléatoire est essentielle pour un modèle de simulation, d'un côté, elle permet d'avoir des résultats différents à chaque répliation, d'un autre côté, beaucoup de systèmes réels sont de nature stochastique.
- Exposition des sorties : les logiciels de simulation doivent proposer une variété de graphiques pour exposer de diverses façons les données de sortie (les statistiques), à savoir, les histogrammes, les camemberts, les diagrammes chronologiques, les représentations en trois dimensions, les bulles, tableaux, etc.

- Service client et documentation : la société qui a créé le simulateur doit organiser périodiquement des formations pour leurs clients, et les informer à chaque mise à jour. La documentation est fondamentale pour manipuler n'importe quel logiciel. Alors, il est nécessaire qu'elle soit suffisamment détaillée et soutenue par plusieurs exemples pratiques.

Il existe des dizaines de simulateurs sur le marché, adaptés à plusieurs domaines d'application ou secteurs industriels, parmi eux, on trouve :

- Anylogic : est un simulateur multi-approches développé en JAVA. C'est le logiciel que nous avons utilisé.
- Flexsim : est un logiciel de simulation à événements discrets, où le codage du modèle se fait en C++ ou en un langage de script, appelé FlexScript. Il offre des modules pour la simulation des ateliers de production, des terminaux portuaires, des hôpitaux, etc.
- Arena : est un simulateur à événements discrets qui utilise le langage de simulation SIMAN pour décrire le système sous format de modules de contrôles. Il supporte certaines technologies de Microsoft, tel que, Visual Basic, Microsoft Visio, Excel, Access et ActiveX.
- Simio : est un outil de simulation orientée objet.
- Witness : est une plate-forme de simulation à événements discrets.

7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base et les outils que nous avons utilisés pour la mise en œuvre d'une solution pour la gestion des risques. En ce sens, nous avons mis le point sur le concept du produit intelligent et de sa mise en œuvre ainsi que son impact sur la performance. Ensuite, nous avons abordé le concept du conteneur intelligent et son inception. D'autres parts, nous avons présenté les techniques de fouille de données. Après, nous avons présenté le principe de la logique floue. En outre, nous avons présenté la simulation, ses types, ainsi que les principaux outils de simulation.

En ce qui suit, nous mettons le point sur l'utilisation de l'ensemble des concepts présentés dans ce chapitre pour la mise en œuvre d'une approche pour la gestion des risques dans les TCs liée au ciblage de conteneurs à haut risque. D'autres parts, nous allons utiliser la simulation pour valider le modèle de tracteur électrique pour le transport de conteneurs que nous allons proposer.

Deuxième partie :
Contributions

Chapitre 1 : Système De priorisation de l'inspection des conteneurs à risque

1. Introduction

La gestion des risques dans les TC a reçu beaucoup d'attention ces dernières années en raison de l'augmentation des activités frauduleuses liées aux conteneurs. La communauté internationale a proposé plusieurs initiatives pour améliorer la sécurité du transport maritime. Cependant, l'évaluation des risques des conteneurs reste une tâche difficile, souvent due à des informations incomplètes ou ambiguës sur les conteneurs. En outre, le processus d'évaluation doit être adapté de manière continue pour faire face aux facteurs de risque émergents. D'autre part, l'inspection des conteneurs à haut risque est généralement entravée par une faible capacité d'inspection ce qui entraîne un problème majeur : comment prioriser l'inspection des conteneurs suspects si leur nombre dépasse la capacité d'inspection du TC? Prioriser l'inspection des conteneurs suspects peut être la réponse. En d'autres termes, c'est la possibilité de classer les conteneurs suivant l'ordre de leur degré ou score de risque. Ce score permet aux douanes de prioriser l'inspection des conteneurs à haut risque. Toutefois, le calcul d'un tel score nécessite la quantification des risques liés aux conteneurs. Par conséquent, l'amélioration de la précision de la quantification des risques des conteneurs est essentielle en enrichissant le flux d'information lié au processus de transport du conteneur et en assurant sa véracité, tout en s'adaptant aux nouveaux facteurs de risques.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche adaptative de la priorisation de inspection des conteneurs. Nous avons nommé cette approche APRICOIN (Adaptive PRIoritizing COntainer INspection). Cette approche est basée sur trois étapes. La première étape vise l'amélioration du flux informationnel et en assurant sa véracité et ce moyennant les capacités du conteneur intelligent. Ainsi on propose un descriptif enrichi du conteneur (DEC). La deuxième étape consiste à attribuant à chaque conteneur un score de risque à l'aide de l'algorithme APRICOIN. La dernière étape consiste à prioriser l'inspection des conteneurs et exploiter les résultats d'inspection afin d'ajuster la précision de l'algorithme APRICOIN et s'adapter aux nouveaux facteurs de risque.

2. L'analyse des risques

L'analyse des risques vise à identifier les différents risques et vulnérabilités qui entourent le processus de transport des conteneurs et notamment pendant leurs transite par les TCs. Notre cas d'étude se focalise sur la priorisation de l'inspection des conteneurs. Le processus de transport de conteneurs est menacé par diverses sources de risque en raison de la mondialisation des marchés et de l'émergence d'activités frauduleuses et de terrorisme. En conséquence, un conteneur frauduleux peut affecter les activités du TC. Par exemple, selon Orphan (Orphan et al. 2005), le risque potentiel d'une attaque terroriste impliquant un conteneur est considérable. En outre, les conteneurs frauduleux transportant de la matière dangereuse, peuvent provoquer un incendie en raison de la négligence des règles de ségrégation appliquées aux matières dangereuses. Des scénarios similaires peuvent entraîner des pertes importantes et affaiblir la compétitivité des ports.

La spécification des scénarios à risques est une étape importante de l'analyse des risques. Elle consiste à spécifier les causes et les conséquences d'un scénario à risque. Pour cette fin, nous optons pour la méthode FTA (Fault Tree Analysis) et la méthodes ETA (Event Tree Analysis) (P. Marhavidas, Koulouriotis, et Mitrakas 2014). La méthode FTA se base sur l'arbre de défaillances qui détail les causes d'un événement à risque. La méthode ETA se base sur l'arbre des événements afin d'étaler les conséquences d'un événement à risque. Le scénario auquel nous nous intéressons est celui du contournement des conteneurs frauduleux de l'inspection des douanes. La figure 2.1.1 présente les causes liées à ce scénario.

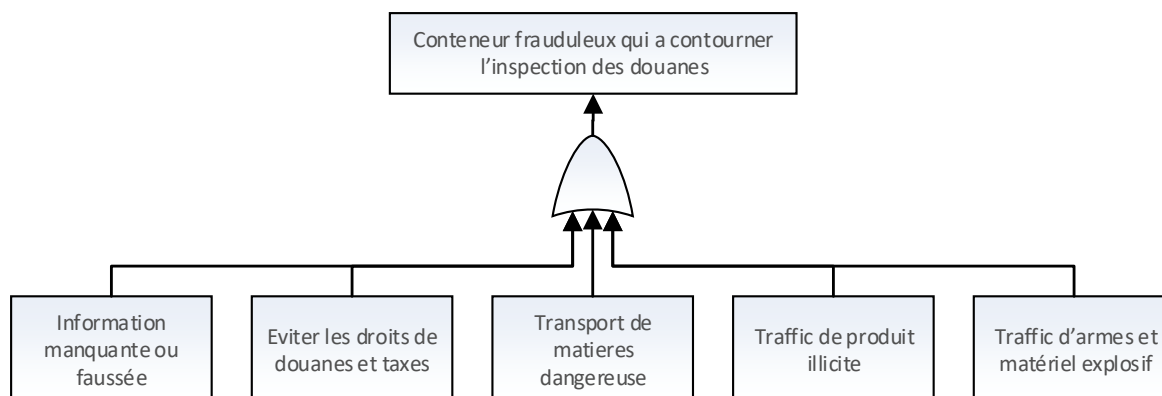


Figure 2.1. 1 L'arbre de défaillance du scénario à risque : Un conteneur frauduleux contournant l'inspection des douanes

3. L'approche proposée

Le ciblage et l'inspection des conteneurs à haut risque dans les TC est entravé par plusieurs difficultés. La difficulté majeure est la capacité d'inspection limitée en raison de l'équipement limité et de la main-d'œuvre pour effectuer des inspections. Cela devient très contraignant si le nombre de conteneurs suspects dépasse la capacité d'inspection, d'où la nécessité de prioriser l'inspections des conteneurs en les classant selon leurs degrés de risque.

En général, le risque est calculé comme le produit de la probabilité de défaillance (*PoF* pour *Point of failur*) et de la gravité des conséquences (*CoF* pour *Cosequence of failur*). Pour réduire le risque, nous pouvons réduire le *PoF* et / ou le *CoF*. Dans notre cas, le *PoF* correspond à la probabilité que la douane n'intercepte un conteneur frauduleux transportant des matières illicites ou dangereuses. Le *CoF* correspond aux conséquences qui peuvent être causées par la non détection de ces conteneurs frauduleux. Dans ce travail, nous avons adopté une approche plus préventive. Désormais, pour réduire le risque, nous nous concentrons sur la réduction du *PoF* en priorisant l'inspection des conteneurs suspects à haut risque.

L'approche APRICOIN proposée pour le classement des conteneurs suspects a été établie en se basant sur trois étapes majeures. La première étape est l'amélioration du flux d'information des conteneurs. La deuxième étape et le calcul du score de risque

des conteneurs. La troisième étape est le classement des conteneurs suspect selon leur score de risque afin de prioriser leur inspection et l'amélioration du système à partir des résultats obtenus, à savoir, l'adaptation aux nouveaux facteurs de risque. Ce qui est important à propos de cette approche, c'est qu'elle permet le classement des conteneurs moyennant un score de risque. Cela donne une meilleure vue de l'ampleur du risque des conteneurs suspects et permet donc de classer et de prioriser leurs inspections. La figure 2.1.2 résume les principales étapes de l'approche APRICOIN.

La première étape concerne l'amélioration du flux informationnel du conteneur. Nous sommes conscients de l'impact négatif de l'indisponibilité de l'information ou des fausses déclarations dans le descriptif des conteneurs sur le processus d'évaluation des risques. Par conséquent, nous estimons que le concept de conteneur intelligent peut atténuer ce problème. Le conteneur intelligent présente plusieurs avantages. Le premier avantage est sa capacité de collecter et stocker de l'information tout au long de son processus de transport. Cela permet de détecter toute altération non autorisée de l'intégrité du conteneur qui peut conduire à une fausse déclaration. Le deuxième avantage est le caractère quantitatif de certaines des informations fournies par le conteneur intelligent, ce qui aide à améliorer la précision du score de risque. En conséquence, nous proposons de structurer toutes ces informations selon un ensemble de critères agrégés sous le DEC. L'ensemble de ces critères est détaillé dans le tableau 2.1.1. Le troisième avantage est la capacité de transmettre les informations collecté et stocké sous forme de DEC.

La deuxième étape a pour objectif d'évaluer le risque de conteneur et de calculer un score de risque. Cela se fait grâce à une combinaison des techniques de fouille de donnée et les systèmes d'inférence à base de logique floue. Ainsi, cette étape est divisée en deux sous-étapes.

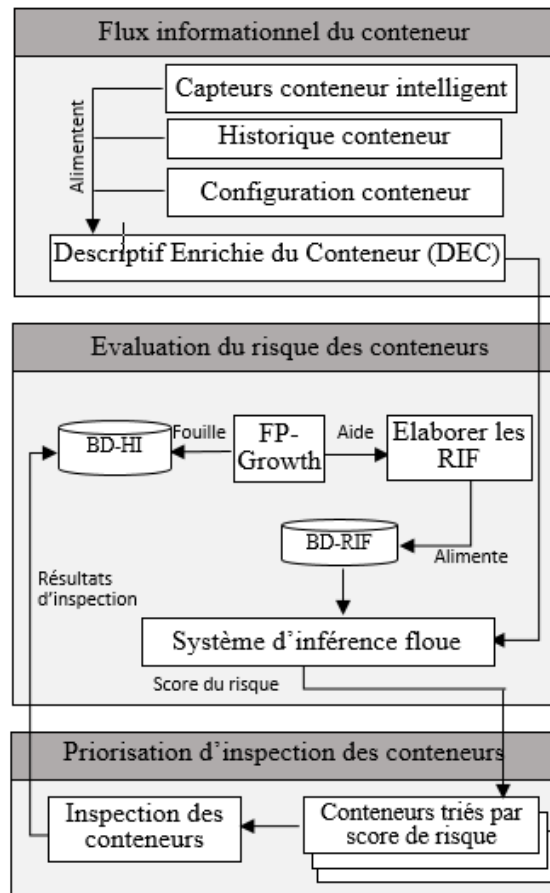


Figure 2.1. 2 Principales étape de l'approche APRICOIN

- La première sous-étape est l'extraction des règles d'inférence floue. Généralement, dans les systèmes de logique floue, les règles d'inférence sont créées manuellement grâce à la collaboration avec des experts du domaine concerné. Cependant, dans notre approche, nous proposons un processus semi automatisé d'extraction des règles d'inférence en utilisant l'algorithme de fouille de données FP-Growth pour l'extraction des motifs fréquents. Le but de cette première sous-étape est de découvrir les principaux critères du DEC que les conteneurs frauduleux déjà saisi par la douane ont tendance à avoir en commun. L'algorithme de FP-Growth est utilisé pour extraire ces critères fréquents de DEC à partir de la base de données des archives des conteneurs qui ont donné lieu à une inspection concluante de douanes BD-HI (base de données d'historique des inspections). Une inspection est concluante si elle conduit à la découverte de conteneur frauduleux (transport de matière illicite, matière dangereuse, armes, ...). Ces critères fréquents découverts sont ensuite exploités pour élaborer les règles d'inférence floue. Ils seront ensuite

stockés dans la base de données des règles d'inférence floue (BD-RIF). Cette étape est exécutée périodiquement afin d'assurer l'adaptabilité de l'algorithme aux nouveaux facteurs de risque en découvrant de nouveaux critères fréquents qui peuvent émerger au fil de temps.

- La deuxième sous-étape porte sur le calcul du score de risque des conteneurs. La BD-RIF est exploitée par le système d'inférence floue (SIF) afin de calculer le score de risque pour chaque conteneur à partir des données de son DEC.

La dernière étape de l'approche APRICOIN consiste à classer les conteneurs par leurs scores de risque dans le but de prioriser leur inspection par les douanes. Enfin, pour améliorer de manière adaptative la précision du système, la BD-HI est continuellement alimentée par les DEC de conteneurs frauduleux récemment saisis.

3.1. Amélioration du flux informationnel du conteneur

3.1.1. Vers un conteneur intelligent : Le descriptif enrichi du conteneur

Dans ce travail, le DEC proposé est établi à partir du descriptif du conteneur tel que proposé par (Longo 2012; Cariou, Mejia, et Wolff 2009), le rapport du GAO (United States Government Accountability Office) (United States Government Accountability Office 2012), et les critères utilisés par les douanes du port du Havre pour cibler les conteneurs suspects. Le DEC proposée contient un ensemble de 24 critères. En pratique, le DEC est une agrégation d'informations provenant de différentes sources. Nous considérons les sources suivantes :

- Les capteurs du conteneur intelligent.
- L'historique du transport du conteneur.
- La configuration du conteneur.

Le conteneur intelligent enregistre moyennant ses capteurs tous les événements survenant à son intérieur ou à son extérieur (ex., un accès non autorisé, de la matière dangereuse non déclaré, ...) pendant le processus de transport. En outre, il fournit

Critère	Nom	Type de données
C1	Port source	Nominative
C2	Port de destination	Nominative
C3	Pays source	Nominative
C4	Pays destination	Nominative
C5	Transporteur	Nominative
C6	Transporteur entre terminaux	Nominative
C7	Importateur	Nominative
C8	Exportateur	Nominative
C9	Destinataire final	Nominative
C10	Propriétaire	Nominative
C11	Groupeur	Nominative
C12	Niveau de sécurité de zone d'emportage	Nominative
C13	Sécurité du dépôt de conteneurs vides du port source	Nominative
C14	Durée de voyage	Nominative
C15	Type de marchandise	Quantitative
C16	Nombre arrêt non prévu dans un parking non sécurisé	Nominative
C17	Délais d'attente anormale	Quantitative
C18	Itinéraire GPS	Quantitative
C19	Détecteur de choques	Quantitative
C20	Détecteur de matières dangereuses	Quantitative
C21	Nombre de détours hors itinéraire GPS prévu	Quantitative
C22	Nombre d'arrêts hors itinéraire GPS prévu	Quantitative
C23	Scellé électronique : ouvertures non autorisées	Quantitative
C24	Scellé électronique : tentations d'ouverture non autorisées	Quantitative

Tableau 2.1. 1 Liste des critères d'un DEC

l'itinéraire pris par le conteneur et ses points d'arrêt et leur durée, ce qui sert principalement à détecter si le conteneur a été garé dans un parking non sécurisé ou a fait un détour non prévu. L'historique du transport des conteneurs contient toutes les informations relatives au transporteur et à l'itinéraire de transport prévu et ça durée. La configuration du conteneur contient des informations sur le type de conteneur et le type de cargaison.

Critère	Valeur nette	Base de l'évaluation qualitative	Évaluation qualitative	Plage numérique
C1	0 à 10	Résultat d'audit ISO 28000 - (0 si pas d'audit)	Sécurité élevé	[7 , 10]
			Sécurité moyen	[4 , 6]
			Sécurité basse	[0 , 3]
C2	0 à 10	Résultat d'audit ISO 28000 - (0 si pas d'audit)	Sécurité élevé	[7 , 10]
			Sécurité moyen	[4 , 6]
			Sécurité basse	[0 , 3]
C3	0 à 10	Niveau de risque du pays	Risque élevé	[7 , 10]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[0 , 3]
C4	0 à 10	Niveau de risque du pays	Risque élevé	[7 , 10]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[0 , 3]
C5	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C6	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C7	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C8	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C9	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C10	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C11	0 à 10	Résultat CTPAT ou autres (0 si pas de certification)	Risque élevé	[0 , 3]
			Risque moyen	[4 , 6]
			Risque bas	[7 , 10]
C12	0 à 10	Niveau de sécurité	Niveau élevé	[7 , 10]
			Niveau moyen	[4 , 6]
			Niveau bas	[0 , 3]
C13	0 à 10	Niveau de sécurité	Niveau élevé	[7 , 10]
			Niveau moyen	[4 , 6]
			Niveau bas	[0 , 3]
C14	0 à 300	Durée de voyage (nombre de jours)	Durée élevée	[201, 300]
			Durée moyenne	[101, 200]
			Durée basse	[0 , 100]
C15	0 à 10	Niveau de risque lié au type de la marchandise	Niveau élevé	[7 , 10]
			Niveau moyen	[4 , 6]
			Niveau bas	[0 , 3]
C16	0 à 10	Nombre d'arrêts	Nombre élevé	[3 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 2]

			Nombre bas	0
C17	0 à 10	Durée d'attente	Durée élevée	[7 , 10]
			Durée moyenne	[4 , 6]
			Durée basse	[0 , 3]
C18	0 à 10	Niveau de concordance avec l'itinéraire prévu	Niveau élevé	[7 , 10]
			Niveau moyen	[4 , 6]
			Niveau bas	[0 , 3]
C19	0 à ∞	Nombre de choques	Nombre élevé	[6 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 5]
			Nombre bas	0
C20	0 à 10	Niveau de dangerosité et type de la matière	Danger élevé	[7 , 10]
			Danger moyen	[4 , 6]
			Danger bas	[0 , 3]
C21	0 à ∞	Nombre de détours	Nombre élevé	[3 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 2]
			Nombre bas	0
C22	0 à ∞	Nombre d'arrêts	Nombre élevé	[3 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 2]
			Nombre bas	0
C23	0 à ∞	Nombre d'ouvertures	Nombre élevé	[3 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 2]
			Nombre bas	0
C24	0 à ∞	Nombre de tentations	Nombre élevé	[3 , ∞]
			Nombre moyen	[1 , 2]
			Nombre bas	0

Tableau 2.1. 2 Tableau de conversion du DEC

Le type de données des critères du DEC varie entre des données nominatives et quantitatives. Le tableau 2.1.1 donne la liste des critères d'un DEC et le type de données correspondant. Afin de rendre le DEC exploitable par SIF pour le calcul des scores de risque, les données quantitatives et nominatives devraient être converties en données qualitatives. Pour cette fin, nous proposons le tableau 2.1.2 que nous avons nommé le tableau de conversion.

3.2. L'évaluation des risques liés aux conteneurs

3.2.1. Extraction des critères clé du DEC

Habituellement, l'évaluation du risque d'un conteneur est basée sur l'expérience des douanes et sur leur capacité à analyser divers critères décrivant le conteneur. Cette expérience acquise par les douanes ainsi que les critères clés pour une évaluation précise du risque des conteneurs sont incarnés dans la BD-HI. Ainsi, pour extraire ces

connaissances, l'utilisation des techniques de fouille de donnée s'avère utile. Ces techniques permettent d'extraire les motifs les plus fréquents dans une base donnée de transactions, ainsi il sera utilisé dans l'extraction de l'ensemble des critères les plus fréquents (l'ensemble des critères clés) de la BD-HI. FP-Growth est l'un des algorithmes les plus performants dans le domaine de la fouille de données. FP-Growth est basé sur l'une des approches les plus rapides pour découvrir les motifs fréquents (Borgelt 2005). Selon (Tan, Michael, et Kumar 2005) FP-Growth a relativement peu d'inconvénients et surpasse les algorithmes de fouille de données standards comme Apriori (Agrawal, Srikant, et others 1994).

a) DEC initial

Critères du DEC	Valeur nette	Valeur qualitative
Critère 1	9	Elevé
Critère 2	5	Moyen
...

b) DEC booléen

Critères du DEC	Niveaux qualitatifs du critère	Valeur	Valeur booléenne
Critère 1	C1_Elevé	Elevé	1
	C1_Moyen	Moyen	0
	C1_Bas	Bas	0
Critère 2	C2_Elevé	Elevé	0
	C2_Moyen	Moyen	1
	C2_Bas	Bas	0
...

Figure 2.1. 3 DEC initiale vs DEC booléen

FP-Growth est basé sur un arbre de préfixe appelé FP-Tree qui représente la base de données à fouiller. L'adoption d'une telle structure, réduit considérablement l'espace et le temps de recherche. Cependant, comme l'algorithme FP-Growth fonctionne uniquement pour les données booléennes, nous devons convertir les valeurs qualitatives des DEC de la BD-HI en valeurs booléennes. La figure 2.1.3 montre la structure du DEC initiale par rapport à celle du DEC booléenne. Pour ce faire, nous proposons une fonction nommée DECversBOOL (Figure 2.1.4). Cette fonction à comme entrée un DEC et comme sortie un DEC booléen. Nous notons que les DEC booléens auront trois fois plus d'attributs que le DEC normal.

Fonction : DECversBOOL

/* Paramètre d'entrée

DEC //DEC with qualitative values

/* Paramètre de sortie

BooléenDEC //DEC avec des valeurs booléennes de critères

/*Etape1: Récupérer les critères du DEC

Critères[] ← obtenirCritères(DEC);

Pour chaque critère De Critères[] Faire**Si critère.ValeurQualitative = élevé Alors**

{ critère.ValeurElevé= Vrai;

critère.ValeurMoyen = Faux ;

critère.ValeurBas = Faux ;}

Si critère.ValeurQualitative = moyen Alors

{ critère.ValeurElevé = Faux ;

critère.ValeurMoyen = Vrai ;

critère.LowValue = Faux ;}

Si critère.ValeurQualitative = bas Alors

{ critère.ValeurElevé = Faux ;

critère.ValeurMoyen = Faux;

critère.ValeurBas = Vrai ;}

BooléenDEC .ajouter(critère);

. Fin Pour**Retourner** BooléenDEC;

Figure 2.1. 4 La fonction DECversBOOL

La figure 2.1.5 et la figure 2.1.6 donnent un aperçu sur un ensemble de DEC et les DEC booléen correspondant utilisée dans cette étude.

	C1	C2	C3	C4	...
DEC-1	1	1	6	6	...
DEC-2	7	6	1	4	...
DEC-3	6	7	7	10	...
DEC-4	1	2	1	7	...
DEC-5	1	0	6	0	...
DEC-6	3	4	1	8	...
DEC-7	2	0	6	7	...
DEC-8	10	5	1	3	...
DEC-9	0	2	1	0	...
DEC-10	2	3	1	10	...
DEC-11	9	4	4	9	...
DEC-12	2	5	6	2	...
DEC-13	5	7	8	5	...
DEC-14	9	1	3	5	...
DEC-15	2	0	2	1	...
...

Figure 2.1. 5 Aperçu d'un ensemble de DEC

	C1-B	C1-M	C1-E	C2-B	C2-M	C2-E	C3-B	C3-M	C3-E	C4-B	C4-M	C4-E	
DEC-1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
DEC-2	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	...
DEC-3	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...
DEC-4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
DEC-5	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	...
DEC-6	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	...
DEC-7	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
DEC-8	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	...
DEC-9	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	...
DEC-10	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
DEC-11	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	...
DEC-12	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	...
DEC-13	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
DEC-14	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	...
DEC-15	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	...
...

Figure 2.1. 6 Aperçu d'un ensemble de DEC booléens

Algorithm 1 : Algorithm FP-Growth

```
1. /* Paramètres
2. FList,F= ∅ ; // liste d'un ensemble de critères fréquents (ECF)
3. T ; //FP-Tree
4. [p|P] ; // liste triée des ensemble de critères fréquents où p est le premier
   élément et
   i. P le dernier élément de la liste
5. a ; //un ensemble de critères fréquents
6. β ; // combinaison de nœuds d'un chemin
7. DB-HI ; //Base de données des transactions
8. P ; //chemin avec un seul préfix
9. Q ; //chemins multiples
10. minSupp ; //support minimum
11. /*Etape1: Construire le FP-tree
12. F ← obtenirEnsemblesFréquents(DB-HI,minSupp);
13. FList ← trierParSupportDescendant (F);
14. T ← créerFPtree(null);
15. Pour Chaque transaction De DB-HI Faire
16. [p|P]←selectTransEnsembleFréquent (transaction, FList) ;
17. insererFP-Tree([p|P],T);
18. Fin Pour
19. /*Etape2: Extraction des ensembles frequents de critères à partir de la FP-tree
20. Procédure FP-Growth(T, α)
21. {
22. Si T.obtenirNombreDeChemins() == 1 Alors
23. P ← obtenirChemin(T);
24. Pour Chaque P.β Faire
25. convertirEnECF(P)← générerECF (β, α) ; //ECF - Ensemble de Critères
   Frequents
26. End for
27. Else
28. Q ← obtenirCheminsMultiples(T);
29. Pour Chaque critère de Q Faire
30. convertirEnECF(Q)←générerECF (β, α,critère);
   Tβ ← créerFP-Tree(β);
   FP-Growth(Tβ, β);
Fin Pour
retourner(convertirEnECF (P) ∪ convertirEnECF (Q) ∪ (convertirEnECF (P) ×
convertirEnECF (Q)));
}
```

Figure 2.1. 7 L'algorithm FP-Growth

La Figure 2.1.7 montre les étapes principales de l'algorithme FP-Growth. La première étape de l'algorithme FP-Growth consiste à construire l'arbre FP-tree. L'algorithme analyse la base de données des transactions, en l'occurrence la DB-HI, commence à collecter l'ensemble des critères fréquents F (ligne 1) et l'affiche dans la FList par ordre décroissant par rapport à leur support (ligne 2). Par la suite, la construction du FP-Tree commence. Un arbre FP-Tree nommé T avec une racine (null) est créé (ligne 3). Ensuite, l'arbre T est rempli comme suit. Pour chaque transaction de la DB-EI (une transaction correspond à un DEC de conteneur frauduleux), nous appelons la fonction *insérerFP-Tree* pour remplir l'arbre T (lignes 4 à 7). Le fonctionnement *insérerFP-Tree* est détaillé dans (Han, Pei, et Yin 2000). La deuxième étape de l'algorithme FP-Growth est l'extraction des ensembles de critères fréquents de l'arbre T. Si l'arbre T contient un seul chemin de préfixe P, les ensembles de critères fréquents sont l'énumération des sous-chemins de P qui ont un support minimum (ligne 8 à 12). Si l'arbre T possède plusieurs chemins Q, les ensembles de critères fréquents résultants sont extraits de manière récursive (ligne 14 à 19). Enfin, les ensembles de critères fréquents qui en résultent sont combinés et renvoyés comme résultat final (ligne 20).

Ainsi, FP-Growth aide à l'extraction des ensembles de critères clés de la BD-HI. Bien que FP-Growth puisse produire des dizaines d'ensembles de critères fréquents, beaucoup d'entre eux ne sont pas pertinents. Par conséquent, il est important d'appliquer les mesures d'intérêt (*interestingness measures*) (Geng et Hamilton 2006) pour décider si un ensemble de critères fréquents est intéressant, c-à-d un ensemble de critères clés. Pour cela, nous utilisons des mesures d'intérêt objectives. Par exemple, nous utilisons le support et la taille minimale d'un ensemble de critères fréquents. Un ensemble de critères est considéré comme intéressant s'il dispose d'un support supérieur à un seuil donné. Dans l'algorithme FP-Growth, on utilise *minSupp* comme un seuil de support pour éliminer les ensembles inintéressants. Une longueur minimale de l'ensemble des critères est utilisée pour raffiner les résultats de FP-Growth. Par exemple, nous considérons seulement les ensembles qui ont un minimum de trois critères. Un exemple d'un ensemble de trois critères fréquents est le suivant :

{Critère-1.Elevé | Critère-2.Bas | Critère-5.Bas | Critère-9.Moyen}

La figure 2.1.8 montre un exemple d'un arbre FP-Tree et les ensembles des critères fréquents extraits.

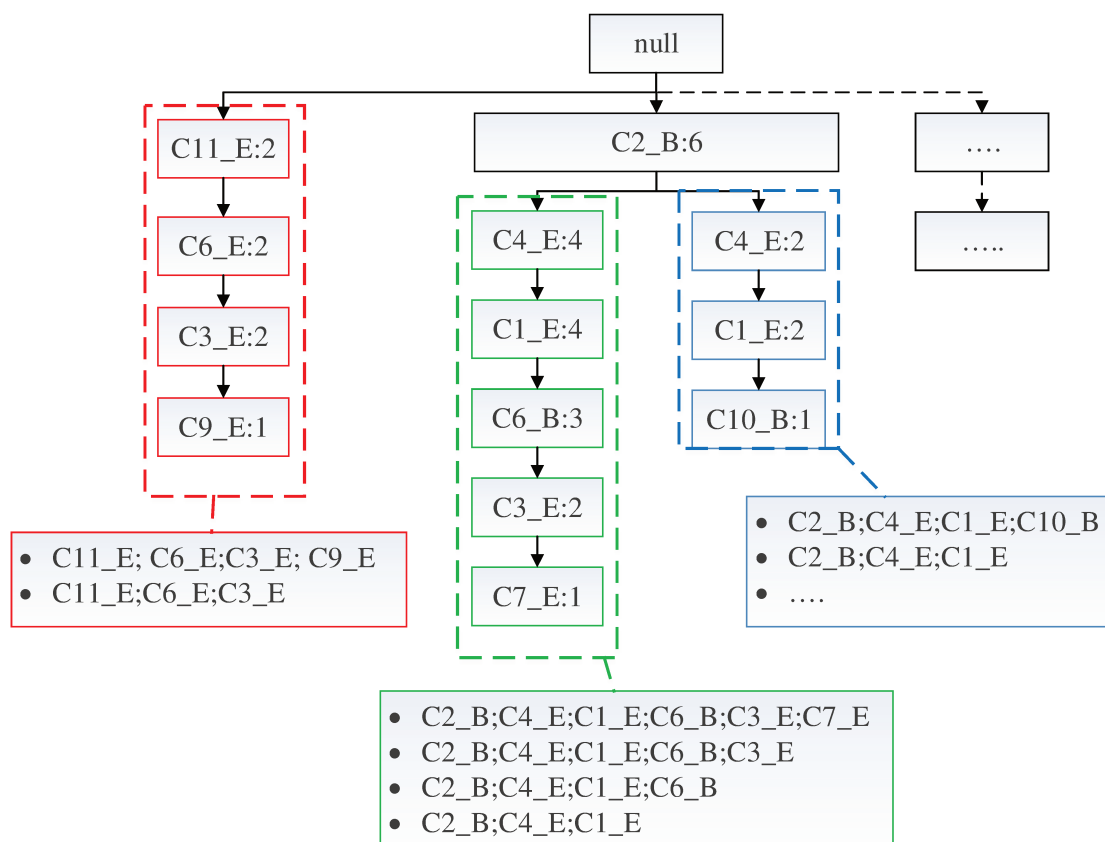


Figure 2.1. 8 Aperçue d'une Fp-Tree

3.3. Le système d'inférence flou

3.3.1. Les règles d'inférence floue

Les règles d'inférence floues reflètent l'expérience et les connaissances des agents des douanes en matière de ciblage des conteneurs frauduleux. Une règle d'inférence floue se compose de deux parties : l'antécédent qui est délimité par les mots *SI-ALORS*, et la partie conséquence qui vient après le mot *ALORS* (Lotfi A. Zadeh 1965). Ces règles d'inférence sont élaborées à partir des ensembles fréquents fournis par FP-Growth. Ainsi, la partie 'antécédent' des règles sera composée des critères d'un ensemble fréquent. Toutefois, on a constaté que même avec les mesures d'intérêt et le filtrage par support des ensembles fréquents, il arrive que quelques ensembles

fréquents fournis par FP-Growth soient inintéressant. Ainsi, pour élaborer ces règles, nous optons pour un processus semi-automatique. En effet, ces règles d'inférence seront élaborées en collaboration avec les agents de douanes.

Les règles d'inférence floue seront sous la forme :

Si (x est A) et (y est B) alors R est C

Où x, y sont des critères, R est le risque du conteneur, et A, B, C sont leurs valeurs quantitatives.

La règle suivante montre un exemple de règle d'inférence floue :

Si (C1 est Elevé) et (C2 est Bas) et (C3 est Moyen) Alors, le risque est Moyen

3.3.2. Le processus d'inférence floue

L'établissement d'un système d'inférence flou pour la quantification des risques nécessite une description détaillée de ses composantes. À cette fin, nous proposons un processus de description en trois étapes, comme le montre la figure 2.1.9. La première étape concerne l'étape de fuzzification. La deuxième étape se concentre sur le moteur d'inférence floue. La dernière étape aborde la défuzzification et le calcul du score de

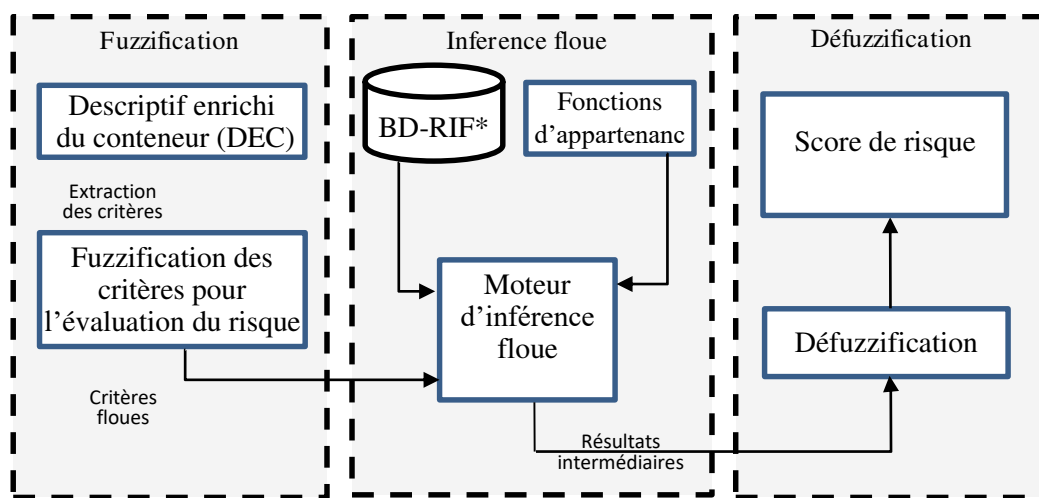


Figure 2.1. 9 Les étapes du processus d'inférence floue

risque final du conteneur.

La première étape est la fuzzification. Elle consiste à convertir les valeurs quantitatives ou nominatives de chaque critère en valeurs nettes. Pour ce faire, nous définissons un ensemble flou pour chaque critère. Contrairement aux ensembles

classiques qui ont un degré d'appartenance de 0 ou 1, un ensemble flou permet une transition progressive du degré d'appartenance. En pratique, un ensemble flou est défini à l'aide des fonctions d'appartenance (FA). La littérature a suggéré différentes formes de FA (Negnevitsky 2005). Cependant, dans le domaine de l'évaluation des

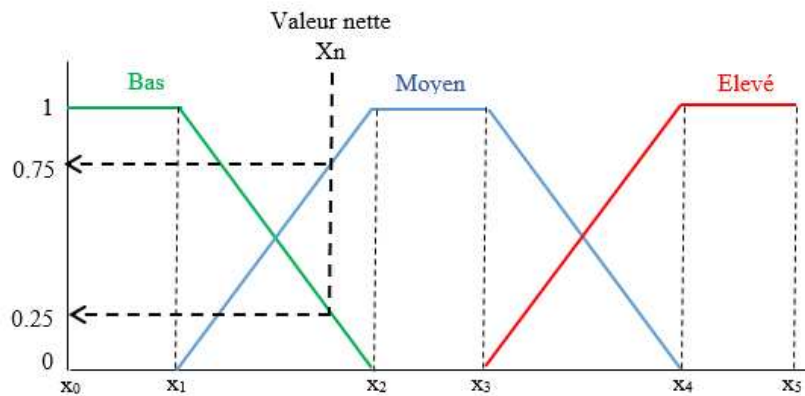


Figure 2.1.10 Exemple de fonctions d'appartenance

risques, les FA triangulaires et trapézoïdales sont couramment utilisés. Par exemple, (Pokoradi 2002) a utilisé une FA trapézoïdal pour concevoir un système de logique floue pour une évaluation des risques des processus.

Ainsi, tous les critères quantitatifs et nominatifs du DEC devraient être associés à leur ensemble flou correspondant. Chaque ensemble flou correspond à une FA trapézoïdal ou triangulaire. Le choix entre la forme trapézoïdal et triangulaire diffère selon chaque critère. Pour définir le nombre de FA, nous avons adopté l'approche consistant à commencer par le plus petit nombre de FA et d'augmenter ce nombre au fur et à mesure si les résultats ne sont pas satisfaisants. En conséquence, nous avons commencé avec trois FA et cela conduit à des résultats acceptables. Par suite, nous définissons trois catégories qualitatives : élevée, moyenne et bas. C'est ainsi que, chaque ensemble flou d'un critère sera défini par trois FA trapézoïdales. La figure 2.1.10 montre un exemple des trois FA correspondant à un ensemble flou du critère *Transporteur*.

Une FA d'un ensemble flou A est communément noté μ_A . Le degré d'appartenance d'une variable x est notée $\mu_A(x)$.

La FA *bas* est définie par deux points (x_1, x_2). En conséquence, elle est définie comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x > x_2 \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x < x_1 \end{cases}$$

La FA *moyen* est définie par quatre points (x_1, x_2, x_3, x_4). En conséquence, elle est définie comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & (x < x_1) \text{ ou } (x > x_4) \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x_2 < x < x_3 \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3}, & x_3 < x < x_4 \end{cases}$$

La FA *élevé* est définie par deux points (x_3, x_4). En conséquence, elle est définie comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < x_3 \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3}, & x_3 < x < x_4 \\ 1, & x > x_4 \end{cases}$$

Toutes les valeurs nettes d'une variable X peuvent être fuzzifiées à travers les trois FA (*bas, moyen, élevé*) dans la figure 2.1.10.

Par exemple, si l'on suppose que X_n est une valeur nette, alors :

- Le degré de l'appartenance de X_n à FA *faible* est de 0,25 (voir la figure 2.1.10).
- Le degré de l'appartenance de X_n à FA *moyen* est de 0,75 (voir la figure 2.1.10).

La figure 2.1.11 illustre les FA qui ont été utilisées pour le critère 3 qui se réfère à la société de logistique en fonction du score d'audit CT-PAT.

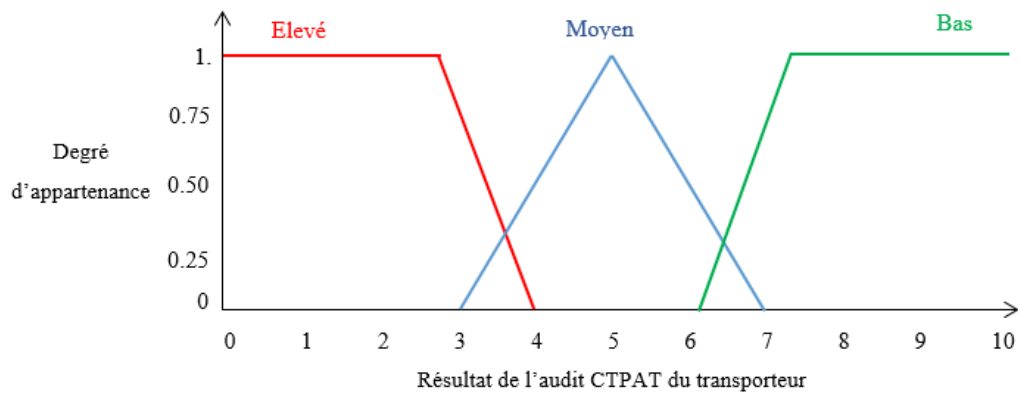


Figure 2.1. 11 Les fonctions d'appartenance du critère Transporteur

La deuxième étape est l'inférence floue. En pratique, les opérateurs d'implication floue sont utilisés pour interpréter les règles d'association floue. L'opérateur d'implication le plus utilisé est l'implication minimale de Mamdani (Mamdani 1974). La valeur de l'implication minimale de Mamdani est $\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$. L'implication minimale s'applique à prendre le minimum de degré d'appartenance de x et y . Le moteur d'inférence est responsable de l'application des règles d'association floue aux valeurs fuzzifiées pour produire un résultat flou.

La dernière étape est la défuzzification. Cette étape transforme les résultats flous en un résultat net. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification (Cox 1999); La méthode que nous avons adoptée est la méthode du centre de gravité (COG, *Center Of Gravity*) (Ying et Wang 2006). Le COG est probablement la technique la plus utilisée. Cette technique définit le résultat en calculant l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance caractérisant l'ensemble flou résultant de l'étape d'inférence. Le COG peut être exprimé comme suit :

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx}$$

3.4. L'algorithme APRICOIN

L'algorithme APRICOIN (figure 2.1.12) donne une description détaillée des étapes principales de l'approche proposée. L'algorithme APRICOIN comporte deux entrées : l'historique des conteneurs frauduleux, stocké dans la *BD-HI*, et l'ensemble des conteneurs à prioriser pour l'inspection *ensembleConteneurs*. Les deux entrées sont

sous forme de DEC. La sortie est une liste de conteneurs classés par leur score de risque *ListePrioritéInspection*.

La première étape de l'algorithme APRICOIN vise à préparer l'ensemble de données d'entrée en forme booléenne pour l'algorithme FP-Growth. En conséquence, nous examinons l'historique des inspections, extrayons les critères et les convertir en forme booléenne. Le processus de conversion se fait par la fonction *DECversBOOL* (voir la figure 2.1.4). Les DEC booléens sont ensuite stockés dans la base de données *BD-HI*.

La deuxième étape consiste à extraire les critères fréquents de l'historique des inspections pour construire les règles d'inférence floue. Cette étape est répétée chaque mois afin d'adapter les règles d'inférence floue à tous les critères émergents. Pour ce faire, nous appelons l'algorithme FP-Growth pour extraire les ensembles de critères fréquents (*EnsemblesCF*) de la *BD-HI*. Les *ensemblesCF* sont ensuite utilisés pour élaborer les règles d'inférence floues. Une fois que toutes les règles sont élaborer et stockées dans la base de données des règles d'inférence *BD-RIF*, nous passons à la troisième étape.

La troisième étape consiste à évaluer le score de risque d'un conteneur à travers le moteur d'inférence floue. Pour chaque DEC, nous utilisons la fonction *quantifierDEC* pour extraire les valeurs quantitatives de ses critères (voir les tableaux 2.1.1 et 2.1.2). Par la suite, nous appelons le moteur d'inférence flou avec les règles floues et les critères quantitatifs comme entrée. Les scores obtenus sont enregistrés dans la liste des scores appelée *scoresList*.

La quatrième étape est le classement des conteneurs, qui consiste à trier la liste de score, puis à réduire la liste en utilisant le taux d'inspection comme limite (par exemple, si nous avons 1,8% du taux d'inspection, nous sélectionnons seulement 1,8% des conteneurs à partir du plus haut score sur la liste triée). Finalement, on a une liste des priorités d'inspection *listePrioritéInspection*. Les conteneurs qui ont une priorité d'inspection ont un score de risque élevé, toutefois, il se peut qu'ils ne soient pas tous des conteneurs frauduleux en réalité. Ainsi, la dernière étape consiste à attendre le résultat des inspections des agents de la douane. Une fois l'inspection est accomplie,

la BD-HI est alimentée seulement avec les DEC des conteneurs qui sont avérés frauduleux.

Algorithm 3: APRICOIN Algorithm

```
1. /*Paramètres d'entrée :  
2. DB-HI //base de données de l'historique des inspections,  
3. ensembleConteneurs //Ensemble de DEC correspondant aux conteneurs  
   à prioriser pour l'inspection  
4. /* Paramètres de sortie :  
5. listePrioritéInspection //Liste des conteneurs triée 2par priorité  
   d'inspection  
6. /*Variables  
7. booléenDEC //DEC booléen  
8. DB-HI-BOOL // base de données de l'historique des inspections  
   sous format booléenne  
9. DB-RIF // base de données des règles d'inférence floue (RIF)  
  
10. /*Etape1 : Convertir les DEC en DEC booléens  
11. Pour Chaque DEC De DB-EI Faire  
12. booléenDEC ← DECversBOOL(DEC) ;  
13. DB-HI-BOOL.ajouter(booléenDEC);  
14. Fin Pour  
  
15. /*Etape2 : Extraction des ensembles de critères fréquents (ECF) et  
   l'élaboration des règles d'inférence floue  
16. Pour Chaque mois Faire  
17. EnsembleCF ← FPGrowth(DB-HI-BOOL);  
18. Pour Chaque ensemble De EnsembleCF Faire  
19. RègleInferenceFloue← elaborerRègle(ensemble);  
20. DB-RIF.ajouter(fuzzyRule);  
21. Fin Pour  
22. Fin Pour  
  
23. /*Etape3 : Calcule du score de risque  
24. Pour Chaque DEC De ensembleConteneurs Faire  
25. DECQuantifié ← quantifierDEC(DEC);  
26. RIF← obtenirRIF (DB-RIF);  
27. scoreRisque ← moteurInferenceFloue(DECQuantifié, RIF);  
28. scoresListe.ajouter(scoreRisque);  
29. Fin Pour  
  
30. /*Etape4 : Classement des conteneurs à inspecter par score de risque  
31. listeConteneurTriée← trierListe(scoresList);  
32. listePrioritéInspection←modifierListe(tauxInspection, listeConteneurTriée);  
33. /*Etape5 : Inspections history feed  
34. listConteneursFrauduleux← obteneiurRésultatInspections ();  
35. DB-HI.ajouter(listConteneursFrauduleux);
```

Figure 2.1. 12 L'algorithmme APRICOIN

4. Étude illustrative : Terminale multimodale du Havre

L'étude illustrative porte sur la priorisation de l'inspection des conteneurs suspects dans le terminal multimodal (TMM) du port du Havre. Plus de 300 000 conteneurs transitent par le MMT par an. Les conteneurs transitant par le MMT sont assujettis à une évaluation des risques afin de cibler les conteneurs suspects pour une inspection approfondie. La capacité d'inspection du MMT est de 1,8%. Dans cette étude illustrative, nous simulons l'approche proposée pour analyser un ensemble de données de 300 000 DEC pour une capacité d'inspection de 1,8% (450 conteneurs) et un taux de 3,6% (900 conteneurs) de conteneurs à risque avec différents degrés de risque. En outre, une approche de base est simulée sur le même ensemble de données pour comparer ses résultats avec les résultats de l'approche proposée.

La comparaison entre les deux approches sera basée sur la précision (Buckland et Gey 1994) de la liste d'inspections priorisés et sur la capacité de s'adapter aux nouveaux critères clés qui émergent au fil du temps. La précision est la fraction des conteneurs à haut risque, c.-à-d. les conteneurs à risque très élevé qui doivent être inspectés en priorité et qui doivent figurer en haut de la liste des inspections priorisés.

4.1. Application

Pour réaliser une simulation de l'approche proposée, nous aurons besoin de deux jeux de données :

- Un premier jeu de données constitué d'un ensemble de DEC servant à simuler les conteneurs en transit à travers le MMT sur un an.
- Un deuxième jeu de données constitué d'un ensemble de DEC servant à simuler l'historique des inspections (BD-HI).

Nous avons choisi 12 critères DEC comme critères clés. Plus un DEC valide un grand nombre de ces critères clés, plus il aura un score de risque élevé.

En l'absence de tels jeux de données, nous avons développé un programme en langage Java pour générer ces jeux de données. Tout d'abord, nous avons généré 12 jeux de données de 25.000 DEC pour simuler les conteneurs transitant par le MMT

pendant 12 mois. Parmi chaque ensemble de données, 3,6% (900 DEC) sont des DEC de conteneurs à risque élevé avec divers degrés de risque.

Afin de vérifier la précision du classement des deux approches, nous avons généré 900 DEC à haut risque comme suit :

- 50% sont des DEC à très haut risque.
- 50% sont des DEC à haut risque.

Les DEC des conteneurs à très haut risque sont générés de manière à valider 12 critères clés. Les DEC à haut risque valident 8 critères clés. Nous notons que tous les DEC des conteneurs à haut risque générés sont connus et marqués afin d'évaluer la précision de chaque approche. En outre, afin de tester l'adaptabilité de l'approche proposée aux critères clés émergeant, nous augmentons la fréquence d'un critère émergeant à partir du mois de Janvier.

Pour simplifier la simulation, nous supposons que tous les conteneurs à haut risque entraînent une inspection douanière positive. Une inspection positive conduit habituellement les douanes à trouver des matières illicites ou dangereuses dans un conteneur. Par conséquent, chaque mois, la BD-HI est alimenté par 450 DEC (correspondant à a capacité d'inspection qui est de 1.8%).

En deuxième lieu, nous générons le jeu de données correspondant à l'historique des inspections pour créer les données initiales de la BD-HI. Ce jeu de données initiale est constitué d'un ensemble de 5.000 DEC de conteneurs frauduleux. Nous notons que nous avons choisi 5.000 DEC que données initiales de la BD-HI afin de d'assouplir l'émergence de nouveaux critères. Dans le processus de génération, un conteneur à risque élevé est un conteneur qui répond à un certain nombre de critères clés DEC. Nous avons utilisé la distribution triangulaire dans le processus de génération pour rendre plus fréquents les 12 critères clés choisis parmi le jeu de donnée initiale de la BD-HI.

La mise en œuvre de l'algorithme APRICOIN commence par l'exécution de l'algorithme FP-Growth. Nous avons mis en œuvre l'algorithme FP-Growth en utilisant le framework de données SPMF (*Sequential Pattern Mining Framework*) (Fournier-Viger et al. 2014). Ensuite, le score de risque des DEC est évalué en utilisant

le système d'inférence floue. Enfin, une liste de priorisation d'inspection est fournie. Nous avons mis en œuvre le système d'inférence flou proposé à l'aide de la bibliothèque JFuzzyLogic (Cingolani et Alcalá-Fdez 2013). JFuzzyLogic est une bibliothèque open source écrite en Java et utilise un moteur d'inférence basé sur Mamdani.

Pour l'approche basée sur AHP, nous avons utilisé le framework jAHP (*Java Analytic Hierarchy Process*) pour mettre en œuvre l'approche multicritères AHP. Le poids des critères AHP correspond aux 12 critères clés choisis précédemment. Nous notons que les poids des critères AHP sont fixes et ne s'adaptent pas. La figure 2.1.13 donne un aperçu sur le processus d'analyse hiérarchique de la méthode AHP. De suite, l'algorithme APRICOIN et la méthode AHP sont ensuite exécutés pour chaque jeu de données mensuel.

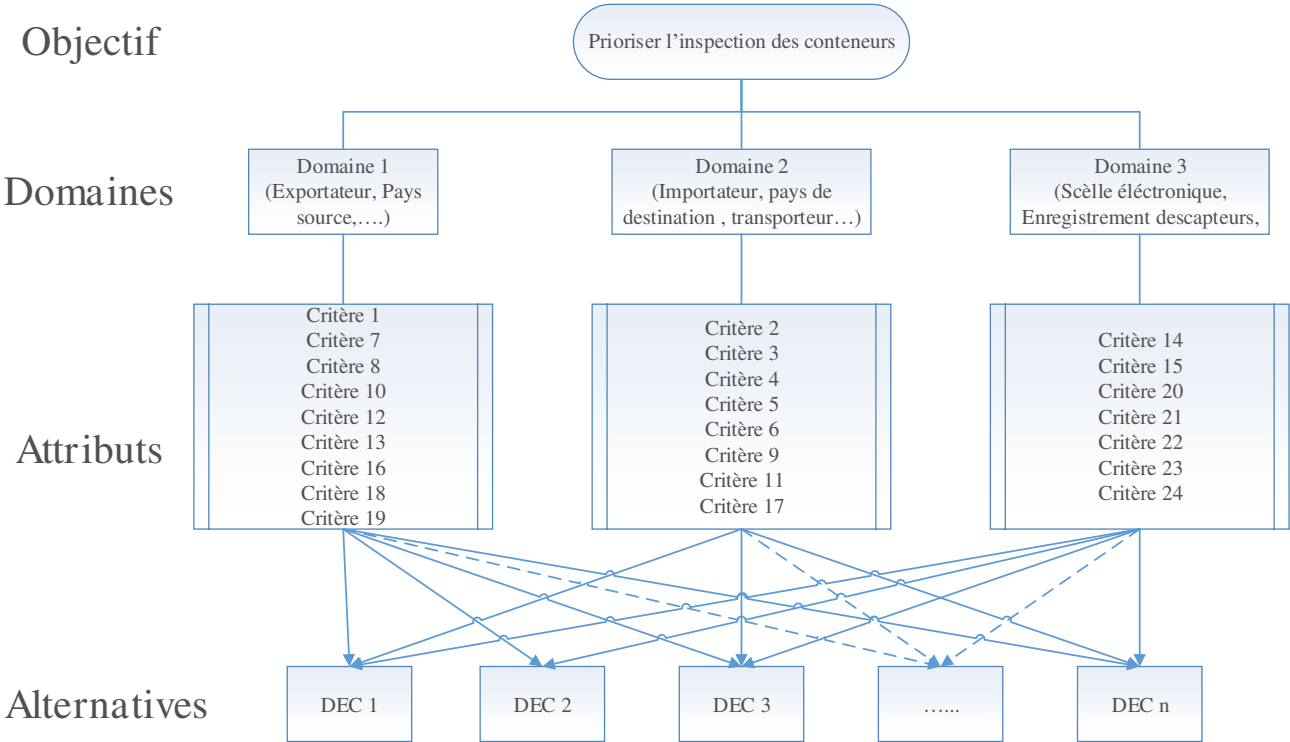


Figure 2.1. 13 Aperçu du processus d'analyse multicritère AHP

Pour l'approche basée sur APRIORI, nous avons utilisé l'algorithme APRIORI original proposé par Agrawal (Agrawal, Srikant, et others 1994) pour extraire les règles d'association qui seront utilisées pour cibler les conteneurs à haut risque. En pratique, nous avons utilisé la bibliothèque java JESS (Friedman-Hill 2003) pour implémenter l'algorithme APRIORI. JESS fournit le moteur d'inférence RETE, qui assure l'application des règles extraites aux ECDs.

Pour comparer les performances de l'approche proposée avec les autres approches, nous utilisons deux indicateurs de performances :

- La précision du classement,
- La précision du système.

La précision du classement mesure la proportion des DEC à très à haut risque (qui valident les 12 critères clés) figurant parmi les DEC des conteneurs à inspecter dans la liste fournis en fin d'exécution des approches. La précision est calculée en utilisant la formule suivante :

$$precision = \frac{DEC \text{ à tres haut risque}}{DEC \text{ à inspecter}}$$

La précision du système se mesure par la capacité de détecter les ensembles de critères clés émergents.

4.2. Résultats

Pour montrer l'adaptabilité de l'approche proposée aux critères émergents, nous donnons à la figure 2.1.15 l'évolution des ensembles de critères fréquents lors de l'exécution de l'APRICOIN sur 12 mois. Comme mentionné précédemment, nous commençons à augmenter la fréquence d'un ensemble critère émergeant (ensemble 5) à partir de Janvier. On a choisi l'ensemble 5 comme ensemble de critères fréquents émergents. Pendant les premiers mois de la simulation, APRICOIN ignore l'ensemble émergeant 5 en raison de sa faible valeur de support (moins de support minimum). Cependant, à partir du mois de Septembre, l'ensemble émergeant 5 a atteint le seuil minimum de support et a donc été considérés comme un nouvel ensemble de critères fréquents. L'ajout de ce nouvel ensemble de critères fréquents affectera directement la base de données des règles floues. Une nouvelle règle d'inférence sera élaborée et

validée par rapport à sa pertinence. Cette nouvelle règle participera à l'évaluation des scores de risque et influencera la précision du classement.

En ce qui concerne l'algorithme APRIORI, il n'a extrait qu'une seule règle à partir de la base de données de l'historique des inspections. En conséquence, APRIORI commence le mois de janvier avec une seule règle. La figure 2.1.14 montre l'évolution du nombre de règles extraites par APRICOIN et Apriori. En mois de mars, APRIORI a généré 3 règles. Cependant, à partir du mois d'avril, il conserve seulement 2 règles pour le reste de l'année.

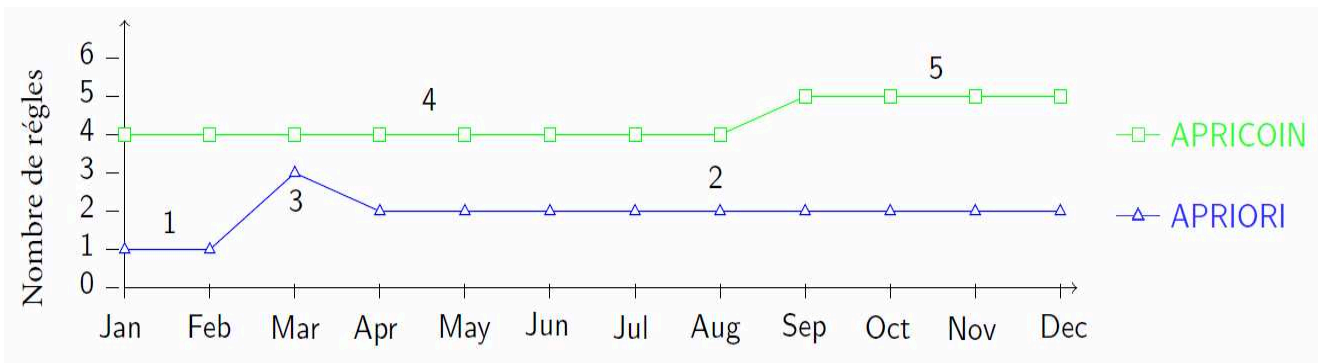


Figure 2.1. 14 Nombre de règles générées par l'approche APRICOIN et Apriori

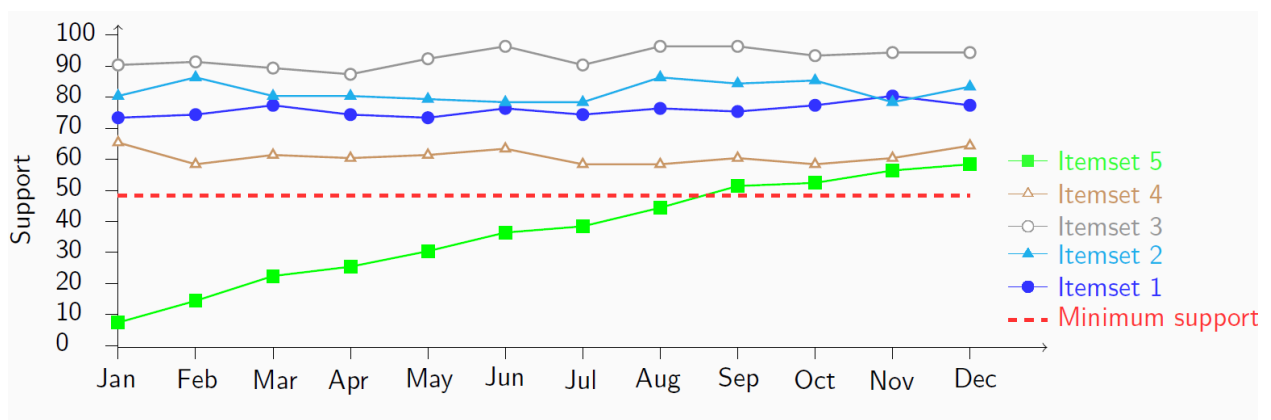


Figure 2.1. 15 Evolution des ensembles de critères fréquents

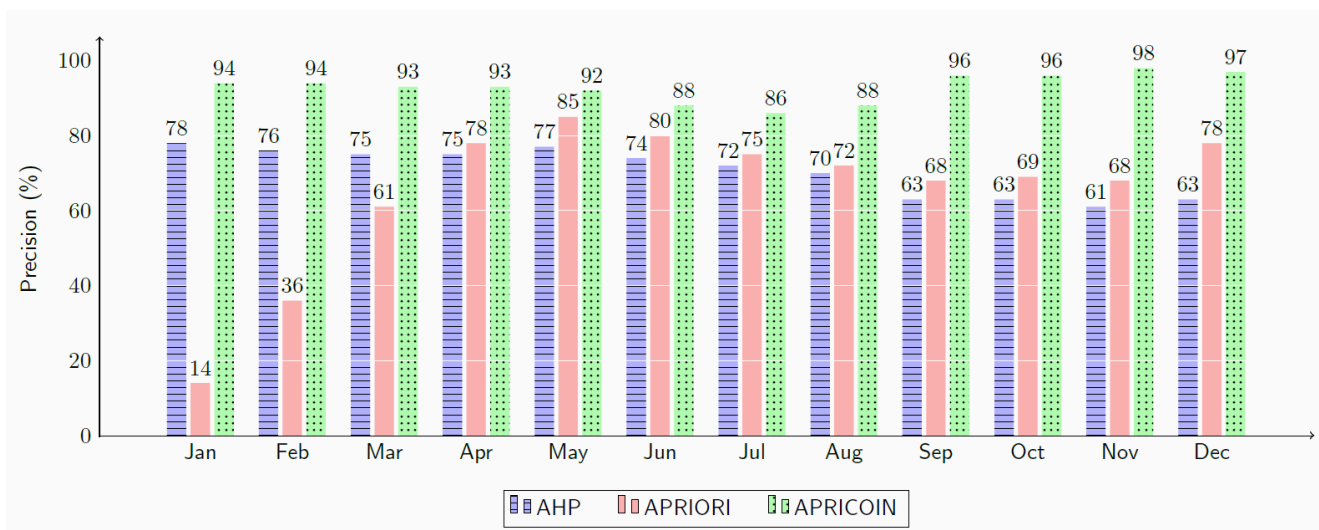


Figure 2.1. 16 Evolution de la précision de l'approche APRICOIN , Apriori et AHP

Pour tester à la fois la précision d'APRICOIN par rapport à Apriori et AHP, nous avons progressivement augmenté chaque mois le nombre des DEC validant les critères de l'ensemble émergeant 5. La figure 2.1.14 montre la précision de classement des approches AHP et APRIORI et l'approche proposée APRICOIN sur 12 mois. AHP est incapable de faire face au nombre croissant de conteneurs à haut risque qui valident les nouveau critères clés de l'ensemble émergeant 5. Ainsi, sa précision commence à diminuer à partir du mois de Juin. D'autre part, la précision de l'APRICOIN commence également à chuter à partir du mois de Juin à août en raison du nombre croissant de conteneurs à haut risque qui valident les nouveau critères clés de l'ensemble émergeant 5. Cependant, à partir du mois de Septembre, APRICOIN a détecté un nouvel ensemble de critère clés (l'ensemble 5). Ainsi une nouvelle règle d'inférence floue a été ajoutée. Cela a permis à APRICOIN de rétablir son taux de précision à partir du mois de Septembre.

Pour tester à la fois la précision d'APRICOIN par rapport à Apriori et AHP, nous avons progressivement augmenté chaque mois le nombre des DEC validant les critères de l'ensemble émergeant 5. La figure 2.1.16 montre la précision de classement des approches APRICOIN, Apriori et AHP sur 12 mois. A AHP est incapable de faire face au nombre croissant de conteneurs à haut risque qui valident les nouveau critères clés de l'ensemble émergeant 5. Ainsi, sa précision commence à diminuer à partir du mois de Juin. Ceci est principalement dû à la négligence de l'approche AHP des critères clés de l'ensemble émergeant 5. Dans le cas d'APRIORI, en janvier, le taux de précision est de 14%. Ce faible taux est justifié par la non-pertinence de la règle générée en raison du faible nombre (relativement à Apriori) de conteneurs stockés dans la base de données de l'historique des inspections. En février, APRIORI a mis à jour ses règles, d'où la légère amélioration du taux de précision, qui a augmenté à 36%. En mars, il génère trois règles et améliore le taux de précision à 61%. À partir d'avril, Apriori garde seulement 2 règles et garde un taux de précision entre 70% et 77%. Cependant, la précision d'Apriori va diminuée à partir du mois d'août en raison de l'ensemble

émergeant 5 des critères clés ; toutefois, il a fallu plus de temps pour Apriori (septembre, octobre et novembre) pour se rattraper.

D'autre part, la précision d'APRICOIN commence également à chuter à partir de juin et jusqu'à juillet en raison du nombre croissant de conteneurs positifs à haut risque remplissant l'ensemble 5 des éléments clés. Cependant, à partir du mois d'août, APRICOIN a détecté l'ensemble 5 des critères émergents et a ajouté une nouvelle règle floue dans sa base de règles. Cela a permis à APRICOIN de rapidement rétablir son taux de précision à partir du mois d'août.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un algorithme de priorisation (APRICOIN) pour la priorisation de l'inspection des conteneurs à haut risque. La solution proposée exploite le potentiel du concept de conteneur intelligent pour améliorer le flux informationnel à travers l'adoption du DEC, et combine des techniques d'extraction de motifs fréquentes avec un système flou pour calculer le score de risque du conteneur.

Nous avons effectué une simulation pour valider cette solution. Nous avons généré un ensemble de données de 300 000 DEC pour simuler le trafic de conteneurs dans le MMT du port de Havre. En outre, un ensemble de données historiques de 5 000 DEC à haut risque a été généré pour simuler la base de données historique des inspections. L'approche proposée utilise la logique floue pour évaluer le score de risque d'un conteneur. La première approche de comparaison se base sur l'algorithme Apriori et la deuxième approche de comparaison repose sur la méthode de décision multicritère AHP pour évaluer le score de risque du conteneur. Nous avons constaté que les deux approches de comparaison pouvaient évaluer un score de risque ; Cependant, l'approche proposée est plus efficace par rapport aux deux approches de comparaison en termes de précision de l'évaluation des scores de risque. En outre, contrairement aux approches basées sur Apriori et AHP, l'approche proposée réussit à s'adapter aux nouveaux critères clés et de conserve sa précision.

La contribution majeure de notre étude implique la formulation d'un nouvel algorithme de priorisation des inspections de conteneurs APRICOIN. L'approche

proposée va au-delà d'un simple système de logique floue pour l'évaluation des scores de risque. Elle implémente une élaboration semi-automatisée de règles d'inférence floues basées sur l'algorithme FP-Growth. Cela permet de repérer les critères clés pour cibler les conteneurs à haut risque. En outre, il permet la détection et l'adaptation aux nouveaux critères clés qui émergent au fil de temps. En outre, l'intégration de la logique floue améliore la précision de l'évaluation des risques du conteneur.

Chapitre 2 : Logistique verte du dernier kilomètre : Le projet Green Truck

1. Introduction

En France, comme partout dans le monde, les émissions de gazes à effet de serre (GES) liées aux transports connaissent depuis des décennies une progression quasi ininterrompue et les projections pour les années à venir sont alarmantes. Selon l'agence européenne pour l'environnement (The European Environment Agency 2017), le secteur de transport jusqu'en 2015 est responsable de près de 24% des émissions de GES. Voulant lutter contre ces pollutions atmosphériques ainsi que contre ce réchauffement climatique causé par les GES, la France, en tant que pays industriel, s'est particulièrement mobilisée pour définir, optimiser et maîtriser sa consommation d'énergie fossile (essence, diesel, gaz) en adoptant des nouvelles technologies propres. Et c'est ainsi qu'est né le concept de renaissance énergétique chez le gouvernement français en admettant la nécessité d'adopter de nouvelles mesures dont, entre autres, l'exploitation des énergies renouvelables, le développement durable, les nouvelles technologies et les découvertes de nouvelles ressources. Cette politique de transition énergétique concerne, en premier lieu, le secteur de transport routier de marchandises qui doit intégrer des véhicules hybrides ou entièrement électriques.

Ainsi, la réduction de l'empreinte écologique sur l'environnement est devenue l'une des préoccupations majeures en matière de transport conteneurisé. Face à cet enjeu écologique, les acteurs du dernier kilomètre de la chaîne logistique doivent améliorer et optimiser leur infrastructure et penser des modes de transports terrestre de conteneurs ayant une empreinte environnementale moindre que les modes de transports classiques, sans toutefois impacter les performances. Le projet Green Truck s'inscrit dans cette vision et étudie la faisabilité de la mise en œuvre de mode de transport électrique de conteneurs.

Le projet green Truck (Haropa 2015) vise particulièrement les transporteurs routiers de conteneurs à courtes distances dans la zone portuaire en assurant une transition énergétique de la flotte de tracteurs diesels vers des tracteurs électriques à batteries rechargeables. Le projet s'intéresse à une technique récente de rechargement des batteries, à savoir le « Biberonnage ». Cette technologie est inspirée du

fonctionnement de certains bus électriques. Elle consiste à exploiter les courts temps d'attentes du véhicule, comme par exemple la montée et la descente des passagers pour le cas des bus, afin de recharger automatiquement la batterie du véhicule. Toutefois, les trajets doivent être répétitifs et courts afin de limiter le nombre de borne de rechargement. L'intérêt de cette technique est double : l'autonomie du véhicule est illimitée (tant qu'il y a des bornes à disposition) et la taille de la batterie est réduite en poids et en coût.

Dans cette étude, les tracteurs routiers transportent des conteneurs entre des lieux définis de la zone portuaire (terminaux maritimes, parking des transporteurs, dépôts de vides) et à chaque origine destination, les tracteurs sont immobilisés pour permettre la manutention du conteneur ou satisfaire les procédures administratives. Ce projet a donc pour objet d'explorer les différentes techniques et modes de rechargement rapide des batteries de tracteurs routiers électriques compte tenu des contraintes d'exploitation, et d'évaluer la faisabilité économique de la mise en œuvre d'un système comprenant le véhicule et l'infrastructure électrique.

2. Tracteurs électriques : Veille technologique

L'objectif de cette veille technologique est d'explorer les différentes techniques, équipements et infrastructures de recharge électrique, et ce afin de vérifier la faisabilité technique et économique de la solution électrique projetée.

La solution électrique est entravée par rapport à la solution thermique par trois facteurs majeurs : (1) sa faible autonomie de batteries des véhicules électriques (VEs), (2) les longs temps de recharge, et (3) le nombre limité de stations de recharge. Tout cela rend le dimensionnement de la batterie et les puissances de recharge des stations une tâche primordiale. Pour répondre à ces challenges, de nombreux travaux de recherche ont été effectués afin d'explorer et repousser ces limites technologiques relatives à la batterie, et aux techniques de recharge.

Dans la littérature, les véhicules électriques sont classés en trois types ; véhicules à batteries (Battery electric vehicles ou BEVs), véhicules hybrides (Hybrid electric

véhicules ou HEVs) et véhicules à piles à combustibles (Fuel cell electric vehicles ou FCEVs) (Jabali, 2015.).

Les BEVs sont dotés d'un ou plusieurs moteurs électriques et utilisent uniquement la puissance fournie par leurs batteries internes (Réf. Electrification Coalition, 2013). Les avantages de ces moteurs par rapport aux moteurs thermiques sont (1) un excellent rendement atteignant les 90% en moyenne pour les gammes de puissance considérées, (2) un fonctionnement silencieux et propre. De plus, ils permettent de fournir un couple (capacité maximale à accélérer) à faible vitesse appréciable au démarrage d'un véhicule (MacLean, 2003) et possèdent un fonctionnement à puissance maximale avec un bon rendement sur une large plage de vitesse (Réf. de Santiago et al. 2012). Ainsi, les BEVs n'exigent pas de changements d'huile réguliers et possèdent moins de parties mobiles que les autres types de véhicules (Feng and Figliozzi, 2013). Pendant les phases de décélération et de freinage du véhicule, le système de récupération de l'énergie cinétique assure la recharge des batteries (Beretta, 2010). Ceci permet également une moindre usure des freins, réduisant ainsi les coûts de maintenance (Lee et al., 2013).

Par ailleurs, la problématique des BEVs prend corps dans le coût global (véhicule, infrastructure et batterie) mais aussi dans les contraintes de l'autonomie (capacité) de la batterie. L'autonomie des BEVs diminue au fil du temps en raison du vieillissement de la batterie (Taefi et al., 2014). Elle dépend directement de la capacité de la batterie, du type de trajet (plat, varié, urbain, etc.), de la température extérieure, du mode de conduite et des accessoires utilisées (phares, chauffage, climatisation, essuie glaces, etc.) (US DOE, 2012b). La taille et le poids de la batterie réduisent la charge utile maximale des BEVs lourds par rapport aux véhicules thermiques équivalents (den Boer et al., 2013).

En ce qui a trait aux batteries, de nouvelles technologies sont apparues notamment celles exploitant la technologie lithium (Réf. Chauvin, 2016). Comparé à d'autres alternatives, les batteries au lithium-ion disposent de fortes densités d'énergie (100 Wh/kg) et de puissance (300W/kg), et d'une durée de vie un peu plus longue (Lukic et al, 2008). C'est pourquoi elles sont l'alternative la plus utilisée pour le

transport électrique de passagers et des marchandises (Réf. den Boer et al., 2013). Mais cela ne résout pas la problématique majeure de la durée de vie en utilisant des batteries lithium (Montaru, 2009) et (Ebbesen et al., 2012). Les constructeurs qui proposent des véhicules hybrides électriques et tout électriques garantissent actuellement des durées de vie atteignant 100 000km, alors que les véhicules thermiques peuvent atteindre une durée de vie au-delà de 200 000km. De plus, la batterie peut représenter un coût d'investissement prépondérant dans l'achat du véhicule (Electrification Coalition, 2013). Cependant, des réductions significatives des coûts liés à la batterie sont également prévues sur les prochaines décennies, avec une réduction d'un facteur de 10 d'ici 2030 par rapport à 2009 (US DOE, 2010).

Outre la littérature liée aux véhicules et batteries, d'autres recherches connexes se sont concentrées sur l'infrastructure de stations de recharge des batteries. De nos jours, lorsque les batteries des BEVs sont épuisées, il existe deux possibilités : soit les recharger, soit les échanger. Les stations de recharge sont classées en deux catégories : recharge rapide et recharge lente. Une station de recharge rapide peut recharger un BEV en moins de cinq minutes (réf. Wang), mais ce type de recharge peut réduire considérablement la durée de vie des batteries. A l'inverse, une station de recharge lente nécessite plus de temps pour recharger un BEV. Par exemple, dans les stations de recharge lente du niveau 1 ou 2 (110-240 V), les véhicules doivent attendre de 2 jusqu'à 8 h pour recharger complètement leurs batteries (réf. Juan). Dans les stations de recharge de niveau 3 (480 V), la recharge d'une batterie prend environ 20 à 40 minutes (réf. Juan). Par conséquent, le temps de recharge est un facteur d'influence crucial pour la démocratisation des BEVs. Une autre alternative est de remplacer la batterie existante, lorsque celle-ci est épuisée, par une autre qui est complètement rechargée (réf. Li). Une telle méthode s'appelle l'échange ou swap de la batterie. Le principal avantage du swap est la vitesse. Toute l'opération d'échange pourrait prendre moins de 10 minutes, ce qui est à la hauteur des véhicules conventionnels thermique et beaucoup plus rapide que les stations de recharge rapides. Selon Yang et Sun (réf. Yang), le modèle de swap est plus approprié que celui de recharge puisqu'il améliore non seulement la rentabilité des véhicules mais réduit également le coût de recharge.

Du point de vue industriel, plusieurs technologies existent sur les véhicules électriques dont celui du biberonnage qui intéresse ce projet. Le biberonnage est un système d'énergie électrique pour les véhicules à recharge ultra-rapide. Il a été développé pour l'instant pour les bus électriques et tramways afin de rentabiliser l'investissement dans l'écart des coûts entre le diesel et l'électricité, l'autonomie dans le dimensionnement de la batterie (environ 50 000 km parcourus par an par ces engins) et de répondre au défi écologique. Il regroupe plusieurs techniques de rechargement, à savoir, (1) l'induction proposée par Bombardier, (2) la conduction par le sol développée par Alstom, (3) la recharge co-axiale, la recharge par caténares et pantographe, proposée par Siemens, et (4) la technique du bras articulé.

3. Le projet Green Truck

3.1. Présentation du projet

Le projet Green Truck s'intéresse particulièrement à la zone portuaire du Havre comprise entre la mer à l'Ouest et le pont de Tancarville à l'Est, entre le pied des falaises au Nord et l'estuaire de la Seine au Sud, sur une étendue de 25 km d'Est en Ouest et 5 km du Nord au Sud. Le long de ses bassins, se sont implantés des activités en relation avec le transfert de conteneurs entre les TCs et les différents modes de transport terrestres au titre desquels le routier, le ferroviaire, et le fluviale. Le transfert des marchandises conteneurisées s'est accompagné d'un développement de services logistiques tels que le dépotage et rempotage des conteneurs, le stockage et la réparation des conteneurs. Ces différentes activités génèrent des flux importants de trafic routiers au sein de la zone portuaire. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes intéressés à trois types d'activités routières :

- *Les pré- et post-acheminements routiers :* Les transporteurs routiers manutentionnent dans leurs entrepôts les conteneurs pour être ensuite transporter vers des tracteurs portuaires et vice versa.
- *La traction portuaire :* Nommée aussi le brouettage, cette activité est généralement effectuée par les dockers et concerne les transferts entre les terminaux maritimes et les plate-forme logistiques situées sur le domaine portuaire où les conteneurs sont dépotés ou empotés.

- *Le trafic de conteneurs vides* : les conteneurs appartenant aux compagnies maritimes, ils doivent leur être restitués dans un dépôt de conteneurs vides de la zone portuaire, une fois qu'ils ont été déchargés en France par un transporteur routier ou dans un centre logistique de la zone portuaire par un manutentionnaire. En sens inverse, ces mêmes acteurs doivent aller y chercher des conteneurs vides qui auront été nettoyés et réparés par les gestionnaires de dépôts de vides.

Les chauffeurs des transporteurs routiers travaillent à la journée sur une amplitude de 10 à 11 heures et réalisent 5 à 6 missions par jour. Les dockers travaillent par shifts de 7 heures et réalisent entre 2 et 3 missions par shift. Pour la plupart, ces missions sont des allers-retours entre les entrepôts des transporteurs et les TCs d'une distance comprise entre une vingtaine et une quarantaine de km. A chaque origine destination, il existe des temps d'attente pour satisfaire les procédures administratives et pour manutentionner le ou les conteneurs. Ces temps d'immobilisation des tracteurs sont de l'ordre du quart d'heure sur les TCs, de 5 à 10 minutes chez les transporteurs routiers et rarement aux dépôts de vides. L'objectif est ainsi de profiter de ces arrêts d'exploitation, pour recharger en temps masqué, la batterie des tracteurs.

Le transport des conteneurs depuis les terminaux portuaires au point de destination se réalise majoritairement avec un premier transport de proximité avant que le transport interurbain ne soit organisé. Le transport local s'opère donc principalement sur des distances courtes avec de nombreuses missions. Le territoire portuaire doit donc s'adapter au contexte et promouvoir un transport sans émissions dans un contexte de faible rentabilité de l'activité de transport routier

Le transport des conteneurs en territoire portuaire est assuré par de nombreux prestataires. L'entreprise Duboc transports est l'un des principaux transporteurs. Les tracteurs qui transportent les conteneurs sur le territoire portuaire havrais sont à moteur thermique. Les conteneurs transportés vides ou chargés par Duboc Transport sont diversifiés : 20 pieds ou 40 pieds, standards, citernes ou réfrigérés. Ils peuvent

contenir des produits dangereux. Les missions se font vers des lieux clairement définies (terminaux maritimes, parking des transporteurs, dépôts de vides, parcs logistiques). Le nombre de tracteurs destinés aux missions est de 5 à 8 tracteurs.

Une mission type

Les tracteurs réalisent des missions depuis le site de l'entreprise vers les terminaux portuaires. Certaines missions peuvent combiner des visites auprès des parcs de conteneurs vides. Une mission peut commencer à partir de six heures le matin. La dernière mission se termine au plus tard vers 18h30 (amplitude du besoin en énergie).

L'organisation d'une mission

Elle est définie à la fois par la demande des clients et par la nécessité de prendre rendez-vous auprès du terminal aussi bien pour acheminer le conteneur que pour le récupérer. Les demandes de livraison des clients (livraison ou récupération de marchandise) sont réalisées en A pour B (du jour pour le lendemain) ou en A pour C (du jour pour le surlendemain). Un transport vers le site du chargeur est typiquement attendu entre 8 heures et 10 heures le matin. Pour qu'une tournée soit engagée, il faut qu'il y ait une demande client et l'obtention d'un rendez-vous auprès du port. La prise de RDV se fait à l'aide d'une application proposée par les terminaux et accessible via le système d'information portuaire. Cette prise de rendez-vous permet de contrôler l'accès aux terminaux et de limiter les temps d'attente. Ce système de prise de rendez-vous ne permet pas à l'heure actuelle de combiner plusieurs opérations dans une seule mission. Il n'est pas possible donc de combiner la livraison et la récupération d'un conteneur. De même, il n'est pas possible de livrer deux conteneurs avec un même tracteur (2 conteneurs de 20 pieds) sur le même terminal. Un trajet chargé à l'aller peut être vide au retour. Inversement, la récupération d'un conteneur se traduit par un aller à vide et un retour chargé.

Pour optimiser l'utilisation des tracteurs, Duboc s'efforce de combiner les trajets vers et en provenance des terminaux avec des trajets vers les parcs de conteneurs vides. Ces derniers sont accessibles sans rendez-vous et les déplacements vers les points

définis permettent d'organiser des tournées. Les missions se caractérisent par des points d'arrêts systématiques d'une part chez Duboc et d'autre part sur le terminal portuaire qui permettent d'assurer la manutention ou de réaliser les procédures administratives.

Une démarche de trois principales étapes a été suivie afin de répondre à l'objectif de cette étude. La première étape consiste à identifier et caractériser les trajets empruntés par les transporteurs routiers. La deuxième étape est le dimensionnement de la batterie et la proposition d'un modèle de tracteur électrique selon la puissance du moteur électrique, puissance et capacités minimales de la batterie, puissance et temps de recharge des bornes électriques. La dernière étape consiste à valider le modèle proposé de tracteur électrique à l'aide de l'outil de simulation Anylogic.

3.2. Modélisation du tracteur électrique pour le transport des conteneurs

3.2.1. Caractérisation et modélisation des trajets

Cette phase est une étape importante de l'analyse du besoin. Elle détermine les données permettant de caractériser les exigences et contraintes puis de dimensionner les équipements électriques en termes de puissances, d'énergie à embarquer. La figure 2.2.1 montre à la fois la localisation géographique des différents sites (terminaux, dépôts de vide, plate-formes logistiques) et la cartographie des trajets. Ces derniers ont été obtenus après analyse, interprétation et correction des données GPS de Dynafleet. Ce logiciel équipe le tracteur routier Volvo de la flotte du transporteur Duboc et permet aux transporteurs qui le souhaitent de tracer les déplacements et les temps d'arrêts de leurs tracteurs, d'analyser leurs consommations et de mieux gérer leur flotte. Ces données ont été extraites avec un temps d'échantillonnage de 1 minute pour les positions et de 10 minutes ou changement d'état pour les consommations (diesel). Une plus grande précision aurait été utile mais il a été convenu que l'étude pouvait s'en satisfaire moyennant des extrapolations.

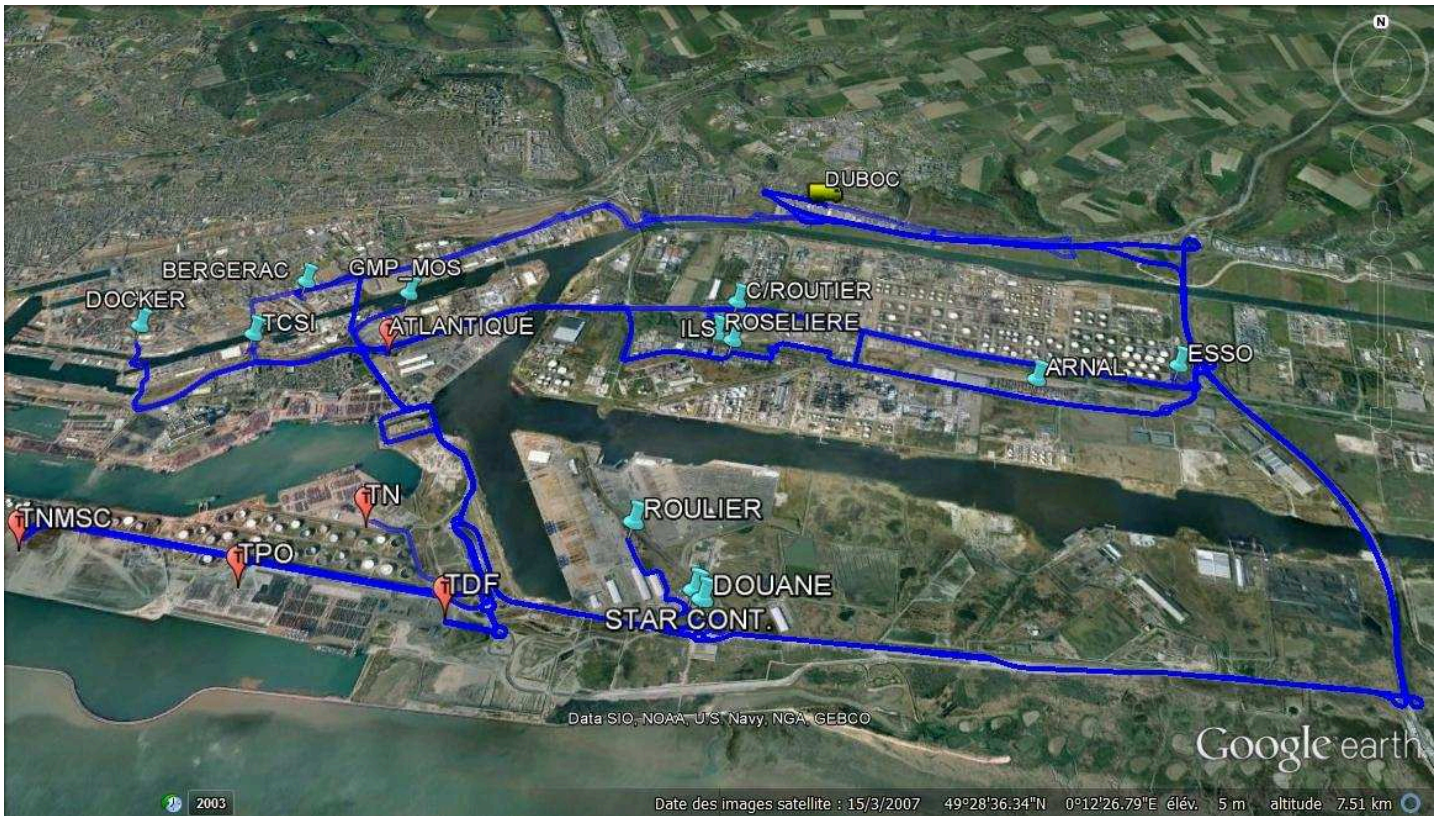


Figure 2.2. 1 Cartographie des sites et des trajets de la zone portuaire du GPMH

Les données issues du SIG (Système d'information géographique) du GPMH ont été intégrées aux trajectoires pour prendre en compte les dénivelés et plus tard calculer les efforts de traction. Seuls les dénivelés significatifs ont été pris en compte. La figure 2.2.1 affiche l'ensemble des trajets de la zone portuaire GPMH.

3.2.2. Dimensionnement de la batterie et des bornes de recharge

Dans cette étape, il s'agit d'intégrer toutes les contraintes techniques et pratiques pour dimensionner la batterie ainsi que l'infrastructure de recharge électrique. Deux modèles d'optimisation seront ainsi proposés. Le premier modèle d'optimisation concerne le dimensionnement de la batterie et consiste à déterminer sa capacité minimale qui permet au tracteur d'assurer sa mission dans les conditions les plus exigeants (pente maximale, charge maximale, trajet le plus long, etc.). Quant au deuxième modèle d'optimisation il concerne le dimensionnement de la puissance de

recharge en déterminant les puissances et les temps de recharge de façon à être sûr que le tracteur pourra réaliser ses missions dans les délais.

Comme cité dans la 2^{ème} partie de ce chapitre, il n'existe pas actuellement de tracteurs routiers ou portuaires électriques répondant aux exigences de notre application. Celui qui s'approcherait le plus de notre besoin est encore au stade projet et à un PTR (poids total roulant) très supérieur à ce que la réglementation française peut autoriser. Nous serons donc contraints de modéliser un tracteur portuaire électrique capable de répondre à notre besoin. Une des conséquences est que nous n'aurons de retour d'expérience sur certains équipements en termes techniques et économiques. Lors de nos échanges avec les constructeurs, nous avons pu constater l'intérêt porté par ces derniers pour ce type de tracteur, en particulier par TransPower.

Pour ce faire, nous avons développé un outil informatique en C# mettant en œuvre les deux modèles d'optimisations par algorithmes mathématiques pour dimensionner la batterie et les puissances des bornes de recharge nécessaire chez Transports Duboc et TDF. Nous avons appelé ce logiciel DOTE (Dimensionnement Optimal du Tracteur Electrique). DOTE calcule l'énergie nécessaire que la batterie doit fournir en permanence pour réaliser les missions à venir. DOTE peut aussi décider de ne pas faire de recharge lors d'un arrêt s'il estime que la batterie aura l'énergie nécessaire pour réaliser la mission suivante sans recharge. Il cherche ainsi à minimiser les temps de recharge, l'énergie consommée et le temps d'occupation des bornes pour mieux les mutualiser entre les tracteurs électriques. Ensuite, les résultats de dimensionnement obtenus par le logiciel DOTE seront validés moyennant la simulation Anylogic et d'en éprouver leurs robustesses par des répliques pour divers missions.

Pour recharger la batterie du tracteur électrique, nous disposons de deux stations de recharge, une située chez Duboc et une autre à TDF, avec deux puissances différentes. La question qui se pose est : quelle est la puissance de chaque station pour répondre à un besoin énergétique donné ? Sachant que la puissance de la station de

recharge qui va être installée chez le transporteur Duboc est limitée, la puissance de la station TDF doit compenser cette limitation. Nous considérons l'hypothèse de la recharge chez Duboc durant la nuit, en effet, la batterie est supposée être pleinement chargée au début de chaque mission de transport.

- **Formulation mathématique**

Notations

i, j : désignent les sites ($i, j=0$: désigne le transporteur Duboc). Les stations de recharge prennent les mêmes indices que les sites.

CAP_{Bat} : Capacité de la batterie.

N_s : Nombre de stations de recharge.

P_i : Puissance de la i ème station de recharge. $P_i \in [P_i^{\min}, P_i^{\max}]$

P_i^{\min}, P_i^{\max} : Puissance minimale et maximale de la i ème station de recharge.

t_i^{\max} : Temps maximum alloué à la recharge au niveau de la i ème station de recharge.

E_{ij} : Besoin énergétique sur le trajet (i, j).

d_{ij} : Distance du trajet (i, j).

t_{ij} : Temps du trajet (i, j).

α : Coefficient moyen énergétique exprimé en kWh/ (Tonne \times km).

P_{ds} : Poids du tracteur routier.

E_i^{Bat} : Etat de charge de la batterie au niveau de la i ème station.

$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la batterie est rechargée au niveau de la station "i".} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$

E_i^c : Energie absorbée au niveau de la i ème station.

H : Horizon de travail (temps d'exploitation du tracteur routier).

N_{Cycles}^{Total} : Nombre total de cycles, avant que la batterie soit remplacée.

$N_{\text{Cycles}}^{\text{Jour}}$: Nombre de cycles de recharge utilisés durant une journée d'exploitation.

t_i : Temps nécessaire à la recharge de la batterie au niveau de la i ème station.

t_{Total} : Temps total de recharge, $t_{\text{Total}} \in [0, \sum t_i^{\text{max}}]$

$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{si la batterie est recyclée.} \\ 0 & \text{si la batterie est revendue.} \end{cases}$

$C_{\text{Bat}}^{\text{acq}}$: Coût d'acquisition de la batterie.

$C_{\text{Bat}}^{\text{recy}}$: Coût de recyclage de la batterie.

$C_{\text{Bat}}^{\text{rev}}$: Coût de revente de la batterie.

$\beta = \begin{cases} 1 & \text{si le tracteur est revendu.} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$

$C_{\text{Tra}}^{\text{acq}}$: Coût d'acquisition du tracteur.

$C_{\text{Tra}}^{\text{acq}(1-T)}$: Coût réel d'acquisition du tracteur.

$C_{\text{Tra}}^{\text{rev}}$: Coût de revente du tracteur.

$C_{\text{Tra}}^{\text{maint}}$: Coût de maintenance du tracteur.

$C_{\text{Sta}}^{\text{acq}(1-T)}$: Coût réel d'acquisition d'une station.

$C_{\text{Sta}}^{\text{maint}}$: Coût de maintenance d'une station.

C_{Ene}^0 : Coût unitaire de l'énergie.

Variables de décision

Pour le modèle « dimensionnement de la batterie », les variables de décisions à déterminer sont : $CAP_{\text{Bat}}, N_s, t_i$.

Pour le modèle « dimensionnement de la puissance », les variables de décisions à déterminer sont : $P_i (i \neq 0), t_i$.

Contraintes

-Contraintes de capacité :

La capacité de la batterie doit être deux fois plus grande que la puissance P_i de la station de recharge i . Cette contrainte est exprimée comme suit :

$$CAP_{Bat} \geq \frac{P_i}{2}$$

-Contrainte de l'état de charge :

Quel que soit le poids du tracteur et quel que soit le trajet à emprunter, la batterie doit répondre au besoin énergétique. De plus, l'état de charge de cette batterie doit être compris entre 20% et 80% de sa capacité :

$$0.2 \times CAP_{Bat} \leq E_{bat} \leq 0.8 \times CAP_{Bat}$$

Il faut noter que l'état de charge initial au départ de la mission journalière E_0^{Bat} est égal à 80% de la capacité de la batterie. Cette contrainte n'est pas liée à des conditions de limites de recharge comme l'est la contrainte ci-dessus, mais plutôt liée essentiellement à la recharge de la batterie durant la nuit :

$$E_0^{Bat} = 0.8 \times CAP_{Bat}$$

- Contrainte de la consommation énergétique :

Pour un trajet (i, j) de la mission, l'état de charge de la batterie E_i^{Bat} doit satisfaire le besoin énergétique demandé par ce trajet. Donc, la gestion d'énergie nécessite de (1) calculer ce besoin, (2) le comparer avec E_i^{Bat} et (3) si E_i^{Bat} est insuffisante, de préciser la quantité d'énergie complémentaire qu'il faut absorber de la station de recharge pour assurer le besoin du trajet. Cette contrainte est exprimée comme suit :

$$E_i^{Bat} + y_i \times E_i^c \geq E_{ij}$$

Le besoin énergétique E_{ij} sur le trajet (i, j) est calculé comme suit :

$$E_{ij} = d_{ij} \times \alpha \times P_{ds}$$

-Contrainte de répartition de puissance :

Cette contrainte exprime le fait que la puissance de la station de recharge chez le transporteur Duboc doit être relativement faible par rapport à celle de TDF. En fonction du temps alloué à la recharge, cette puissance chez Duboc peut être insuffisante (conduisant à des solutions infaisables), d'où l'importance de répartir au

mieux ces puissances. En d'autres termes, pour une puissance donnée chez le transporteur Duboc, cette contrainte dimensionne celle de TDF :

$$P_i^{\max} \geq P_i \geq \frac{\sum_i \sum_j E_{ij} - P_0 \times \sum_H t_0^{\max}}{\sum_H t_i^{\max}}$$

Une fois l'intervalle de variation de la puissance connue, le pas de dimensionnement sera intégré dans l'optimisation.

-Contrainte de temps de recharge :

En supposant que t_i est le temps nécessaire à la recharge de la batterie au niveau de la i ème station, nous pouvons alors déterminer le temps nécessaire à la recharge à n'importe quelle station en tentant compte de l'énergie initialement contenue dans la batterie. De plus, t_i doit être inférieur au temps maximum alloué à la recharge. La contrainte peut être exprimée de différentes façons, nous pouvons l'exprimer par :

$$\frac{0.8CAP_{Bat} - E_i^{Bat}}{P_i} \leq t_i \leq t_i^{\max}$$

Puisque le temps total nécessaire à la recharge dépend à la fois de l'horizon de travail H et du temps total de parcours dans cet Horizon, il faut que le temps total alloué à la recharge de la batterie ne dépasse pas la différence entre H et le temps total de parcours :

$$\sum t_i \leq H - \sum t_{ij}$$

Fonction objective

La fonction objective doit déterminer la meilleure valorisation des résultats obtenus, fixant ainsi le mode de fonctionnement du tracteur routier, c'est-à-dire, obtenir en plus de la capacité minimale de la batterie, toutes les combinaisons optimales de la répartition entre les différentes puissances de stations de recharge sur un scénario donné. La fonction objective doit tenir compte de l'ensemble de tous les coûts technico-économiques de l'étude, à savoir, les coûts d'exploitation et les coûts d'investissement :

$$Coût\ Total \left(C^T \right) = \left(C_{Bat}^T \right) + \left(C_{Tra}^T \right) + \left(C_{Sta}^T \right) + \left(C_{Ene}^T \right).$$

- C_{Bat}^T (coûts total de la batterie) = $C_{Bat}^{acq} + \alpha C_{Bat}^{recy} - (1 - \alpha) \times C_{Bat}^{rev}$
- C_{Tra}^T (coûts total du tracteur) = $\beta \times (C_{Tra}^{acq} - C_{Tra}^{rev}) + (1 - \beta) \times C_{Tra}^{acq(1-T)} + C_{Tra}^{maint}$
- C_{Sta}^T (coûts total de la station) = $C_{Sta}^{acq(1-T)} + C_{Sta}^{maint}$
- C_{Ene}^T (coûts total de l'énergie) = $C_{Ene}^0 \times \sum_i \sum_j E_{ij}$

Le coût total englobe deux types de coûts : les coûts variables déterminés par le modèle d'optimisation et les coûts fixes fournis par le modèle économique.

- **Logiciel DOTE**

Le logiciel DOTE a été développé conjointement avec A.Benantar (Benantar et al. 2018) et dispose d'une IHM (Interface Homme-Machine) et implémente les deux modèles d'optimisation à sa savoir le modèle de dimensionnement de la batterie et le modèle de dimensionnement de la puissance de recharge. DOTE permet à partir d'une mission donnée de :

- Déterminer la capacité minimale de la batterie
- Déterminer les puissances minimales des stations de recharge
- Calculer le coût total décrit ci-dessus

La figure 2.2.2 présente l'interface du logiciel DOTE et les résultats de dimensionnement d'un scénario de la mission 8+1 composée de 8 aller-retour Duboc-TDF et 1 aller-retour Duboc-Roulier. Les paramètres de dimensionnement sont saisis dans la partie haute de l'interface du logiciel DOTE (Tonnage du tracteur, Puissance et temps de recharge chez Duboc, Coefficient énergétique, etc.).

Le logiciel DOTE fournit ainsi l'ensemble des valeurs approximatives de l'état de la charge (State of charge- SOC) de la batterie pour chaque aller-retour de la mission. Chaque colonne donne ces valeurs de l'état de la charge de batterie pour différentes puissances de rechargement a la fois.

	P = 100 kW	P = 150 kW	P = 200 kW	P = 250 kW	P = 300 kW	P = 350 kW	P = 400 kW
DUBOC	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)	>>149.00 (80%)
TDF	109.00 >> 134.00	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00
DUBOC	92.00 >> 142.00	67.00 >> 117.00	67.00 >> 117.00	67.00 >> 117.00	67.00 >> 117.00	67.00 >> 117.00	67.00 >> 117.00
TDF	102.00 >> 127.00	77.00 >> 114.50	77.00 >> 127.00	77.00 >> 139.50	77.00 >> 149.00	77.00 >> 149.00	77.00 >> 149.00
DUBOC	85.00 >> 135.00	72.50 >> 122.50	85.00	97.50	107.00	107.00	107.00
TDF	95.00 >> 120.00	82.50	45.00 >> 95.00	57.50 >> 120.00	67.00 >> 142.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	78.00 >> 128.00	40.50 >> 90.50	53.00 >> 103.00	78.00	100.00	107.00	107.00
TDF	88.00 >> 113.00	50.50 >> 88.00	63.00 >> 113.00	38.00 >> 100.50	60.00 >> 135.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	71.00 >> 121.00	46.00 >> 96.00	71.00 >> 121.00	58.50 >> 108.50	93.00	107.00	107.00
TDF	81.00 >> 106.00	56.00 >> 93.50	81.00	68.50 >> 131.00	53.00 >> 128.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	64.00 >> 114.00	51.50 >> 101.50	39.00 >> 89.00	89.00	86.00	107.00	107.00
TDF	74.00 >> 99.00	61.50 >> 99.00	49.00 >> 99.00	49.00 >> 111.50	46.00 >> 121.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	57.00 >> 107.00	57.00 >> 107.00	57.00 >> 107.00	69.50 >> 119.50	79.00	107.00	107.00
TDF	67.00 >> 92.00	67.00 >> 104.50	67.00 >> 117.00	79.50	39.00 >> 114.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	50.00 >> 100.00	62.50 >> 112.50	75.00 >> 125.00	37.50 >> 87.50	72.00 >> 122.00	107.00	107.00
TDF	60.00 >> 85.00	72.50 >> 110.00	85.00 >> 135.00	47.50 >> 110.00	82.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00	67.00 >> 149.00
DUBOC	43.00 >> 93.00	68.00 >> 118.00	93.00 >> 143.00	68.00 >> 118.00	107.00 >> 149.00	107.00 >> 149.00	107.00 >> 149.00
ROULLIER	.	84.00	109.00	84.00	115.00	115.00	115.00
DUBOC	.	48.00 (26 %)	73.00 (39 %)	48.00 (26 %)	79.00 (42 %)	79.00 (42 %)	79.00 (42 %)
Bornes		2	2	2	2	2	2
Recharges		15	14	12	11	10	10
Cycle/jour		3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90
T.Recharges Dub...		2.00	1.75	1.25	0.71	0.46	0.46
T.Recharges TD...		1.50	1.50	1.50	1.71	1.61	1.41
T.Recharges (h)		3.50	3.25	2.75	2.42	2.07	1.87
Temps Parcours (h)		8.18	8.18	8.18	8.18	8.18	8.18
Resultat	Non Validel	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide	Valide

Figure 2.2. 2 Aperçu du logiciel DOTE et les résultats d'optimisation obtenus

3.2.3. La construction et la vérification du modèle de simulation du tracteur

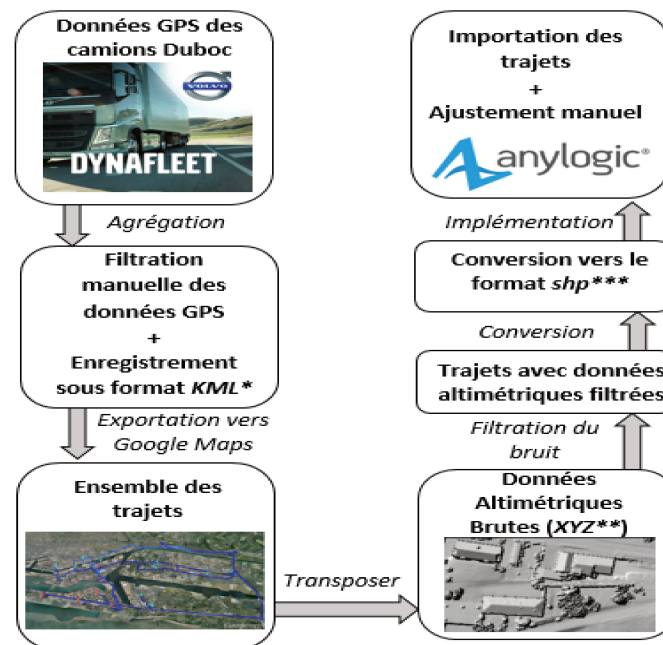
Dans cette partie, nous allons simuler un tracteur électrique pour le transport de conteneurs. Afin de valider les résultats d'optimisation obtenu par le logiciel DOTE, nous avons choisi de simuler le même scénario que le logiciel DOTE, à savoir la mission 8+1 composée de 8 aller-retour Duboc-TDF et 1 aller-retour Duboc-Roulier. Pour ce faire, la première étape de la simulation consiste à modéliser et implémenter les routes correspondant avec leurs paramètres dont les plus importants sont la dénivelé, les limitations de vitesse. La deuxième étape est la modélisation et l'implémentation du tracteur électrique qui va simuler le comportement réel sur route d'un tracteur électrique. La troisième étape est l'implémentation et la modélisation des stations de rechargement afin de simuler le processus de rechargement des batteries.

La plate-forme de simulation AnyLogic est utilisée pour l'implémentation de la simulation. AnyLogic est un simulateur développé en JAVA et fournis une boîte à outils riche et facile à maîtriser. AnyLogic permet de combiner efficacement les diverses techniques de simulation (simulation à base d'agent, simulation à événements discrets et simulation continue). AnyLogic est utilisé aussi bien pour l'analyse, la

collecte et la comparaison de résultats, que pour l'extension, la visualisation et l'expérimentation des modèles de simulations.

3.2.3.1. Modélisation et implémentation des routes

L'outil de simulation Anylogic permet de visualiser le déplacement des tracteurs électriques et de calculer en instantanée leurs besoins en puissance et leurs consommations suivant les données énergétiques précisés. Le coefficient de consommation énergétique instantanée du tracteur dépend de 2 paramètres : le dénivelé de l'endroit où circulent le tracteur, et la vitesse instantanée. Sur des zones à peu près plates, le coefficient est relativement faible. S'il y a une montée, ce coefficient augmente et s'il y a une descente, le coefficient est encore plus faible car le moteur électrique peut récupérer une partie de l'énergie du freinage. Dans la mesure où l'ensemble des routes principales ont été modélisées, le coefficient énergétique peut être recalculé pour n'importe quel trajet et ainsi l'ensemble de trajets. La figure 2.2.3 résume les étapes du processus global d'extraction et d'implémentation des trajets sous Anylogic.



*KML : Keyhole Markup Language fichier d'itinéraire ; **XYZ : fichier de données altimétriques ;
 ***shp : fichier de forme shapefile

Figure 2.2. 3 Étapes du processus d'implémentation des trajets sous Anylogic

La première étape de ce processus consiste à exploiter les données GPS Dynafleet brutes en provenance des camions. Ces données GPS sont sous forme de coordonnées GPS horodaté. L'étape suivante consiste à agréger et filtrer tous les données GPS afin d'extraire les itinéraires des trajets effectués par les camions. Une fois les trajets sont extraits et enregistrés sous format KML (Keyhole Markup Language), ils sont ensuite affichés sur l'outil Google Maps afin de vérifier et ajuster les itinéraires. Une fois tous les itinéraires de trajets sont sous format KML, l'ensemble de ces fichiers est transposé sur la couche des données altimétrique, à savoir le fichier XYZ. Après la transposition, les données altimétriques des itinéraires sont ajustées et filtrées. L'ensemble des trajets est ensuite converti sous format Shapefile compatible avec l'outil Anylogic. Toutefois, un dernier ajustement manuel sur Anylogic (des itinéraires et des données altimétriques) est nécessaire afin de corriger les erreurs générées lors des différentes étapes de conversions.

3.2.3.2. Modélisation et implémentation du tracteur électrique

Cette étape consiste en la conception du modèle représentatif du comportement réel du tracteur. La figure 2.2.4 donne un aperçu sur la logique de fonctionnement du tracteur dans Anylogic et illustre le séquençement des principales activités qui contrôlent la simulation du tracteur électrique dans Anylogic. Dans ce modèle, après l'instanciation du tracteur électrique, deux activités se lancent en parallèle. La première activité consiste à vérifier si l'ensemble des paramètres et caractéristiques nécessaires au bon fonctionnement du tracteur électrique ont bien été initialisés, à savoir la vitesse de croisière, la capacité de la batterie, l'itinéraire de la mission et le nombre de tournées. La deuxième activité fournit des statistiques et des valeurs de certains paramètres tels que la SOC (state of charge) de la batterie, la vitesse et le nombre de tournées. Si l'une ou les deux activités échouées, le tracteur est immobilisé. Une fois ces activités achevées avec succès, la mission du tracteur électrique débute. Pendant le déplacement du tracteur électrique, trois activités sont enclenchées. La première activité consiste à vérifier l'avancement de la mission, une fois le nombre de tournées est atteint, le tracteur est immobilisé et la mission s'achève avec succès. La

deuxième activité consiste à vérifier la SOC, si la SOC atteint le seuil minimal prédéfini, le tracteur est immobilisé. La troisième activité consiste à vérifier si le tracteur passe par une station de chargement, si c'est le cas, le tracteur s'arrête afin de se charger. Le temps de chargement est relatif aux paramètres prédéfinis de la capacité de la batterie et de la puissance de charge. Une fois le chargement terminé, le tracteur continue la mission.

Le modèle simulé prend en compte d'autres facteurs comme les accélérations/décélérations du tracteur (voir figure 2.2.4). La consommation en énergie électrique est calculée instantanément (chaque seconde) pendant le trajet afin de prendre en compte les variations de la vitesse tout en fournissant un aperçu proche du temps réel sur la consommation et l'état de la batterie. Ainsi, pour simuler des comportements différents des conducteurs, des variations de vitesse lors des trajets sont prises en compte, car ce paramètre influence le coefficient de consommation énergétique et donc l'énergie à stocker dans la batterie.

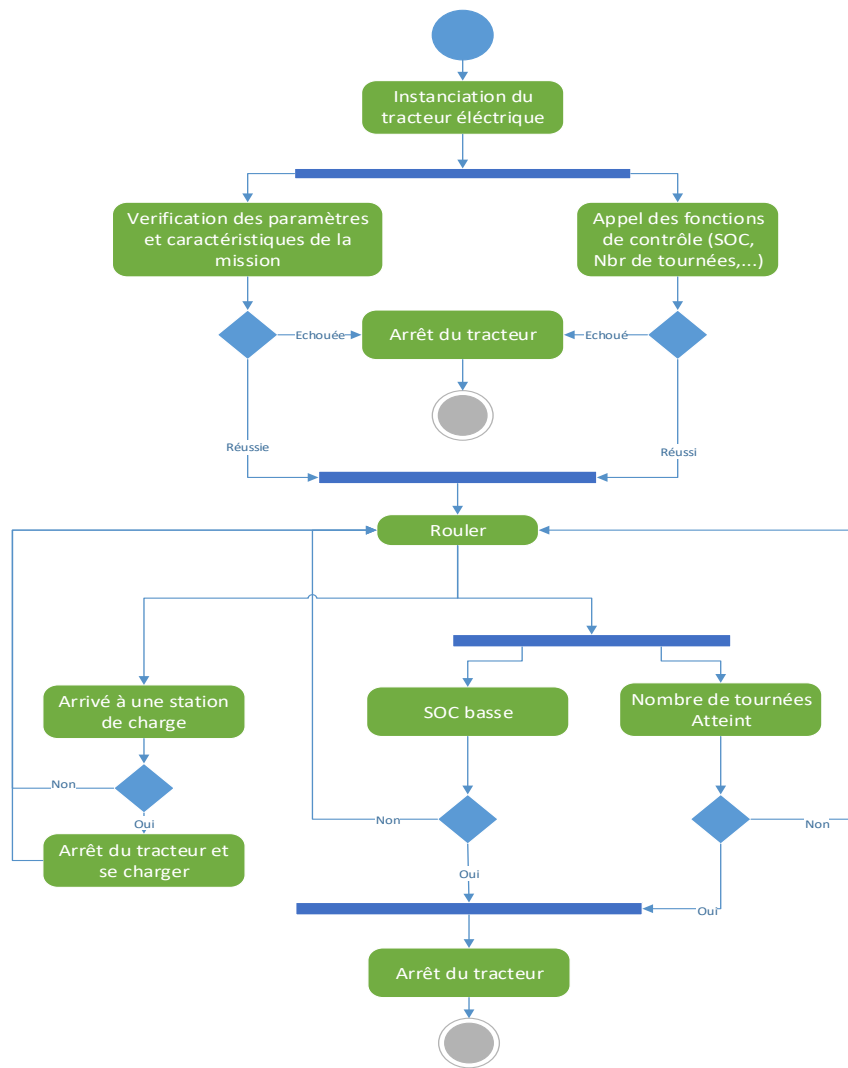


Figure 2.2. 4 Diagramme d'activités du tracteur électrique sur Anylogic

▼ Car

New car:

Length: meter

Initial speed: kilometers per hour

Preferred speed: kilometers per hour

Max acceleration: meters per second²

Max deceleration: meters per second²

Figure 2.2. 5 Aperçu des paramètres de vitesse du tracteur électrique.

Durant la simulation, divers résultats sont fournis, tels que l'état de charge de la batterie, la consommation en énergie électrique, la vitesse instantanée, la distance parcourue et le numéro de la tournée en cours (voir figure 2.2.5).

3.2.3.3. Modélisation et implémentation des stations de recharge

Le tracteur routier a besoin de recharger sa batterie régulièrement car sa capacité de stockage a été limitée pour réduire son poids et son volume. Dans notre simulation, la position des bornes de recharge avait été fixée selon les temps d'arrêt d'exploitation observés dans les fichiers extraits de Dynafleet, c'est-à-dire chez Transports Duboc et chez TDF.

Deux stations de recharge ont été prises en compte, une située chez Duboc et une autre à TDF. La logique de fonctionnement de ces stations dans Anylogic est détaillée dans l'algorithme suivant :

Etape 1 : Saisie des paramètres

```
puissanceRecharge<- lirePuissanceRecharge () ;
```

```
tempsRecharge<- lireTempsRecharge () ;
```

```
capacitéBatterie<- lireCapacité () ;
```

```
tracteur.SOC* <- lireSOC () ;
```

Etape 2 : Rechargement de la batterie

```
Si SOC <capacitéBatteriefaire
```

```
    Tant que tracteur.SOC<capacitéBatterieoutempsRecharge =0 faire
```

```
        tracteur.SOC.RechargerBatterie (puissanceRecharge) ;
```

```
        tempsRecharge -- ;
```

```
    Fin de tant que
```

```
Fin de si
```

Etape 3 : Ordre de départ du tracteur

```
tracteur.depart () ;
```

***SOC : State Of Charge - état de charge de la batterie**

3.2.3.4. La construction de l'interface graphique et de la 3D.

Cette étape vise à concevoir une interface graphique afin de visualiser en temps réel le déroulement de la simulation 2D et 3D. Des résultats sont affichés afin de suivre l'évolution des différents paramètres (voir figure 2.2.6).



Figure 2.2. 6 Aperçu de l'interface de la simulation.

3.2.3.5. Vérification de la simulation

La vérification et d'un modèle de simulation est une étape primordiale dont l'objectif est de s'assurer que le modèle de simulation est correctement implémenté et reflète le comportement réel du système étudié tout en donnant des résultats raisonnables. Dans cette étude, nous avons procédé à deux types de vérification. En premier lieu, la vérification de l'implémentation des modèles est faite grâce à trois outils : le débogueur d'Anylogic, la visualisation 3D, et les fichiers logs. Ces fichiers logs nous permettent de tracer l'enchaînement des actions durant l'exécution des modèles en fonction du temps, en vue de localiser tout dysfonctionnement au niveau du système. En deuxième lieu la vérification de la logique des simulations a été réalisée en comparant les indicateurs de performances. Les indicateurs de performance les plus importants sont : la vitesse, le temps de parcours, et la distance parcourue. Le temps de parcours doit être cohérent avec la vitesse et la distance parcourue.

3.2.4. Validation des résultats

Nous avons validé nos applications sur l'ensemble des scénarios de dimensionnement et d'exploitation. Nous présentons ci-dessous les résultats d'un des scénarios de dimensionnement, composé de 8 aller-retour Duboc-TDF et 1 aller-retour Duboc-Roulier. Les paramètres de dimensionnement sont décrits dans le tableau 2.2.2 (Tonnage du tracteur, Puissance et temps de recharge chez Duboc, Coefficient énergétique, etc.).

	200 kW		250 kW	
	SOC - DOTE	SOC - ANYLOGIC	SOC - DOTE	SOC - ANYLOGIC
DUBOC	>>149.00 (80%)	>>149(80%)	>>149.00 (80%)	>>149(80%)
TDF	109.00 >> 149.00	107.26>>149	109.00 >> 149.00	107.57>>149
DUBOC	107.00 >> 130.33	114.51>>137.51	107.00 >> 136.17	106.43>>135.59
TDF	90.33 >> 140.33	97.05>>146.05	96.17 >> 149.00	94.96>>149
DUBOC	98.33 >> 121.67	104.18>>127.18	107.00 >> 136.17	106.57>>135.73
TDF	81.67 >> 131.67	85.86>>135.86	96.17 >> 149.00	94.70>>149
DUBOC	89.67 >> 113.00	93.05>>116.05	107.00 >> 136.17	106.79>>135.95
TDF	73.00 >> 123.00	75.36>>125.36	96.17 >> 149.00	94.55>>149
DUBOC	81.00 >> 104.33	81.49>>104.49	107.00 >> 136.17	107.67>>136.83
TDF	64.33 >> 114.33	63.94>>113.94	96.17 >> 149.00	95.67>>149
DUBOC	72.33 >> 95.67	71.66>>94.66	107.00 >> 136.17	106.74>>135.9
TDF	55.67 >> 105.67	54.64>>104.65	96.17 >> 149.00	95.82>>149
DUBOC	63.67 >> 87.00	61.33>>84.33	107.00 >> 136.17	106.30>>135.46
TDF	47.00 >> 97.00	44.50>>94.50	96.17 >> 149.00	94.49>>149
DUBOC	55.00 >> 78.33	52.50>>75.50	107.00 >> 136.17	107.63>>136.79
TDF	38.33 >> 88.33	34.47>>84.47	96.17 >> 149.00	95.91>>149
DUBOC	46.33 >> 69.67	42.10>>67.10	107.00 >> 136.17	106.62>>135.78
ROULIER	-	25.11	101.17	95.35
DUBOC	-	-	64.17	58.052

Tableau 2.2. 1 Comparaison entre les résultats du logiciel DOTE et le simulateur Anylogic

Véhicule électrique	Poids : 28T Capacité de la batterie : 187 kWh
Bornes de recharge	Nombre : 2 Emplacements : Transporteur DUBOC et TDF Puissances testées : 200 kW et 250 kW Temps de recharge testé : 7 minutes au transporteur ET 15 minutes à TDF
Trajet de la mission	8 aller-retour entre le transporteur et TDF + 1 aller-retour entre le transporteur et Roulier

Tableau 2.2. 2 détails du scénario simulé

Le résultat obtenu par l'optimisation à l'aide du logiciel DOTE (tableau 2.2.1) affiche comme dernier chiffre, le SOC (State of Charge) chez le transporteur (69.67) alors que la simulation doit montrer qu'avec cette charge, le tracteur électrique peut arriver au terminal Roulier et tomber en rupture d'énergie quelques part.

Pour le cas 200kW, nous constatons que la mission n'est pas réalisable avec une telle puissance. Le tableau 2 montre que les résultats obtenus par l'optimisation ne permettent pas au tracteur électrique d'accomplir sa tournée, le tracteur s'arrête entre le terminal Roulier et Transport DUBOC. Les résultats de la simulation concordent avec ceux de l'optimisation, en effet le tracteur arrive au terminal Roulier avec un SOC de 25.11kWh, un SOC insuffisant pour arriver jusqu'au Transport DUBOC, ce qui entraîne un arrêt du tracteur électrique avant la fin de la mission.

4. Calcul économique des différentes techniques et comparaison avec l'exploitation actuelle

Dans cette partie du rapport, nous comparons les coûts des solutions électriques par rapport au coût du Diesel. Bien que la solution à base de bornes utilisant la technique de l'induction ne réponde pas techniquement au besoin, les calculs économiques à titre indicatif et à titre comparatif. Ces calculs ont été élaborés en collaboration avec le laboratoire NIMEC (Normandie Innovation, Marché, Entreprise, Consommation) sous la direction de Mme Marie-Laure BARON.

4.1. Technologie par induction

Les prix des éléments de la technologie par induction sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

Prix des éléments du tracteur électrique de la technologie par induction

Les caractéristiques et les prix des éléments du tracteur électrique de la technologie par induction sont donnés dans le tableau 2.2.3.

Équipement embarqué (Moteurs, convertisseurs, etc.)	140 000 €
Châssis	70 000 €
Système électronique pour la technologie par induction	30 000 €
Coût de maintenance	4 000 €/an
Durée d'exploitation	15 ans
Prix de revente après 15 ans d'exploitation	0 €

Tableau 2.2. 3 Caractéristiques et prix de la technologie par induction

Prix des éléments de la station de la technologie par induction

Les caractéristiques et les prix des éléments des stations de recharge en énergie électrique sont données dans les tableaux 2.2.4 et 2.2.5.

○ Stations : T.Duboc

Coût équipements de l'installation au sol	115 000 €
Coût installation génie civil	25 000 €
Coût de maintenance	1 500 €/an
Coût d'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	250 000 €
Nombre de station	2
Mutualisation de l'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	1/2
Durée d'exploitation	25 ans
Nombre de tracteurs utilisant les stations de T.Duboc	5

Tableau 2.2. 4 Stations au niveau T.Duboc

○ **Stations : TDF**

Coût équipements de l'installation au sol	115 000 €
Coût installation génie civil	25 000 €
Coût de maintenance	1 500 €/an
Coût d'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	300 000 €
Nombre de station	2
Mutualisation de l'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	1/8
Durée d'exploitation	25 ans
Nombre de tracteurs utilisant les stations de TDF	10

Tableau 2.2. 5 Stations au niveau TDF

4.2. Technologie par conduction

Les prix des éléments de la technologie par conduction sont donnés dans les tableaux ci-dessous.

Prix des éléments du tracteur électrique par conduction

Les caractéristiques et les prix des éléments du tracteur électrique de la technologie

Équipements embarqués (Moteurs, convertisseurs, etc)	140 000 €
Châssis	70 000 €
Système électronique pour la technologie conduction	25 000 €
Coût de maintenance	4 000 €/an
Durée d'exploitation	15 ans
Prix de revente après 15 ans d'exploitation	0 €

Tableau 2.2. 6 caractéristiques et prix de la technologie par conduction

par conduction sont donnés dans le tableau 2.2.5.

Prix des éléments de la station de la technologie par conduction

Les caractéristiques et les prix des éléments des stations de recharge en énergie électrique sont données dans les tableaux 2.2.7 et 2.2.8.

○ Stations : T.Duboc

Coût équipements de l'installation au sol	100 000 €
Coût installation génie civil	25 000 €
Coût de maintenance	1 500 €/an
Prix d'un plot supplémentaire	20 000 €
Coût d'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	250 000 €
Nombre de station	1 + 1 plot
Mutualisation de l'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	1/2
Durée d'exploitation	25 ans
Nombre de tracteurs utilisant les stations de T.Duboc	5

Tableau 2.2. 7 Stations au niveau T.Duboc.

○ Stations : TDF

Coût équipements de l'installation au sol	100 000 €
Coût installation génie civil	25 000 €
Coût de maintenance	1 500 €/an
Prix d'un plot supplémentaire	20 000 €
Coût d'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	300 000 €
Nombre de station	1+ 1 plot
Mutualisation de l'infrastructure de l'alimentation électrique (transformateur)	1/8
Durée d'exploitation	25 ans
Nombre de tracteurs utilisant les stations de TDF	10

Tableau 2.2. 8 Stations au niveau TDF

- **Batterie**

Le coût et les caractéristiques de la batterie sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Coût de la batterie	550 €/kWh
Durée de vie	8000 Cycles

Tableau 2.2. 9 Coût et caractéristiques de la batterie

- **Technologie diesel**

Les caractéristiques du tracteur diesel, le coût du carburant et la consommation en carburant sont données dans les tableaux ci-dessous

Coût du carburant	0.906 €/litre
Consommation en carburant	0.3580 litre/km

Tableau 2.2. 10 Consommation du tracteur diesel

Tracteur diesel neuf	95000 €
Coût de maintenance	4000 €/an
Durée d'exploitation	15 ans
Prix de revente après 15 ans d'exploitation	0 €

Tableau 2.2. 11 Maintenance du tracteur diesel

4.3. Comparaison économique entre la solution électrique et l'exploitation classique

Dans le scénario d'étude, il y a 7 hypothèses basées sur les variations du prix de la batterie, du prix de l'électricité et du prix du gazole, comme cela est montré dans le tableau 2.2.12. Par exemple (voir tableau 2.2.13): de l'hypothèse n°1 à l'hypothèse n°2, le prix de la batterie diminue de 50 €/kWh, le prix de l'électricité augmente de 2 % et le prix du gazole augmente de 2%. Les calculs économiques sont bâtis sur des journées de travail comportant 5 allers-retours Transports Duboc - TDF et 1 aller-retour Transports Duboc - Roulier.

ÉLÉMENTS DE SCENARIO				
COÛT BATTERIE		Base	550	€/kWh
		Incrément	-50	€/kWh
COÛT ENERGIE	Électrique	Base	0,08	€/kWh
		Incrément	2	%
	Gazole	Base	0.906	€/Litre
		Incrément	2	%

Tableau 2.2. 12 Variation des coûts de batterie et énergie électrique et diesel

ÉVOLUTION DES COÛTS							
Hypothèses	Hypo.1	Hypo.2	Hypo.3	Hypo.4	Hypo.5	Hypo.6	Hypo. 7
Batterie €/kWh	550	500	450	400	350	300	250
Energie électrique €/kWh	0,08	0,0816	0,0832	0,0848	0,0864	0,0880	0,0896
Gazole €/Litre	0,906	0,926	0,946	0,966	0,986	1,006	1,026

Tableau 2.2. 13 hypothèses proposées selon la capacité de la batterie

4.3.1. Résultats de la technologie par induction

Taux de consommation en énergie électrique = 70 Wh/ (tonne.km)

Les résultats en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages sont donnés dans le tableau 2.2.14 et illustré dans la figure 2.2.7. La solution électrique (technologie par induction) reste chère par rapport au Diesel mais l'évolution de son coût, en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages, est décroissante.

Coûts comparés selon le tonnage

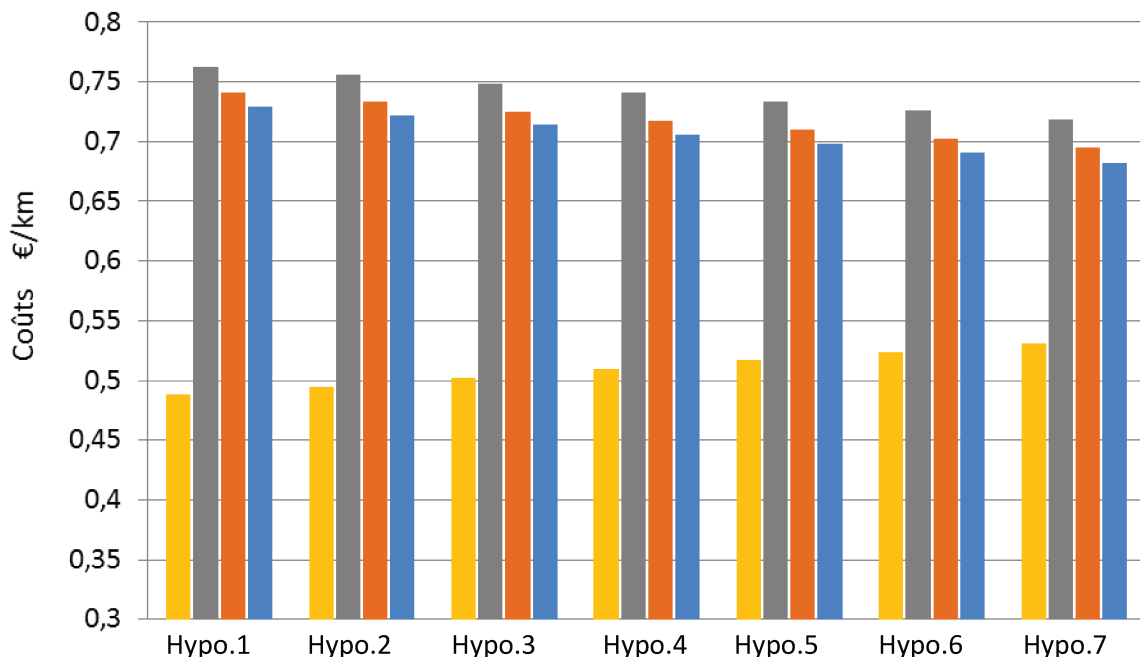


Figure 2.2. 7 Illustration des coûts selon le tonnage (Induction avec 70 Wh/ (tonne.km))

Hypothèses	Hypo. 1	Hypo. 2	Hypo. 3	Hypo. 4	Hypo.5	Hypo. 6	Hypo. 7
34t	0,76294 €/km	0,7556 €/km	0,7482 €/km	0,7409 €/km	0,7335 €/km	0,7262 €/km	0,7189 €/km
32t	0,7406 €/km	0,7330 €/km	0,7254 €/km	0,7179 €/km	0,7103 €/km	0,7027 €/km	0,6952 €/km
30t	0,7294 €/km	0,7216 €/km	0,7138 €/km	0,7060 €/km	0,6982 €/km	0,6904 €/km	0,6826 €/km
Diesel	0,4879 €/km	0,4950 €/km	0,5022 €/km	0,5094 €/km	0,51663 €/km	0,5238 €/km	0,5309 €/km

Tableau 2.2. 14 Coûts selon le tonnage (Induction avec 70 Wh/ (tonne.km))

Taux de consommation en énergie électrique = 65 Wh/ (tonne .km)

Les résultats en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages sont donnés dans le tableau dans le tableau 2.2.15 et illustré dans la figure 2.2.8. La solution électrique (technologie par induction) reste chère par rapport au Diesel mais l'évolution de son coût, en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages, est décroissante.

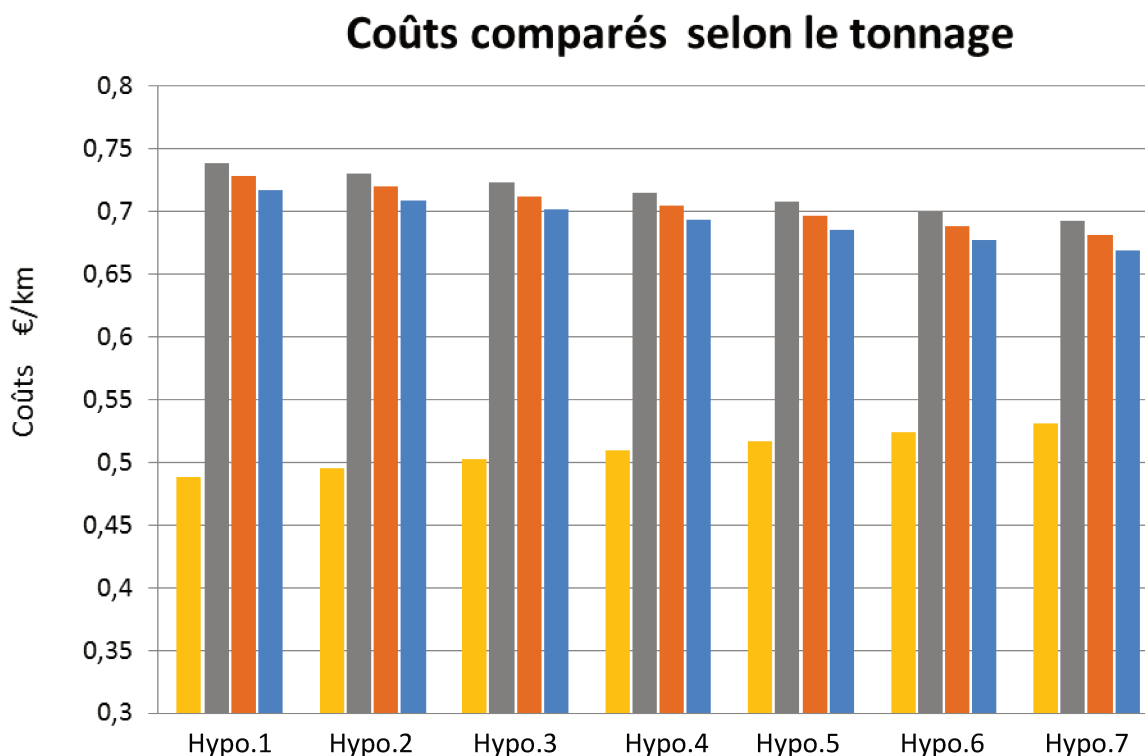


Figure 2.2. 8 Illustration des coûts selon le tonnage (Induction avec 65 Wh/ (tonne.km))

Hypothèses	Hypo. 1	Hypo.2	Hypo. 3	Hypo. 4	Hypo. 5	Hypo. 6	Hypo. 7
34t	0,7382 €/km	0,7305 €/km	0,7229 €/km	0,7153 €/km	0,7077 €/km	0,7001 €/km	0,6925 €/km
32t	0,7278 €/km	0,7199 €/km	0,7121 €/km	0,7043 €/km	0,6965 €/km	0,6887 €/km	0,6808 €/km
30t	0,7174 €/km	0,7093 €/km	0,7013 €/km	0,6933 €/km	0,6853 €/km	0,6772 €/km	0,6692 €/km
Diesel	0,4879 €/km	0,4950 €/km	0,5022 €/km	0,5094 €/km	0,51663 €/km	0,5238 €/km	0,5309 €/km

Tableau 2.2. 15 Coûts selon le tonnage (Induction avec 65 Wh/ (tonne.km))

4.3.2. Résultats de la technologie par conduction

Taux de consommation en énergie électrique = 70 Wh/ (tonne.km)

Les résultats en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages sont donnés dans le tableau 2.2.16. La solution électrique (technologie par conduction) reste chère par rapport au Diesel mais l'évolution de son coût, en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages, est décroissante.

Coûts comparés selon le tonnage

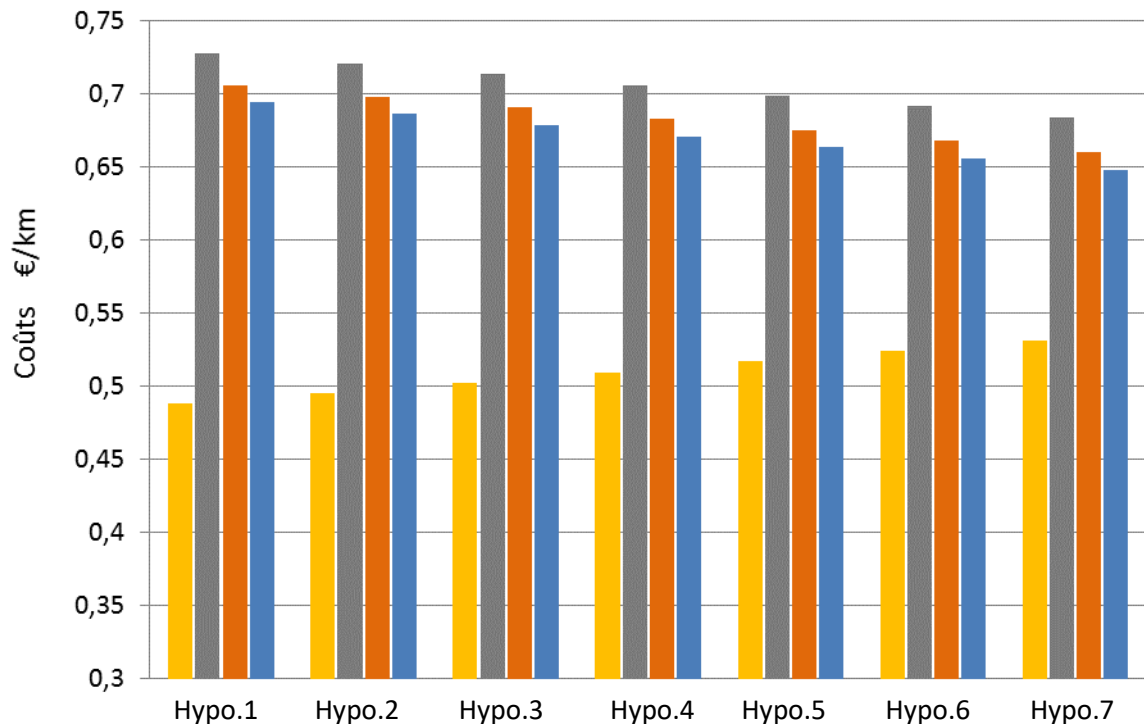


Figure 2.2. 9 Illustration des coûts selon le tonnage (Conduction avec 70 Wh/ (tonne.km))

Hypothèses		Hypo. 1	Hypo. 2	Hypo. 3	Hypo. 4	Hypo. 5	Hypo. 6	Hypo. 7
	34t	0,7276 €/km	0,7203 €/km	0,7129 €/km	0,7056 €/km	0,6982 €/km	0,6909 €/km	0,6836 €/km
	32t	0,7052 €/km	0,6977 €/km	0,6901 €/km	0,6826 €/km	0,6750 €/km	0,6674 €/km	0,6599 €/km
	30t	0,6940 €/km	0,6863 €/km	0,6785 €/km	0,6707 €/km	0,6629 €/km	0,6551 €/km	0,6473 €/km
	Diesel	0,4879 €/km	0,4950 €/km	0,5022 €/km	0,5094 €/km	0,51663 €/km	0,5238 €/km	0,5309 €/km

Tableau 2.2. 16 Coûts selon le tonnage (Conduction avec 70 Wh/ (tonne.km))

Taux de consommation en énergie électrique = 65 Wh/ (tonne.km)

Les résultats en fonctions des hypothèses et pour les différents tonnages sont donnés dans le tableau 2.2.17. La solution électrique (technologie par conduction) reste chère par rapport au Diesel mais l'évolution de son coût, en fonction des hypothèses et pour les différents tonnages, est décroissante.

Coûts comparés selon le tonnage

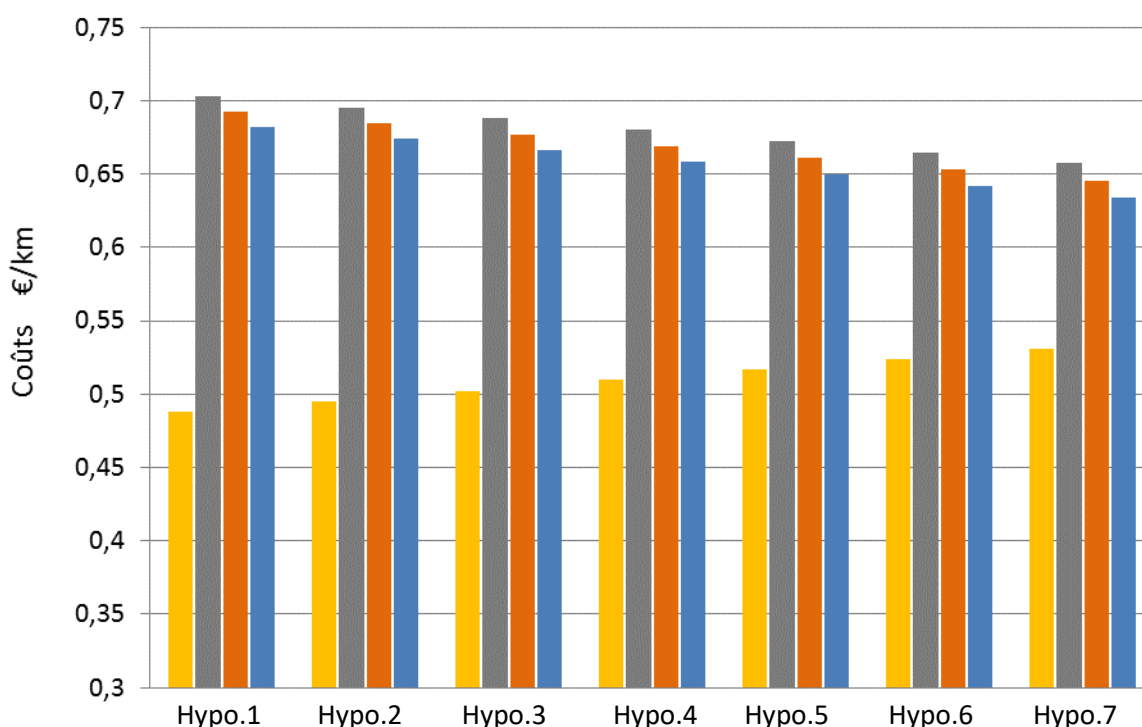


Figure 2.2. 10 Illustration des coûts selon le tonnage (Conduction avec 65 Wh/ (tonne.km))





Hypothèses		Hypo. 1	Hypo. 2	Hypo. 3	Hypo. 4	Hypo. 5	Hypo. 6	Hypo. 7
 34t  32t  30t		0,7028	0,6952	0,6876	0,6800	0,6724	0,6648	0,6572
		€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km
		0,6924	0,6846	0,6768	0,6690	0,6612	0,6534	0,6455
		€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km
	0,6820	0,6740	0,6660	0,6580	0,6499	0,6419	0,6339	
		€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km
 Diesel		0,4879	0,4950	0,5022	0,5094	0,51663	0,5238	0,5309
		€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km	€/km

Tableau 2.2. 17 Coûts selon le tonnage (Conduction avec 65 Wh/ (tonne.km))

4.4. Coût en €/ (tonne.km)

Les coûts en €/ (tonne.km) sont donnés dans les tableaux suivants.

- **Technologie par induction**

	Mission (5+1)
Coût €/ (tonne.km)	0,02328

- **Technologie par conduction**

	Mission (5+1)
Coût €/ (tonne.km)	0.0228

- La solution électrique basée sur la technologie par conduction est moins chère par rapport la solution électrique basée sur la technologie par induction.
- Le coût des deux solutions électriques diminue en fonction des hypothèses, mais les deux solutions restent toujours plus chères par rapport au Diesel.

5. Conclusion

Dans cette étude, nous avons modélisé et validé un modèle de tracteur électrique pour le transport de conteneurs à l'intérieur d'une zone portuaire. Toutefois, l'intérêt économique de cette solution est limité. L'intérêt économique de la solution électrique réside dans une moindre consommation énergétique. Les rendements des moteurs électriques sont bien meilleurs que ceux des moteurs thermiques et le coût énergétique ramené au km est environ inférieur de 50% à celui du diesel. Pour améliorer l'équation économique de la solution électrique, il faudrait augmenter le nombre de kilomètres parcourus par jour (scénario 5+1 / scénario 8+1) et donc réduire les temps d'arrêts, ce qui limiterait encore les possibilités de mettre en œuvre le principe du « biberonnage ».

En outre, les progrès technico-économiques relatifs aux batteries électriques sont très importants et remettent en question l'intérêt même du « biberonnage » dans la mesure où la plus grande autonomie des batteries nécessiterait moins de bornes

réparties sur les routes des tracteurs. La technique de rechargement par conduction, en offrant des puissances beaucoup plus importantes permet des temps de rechargement très courts, inférieurs à 5 minutes. Ce type de rechargement est donc de nature à remettre en question l'intérêt de masquer les temps de rechargement par les temps d'arrêt induits par la manutention des charges.

Cette étude montre que la technique du « biberonnage » telle qu'elle est appliquée pour le transport de personnes par bus, n'est pas, à l'heure actuelle, adaptée au transport de marchandises, courte distance. En effet, les bus ont des poids de l'ordre de 15 tonnes et des besoins énergétiques moindres que le transport de conteneurs. Les bornes de rechargement utilisant la technique de l'induction sont limitées à des puissances de 200kW ne conviennent pas à notre application.

Enfin, le coût principal et rédhibitoire de la solution électrique étant l'investissement relatif à l'achat du tracteur électrique, du fait d'une production artisanale aujourd'hui, il est plus que souhaitable d'adapter la conception de notre système à l'offre des produits de demain, pour profiter des économies d'échelle relative à la fabrication en série. Or la demande actuelle de la plupart des acteurs est une plus grande autonomie et donc, une capacité de stockage plus importante dans la batterie embarquée.

Conclusion Générale

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à proposer une solution pour l'amélioration de la gestion des risques au sein des TCs liée au ciblage et à l'inspection des conteneurs à haut risque. Trouver un compromis entre l'aspect sécuritaire et l'aspect performance était une préoccupation majeure. Il existe plusieurs travaux abordant la problématique de gestion des risques aux TCs. Cependant, l'évaluation des risques liés aux conteneurs reste une tâche difficile, souvent due à des informations incomplètes ou ambiguës sur les conteneurs. En outre, le processus d'évaluation doit être adapté de manière continue pour faire face aux facteurs de risque émergents. D'autre part, l'inspection des conteneurs à haut risque est généralement entravée par une faible capacité d'inspection et son impact sur la performance du TC par la génération des retards. C'est dans ce contexte que nous avons proposé une nouvelle approche adaptive qui, à la fois, améliore l'efficacité d'évaluation des risques liées au conteneur et le processus de ciblage des conteneurs à haut risque tout en préservant la performance du TC. Cette nouvelle approche nommée APRICOIN combine les techniques de fouille de données ainsi que la logique floue.

D'autres part, dans cette thèse nous avons abordé le côté écologique du transport de conteneurs dans les TCs. La réduction d'empreinte écologique et l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution d'émissions de gazes à effet de serre du transport conteneurisé est devenue récemment une préoccupation majeure pour les différents acteurs de la chaîne logistique. Dans cette optique, penser à des modes de transport terrestre de conteneurs ayant une faible empreinte environnementale que les modes de transports classiques à diesel, sans toutefois impacter les performances de la chaîne logistique. Ainsi, dans cette nous avons entamé, dans le cadre du projet Green Truck, une étude de faisabilité de la mise en œuvre de transport électrique de conteneurs. Nous avons exploré les différentes techniques et modes de rechargement rapide des batteries de tracteurs routiers électriques compte tenu des contraintes d'exploitation, modélisé et validé un modèle de tracteur électrique, et évalué la faisabilité économique de la mise en œuvre d'un système comprenant le tracteur électrique ainsi que l'infrastructure électrique.

Concernant les perspectives d'évolution des solutions proposées, nous visons d'automatiser complètement le processus d'élaboration des règles d'inférence floue dans l'approche APRICOIN. Ceci permettra de rendre l'approche plus flexible et efficace. En plus, appliquer l'approche APRICOIN sur d'autres cas de TC aurait certainement favorisé d'autres perceptions de risque. Par ailleurs, l'interfaçage d'APRICOIN avec des bases de données externes des services de douanes est envisagé afin d'alimenter continuellement et enrichir la base de connaissances. En outre, la mise en œuvre pratique du concept du conteneur intelligent reste un grand défi. Sur le plan juridique par exemple on peut se poser la question à qui appartiennent les données collectées ? Un tribunal accepterait-il des données provenant d'un capteur de conteneur intelligent ? En ce qui concerne la technologie, la consommation d'énergie des capteurs reste une préoccupation majeure.

Bibliographie

- Agrawal, Rakesh, Ramakrishnan Srikant, et others. 1994. « Fast algorithms for mining association rules ». In *Proc. 20th int. conf. very large data bases, VLDB*, 1215:487-99.
- Al-Bahar, Jamal F., et Keith C. Crandall. 1990. « Systematic risk management approach for construction projects ». *Journal of Construction Engineering and Management* 116 (3): 533-46.
- Altenbach, Thomas J. 1995. « A comparison of risk assessment techniques from qualitative to quantitative ». Lawrence Livermore National Lab., CA (United States). <https://www.osti.gov/scitech/biblio/67753>.
- Amrani-Zouggar, Aïcha. 2009. *Impact des contrats d'approvisionnement sur la performance de la chaîne logistique : modélisation et simulation*. Bordeaux 1. <http://www.theses.fr/2009BOR13878>.
- Assongba, Cossi Hervé. 2014. « Le transport maritime de marchandises conteneurisées ».
- Bai, Ying, et Dali Wang. 2006. « Fundamentals of Fuzzy Logic Control—Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications ». In *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, 17-36. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84628-469-4_2.
- Bai, Yong, et Qiang Bai. 2014. *Subsea pipeline integrity and risk management*. Gulf Professional Publishing. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=rsz8CN4FBSEC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Subsea+Pipelines+Integrity+and+Risk+Management&ots=81NFYmKFtr&sig=lgPf52zmYsBqOSbhsVTpSuELO7w>.
- Benantar, Abdelaziz, Mohamed Yassine Samiri, Jaouad Boukachour, et Dalila Boudebous. 2018. « Dimensionnement d'un véhicule électrique pour le pré et post acheminement des conteneurs ». In *GOL 18*. Le Havre France.
- Borgelt, Christian. 2005. « An Implementation of the FP-growth Algorithm ». In *Proceedings of the 1st international workshop on open source data mining: frequent pattern mining implementations*, 1-5. ACM. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1133907>.
- Borshchev, Andrei. 2013. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*. Chicago: AnyLogic North America.
- Botta-Genoulaz, Valerie. 2005. « Principes et méthodes pour l'intégration et l'optimisation du pilotage des systèmes de production et des chaînes logistiques ». INSA de Lyon. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00287091/>.
- Brennan, R. W., D. H. Norrie, J. P. Kruth, T. Van Ginderachter, P. I. Tanaya, P. Valckenaers, F. Lin, et al. 2001. « SPECIAL ISSUE: Holonic Manufacturing Systems ».
- Brinkmann, Birgitt. 2011. « Operations Systems of Container Terminals: A Compendious Overview ». In *Handbook of Terminal Planning*, 25-39. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Springer, New York, NY. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-8408-1_2.
- Brintrup, Alexandra, Duncan McFarlane, Damith Ranasinghe, Tomás Sánchez López, et Kenneth Owens. 2011. « Will intelligent assets take off? Toward self-serving aircraft ». *IEEE Intelligent Systems* 26 (3): 66-75.
- Buckland, Michael, et Fredric Gey. 1994. « The relationship between recall and precision ». *Journal of the American society for information science* 45 (1): 12.
- Cariou, Pierre, Maximo Q. Mejia, et Francois-Charles Wolff. 2009. « Evidence on Target Factors Used for Port State Control Inspections ». *Marine Policy* 33 (5): 847-59. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2009.03.004>.

- Carlo, Héctor J., Iris F. A. Vis, et Kees Jan Roodbergen. 2014. « Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions ». *European Journal of Operational Research, Maritime Logistics*, 235 (2): 412-30. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.054>.
- Carluer, Frédéric, ALIX Yann, et JOLY Olivier. 2008. *Global logistic chain security: economic impacts of the US 100% container scanning law*. EMS.
- CBP. 2009. « Importer Security Filing and Additional Carrier Requirements ». U.S. Customs and Border Protection Office of Field Operations.
- Cheyroux, Laurent. 2003. « Sur l'évaluation de performances des chaînes logistiques ». Automatique / Robotique., Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG., <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00197490>.
- Cingolani, Pablo, et Jesús Alcalá-Fdez. 2013. « jFuzzyLogic: a java library to design fuzzy logic controllers according to the standard for fuzzy control programming ». *International Journal of Computational Intelligence Systems* 6 (sup1): 61-75.
- Coleman, M. E., et H. M. Marks. 1999. « Qualitative and quantitative risk assessment ». *Food Control* 10 (4): 289-97.
- Cox, Earl. 1999. *The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building using, and maintaining fuzzy systems*. 2nd ed. San Diego: AP Professional.
- Crainic, Teodor Gabriel, et Kap Hwan Kim. 2007. « Chapter 8 Intermodal Transportation ». *Handbooks in Operations Research and Management Science, Transportation*, 14 (janvier): 467-537. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6).
- Cullinane, Kevin, Teng-Fei Wang, Dong-Wook Song, et Ping Ji. 2006. « The technical efficiency of container ports: comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (4): 354-74.
- Dahlman, Ola, Jenifer Mackby, Bernard Sitt, Andre Poucet, Arend Meerburg, et Bernard Massinon. 2005. « Container security: a proposal for a comprehensive code of conduct ». DTIC Document. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA434718>.
- Design and Operation of Automated Container Storage Systems | Nils Kemme | Springer*. s. d. Consulté le 11 septembre 2017. <http://www.springer.com/gp/book/9783790828849>.
- Desroches, Alain, Dominique Baudrin, et Michel Dadoun. 2009. *L'analyse préliminaire des risques: principes et pratiques*. Hermes science publications.
- « DIALOG ». s. d. Consulté le 12 septembre 2017. <http://cl2m.com/wiki/1293>.
- Dornier, Philippe-Pierre. 2005. *La logistique globale: enjeux, principes, exemples*. Paris: Ed. d'Organisation.
- Douanes et droits indirects. 2015. « Charte Des Contrôles Douaniers ». octobre 2015. <http://www.douane.gouv.fr/Portals/0/fichiers/information/publication-douane/pour-les-professionnels/charte-des-contrôles-douaniers.pdf>.
- Drogoul, Alexis, Diane Vanbergue, et Thomas Meurisse. 2003. « Multi-agent based simulation: Where are the agents? » In *Multi-agent-based simulation II*, 1-15. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-36483-8_1.
- Dubreuil, Julien. 2008. *La logistique des terminaux portuaires de conteneurs*. CIRRELT. http://www.academia.edu/download/45387918/Le_logistique_des_terminaux_portuaires_de_conteneurs.pdf.
- Duinkerken, Mark B, Joseph Evers, et Jaap A Ottjes. 2001. « A Simulation Model For Integrating Quay Transport And Stacking Policies On Automated Container Terminals ». In . Faculty of OCP, department of Mechanical Engineering and Marine Technology. https://www.researchgate.net/publication/2366803_A_Simulation_Model_For_Inte

- grating_Quay_Transport_And_Stacking_Policies_On_Automated_Container_Termin
als.
- Ellis, Joanne. 2011. « Analysis of Accidents and Incidents Occurring during Transport of Packaged Dangerous Goods by Sea ». *Safety Science* 49 (8-9): 1231-37. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.004>.
- Eloff, Jan HP, Les Labuschagne, et Karin P. Badenhorst. 1993. « A comparative framework for risk analysis methods ». *Computers & Security* 12 (6): 597-603.
- Fedtke, Stefan, et Nils Boysen. 2017. « A comparison of different container sorting systems in modern rail-rail transshipment yards ». *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 82 (septembre): 63-87. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.06.012>.
- Fournier-Viger, Philippe, Antonio Gomariz, Ted Gueniche, Azadeh Soltani, Cheng-Wei Wu, Vincent S Tseng, et others. 2014. « SPMF: a Java open-source pattern mining library. » *Journal of Machine Learning Research* 15 (1): 3389-93.
- Främling, Kary, et Jan Nyman. 2008. « Information architecture for intelligent products in the internet of things ». *Beyond Business Logistics proceedings of NOFOMA*, 224-29.
- Frawley, W. J., G Piatetsky-Shapiro, et C.J. Matheus. 1991. « An Overview: Knowledge Discovery in Databases - Google Scholar ». *Knowledge discovery in data bases*, 1991, MIT Press édition.
- Freeman, R. Edward. 2010. *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Reissue. Cambridge New York Melbourne Madrid Cape Town Singapore: Cambridge University Press.
- Friedman-Hill, Ernest. 2003. *Jess in action: rule-based systems in Java*. Greenwich, CT: Manning.
- GAO. 2007. « Summary of Challenges Faced in Targeting Ocean-going Cargo containers for Inspection ». United States General Accounting Office.
- Geng, Liqiang, et Howard J. Hamilton. 2006. « Interestingness Measures for Data Mining: A Survey ». *ACM Computing Surveys* 38 (3): 9 - es. <https://doi.org/10.1145/1132960.1132963>.
- Gningue, Mame bigue. 2011. « Gestion Du Risque Securitaire Dans La Chaine Logistique Globale : Le Cas Du Transport International De Marchandises », 2011.
- Haass, Rasmus, Patrick Dittmer, Marius Veigt, et Michael Lütjen. 2015. « Reducing Food Losses and Carbon Emission by Using Autonomous Control - A Simulation Study of the Intelligent Container ». *International Journal of Production Economics* 164 (juin): 400-408. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.013>.
- Haimes, Yacov Y., Stan Kaplan, et James H. Lambert. 2002. « Risk filtering, ranking, and management framework using hierarchical holographic modeling ». *Risk Analysis* 22 (2): 383-97.
- Hall, Mark, Eibe Frank, Geoffrey Holmes, Bernhard Pfahringer, Peter Reutemann, et Ian H. Witten. 2009. « The WEKA Data Mining Software: An Update ». *SIGKDD Explor. Newsl.* 11 (1): 10-18. <https://doi.org/10.1145/1656274.1656278>.
- Han, Jiawei, Jian Pei, et Yiwen Yin. 2000. « Mining frequent patterns without candidate generation ». In *ACM Sigmod Record*, 29:1-12. ACM.
- Hargather, Michael J, Matthew E Staymates, Matthew J Madalis, Daniel J Smith, et Gary S Settles. 2011. « The Internal Aerodynamics of Cargo Containers for Trace Chemical Sampling and Detection ». *IEEE Sensors Journal* 11 (5): 1184-93.
- Haropa. 2015. « Haropa bilan 2014 et perspectives 2015 ». 2015. http://www.haropaports.com/sites/haropa/files/u31/2015-01-28_haropa_bilan_2014_et_perspectives_2015.pdf.
- HAROPA - Ports de Paris Seine Normandie. s. d. « Statistiques de trafic ». Consulté le 11 septembre 2017. <http://www.haropaports.com/fr/le-havre/nous-connaitre/statistiques-de-traffic>.
- Henesey, L. 2006. « Multi-agent systems container terminal management ». Blekinge Institute of Technology,.

- Hillson, David. 2006. « Les trois temps de l'identification des risques: Le passé, le present et le future ». Risk Doctor Note d'Information. <http://www.risk-doctor.com/pdf-briefings/risk-doctor27f.pdf>.
- Hinkelman, Edward G., et Karla C. Shippey. 2005. *Dictionary of international trade: handbook of the global trade community, includes 21 key appendices*. 6th ed. Novato, Calif: World Trade Press.
- Hubbard, Graham. 2009. « Measuring organizational performance: beyond the triple bottom line ». *Business strategy and the environment* 18 (3): 177-91.
- Humez, Vérane. 2008. « Proposition d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des commandes en cas de pénurie: une approche par la performance ». INPT. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000839/>.
- Ioannou1, Petros, et Hossein Jula. 2008. « Automated Container Terminal Concepts ». In *Intelligent Freight Transportation*, 7-33. Automation and Control Engineering. CRC Press. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780849307744.ch2>.
- Janssens-Maenhout, G., F. De Roo, et W. Janssens. 2010. « Contributing to Shipping Container Security: Can Passive Sensors Bring a Solution? » *Journal of Environmental Radioactivity* 101 (2): 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.09.002>.
- « Jay Wright Forrester ». 2017. *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jay_Wright_Forrester&oldid=768175980.
- Jovanovic, Boyan. 1982. « Selection and the Evolution of Industry ». *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 649-70.
- Kaplan, Stanley, et B. John Garrick. 1981. « On the quantitative definition of risk ». *Risk analysis* 1 (1): 11-27.
- Kärkkäinen, Mikko, Jan Holmström, Kary Främling, et Karlos Artto. 2003. « Intelligent products—a step towards a more effective project delivery chain ». *Computers in industry* 50 (2): 141-51.
- Kerre, Etienne. 1995. « On the Evolution of the Mathematics of Fuzziness | SpringerLink ». *Fuzzy Set Theory and Advanced Mathematical Applications*, 1995. https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4615-2357-4_1.
- Khan, Omera, et Bernard Burnes. 2007. « Risk and supply chain management: creating a research agenda ». *The international journal of logistics management* 18 (2): 197-216.
- Kim, Su Jin, Guofeng Deng, Sandeep KS Gupta, et Mary Murphy-Hoye. 2008. « Intelligent networked containers for enhancing global supply chain security and enabling new commercial value ». In *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on*, 662-69. IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4554493.
- Kiritsis, Dimitris. 2011. « Closed-Loop PLM for Intelligent Products in the Era of the Internet of Things ». *Computer-Aided Design* 43 (5): 479-501. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.03.002>.
- Klaus, Peter, et Stefanie Müller, éd. 2012. *The roots of logistics: a reader of classical contributions to the history and conceptual foundations of the science of logistics*. Berlin: Springer.
- Law, Averill M., et W. David Kelton. 1991. *Simulation modeling and analysis*. 2nd ed. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. New York: McGraw-Hill.
- Leriche, D., M. Oudani, A. Cabani, G. Hoblos, J. Mouzna, J. Boukachour, et A. El Hilali Alaoui. 2015. « Simulating new logistics system of Le Havre Port ». *IFAC-PapersOnLine*, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015, 48 (3): 418-23. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.117>.
- Leung, M. F., J. R. Santos, et Y. Y. Haimés. 2003. « Risk modeling, assessment, and management of lahar flow threat ». *Risk Analysis* 23 (6): 1323-35.

- Lewis, Brian, Alan Erera, et Chelsea White III. 2003. « Optimization approaches for efficient container security operations at transshipment seaports ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1822: 1-8.
- Li, He. 2008. « Conteneurs à étiquettes électroniques ». In .
- Longo, Francesco. 2010. « Design and Integration of the Containers Inspection Activities in the Container Terminal Operations ». *International Journal of Production Economics* 125 (2): 272-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.01.026>.
- — —. 2012. « Supply chain security: an integrated framework for container terminal facilities ». *International Journal of Simulation and Process Modelling* 7 (3): 159-67.
- Longo, Francesco, et Giovanni Mirabelli. 2008. « An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation ». *Computers & Industrial Engineering* 54 (3): 570-88.
- Lu, Chin-Shan, et Chung-Shan Yang. 2010. « Safety leadership and safety behavior in container terminal operations ». *Safety science* 48 (2): 123-34.
- Malhéné, Nicolas, et Jean-Christophe Deschamps. 2010. « De la traçabilité au routage des produits en transport routier ». In *8èmes Rencontres Internationales de Recherche en Logistique, RIRL'2010*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00585060/>.
- Mamdani, E.H. 1974. « Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant ». *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 121 (12): 1585. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>.
- March, James G., et Zur Shapira. 1987. « Managerial perspectives on risk and risk taking ». *Management science* 33 (11): 1404-18.
- Marhavilas, Panagiotis, Dimitrios Koulouriotis, et Christos Mitrakas. 2014. « FAULT AND EVENT-TREE TECHNIQUES IN OCCUPATIONAL HEALTH-SAFETY SYSTEMS-PART II: STATISTICAL ANALYSIS. » *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)* 13 (9). http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/pdfs/vol13/no9/full/32_147_Marhavilas_14.pdf.
- Marhavilas, P. K., et D. E. Koulouriotis. 2012. « Developing a new alternative risk assessment framework in the work sites by including a stochastic and a deterministic process: A case study for the Greek Public Electric Power Provider ». *Safety Science* 50 (3): 448-62.
- Marhavilas, P. K., D. E. Koulouriotis, et C. Mitrakas. 2011. « On the development of a new hybrid risk assessment process using occupational accidents' data: Application on the Greek Public Electric Power Provider ». *Journal of loss prevention in the process industries* 24 (5): 671-87.
- McFarlane, Duncan, Sanjay Sarma, Jin Lung Chirn, C.Y Wong, et Kevin Ashton. 2003. « Auto ID Systems and Intelligent Manufacturing Control ». *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (4): 365-76. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00077-0](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00077-0).
- « Menace ». 2016. *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Menace&oldid=127597000>.
- Mendel, J. M. 1995. « Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial ». *Proceedings of the IEEE* 83 (3): 345-77. <https://doi.org/10.1109/5.364485>.
- Mentzer, John T., Daniel J. Flint, et G. Tomas M. Hult. 2001. « Logistics service quality as a segment-customized process ». *Journal of marketing* 65 (4): 82-104.
- Mercier, J. 1998. « Suivre ses conteneurs en sachant ce qu'il y a dedans ». <http://lamyline.lamy.fr.doc-distant.univ-lille2.fr>.
- Merk, Olaf, César Ducruet, Patrick Dubarle, Elvira Haezendonck, et Michael Dooms. 2011. « The Competitiveness of Global Port-Cities: the Case of the Seine Axis (Le Havre, Rouen, Paris, Caen)-France ». *OECD Regional Development Working Papers* 2011 (7): 1.
- Meyer, Gerben G., Kary Främling, et Jan Holmström. 2009. « Intelligent products: A survey ». *Computers in Industry* 60 (3): 137-48.
- « Modal Share of Freight Transport to and from EU Ports ». 2015. DIRECTORATE - GENERAL FOR INTERNAL POLICIES.

- [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540350/IPOL_STU\(2015\)540350_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/540350/IPOL_STU(2015)540350_EN.pdf).
- Nahmias, Steven, et Ye Cheng. 2009. *Production and operations analysis*. Vol. 4. McGraw-Hill/Irwin New York.
<http://www.academia.edu/download/40414673/574716238.pdf>.
- NAJIB, MEHDI. 2014. « Gestion des risques liés au transport des matières dangereuses ». Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH): Université du Havre.
- Najib, Mehdi, Abdelaziz El Fazziki, et Jaouad Boukachour. 2014. « Risk management impact assesment: maritme container terminal performance. » *International Journal of Academic Research* 6 (1).
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=20754124&AN=95739177&h=HnITDhaNZIPB4Txcn0pSL9u10eI9O0nWuvCCAOJaWR63h9Ic%2BTL4ORKAWB06hfNWwGgYfKD8%2B3AXVNc004Zs4A%3D%3D&crl=c>.
- Negnevitsky, Michael. 2005. *Artificial intelligence: a guide to intelligent systems*. 2nd ed. Harlow, England ; New York: Addison-Wesley.
- Ngai, Eric WT, TC Edwin Cheng, S. Au, et Kee-hung Lai. 2007. « Mobile commerce integrated with RFID technology in a container depot ». *Decision Support Systems* 43 (1): 62-76.
- OMD. 2015. « CADRE DE NORMES SAFE ». Organisation mondiale des douanes.
http://www.wcoomd.org/~media/wco/public/fr/pdf/topics/facilitation/instruments-and-tools/tools/safe-package/safe2015_f_final.pdf?la=fr.
- Orphan, Victor J., Ernie Muenchau, Jerry Gormley, et Rex Richardson. 2005. « Advanced γ Ray Technology for Scanning Cargo Containers ». *Applied Radiation and Isotopes* 63 (5-6): 723-32. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.05.033>.
- Oudani, Mustapha. 2016. « Optimisation des problèmes de transport multimodal ». Normandie université/Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01327923/>.
- Pach, Cyrille, Abdelghani Bekrar, Nadine Zbib, Yves Sallez, et Damien Trentesaux. 2012. « An effective potential field approach to FMS holonic heterarchical control ». *Control Engineering Practice* 20 (12): 1293-1309.
- Papa, Paola. 2013. « US and EU Strategies for Maritime Transport Security: A Comparative Perspective ». *Transport Policy* 28 (juillet): 75-85.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.08.008>.
- Papon, Pierre-Antoine. 2016. « Extraction optimisée de règles d'association positives et négatives intéressantes ». Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01412054>.
- Paté-Cornell, Elisabeth. 2012. « On “Black Swans” and “Perfect Storms”: risk analysis and management when statistics are not enough ». *Risk analysis* 32 (11): 1823-33.
- Pennerath, Frédéric. 2009. « Méthodes d'extraction de connaissances à partir de données modélisables par des graphes. Application à des problèmes de synthèse organique. » Phdthesis, Université Henri Poincaré - Nancy I. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00436568/document>.
- Petru, Măzăreanu Valentin. 2013. « On the role of implementing a database system in the risk communication process. » *Young Economists Journal/Revista Tinerilor Economisti* 10 (20).
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=15839982&AN=94431184&h=iMnORimUFU73UjFOnEWNJ6y5ULnt3ozpw2QY%2FqUxsZGn9DFa41Zn8QUJrbCCHQNpi9%2F1fIipVosGk7gIzEOw4A%3D%3D&crl=c>.
- Pokoradi, Laszlo. 2002. « Fuzzy logic-based risk assessment ». *AARMS, Academic and Applied Research in Military Science* 1 (1): 63-73.

- Ramirez-Marquez, Jose Emmanuel. 2008. « Port-of-Entry Safety via the Reliability Optimization of Container Inspection Strategy through an Evolutionary Approach ». *Reliability Engineering & System Safety* 93 (11): 1698-1709. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2008.01.003>.
- « Risque majeur ». 2017. *Wikipédia*. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Risque_majeur&oldid=137646432.
- Rizzo, Francesco, Marcello Barboni, Lorenzo Faggion, Graziano Azzalin, et Marco Sironi. 2011. « Improved Security for Commercial Container Transports Using an Innovative Active RFID System ». *Journal of Network and Computer Applications* 34 (3): 846-52. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2010.04.006>.
- Rot, Artur. 2008. « IT risk assessment: Quantitative and qualitative approach ». *Resource* 283: 284.
- Sallez, Yves. 2012. « Produit' actif' tout au long de son cycle de vie ». Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00768771/>.
- Sallez, Yves, Shenle Pan, Benoit Montreuil, Thierry Berger, et Eric Ballot. 2016. « On the Activeness of Intelligent Physical Internet Containers ». *Computers in Industry* 81 (septembre): 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.12.006>.
- Shang, Kuo-Chung, et Wen-Jui Tseng. 2010. « A risk analysis of stevedoring operations in seaport container terminals ». *Journal of Marine Science and Technology* 18 (2): 201-10.
- Su, Eric, Edward Tang, Kin Keung Lai, et Yan Pui Lee. 2015. *Operational Risk Management in Container Terminals*. Vol. 6. Routledge. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=8pjwCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=%22operational+risk+management+in+container+terminals.%22&ots=VgJL-XbDM9&sig=bJZDf2TYJVX-FI72RYt7cS-OFbs>.
- Tan, Pang-Ning, Steinbach Michael, et Vipin Kumar. 2005. « Chapter 6. association analysis: Basic concepts and algorithms ». *Introduction to Data Mining*. Addison-Wesley. ISBN 321321367.
- The European Environment Agency. 2017. « Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2015 and inventory report ». <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2017>.
- Tixier, Jerome, Gilles Dusserre, Olivier Salvi, et Didier Gaston. 2002. « Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants ». *Journal of Loss Prevention in the process industries* 15 (4): 291-303.
- « Top 50 World Container Ports | World Shipping Council ». s. d. Consulté le 11 septembre 2017. <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports>.
- Treuil, Jean-Pierre, Alexis Drogoul, et Jean-Daniel Zucker. 2008. *Modélisation et simulation à base d'agents: exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Paris: Dunod : IRD.
- Tummala, V. M. Rao, et C. L. Mak. 2001. « A Risk Management Model for Improving Operation and Maintenance Activities in Electricity Transmission Networks ». *The Journal of the Operational Research Society* 52 (2): 125-34. <https://doi.org/10.2307/254139>.
- UNCTAD. 2016. « Review of Maritime Transport, 2016 . » New York and Geneva, Switzerland: United Nations Conference on Trade and Development.
- United States Government Accountability Office. 2012. « Container Security Programs Have Matured, but Uncertainty Persists over the Future of 100 Percent Scanning ».
- Ventä, Olli. 2007. *Intelligent products and systems: Technology theme-final report*. VTT Technical Research Centre of Finland.

- Voß, Stefan, Robert Stahlbock, et Dirk Steenken. 2004. « Container terminal operation and operations research - a classification and literature review ». *OR Spectrum* 26 (1): 3-49. <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>.
- Ward, Stephen. 2003. « Approaches to integrated risk management: a multi-dimensional framework ». *Risk Management*, 7-23.
- Wiese, Jörg, Leena Suhl, et Natalia Kliewer. 2011. « Planning Container Terminal Layouts Considering Equipment Types and Storage Block Design ». In *Handbook of Terminal Planning*, 219-45. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Springer, New York, NY. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-8408-1_12.
- Wong, Chien Yaw, Duncan McFarlane, A. Ahmad Zaharudin, et Vivek Agarwal. 2002. « The intelligent product driven supply chain ». In *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on*, 4:6 - pp. IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1173319.
- Wu, Teresa, Jennifer Blackhurst, et Vellayappan Chidambaram. 2006. « A model for inbound supply risk analysis ». *Computers in industry* 57 (4): 350-65.
- Wu, Y., Y. Chen, et R. Chang. 2009. « Generalized knowledge discovery from relational databases ». *International Journal of Computer Science and Network* 9 (6): 148-53.
- Yang, Xiaoyu, Philip Moore, et Seng Kwong Chong. 2009. « Intelligent products: From lifecycle data acquisition to enabling product-related services ». *Computers in Industry* 60 (3): 184-94.
- Zadeh, L. A. 1973. « Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-3 (1): 28-44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>.
- Zadeh, Lotfi A. 1965. « Fuzzy sets ». *Information and control* 8 (3): 338-53.
- — —. 1975. « FUZZY SETS AND THEIR APPLICATIONS ». In *Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes*, 477-96. Academic Press. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780127752600500256>.
- — —. 2009. « Toward extended fuzzy logic – A first step ». *Fuzzy Sets and Systems*, Theme: Fuzzy intervals, 160 (21): 3175-81. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.04.009>.
- Zaki, Mohammed J, Srinivasan Parthasarathy, Mitsunori Ogihara, et Wei Li. 1997. « New Algorithms for Fast Discovery of Association Rules ». Rochester, NY, USA: University of Rochester.
- Zopounidis, Constantin, et Panos M. Pardalos. 2013. *Managing in Uncertainty: Theory and Practice*. Vol. 19. Springer Science & Business Media. <https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=b2XTBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP10&dq=%22Managing+in+Uncertainty:+Theory+and+Practice%22&ots=EHaGCa5T42&sig=XZhwT9aCLqCznW2ebZlimPvWw5o>.