Gestion des risques liés au transport des matières dangereuses

Mehdi Najib

UNIVERSITÉ DU HAVRE

Thèse pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU HAVRE

Spécialité : Informatique **–** ***Option :*** Intelligence artificielle

Préparée au :

Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH)

Présentée par :

Mehdi **N**AJIB

Gestion des risques liés au transport des matières dangereuses

---

Soutenue publiquement Le 31 Octobre 2014 devant le Jury d'examen :

Président :

- Mohammed SADGAL, Professeur des universités, Cadi Ayyad de Marrakech, Maroc

Rapporteurs :

- Cyril FONLUPT, Professeur des universités, Université du Littoral Côte d'Opale, France
- Djamal BENSLIMANE, Professeur des universités, Université C.B. Lyon1, France
- Ernesto DAMIANI, Professeur des universités, Université de Milan, Italie
- Kokou YETONGNON, Professeur des universités, Université de Bourgogne, France

Examinateur :

- Cyrille BERTELLE, Professeur des universités, Université du Havre, France

Directeurs de thèse :

- Jaouad BOUKACHOUR, MCF-HDR, Université du Havre, France
- Abdelaziz EL FAZZIKI, Professeur des universités, Université Cadi Ayyad, Maroc

AVANT-PROPOS

Les travaux de recherche concernés par cette thèse sont menés à l'université du Havre, dans le Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (LMAH). Dans cette thèse, les efforts se focalisent sur la problématique de la gestion des risques liés au transport des matières dangereuses et particulièrement au niveau d'un terminal à conteneurs.

Ma thèse a été codirigée M. Jaouad BOUKACHOUR et M. Abdelaziz EL FAZZIKI. Le contexte général de notre étude est la gestion des risques. Nous nous intéressons à la proposition des processus de gestion des risques appropriés au contexte portuaire. De plus, nous mettons le point sur l'évaluation de l'impact de la gestion des risques sur la performance d'un terminal à conteneurs. Ce sujet est d'actualité et ces travaux se situent pleinement dans les préoccupations du projet passage portuaire.

À la mémoire de mon père

REMERCIEMENTS

Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de cette thèse.

Je voudrais tout d'abord exprimer mes profonds remerciements à M. Jaouad BOUKACHOUR, Maître de conférence HDR à l'université du Havre, et M. Abdelaziz EL FAZZIKI, Professeur de l'enseignement supérieur à l'université Cadi Ayyad de Marrakech et qui sont les directeurs de cette thèse, pour leur encadrement, conseils, confiance et pour le soutien qu'ils ont su m'accorder durant toutes ces années.

Je tiens à remercier M. Cyril FONLUPT, professeur à l'université du Littoral Côte d'Opale, M. Djamal BENSLIMANE professeur à l'université Claude Bernard Lyon1, M. Ernesto DAMIANI, professeur à l'université de Milan (Italie) et M. Kokou YETONGNON, professeur à l'université de Bourgogne pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. Je leur suis également très reconnaissant pour leur lecture approfondie du mémoire ainsi que pour les remarques et les suggestions qu'ils ont su apportées

Je tiens à remercier M. Mohammed SADGAL, professeur à l'université Cadi Ayyad de Marrakech d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury lors de ma soutenance.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à M. Cyrille BERTELLE, Professeur à l'université du Havre d'avoir accepté d'examiner cette thèse et d'apporter son point de vue sur ce travail.

Je remercie également, Mme Dalila BOUDEBOUS MCF-HDR à l'université du Havre et tous les membres de l'équipe pour l'ambiance cordiale qu'ils ont su faire régner au sein du laboratoire.

Mes remerciements vont également à ma mère pour ses encouragements et son attention.

Résumé

L'évolution du commerce international et la croissance des échanges intercontinentaux ont créé un besoin constant pour le transport de marchandises. Dans ce contexte, le transport maritime a connu un grand engouement vu son efficience pour la mobilité de grande quantité de marchandises. Ce mode de transport a été révolutionné par l'introduction des conteneurs, et le développement de nouvelles plateformes multimodales : les terminaux à conteneurs (TC), spécialisés dans la manutention des conteneurs. Ces derniers sont souvent soumis à des contraintes et des exigences qu'ils doivent satisfaire en termes d'efficience, de sécurité et de sûreté de fonctionnement.

L'objectif de cette thèse est de gérer les risques liés au transport des conteneurs dans un TC tout en prenant en compte l'aspect collaboratif au niveau d'une chaîne logistique et les activités qui pourraient être réalisées en amont de la livraison des conteneurs. Ceci en garantissant une réconciliation des aspects gestion des risques et performance dans un TC. La mise en œuvre est basée sur une approche multi-paradigme permettant l'urbanisation du système de traçabilité GOST (Géo-localisation Optimisation et Sécurité de Transport) et le développement d'un Système de Gestion d'un Terminal à Conteneurs (SGTC).

Concernant la gestion des risques liés au transport des conteneurs, une solution a été proposée en se basant sur la traçabilité et la géo-localisation en s'appuyant sur le système GOST moyennant son urbanisation, le concept de produit intelligent et des architectures orientées services. Le but de cette solution est d'améliorer la collecte des informations relatives à la gestion des risques fournies par les acteurs de la chaîne logistique. Pour ce faire, nous avons tout d'abord procédé à une urbanisation du système GOST afin de l'adapter aux nouvelles exigences. Ensuite, nous avons proposé un enrichissement du concept de produit intelligent afin de développer un modèle du conteneur intelligent approprié. Enfin, nous avons employé les architectures dirigées par les modèles afin d'automatiser la génération du code des services web pour la collecte des données de traçabilité. A cet effet, deux approches pour l'interfaçage du conteneur intelligent aux différents services web ont été proposées. La première est basée sur l'orchestration des services selon la logique des processus métiers. Quant à la seconde, elle est fondée sur l'utilisation d'un bus de communication l'ESB : Entreprise Service Bus.

Toutes ces solutions sont intégrées dans le système SGTC qui s'appui sur la technologie Agent. Ce système intègre une approche de gestion des risques et l'évaluation de la performance du TC. L'approche de gestion des risques est basée sur deux processus. Le premier traite le ciblage des conteneurs suspects et est bâti autour d'un système expert enrichi par une méthode d'apprentissage forcé : l'algorithme Apriori. Le second prend en charge la vérification de la ségrégation spatiale durant l'entreposage. Enfin, une étude de cas a été réalisée afin de valider la solution proposée ainsi qu'une simulation pour l'évaluation de la performance.

Mots-clés: Gestion des risques, Systèmes multi-agent, Architecture dirigée par les modèles (MDA), Simulation, produit intelligent, Processus métier, Architecture orientée services.

Abstract

The international trade evolution and the growth of intercontinental commercial exchanges have created an ongoing need for goods' transport. In this context, maritime transport knew an enormous craze due to its efficiency for shipping large quantities of goods. This mode of transport has been revolutionized by the introduction of containers and the development of new multimodal platforms specialized in container handling: Container Terminals (CT). These CTs are subject to a set of constraints and requirements that must be satisfied in terms of efficiency, safety, and dependability.

This thesis aims to manage the risks related to containers transport in a CT taking into account the collaborative aspect of the supply chain and the activities carried out before the containers' delivery. Furthermore, it tackles reconciliation of the risk management aspect and performance aspect in CT. The implementation is based on a multi-paradigm approach for the urbanization of GOST traceability system (Geo-localization, Optimization, Securing, and Transport) and the development of a Container Terminal Management System (CTMS).

For the risk management related to containers transport, we proposed a tracking and tracing solution based on the urbanization of GOST system, intelligent product concept and service-oriented architectures. This solution aims to improve the collection of information needed for risk management, which are provided by the supply chain actors. For this purpose, first of all, we propose an urbanization of the GOST system to fit t risk management requirements. In a second step, we define an improved intelligent product concept to develop an appropriate intelligent container model. Finally, we used the model driven architectures to automate code generation of web services needed to collect traceability data. For this purpose, two approaches for interfacing the intelligent container to different web services have been proposed. The first is based on services orchestration using business process. The second is founded on the configuration of an Enterprise Service Bus (ESB).

All these solutions are integrated in the CTMS system. This system is developed using the Agent technology and aims to integrate risk management approach and the evaluation of the CT performance. Our risk management approach is based on two processes. The first deals with the suspicious containers targeting and it is based on an expert system enriched by a forced learning method: the Apriori algorithm. The second supports the verification of spatial segregation during storage. Finally, a case study was carried out to validate the proposed solution as well as a simulation to evaluate the performance.

Keywords: Risk management, multi-agent system, model driven architecture, simulation, intelligent product, business process, and service oriented architecture.

Sommaire

Liste des Figures

Chapitre II.

Chapitre III.

Introduction Générale

1. Contexte de la thèse

Le transport maritime assure l'acheminement de 90 % des marchandises échangées dans le monde. L'engouement pour ce mode de transport est dû à la délocalisation des usines loin des marchés de consommation et à la capacité d'assurer le transport de grande quantité de marchandises à un prix abordable. Dans ce contexte, la région de Haute-Normandie dispose du plus grand complexe portuaire de France (Le Havre-Rouen) pour le commerce extérieur. Ce dernier représente un levier pour l'économie de la région avec plus de 300 entreprises qui dépendent de ses activités et plus de 40000 emplois directs et indirects.

L'enjeu principal du port du Havre se manifeste dans sa capacité à résister à la concurrence des ports situés sur la même façade maritime notamment ceux d'Anvers et de Rotterdam. En conséquence, ce port doit améliorer sa performance afin de maintenir sa position dans le réseau mondial des grands HUBS portuaires. De manière opérationnelle, cela revient à entreprendre l'ensemble de mesures susceptibles de perfectionner son fonctionnement et par conséquent d'améliorer sa compétitivité en vue d'augmenter sa part du trafic mondial.

Pour répondre à ces besoins, le projet Passage Portuaire a été proposé dans le cadre du Grand Réseau de Recherche Transport Logistique et Technologie de l'Information (GRR TL-TI) de Haute-Normandie en 2010. Ce projet vise la mobilisation des compétences académiques pluridisciplinaires afin de répondre à certains enjeux environnementaux, organisationnels et sécuritaires liés au passage portuaire d'un conteneur. Les problématiques concernent l'inter-modalité du transport, la minimisation des émissions de carbone, la traçabilité et le suivi des conteneurs en temps réel, la sécurité et la sûreté des processus de manutention et enfin l'interconnexion des systèmes d'information utilisés par les acteurs portuaires au Havre, Rouen et Paris.

Ce projet est structuré en quatre axes principaux :

Nouveaux modèles d'organisation et de transbordement : cet axe se focalise sur la réorganisation des modes de transport pour l'acheminement des conteneurs vers l'hinterland.

Il favorise le choix d'autres modes de transport, fluvial et ferroviaire, comme alternatives au transport routier. D'une part, sur le plan stratégique, cet axe met en avant le dimensionnement des réseaux multimodaux et le positionnement de leurs nœuds (terminaux à conteneurs, entrepôts). D'autres parts, au niveau tactique, il vise la spécification du réseau de services permettant le transport des conteneurs entre les différents nœuds du réseau multimodal.

Gestion des terminaux : cet axe traite les problèmes d'aménagement et de gestion des terminaux sous les contraintes dynamiques et avec la prise en compte des incertitudes concernant les délais de réception et de manutention des conteneurs. Le principal objectif est l'adaptation des modèles existants ainsi que le développement de nouveaux modèles tenant compte des contraintes dynamiques dans la gestion des terminaux à conteneurs. Dès lors, cet axe est consacré aux problèmes d'allocations dynamiques et adaptatives des missions de manutention des conteneurs et de coordination entre les engins de manutention.

Optimisation de l'axe Seine et impacts économiques des ports : cet axe étudie la notion de système portuaire régional pour l'exploitation des composantes logistiques situées sur l'axe Seine (Le Havre-Paris) afin de faire face à la concurrence des régions portuaires belges. Pour ce faire, les travaux de recherches y afférents sont fondés sur la mise en œuvre d'un Système d'Information Géographique (SIG). Ce système permet d'avoir une vision sur différentes échelles de l'organisation géoéconomique de l'espace portuaire Basse-Seine afin de supputer les modalités d'intégration des organisations et des infrastructures existantes sur axe Seine.

Traçabilité et gestion des risques dans des systèmes distribués : cet axe traite le rôle des systèmes d'informations et l'émergence de l'informatique ubiquitaire pour répondre aux nouveaux besoins d’une chaîne logistique. Ces besoins sont généralement liés à la sécurité et la sûreté du transport des marchandises. Dans ce contexte, cet axe vise la mise en œuvre d'un dispositif embarqué dans le conteneur afin de relever des informations qui décrivent l'état interne du conteneur (température, pression... etc.) et sa localisation. De plus, il vise la spécification de nouveaux mécanismes de traçabilité pour identifier les responsabilités des acteurs lors d'un éventuel incident.

Le travail de la thèse s’inscrit dans le cadre de l’axe 4 et concerne, plus particulièrement, la gestion des risques liés au transport des matières dangereuses, dans la continuité du projet ANR-PREDIT GOST (Géo-localisation Optimisation et Sécurisation du Transport des conteneurs).

2. Problématique

La complexité des systèmes de transport multimodal, les contraintes et les exigences qu'ils doivent satisfaire en termes d'efficience, de sécurité et de sûreté de fonctionnement sont autant de facteurs que les acteurs du transport dans une chaîne logistique doivent prendre en compte. Vu la nature distribuée des tâches, l'absence d'une partie prenante qui assure le contrôle et le suivi du transport, de nouvelles sources de vulnérabilité ont émergé. Des vulnérabilités de plus en plus redoutées à cause des actes frauduleux qui exploitent les modes de transport pour le trafic de produits illicites ou particulièrement pour faciliter des actes terroristes. Cependant, l'établissement d'un processus pour la gestion des risques dans ce contexte tout en couvrant l'intégralité d'une chaîne logistique s'avère une tâche fastidieuse. Ceci nous a amenés à nous intéresser davantage aux principaux maillons de cette chaîne et particulièrement les ports maritimes.

2.1. Terminal à conteneurs et performance

L'introduction du conteneur comme unité standard de chargement a révolutionné le fonctionnement des ports maritimes. Il a amélioré les conditions de transport des marchandises et a favorisé le transport multimodal. De plus, d'importants investissements ont été alloués pour la construction de nouveaux terminaux à conteneurs afin de tirer profit de l'engouement pour ce type de transport et de répondre aux besoins de l'évolution drastique du nombre de conteneurs échangés dans le monde.

Historiquement, la gestion des terminaux à conteneurs a été dominée par l'objectif d'amélioration de la compétitivité et de l'augmentation de la part du trafic de marchandises. C'est dû à une amélioration de la performance des ports à travers la fluidité des processus de manutention des conteneurs et au coût des services proposés. Cette vision de compétitivité axée sur le niveau tactique ne pourra jamais par elle seule répondre totalement aux besoins liés aux nouvelles réglementations imposées pour garantir la sécurité et la sûreté de fonctionnement des plateformes portuaires. Ainsi, le respect de ces réglementations représente un facteur de compétitivité et garantit l'éligibilité du port à traiter des flux de conteneurs provenant ou à destination des pays exigeants le respect des normes internationales de sécurité et de sûreté.

La tendance montre que les organisations donnent de plus en plus d'importance à la prise en compte des risques durant les opérations de manutention. L'émergence de ce concept

est due à un retour d'expérience en ce qui concerne l'occurrence des événements indésirables. La capitalisation des connaissances liées à ces événements a permis la spécification de méthodes qui visent à garantir le bon déroulement des opérations d'acheminement des conteneurs et de minimiser l'occurrence des événements à risques.

La recherche dans le domaine de la gestion des risques est très riche et attire l'attention d'une grande communauté scientifique pluridisciplinaire. En conséquence, ce domaine se caractérise par une pléthore de méthodes qui varient selon la généricité, le type d'analyse et le type de données. Cependant, si de nombreuses méthodes de gestion des risques existent, la question qui se pose est l'adéquation de ces méthodes pour les différents domaines d'applications. Ainsi, il est judicieux de procéder à une adaptation du processus de la gestion des risques pour prendre en compte la spécificité du cas traité.

Le processus de gestion des risques regroupe plusieurs aspects et se base sur des concepts équivoques dont la définition varie d'un domaine à l'autre. Nous précisons dans ce travail que la gestion des risques au niveau d'un terminal à conteneurs, couvre l'aspect sécurité et sûreté des opérations portuaires.

2.2. Gestion des risques dans les terminaux à conteneurs

Les attentats du onze septembre 2001 aux États-Unis ont montré la vulnérabilité des systèmes de transport et l'ampleur des dégâts qu'ils peuvent engendrer. Toutefois, l'établissement d'un processus de gestion des risques qui couvre l'intégralité d'un système de transport est une tâche fastidieuse. En conséquence, des travaux existants ont été axés sur la sécurisation des principaux maillons d'une chaîne logistique. Vu l'importance du rôle des terminaux à conteneurs, la réglementation qui les régit a connu un grand changement. Ceci se manifeste par de nouvelles réglementations et initiatives qui incitent les acteurs du transport maritime à adopter de nouvelles mesures de sécurité.

La compétitivité d'un terminal à conteneurs est étroitement liée à sa capacité à proposer des services à moindre coût et à respecter les délais d'acheminement des conteneurs. En revanche, l'introduction de nouvelles mesures de sécurité dans la stratégie de fonctionnement d'un TC est susceptible d'affecter sa performance. À titre d'exemple, le processus d'inspection des conteneurs par les douaniers est susceptible de générer des coûts supplémentaires relatifs à l'allocation des ressources nécessaires à cette opération et au non-respect des délais de livraison.

2.3. La traçabilité des conteneurs dans une chaîne logistique

La traçabilité dans une chaîne logistique est liée à la capacité de tracer l'historique, l'utilisation et la localisation d'une entité en se basant sur les enregistrements issus des systèmes utilisés [Botta-Genoulaz, 2005]. Elle est d'une grande importance pour contrôler les activités de transport de marchandises et identifier les causes de dysfonctionnement dans une chaine logistique. Par ailleurs, elle est devenue une exigence réglementaire particulièrement pour le transport des matières dangereuses.

La traçabilité des conteneurs constitue un facteur potentiel pour l'amélioration de la sécurité des TC par la collecte des informations utiles pour l'identification des conteneurs suspects. De plus, elle peut être utilisée pour détecter des actes frauduleux et identifier les responsabilités des acteurs concernés par le processus d'acheminement des conteneurs. Dans ce contexte, le système de traçabilité GOST (Géo-localisation Optimisation et Sécurisation du Transport des conteneurs) a été développé dans le cadre d'un partenariat industriel [Boukachour et al., 2011]. Son but est d'assurer la traçabilité et le suivi de conteneurs en temps réel. En revanche, il se limite à la collecte des informations et ne prend pas en considération leur traitement pour la gestion des risques.

2.4. Questions sous-jacentes

Les aspects pris en compte dans ce travail portent sur l'amélioration de la gestion des risques dans les TC. En conséquence, le problème principal à résoudre est énoncé comme suit :

« Comment peut-on gérer les risques liés au transport des conteneurs, particulièrement les conteneurs de marchandises dangereuses, au niveau d'une chaîne logistique caractérisée par une forte distribution des tâches et par l'hétérogénéité de ses acteurs ? »

Ce problème peut être décliné d'une manière non exhaustive en plusieurs questions :

- *Comment urbaniser le système de traçabilité GOST pour la collecte des informations pour la gestion des risques ?*
- *Comment réduire le coût d'adaptation des solutions informatiques utilisées par les acteurs de la chaîne logistique pour le partage des informations ?*
- *Comment intégrer toutes ces propriétés dans une perspective de génie logiciel ?*

- *Comment utiliser le concept du produit intelligent pour la proposition d'un conteneur intelligent ?*
- *Comment prendre en compte la spécificité d'un terminal à conteneurs lors de l'intégration d'un processus de gestion des risques ?*
- *Comment exploiter les techniques de l'intelligence artificielle pour la gestion des risques au niveau d'un terminal à conteneurs ?*
- *Quel est le paradigme adéquat pour représenter le TC et intégrer la gestion des risques dans son fonctionnement ?*

3. Motivations

La motivation principale de cette thèse est de contribuer à la gestion des risques liés au transport de conteneurs dans un contexte multimodal. Il existe des solutions pour le traitement de cette problématique du transport de marchandises, mais elles demeurent spécifiques aux cas traités. Nous avons la conviction que les avancées réalisées dans le domaine de l'informatique ubiquitaire et du génie logiciel peuvent améliorer la communication des intervenants d'une chaîne logistique pour remédier aux risques émanant de leurs activités. De plus, la technologie agent et les techniques d'apprentissage et de gestion de connaissances représentent une solution prometteuse pour prendre en compte la nature distribuée et hétérogène des tâches liées au transport des conteneurs.

Nous estimons que l'apport des systèmes de traçabilité à la sécurisation et l'optimisation du transport de marchandises est d'un intérêt certain. En ce contexte, GOST déploie des solutions technologiques innovantes qui peuvent améliorer les conditions de transport de conteneurs. Ces derniers se manifestent dans l'embarquement d'une balise GPS, un tag RFID et des capteurs (température, pression, etc.) au niveau du conteneur afin de le localiser et relever des informations liées à son état interne.

Les solutions technologiques déployées par GOST peuvent être exploitées pour créer un conteneur intelligent qui s'affranchi de la simple communication des informations relevées de son environnement vers une entité capable d'analyser ces informations. De plus, l'utilisation de ce système est aussi motivée par le besoin d'enrichir les informations de la traçabilité par d'autres informations concernant les activités menées par les acteurs de la chaîne logistique.

4. Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est l'établissement d'un processus de gestion des risques dans un TC. Ceci est réalisé en prenant en compte le contexte coopératif d'une chaîne logistique et les activités réalisées en amont de la livraison du conteneur. Ce travail vise aussi la réconciliation entre l'aspect gestion des risques et l'aspect performance au niveau des plateformes portuaires. En conséquence, l'introduction de nouvelles mesures pour la prévention des risques dans la gestion d'un TC est considérée comme un facteur de performance. De plus, ceci concède une certaine notoriété au port à traiter les conteneurs provenant des pays les plus exigeants en matière de sécurité du transport maritime.

Aux vues des motivations précédentes, ce travail est structuré en deux étapes principales dont le but est de consolider le processus de gestion des risques qui répond aux spécificités du terminal à conteneurs Terminal De France (TDF) au port du Havre. La première étape développe l'aspect sécurisation du processus d'acheminement des conteneurs en amont d'un port maritime. Elle vise d'abord l'urbanisation du système de traçabilité GOST pour l'adapter aux nouveaux besoins. Ensuite, elle intègre le concept du produit intelligent pour l'élaboration d'un conteneur intelligent capable de collecter et de communiquer les informations relatives à son cycle de vie. Ainsi, nous proposons une nouvelle architecture distribuée du système de traçabilité GOST basée sur l'utilisation des services web et du produit intelligent. Cette solution pallie les lacunes de la centralisation et de la confidentialité des informations collectées. En outre, le principe du MDA (Model Driven Architecture) est intégré dans le processus de développement de la solution proposée.

La deuxième étape traite le problème de la gestion des risques au niveau d'un TC. Cette partie vise l'exploitation des techniques de l'intelligence artificielle afin d'établir un système d'aide à la décision qui exploite les informations relevées par le système de traçabilité GOST pour identifier les situations à risques. Cette étape porte sur la proposition d'une plateforme multi-agent qui permet de reproduire le fonctionnement du TDF et d'introduire des mesures de prévention des risques. Cette plateforme permet la simulation du fonctionnement du TDF et l'évaluation de l'impact d'introduction des mesures de gestion des risques sur sa performance. Pour ce faire, nous adoptons une démarche itérative, incrémentale et dirigée par les cas d'utilisation et la technologie agent.

La figure suivante donne une vue globale de la problématique que nous traiterons dans cette thèse et illustre les étapes principales réalisées :

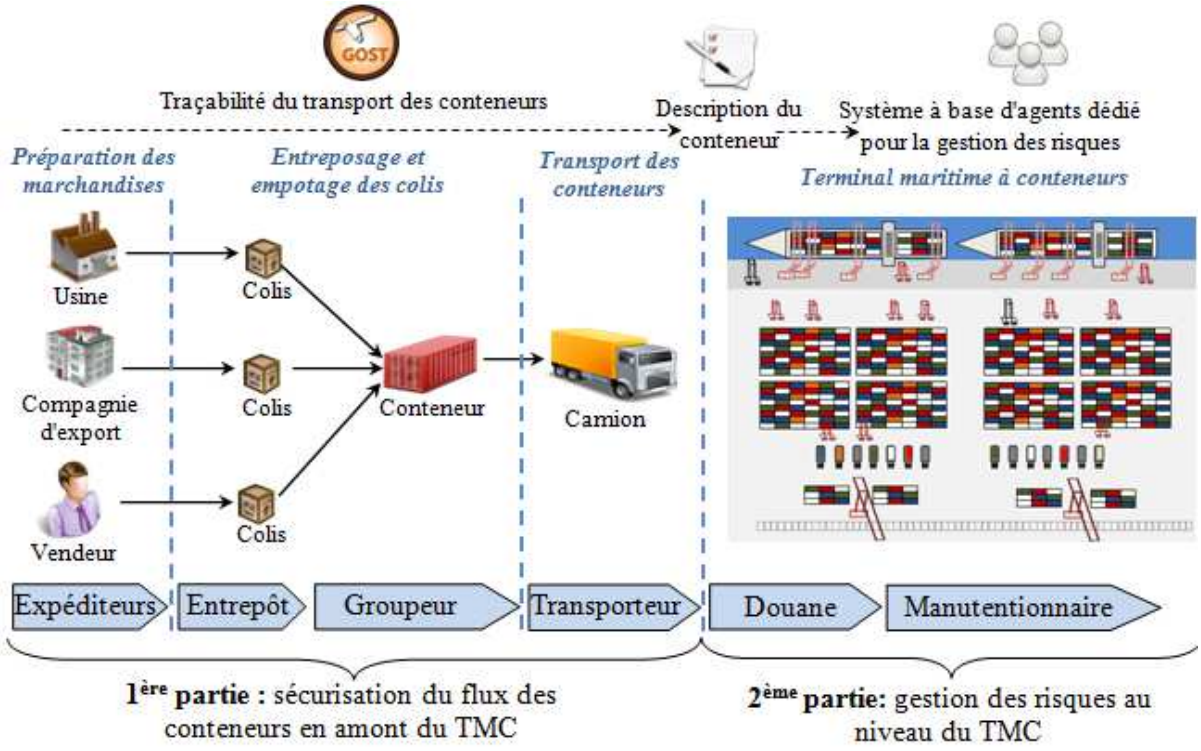

Figure 1. Vue globale des étapes principales de la méthodologie proposée

Les objectifs atteints se définissent au niveau de :

- L'analyse des fonctions d'un terminal à conteneurs par la spécification de ses processus métiers, des rôles et des comportements des acteurs.
- L'étude des risques émanant du processus de manutention des conteneurs.
- L'étude de l'intégration d'une méthode de gestion des risques appropriée.
- L'exploitation des nouvelles technologies de l'information et du génie logiciel pour la collecte des données de la chaîne logistique ainsi que les techniques de l'intelligence artificielle pour la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision pour l'identification des scénarios à risques.
- L'étude de l'impact de la prise en compte des scénarios à risques sur la performance d'un terminal à conteneurs.

5. Contributions

La principale contribution est la sécurisation du flux de conteneurs dans un TC. Notre contribution peut être structurée en deux parties principales. La première vise l'adaptation du système de traçabilité GOST pour la sécurisation du flux des conteneurs en amont du TDF. La deuxième contribution concerne l'intégration d'un processus de gestion des risques dans le fonctionnement du TDF.

5.1. Première contribution : urbanisation du système de traçabilité GOST

Il s'agit de l'urbanisation du système de traçabilité GOST afin de l'aligner sur les besoins du processus de gestion des risques proposé. Cette contribution vise dans un premier temps la proposition d'une architecture du conteneur intelligent, enrichie par les services web. La deuxième porte sur la proposition d'une architecture orientée service du système de traçabilité GOST adapté et la génération automatique des services web en utilisant les Architectures Dirigées par les Modèles (MDA-Model Driven Architecture). La dernière étape de cette contribution est axée sur l'interfaçage des services web générés et le conteneur intelligent. Pour ce faire, nous proposons une première alternative qui se base sur l'exploitation des processus métiers pour l'orchestration des services web. Cette dernière permet la génération d'un service web composite qui sera exploité par le conteneur intelligent. La deuxième alternative se base sur la configuration d'un bus de services d'entreprise (ESB-Enterprise Service Bus) pour permettre la communication entre le conteneur intelligent et les services web. La figure suivante détaille le processus de développement de cette solution :

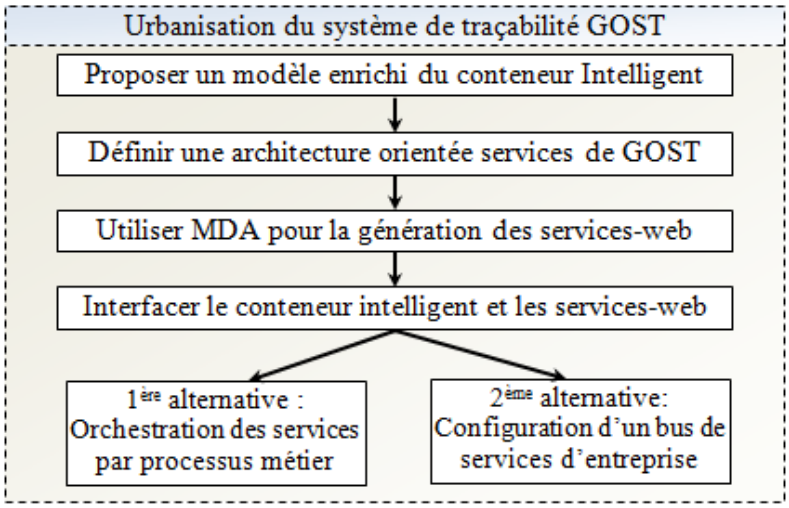

Figure 2. Processus d'urbanisation du système GOST

5.2. Deuxième contribution : Système de gestion d'un terminal à conteneurs

Il s'agit du développement d'un système multi-agent pour la gestion d'un TC. Ce système reproduit, d'une part, le fonctionnement du TDF et d'autre part, il permet l'intégration d'un scénario de gestion des risques dans sa stratégie de fonctionnement. Pour ce faire, nous commencerons par une agentification du système suivie du calibrage de la simulation et son évaluation. La troisième étape porte sur le développement d'un système expert pour le ciblage des conteneurs suspects. Dans la quatrième phase, nous simulerons

plusieurs scénarios de fonctionnement du TDF en intégrant les activités d'inspection des conteneurs et les contraintes de ségrégation durant leurs entreposages. La dernière étape est axée sur l'analyse des résultats de la simulation afin de déterminer et évaluer l'impact de la gestion des risques sur la performance du TDF. La figure suivante présente les principales étapes pour l'élaboration du système multi-agent.

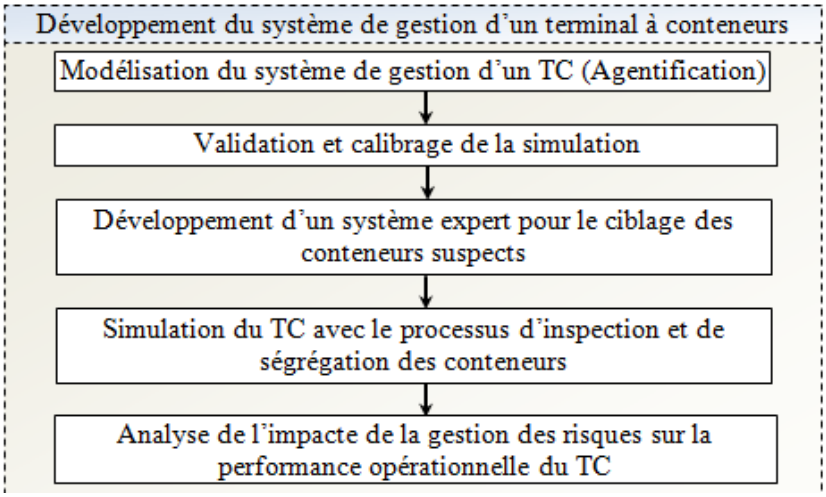

Figure 3. Processus de mise en œuvre de la deuxième contribution

6. Organisation du document

Ce document est structuré en deux parties : la première partie « État de l'art » composée de trois chapitres, une deuxième partie intitulée « Contributions » structurée en trois chapitres. La figure suivante illustre cette structure :

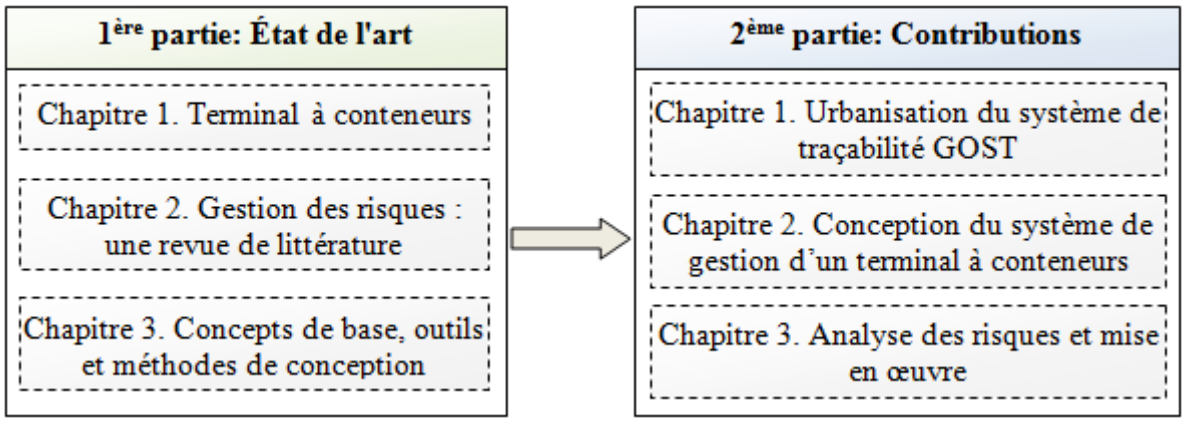

Figure 4. Structure globale de la thèse

6.1. Première partie : État de l'art

Cette partie présente le contexte de ce travail et détaille les concepts de base utilisés. Elle est structurée en trois chapitres.

- *Chapitre 1. Terminal maritime à conteneurs* : L'objectif de ce premier chapitre est de situer ce travail dans son contexte d'une part, par l'illustration de l'évolution du transport maritime et la conteneurisation des marchandises, d'autre part, par la présentation du fonctionnement des TC et le matériel utilisé pour la manutention des conteneurs. Ce chapitre présente aussi un aperçu sur la gestion des TC et les différentes problématiques abordées pour l'amélioration de ses services. Par ailleurs, il détaille aussi la spécificité de traitement des matières dangereuses au niveau des ports.
- *Chapitre 2. Gestion des risques : une revue de littérature* : Ce chapitre présente les concepts de base liés au domaine de la gestion des risques. De plus, il propose des définitions aux termes spécifiques de ce domaine afin de pallier l'ambigüité d'utilisation des termes équivoques. Ce chapitre décrit aussi les différents standards de gestion des risques et détaille les étapes conventionnelles d'un processus de gestion des risques. Dans un deuxième temps, il présente les différentes méthodes de gestion des risques et leurs classifications. De plus, il illustre une revue de littérature des travaux qui ont abordé la gestion des risques et particulièrement dans le transport des conteneurs et au niveau des plateformes portuaires.
- *Chapitre 3. Concepts de base et outils de modélisation* : Ce chapitre présente les concepts de la traçabilité et le produit intelligent et expose une revue de littérature liée aux travaux dans ce domaine. La deuxième partie de ce chapitre détaille les outils de modélisation utilisés dans la mise en œuvre des solutions proposées.

6.2. Deuxième partie : Contributions

Cette partie présente l'ensemble des contributions que nous avons apportées pour l'amélioration de la sécurité et de la sûreté des conteneurs. Elle est organisée en trois chapitres :

Chapitre 1. Urbanisation du système de traçabilité GOST : Ce chapitre introduit les travaux menés pour la sécurisation du transport des conteneurs en amont d'un TC. Nous présentons les étapes que nous avons suivies pour l'amélioration de la traçabilité des conteneurs et l'exploitation du système de traçabilité comme outil de gestion des risques. Ainsi, la première étape de ce travail aborde l'exploitation du concept du produit intelligent

pour la proposition d'un modèle enrichi du conteneur intelligent. La deuxième étape, se focalise sur l'urbanisation du système de traçabilité GOST pour la proposition d'une nouvelle architecture de ce système qui pallie aux problèmes liés à la centralisation et la confidentialité des informations de la traçabilité. La dernière étape se base sur l'exploitation des architectures dirigées par les modèles pour remédier au problème d'adaptation des systèmes informatiques utilisés par les acteurs de la chaîne logistique pour s'interfacer à GOST.

Chapitre 2. Conception du Système de Gestion d'un Terminal à Conteneurs (SGTC). Ce chapitre se focalise sur la conception d'un système adéquat pour la gestion des risques pour le cas des TC. Pour cela, nous présentons la démarche de conception du SGTC basée sur l'agentification et la classification du système selon leurs rôles. De surcroît, nous abordons la modélisation du SGTC en se basant sur le Langage de Modélisation Agent (AML). Ceci permet de modéliser l'organisation, le comportement et les interactions des agents du système proposé.

Chapitre 3. Analyse des risques et mise en œuvre. Dans ce chapitre, nous procédons par une analyse des risques relatifs au fonctionnement d'un TC. Ensuite, nous proposons un processus de gestion des risques pour remédier aux risques de fausses déclarations de conteneurs et la transgression des règles de ségrégation des conteneurs de marchandises dangereuses dans la zone de stockage d'un TC. En outre, nous présentons une brève description de la partie technique de la mise en œuvre du SGTC et des processus de gestion des risques que nous avons avancés. Dans la dernière partie, nous présentons la simulation du fonctionnement d'un TC et nous mettons le point sur l'évaluation de l'impact de la gestion des risques sur sa performance.

Première partie: État de l’art

Chapitre I

Terminal à conteneurs

SOMMAIRE

1. Introduction

L'évolution des activités commerciales dans le monde a généré un engouement pour le transport maritime. Ce mode de transport a été révolutionné par l'introduction des conteneurs comme unité de chargement de marchandises. Ceci a suscité l'expansion des ports par la construction des terminaux à conteneurs (TC) et le développement de nouveaux métiers spécialisés pour satisfaire les besoins de la clientèle.

Les TCs sont caractérisés par la multitude et la distribution des acteurs qui assurent la manutention des conteneurs. Ainsi, une présentation organisationnelle et fonctionnelle d'un TC est fondamentale pour cerner le contexte de la problématique traitée. Ceci nous permet, d'une part, de déterminer la structure d'un TC en termes de composants et leurs interactions, et d'autre part, de cerner les différentes mesures appliquées pour sa gestion.

Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur la présentation de la structure d'un TC, son fonctionnement et le rôle des engins de manutention à savoir l'évolution du transport maritime, l'organisation du port du Havre, la structure du Terminal à conteneurs De France (TDF) et les mesures appliquées pour le stockage des conteneurs de matières dangereuses dans le TDF.

2. Transport maritime de conteneurs

La délocalisation des unités de production loin des marchés de consommation a favorisé le développement du transport maritime de marchandises. Ce mode de transport est fondamental pour le commerce international, car il permet le transport de grande quantité de marchandises à un coût raisonnable. Selon Smith [Smith, 1776], le faible coût du transport maritime favorise l'ouverture de nouveaux marchés. De surcroît, il représente un levier pour le développement de l'industrie sur les façades maritimes.

Ce mode de transport se base sur trois éléments principaux. Le premier est l'infrastructure des ports et des TC. Le deuxième regroupe les navires et les barges qui relient les ports maritimes. Le troisième se compose des systèmes qui assurent l'exploitation efficace du matériel et des infrastructures. Lun et *al.* [Lun et *al.*, 2010] ont présenté une liste d'acteurs qui participent au processus de transport des conteneurs, tels que l'armateur, l'affréteur, le courtier maritime et l'opérateur du TC. La figure 1 illustre l'organisation de ce mode de transport.

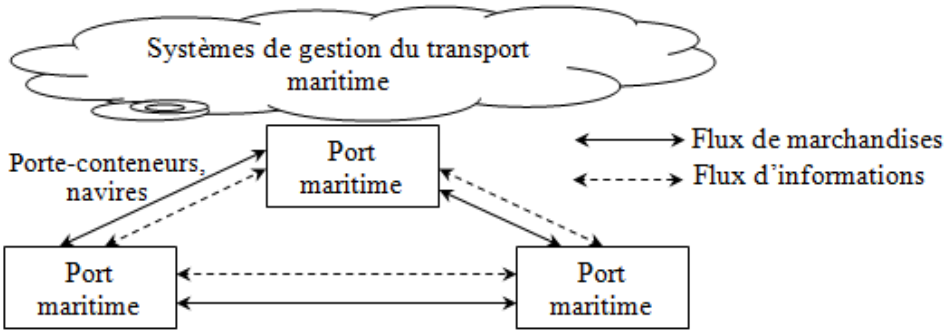

Figure I.1. Organisation du transport maritime

Depuis son introduction en 1960, le conteneur a été considéré comme l'unité standard de chargement de marchandises. La conteneurisation a favorisé le transport multimodal par l'amélioration des conditions de transport et la facilitation des opérations de manutention. Ce type de transport consiste en la combinaison de plusieurs modes de transport pour l'acheminement des marchandises. Ceci a généré un engouement pour la conteneurisation de marchandises transportées par voie maritime avec un taux global de 60% de marchandises échangées dans le monde. Ce taux atteint les 100% entre les pays industrialisés.

Le nombre de conteneurs échangés dans le monde a connu une grande évolution en passant de 50 millions EVP (Equivalent Vingt Pieds) en 1985 à 350 millions EVP en 2004 [Kim et Gunther, 2007]. De plus, le taux d'évolution annuel du nombre de conteneurs est estimé à 10% pour une durée qui s'étale jusqu'à 2020. Cette estimation de l'évolution continue du trafic de conteneurs a été impactée négativement par la crise économique en 2008. En revanche, des études récentes montrent qu'au début de 2010, le trafic de conteneurs a progressivement évolué, particulièrement au niveau des ports européens [Nedyalkov et Andreeva, 2011]. La figure suivante illustre l'évolution du nombre de conteneurs entre 2000 et 2011 [Worldbank, 2012]:

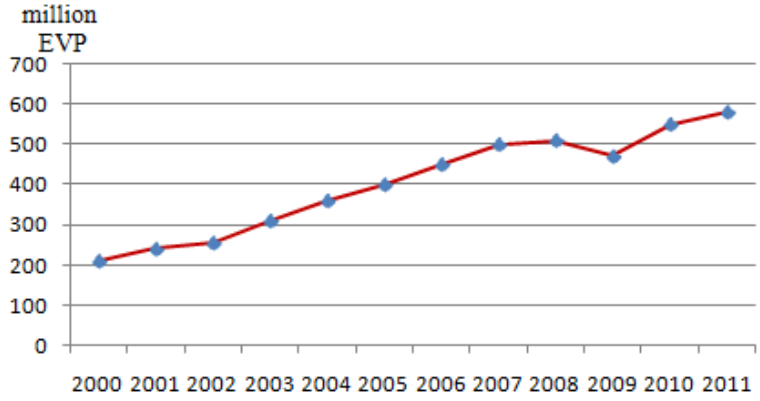

Figure I.2. Évolution du nombre de conteneurs échangés par voie maritime entre 2000-2011

Pour assurer le transport de ce grand nombre de conteneurs, une nouvelle génération de porte-conteneurs d'une capacité qui varie de 8000 à 10000 EVP a été construite. Par ailleurs, en 2013 le groupe Maersk a mis en exploitation un nouveau porte-conteneurs doté d'une capacité de chargement de 18000 EVP. Le tableau 1 illustre l'évolution de la capacité de chargement des porte-conteneurs de Maersk [Maersk, 2014]:

Porte-conteneurs	Année	Capacité (EVP)	Longueur (m)
Triple E	2013	18000	400
Emma	2006	15500	397
Gudrun	2005	9074	367
Laura	2001	4258	266
Alabama	1998	1068	155

Tableau I.1. Évolution de la capacité de chargement des porte-conteneurs de Maersk

L'engouement pour ce mode de transport et le gigantisme des nouveaux porte-conteneurs a encouragé la construction de nouveaux ports capables de servir cette nouvelle gamme de navires. Nous citons l'exemple du port « Wilhelmshafen » en Allemagne où l'investissement pour la construction de nouveaux TC en eau profonde a atteint le milliard d'euros [Dubreuil, 2007].

3. Le terminal à conteneurs

Le TC se présente comme un système complexe caractérisé par la grande dynamique de ses opérations et la multitude des interactions entre ses composants [Kim et Gunther, 2007]. C'est une zone pour le groupage des conteneurs afin de les expédier par voie maritime et également, pour le dégroupage des conteneurs déchargés à partir des navires pour les réacheminer vers d'autres destinations par voies ferrée, routière ou fluviale. La figure 3 présente l'organisation conventionnelle d'un TC :

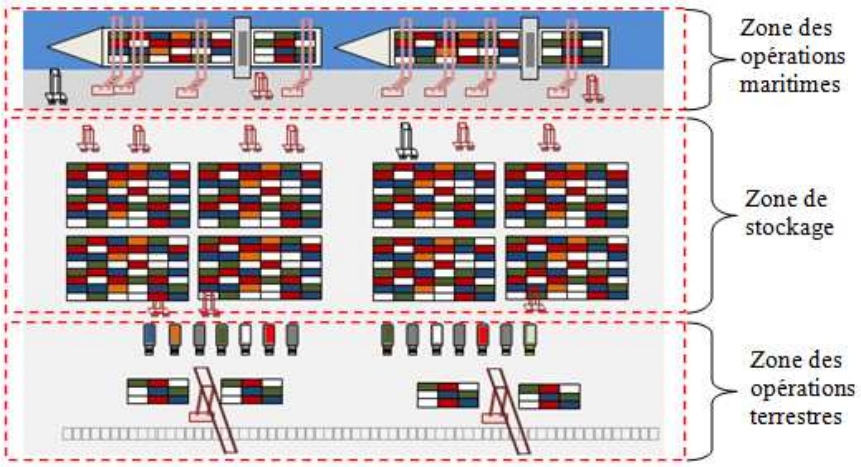

Figure I.3. Organisation d'un TC

Le TC est structuré en trois zones principales : la zone des opérations maritimes, la zone de stockage et la zone des opérations terrestres.

3.1. Zone des opérations maritimes

Cette zone constitue l'interface où se déroulent les opérations de chargement/déchargement des porte-conteneurs. Elle est d'une grande importance pour l'opérateur portuaire, car elle concentre de grands investissements aussi bien pour l'infrastructure ainsi que pour le matériel de manutention des conteneurs. Par ailleurs, l'efficience de fonctionnement de cette zone est vitale pour la compétitivité du port, car elle détermine la durée du service d'un navire qui représente un critère principal pour le choix d'un port d'escale.

Au niveau de cette zone, trois problématiques de gestion se posent. La première est la planification de l'allocation des quais et l'ordonnancement de l'amarrage des navires. Le but de ces opérations est de minimiser le temps d'attente des porte-conteneurs. La deuxième problématique est la planification des opérations de chargement/déchargement. Ce processus décisionnel tache à optimiser le fonctionnement des grues de quai afin d'éliminer les mouvements improductifs et éviter les situations de blocage. La troisième problématique est axée sur le transfert des conteneurs entre le quai et la zone de stockage. Elle vise la coordination des opérations de chargement/déchargement et les opérations de transfert vers la zone de stockage afin de réduire les délais générés par l'indisponibilité des conteneurs au moment de chargement.

3.2. Zone de stockage

C'est une zone tampon pour le découplage des opérations de manutention réalisées au niveau des zones maritimes et terrestres. Elle permet l'entreposage des conteneurs qui transitent par le TC en attendant l'arrivée d'un moyen de transport pour leur expédition. Steenken et *al.* [Steenken et *al.*, 2004] ont proposé une structuration de cette zone en plusieurs sous-zones dédiées pour les conteneurs à importer, les conteneurs à exporter et les conteneurs frigorifiques.

Les principales problématiques abordées au niveau de cette zone sont axées sur l'allocation des emplacements pour le stockage des conteneurs [Matthew et Petering, 2009]. Cette allocation des zones de stockage des conteneurs vise à minimiser les opérations de

manutention improductives générées par un mauvais empilement des conteneurs. Elles visent également le positionnement des conteneurs près de la zone de leurs expéditions. De plus, ces problématiques traitent l'optimisation du fonctionnement du matériel utilisé pour le transport, le tri et le groupage des conteneurs.

3.3. Zone des opérations terrestres

Cette zone est l'interface où se déroulent les opérations de chargement/déchargement des trains et des camions. Elle regroupe toutes les activités qui relient le TC à son arrière-pays (Hinterland). La zone de terrestre peut être subdivisée en une partie ferroviaire qui contient des faisceaux ferroviaires pour la réception des trains, et une partie dédiée pour le roulier. Cette dernière se compose d'une guérite pour le contrôle des camions et d'un parking pour leur stationnement.

Les problématiques traitées au niveau de cette zone portent sur la fluidité de réception des camions afin d'éliminer la congestion au niveau de la guérite terrestre du terminal grâce au développement de nouveaux systèmes d'auto-identification des camions et des conteneurs et à la planification de l'arrivée des camions en tenant compte de la disponibilité des conteneurs [Jurgen, 2011]. De plus, cette zone gère aussi les problèmes liés à l'arrivée des trains et la planification de leur chargement et déchargement.

4. Port du Havre

Le port du Havre est le premier port pour le commerce extérieur, le trafic de conteneurs, le roulier et l'approvisionnement énergétique en France. Il est également le plus grand port maritime de l'ouest de l'Europe. Ce port est en eau profonde et dispose de bassins à niveau constant. Ces conditions nautiques lui permettent de s'affranchir des restrictions de la marrée et de tirant d'eau. En conséquence, il reçoit quotidiennement des porte-conteneurs d'une capacité de chargement moyenne de 10000 EVP.

Ce port représente un « Hub » connecté aux principaux ports du monde par des lignes régulières assurées par des porte-conteneurs transocéaniques. À cet effet, il traite un flux massifié de conteneurs et assure son acheminement vers d'autres destinations. Il est également un port de « Feedering » qui distribue les marchandises vers d'autres ports régionaux tel que celui de Dunkerque. Sa localisation sur la Seine-Maritime privilégie l'acheminement des conteneurs par voie fluviale vers les ports fluviaux de Rouen et de Paris. Son arrière-pays

dispose aussi d'importants réseaux routiers et ferroviaires, ce qui lui permet d'être en liaison avec plusieurs plateformes logistiques distantes.

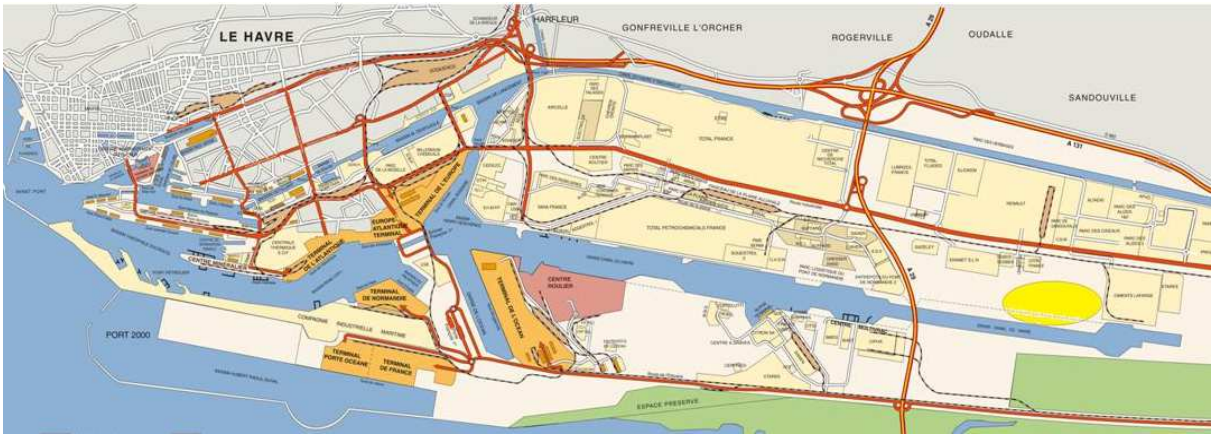

Figure I.4. La disposition globale du port du Havre

Le port du Havre est situé sur un emplacement privilégié par lequel transite un quart des échanges maritimes à l'échelle mondiale. Ce contexte lui garantit une offre de marché stable. Ainsi, en dépit de la crise mondiale, le trafic de conteneurs au niveau de ce port a connu une évolution de +4% en 2012 avec 2,5 million EVP ainsi qu'une augmentation des transbordements de conteneurs de 20%. Ces résultats ont été réalisés grâce au renforcement des services proposés pour desservir les ports d'Asie, des États-Unis et d'Amérique du Sud. En revanche, sa localisation sur la Manche génère une importante concurrence avec les autres ports situés sur la même façade maritime, notamment celui d'Anvers. Ce dernier est le plus sollicité par les entreprises françaises pour l'import des conteneurs. Ce qui engendre une concurrence directe avec le port du Havre. La figure 5 présente une comparaison en termes de trafic de conteneurs entre les principaux ports de cette zone en 2011 [Hafen-Hamburg, 2014].

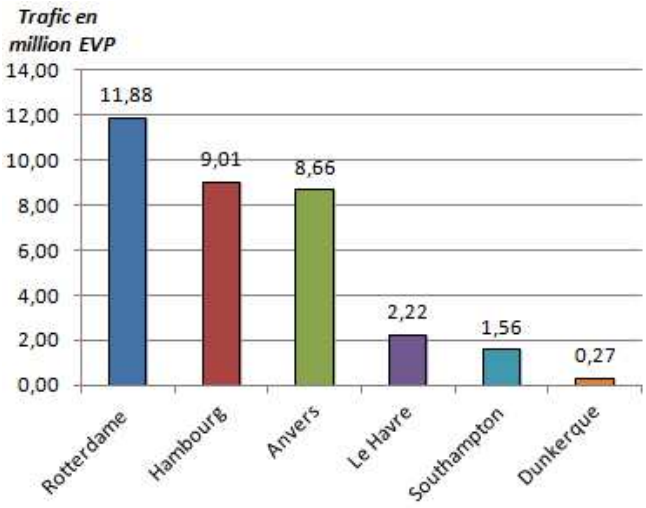

Figure I.5. Trafic de conteneurs dans les ports du nord d'Europe

Malgré toutes ses qualités, la part du trafic des conteneurs du port du Havre reste modeste par rapport au port de Rotterdam et celui d'Anvers. En conséquence, il accorde un grand intérêt quant à l'amélioration de ses services afin de préserver sa place parmi les «Hubs» internationaux. À cet effet, l'amélioration du temps de service des porte-conteneurs et les investissements dans les travaux d'expansions de son infrastructure ont favorisé sa nomination du meilleur port en Europe en 2012 et 2013 [GPMH, 2012].

Le port du Havre dispose de plusieurs terminaux maritimes dédiés pour le transport des conteneurs, le transport des voitures et le transport des produits en vrac. Il se compose de six terminaux à conteneurs : terminal de France, terminal porte océane, terminal TNMSC (Terminaux de Normandie/ Mediterranean Shipping Company), terminal du Nord, terminal de l'atlantique et terminal de Normandie. Pour le reste de cette étude, nous nous intéresserons au cas du Terminal De France (TDF).

5. Terminal de France : organisation et fonctionnement

Le terminal de France (TDF) a été inauguré en 2006 et est exploité par la Générale Manutention Portuaire (GMP). Le choix de ce TC comme cas d'étude est justifié, d'une part par l'importance du flux de conteneurs qui y transite et qui s'élève à 500000 conteneurs/an, et d'autre part, il dispose des ressources nécessaires pour la manutention et le stockage des conteneurs de matières dangereuses. Ces derniers représentent 10% du nombre total des conteneurs qui transitent par cette plateforme. En conséquence, le fonctionnement du TDF est régi par une réglementation qui tient compte des risques liés à la manutention des conteneurs de matières dangereuses. La figure 6 illustre une vue globale de TC.

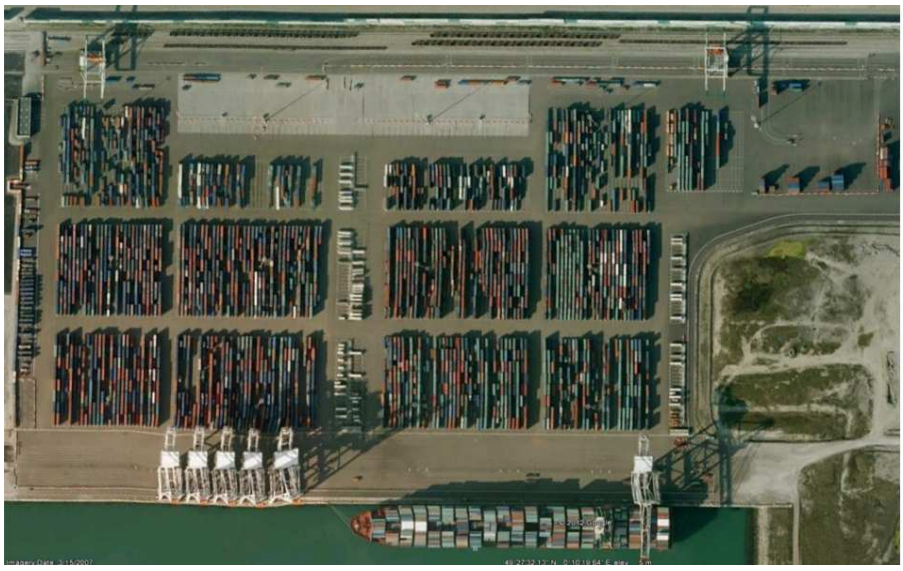

Figure I.6. Vue globale du Terminal De France (Google Earth)

Le tableau 2 présente une fiche descriptive de ce terminal :

Caractéristique	Description
Capacité de stockage	1.500.000 EVP
Aire de stockage	76 hectares
Capacité de stockage des conteneurs vides	2400 EVP
Longueur du quai	850m pour les porte-conteneurs et 200m pour les barges
Tirant d'eau	15.5m
Voie ferrée	4150m
Portiques maritimes	10
Chariots cavaliers	55 (max quatre niveaux)
Portique ferroviaire	3

Tableau I.2. Fiche descriptive du TDF

5.1. Fonctionnement de la zone des opérations terrestres

À la réception d'un camion chargé de conteneurs et après l'attribution d'un emplacement pour son stationnement au niveau du parking interne, un chariot cavalier est alloué pour le déchargement et le transfert du conteneur vers la zone de stockage. Le chariot cavalier est un engin de manutention qui permet le transport et l'empilement des conteneurs dans le TC. Le TDF dispose de 55 chariots cavaliers à quatre niveaux, capables d'empiler quatre conteneurs, 83,3% de ces chariots cavaliers sont réservés pour servir les camions [GMP, 2014]. La figure 7 présente une photo d'un chariot cavalier du TDF [GMP, 2014] :

Figure I.7. Chariot cavalier

Le TDF dispose de trois portiques ferroviaires RMG « Rail Mounted Gantry », utilisés pour charger et décharger les trains. Dans un processus d'export des conteneurs par trains, le chariot cavalier commence par le transport des conteneurs vers les zones de stockages tampons proche des rails, ensuite à l'arrivée d'un train, les portiques ferroviaires chargent les

conteneurs sur le train. Ces portiques effectuent des mouvements transversaux et peuvent charger plusieurs conteneurs en même temps. La figure 8 présente une photo d'un portique ferroviaire du TDF [GMP, 2014].

Figure I.8. Portique ferroviaire

5.2. Fonctionnement de la zone de stockage

Cette zone est structurée en plusieurs sous-zones dédiées pour des types spécifiques de conteneurs : de matières dangereuses, de conteneurs frigorifiques et de conteneurs vides. Ces zones sont structurées en plusieurs travées qui se composent de plusieurs piles dont la hauteur maximale dépend du type de la zone de stockage. Ainsi, dans les zones de stockage des conteneurs ordinaires, la hauteur maximale d'une pile est de quatre niveaux. Dans la zone des conteneurs frigorifiques, la hauteur des piles est limitée à deux et dans la zone des conteneurs vides la hauteur des piles de conteneurs pourrait atteindre six niveaux. Au niveau de la zone de stockage des conteneurs de matières dangereuses, l'empilement est interdit, car il entrave l'évacuation des conteneurs en cas d'occurrence d'un incident.

Les opérations de manutention des conteneurs sont principalement réalisées par les chariots cavaliers. Ils exécutent des opérations de remaniement au niveau de cette zone ainsi que le transfert vers les zones des opérations terrestres et maritimes. En revanche, ces derniers ne peuvent pas manutentionner des piles qui dépassent quatre niveaux. Ainsi, la manutention des conteneurs vides est assurée par les « Reach stacker» (figure 9).

Figure I.9. Reach stacker

5.3. Fonctionnement de la zone des opérations maritimes

Les opérations de chargement et de déchargement des conteneurs sont réalisées par les grues de quai, appelées aussi les portiques maritimes ou portiques « Overpanamax ». Le TDF dispose de dix grues de quai caractérisées par une grande portée de conteneur. Ceci permet de charger des navires de 23 conteneurs de largeurs. En moyenne, la productivité de ces grues est de 24 conteneurs/heure. La figure 10 présente les grues de quai utilisées au niveau du TDF.

Figure I.10. Grues de quai

6. Matières dangereuses

Les matières dangereuses sont toutes les substances qui présentent un risque pour la sécurité des personnes et des biens. L'aspect dangereux de ces produits est dû à plusieurs faits, notamment la nature de leur composition ou les propriétés de stockage, transport, chargement, déchargement et emballage [Rechkoska, et al., 2012]. La spécificité de ces produits impose le respect d'une réglementation rigoureuse qui tient à mitiger le risque d’occurrence des incidents engendrés par leur manutention.

L'évolution des quantités de matières dangereuses échangées dans le monde a favorisé la normalisation des réglementations qui régissent le transport et le stockage de ces matières. Les clauses de ces réglementations dépendent principalement du mode de transport. En adéquation avec ceci, la France adopte plusieurs réglementations suivant le mode de transport des matières dangereuses [Formedit, 2012]. En ce qui concerne le transport maritime, la France applique la réglementation IMDG (International Maritime Dangerous Goods) proposée par l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

6.1. Classification de matières dangereuses

L’Organisation des Nations Unies (ONU) a proposé une classification de matières dangereuses selon l’acuité de leur impact. Neuf classes principales sont définies dont

certaines comportent des classes subsidiaires. Cette classification comporte quatre éléments principaux : l'appellation réglementaire du produit, la classe du produit, le numéro de l'ONU et le groupe d'emballage [GPMH, 2012+].

Le tableau 4 présente les classes principales et subsidiaires de matières dangereuses :

Label	Classe	Division
	1 : Explosifs	1.1 : risque d'explosion en masse 1.2 : risque de projection 1.3 : risque d'incendie 1.4 : sans risque notable à l'extérieur 1.5 : matière très peu sensible avec risque d'explosion en masse 1.6 : matière extrêmement peu sensible sans explosion en masse
	2 : Gaz	2.1 : Gaz inflammable 2.2 : Gaz ininflammable non toxique 2.3 : Gaz toxique
	3 : Liquides inflammables	Sans divisions
	4 : Solides inflammables	4.1 : Solides inflammables 4.2 : Matière sujette à l'inflammation spontanée 4.3 : Matière hydroréactive
	5 : Matières comburantes	5.1 : Matières comburantes 5.2 : Peroxydes organiques
	6 : Matières toxiques infectieuses	6.1 : Matières toxiques 6.2 : Matières infectieuses
	7 : Matières radioactives	Sans divisions
	8 : Matières corrosives	Sans divisions
	9 : Produits, matières ou organismes divers	Sans divisions

Tableau I.3. Classification des matières dangereuses

Le but de cette classification est de standardiser la réglementation pour le transport et le stockage des matières dangereuses par rapport à leurs classes. De plus, elle spécifie des

étiquettes à afficher sur les paquets, les conteneurs et les moyens de transport. Ces étiquettes facilitent la reconnaissance des classes de marchandises dangereuses et donnent des informations de base concernant les risques qu'ils peuvent engendrer. Cette classification détermine aussi les compatibilités entre les produits et les règles de ségrégation à respecter lors de l'entreposage des produits chimiques de classes différentes.

6.2. Ségrégation des matières dangereuses

Les matières dangereuses nécessitent des conditions de stockage adéquates pour garantir leurs sécurités et maîtriser leurs risques. La réglementation proposée par l'ONU tient compte des propriétés physiques des marchandises afin de pallier aux risques des interactions possibles entre elles durant l'entreposage. À cet égard, avant de stocker un produit, le responsable a l'obligation de vérifier la compatibilité entre les classes des matières à stocker.

Le stockage des produits doit respecter les règles de ségrégation entre les classes de matières dangereuses. Ces règles sont définies par une matrice qui croise les neuf classes que nous avons présentées précédemment pour déterminer la compatibilité entre produits. Le but de la ségrégation est de déterminer les distances de sécurité afin d'éviter les interactions entre les produits et d'obvier l'effet domino de l'occurrence d'un incident sur les autres matières dangereuses stockées dans la même zone. Le tableau 5 illustre les distances de séparation entre les conteneurs de matières dangereuses appliquées au niveau du port du Havre. Cette matrice prend en considération l'absence ou l'existence d'un séparateur matériel entre les conteneurs [GPMH, 2012+] :

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 îlot. Les îlots doivent être séparés par deux conteneurs en hauteur et en largeur.		
B*	la distance entre les îlots de la classe 5.6 est de 36,6m		

Tableau I.4. Distances de ségrégation entre les conteneurs de matières dangereuses

Le tableau 6 présente la matrice de compatibilité entre les matières dangereuses et les distances de séparation à respecter durant le stockage [GPMH, 2012].

Classes		1.1 1.2 1.3 1.5 1.6	1.4	2.1 Dry (1)	2.1 Citerne	2.2 (3)	2.3 Dry (1) (2)	3 Dry (1)	3 Citerne	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6.1	6.2	7	8	9
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
1.4		X	X	B	C	B	B	B	C	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	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
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

Tableau I.5. La matrice de compatibilité entre les classes de matières dangereuses

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'importance du transport maritime pour le commerce international. Dans ce contexte, les ports maritimes représentent la pierre angulaire d'une chaîne logistique globale. De plus, nous nous sommes focalisés sur le cas du port du Havre et en particulier le terminal à conteneur TDF qui est notre cas d'étude. En conséquence, nous avons détaillé la structure et le fonctionnement de ce TC ainsi que les différents engins

de manutention utilisés pour l'acheminement des conteneurs entre ses deux interfaces. En dernier lieu, nous avons abordé le cas des matières dangereuses et nous avons détaillé la spécificité du traitement de ces matières, particulièrement durant l'entreposage.

En conclusion, les TC sont des systèmes complexes caractérisés par une forte distribution des tâches. Ceci nécessite une coordination efficiente entre les composants du TC afin de garantir la fluidité d'acheminement des conteneurs. Cependant, le TC est vulnérable à une myriade de risques qui peuvent survenir à tout instant. En conséquence, cette distribution et ces interactions compliquent la tâche de la gestion des risques au niveau des TC, car il est difficile d'appréhender ce problème tout en tenant compte des différentes contraintes en termes de réglementations, de coordinations des opérations de manutention et de contraintes de temps.

Chapitre II

Gestion des risques : une revue de littérature

Sommaire

1. Introduction

Pour cerner les problèmes qui menacent le fonctionnement d'un TC et faciliter sa sécurisation, il est judicieux de spécifier des approches pour la gestion des risques d'une manière appropriée tout en prévoyant les différentes étapes à réaliser pour la réussite de cette mission. À présent, la recherche dans ce domaine est très animée et a généré un ensemble de concepts et de standards dédiés à la gestion des risques dans différents secteurs.

Dans ce chapitre, nous abordons de domaine de la gestion des risques à savoir la terminologie et les standards spécifiques à ce domaine, le processus de gestion des risques et ses étapes de base ainsi qu'une revue de littérature concernant la gestion des risques au niveau des ports.

2. Terminologie du risque

Le domaine de la gestion des risques intègre un ensemble de concepts issus de plusieurs disciplines. Ceci crée une nuance lors de l'interprétation de ces concepts dans différents contextes. Il est donc important de définir ce qu'est un risque et expliquer ensuite quelques notions lui sont liées, tels que le danger, l'aléa, l'enjeu, la prévention, la sûreté et la sécurité.

2.1. Le risque

Le risque est la mesure de l'instabilité d'une situation dangereuse ou menaçante et de la potentialité d'un incident [Desroches et al., 2007]. Selon Charrette [Charrette, 1990], le risque est un problème issu d'un processus décisionnel dû à la variation de la distribution des résultats possibles et leurs probabilités. Alhawari *et al.* [Alhawari et al., 2012] associent le risque aux incertitudes susceptibles d'obvier l'atteinte des objectifs d'un projet. Contrairement à ces définitions basées sur l'aspect négatif du risque, Hillson [Hillson, 2002] précise que ce concept couvre l'opportunité et la menace.

Nous proposons la définition suivante : le risque est une propriété intrinsèque à tout système ou situation qui, dans certaines conditions, est susceptible de générer des dommages.

2.2. Le danger

C’est une source potentielle de dommage [ISO73, 2009]. Il représente une source de préjudice ou d'effet nocif à l'égard d'une chose ou d'une personne dans certaines conditions [CCHST, 2014]. Il peut aussi être assimilé à une propriété intrinsèque d'une substance ou d'une situation physique susceptible d’affecter les humains et l'environnement [INERIS, 2014]. Pour distinguer le danger du risque, nous précisons que le premier est caractérisé par sa faible probabilité d’occurrence et l’importance de ses conséquences, contrairement au second qui est caractérisé par une probabilité d’occurrence élevée et de faibles conséquences.

Nous proposons la définition suivante : le danger est une propriété qui caractérise tout événement ou situation indésirable qui se distingue par sa faible probabilité d'occurrence et par l’importance des dégâts qu’elle peut engendrer.

2.3. L’aléa

Selon la norme ISO 73 [ISO73, 2009], l'aléa représente une source potentielle de danger et de risque. Il peut être assimilé à tout phénomène dangereux, substance, activité ou condition pouvant causer un dommage moral ou matériel [Emploi et santé, 2014]. Selon auteur [ISSMGE, 2004], l’aléa représente la probabilité d'occurrence d'un danger dans une période donnée. Uved [Uved, 2014] a enrichi cette définition par la spécification de deux probabilités. La première est celle d'une occurrence temporelle pour l'estimation de la période de retour d'un événement. La deuxième est la probabilité d'une occurrence spatiale qui se base sur l'analyse de l'environnement pour prévoir les lieux potentiels de survenance d’un événement indésirable.

Dans ce travail, nous adoptons la définition suivante : un aléa est une probabilité spatiotemporelle d'une occurrence d'un danger.

2.4. L’enjeu

L'enjeu concerne les ressources, les personnes, les biens, les systèmes, ou autres éléments présents dans les zones à risque et qui sont soumis à des préjudices potentiels [Emploi et santé, 2014]. Partant de cette définition, la spécification de l'enjeu est axée sur le recensement des entités vulnérables à la survenance d'un risque. Elle est étroitement liée à la spécification de l’exposition et de la vulnérabilité. L'exposition représente le degré du risque auquel les entités étudiées sont soumises et la vulnérabilité détermine la sensibilité à un risque particulier [ISO73, 2009]. Nous considérons qu'un enjeu est assimilé à l'identification des

éléments susceptibles de subir des dommages potentiels qui découlent de l'occurrence d'un risque. La mesure de l'enjeu doit tenir compte du degré d'exposition et de la vulnérabilité à un risque particulier.

2.5. La prévention

La prévention représente un concept de sécurité primaire parmi les techniques du danger [Froquet, 2005]. Au niveau de la gestion des risques, la prévention consiste en un processus destiné à éviter un événement indésirable par l'élimination de ses causes et le traitement de ses conséquences [ISO73, 2009]. Toutefois, Desroche *et al*. [Desroches al., 2007] précisent que la prévention se limite au traitement de la probabilité d'occurrence du risque et de l'atténuation de son impact.

Par la suite, nous considérons que la prévention consiste à spécifier des mesures à mettre en œuvre pour minimiser la probabilité d'occurrence du risque. Ceci est réalisé par l'intégration de nouvelles contraintes pour maintenir les facteurs du risque à un niveau tolérable et la spécification d'un processus pour leur pilotage.

2.6. La sûreté

La sûreté est l'assurance fournie par un système, c'est-à-dire, sa capacité à refuser toutes entrées incorrectes ou tout accès non autorisé et en être éventuellement averti [Mazouni, 2008]. Selon Line et al. [Line et al., 2006], la sûreté est la résistance d'un système et l'incapacité de son environnement à l'affecter. Ces définitions montrent que la sûreté se focalise sur le traitement des risques extrinsèques issus de l'environnement d'un système. D'une autre part, la sûreté s'intéresse particulièrement aux risques résultants des actions volontaires. En ce sens, Cambacédès et Chaudet [Cambacédès et Chaudet, 2010] précisent que la sûreté est dédiée aux risques générés par des actions malicieuses. Ainsi, nous considérons que la sûreté consiste à spécifier des mesures pour prévenir les risques résultants des actions intentionnelles exécutées par des acteurs externes au système dont le but est de contourner ses mesures de contrôles.

2.7. La sécurité

Selon le ministère de transport au canada [TC, 2014], la sécurité représente l'état où les risques sont gérés à différents niveaux de manière acceptable. Elle correspond à l'absence du danger ou des conditions susceptibles de le déclencher [Mazouni, 2008]. Desroche et al.

[Desroche et al., 2007] ont déterminé deux types de sécurité : une sécurité intrinsèque qui tache de tenir compte des risques durant la conception d'un système. Une deuxième qui est greffée et définit de nouveaux éléments à intégrer au système pour gérer les risques. Contrairement à la sûreté, la sécurité porte sur la prévention des risques générés par des événements aléatoires. Elle représente le degré de prévention et d'atténuation des dommages causés par des actions non intentionnelles [Firesmith, 2003] [Raspotnig et Opdahl, 2013]. De notre part, nousconsidérons que la sécurité porte sur la prévention des événements accidentels issus du fonctionnement interne d'un système caractérisé par un danger potentiel qui peut affecter son environnement.

3. La Gestion des risques

La survenance répétitive des événements indésirables a fait émerger une culture de gestion des risques. Cette dernière est le résultat de la capitalisation des connaissances liées aux risques potentiels et aux bonnes pratiques à adopter pour les éviter.

3.1. Définitions

En se référant aux définitions existantes, nous constatons que la gestion des risques est appréhendée d'une façon homogène. Le tableau suivant présente des définitions de la gestion des risques issues de différents domaines :

Références	Définitions : Gestion des risques
[Flanagan et norman 1993]	Consiste en un système dédié à l'identification et la quantification des risques émanant des processus ou projets pour une prise de décision appropriée pour traiter le risque.
[PMI, 2014]	Concerne les processus de planification de la gestion des risques : identification, analyse, réaction, pilotage et contrôle.
[SSA, 2004]	Représente la culture, les processus et les structures dédiés pour la concrétisation des opportunités potentielles tout en gérant les effets indésirables
[Faissal, 2009]	Plan d'action pour identifier les risques potentiels et les solutions associées.
[ISO31000, 2009]	Définit une architecture pour gérer les risques d'une manière efficace
[Mojtahedi et al. , 2010]	Une approche systématique pour l'identification, l'analyse et le traitement des risques
[Safyalioglu et kartal, 2012]	Définit un processus de mitigation des risques basé sur la collaboration, la coordination et l'application d'outils pour gérer les risques par les partenaires

Tableau I.6. Définitions de la gestion des risques

Partant de ces définitions, la gestion des risques représente l'ensemble des actions appliquées par une organisation pour analyser, évaluer, anticiper et traiter les risques.

3.2. Standards pour la gestion des risques

Grâce aux nouvelles réglementations qui imposent l'intégration de la gestion des risques dans des domaines tels que l'industrie pétrochimique, plusieurs standards ont été proposés pour satisfaire ce besoin. Parmi les quels, nous pouvons citer :

3.2.1. IEEE 1540:2001

Ce standard a été proposé par « Institut of Electrical and Electronic Engineers ». Son objectif principal est de pallier les risques qui menacent les projets logiciels. Il fait abstraction de la partie technique pour gérer les risques mais spécifie les exigences appropriées pour les différents intervenants du cycle de vie d'un logiciel [IEEE1540, 2001]. Il propose un processus structuré pour la gestion des risques.

3.2.2. CEI/IEC62198 :2001

Ce standard a été proposé par l'IEC « International Electrotechnical Commission » en 2001 [CEI62198, 2001]. Il spécifie un processus pour gérer les risques d'une façon cohérente en adéquation avec les besoins technologiques. En plus, il donne une vue globale de la gestion des risques par la prise en considération de l'aspect organisationnel et le contexte de l'étude.

3.2.3. AS/NZS 4360 :2004

Représente un guide générique pour mener une étude de gestion des risques indépendamment du domaine d'application. Il a été proposé pour combler le manque d'assistance pratique dans ce domaine pour les organisations [CEI62198, 2001]. Son objectif est d'identifier les opportunités, les menaces et créer de la valeur ajoutée dans un contexte incertain [AS/NZS4360, 2004]. Par ailleurs, il prône le pilotage des actions menées pour la gestion des risques afin de s'assurer de leur efficacité. En plus, il recommande une exécution itérative des étapes afin de tenir compte des changements de l'environnement [Broadleaf, 2007].

3.2.4. ISO 31000:2009

Ce standard a été défini par « Standards Australia » et « Standards New Zealand Committee » pour remplacer l'ancienne norme AS/NZS4360. Selon Caron et al. [Caron et al., 2013], l'ISO31000 représente la base des nouveaux modèles de gestion des risques. Il préconise l'intégration de la gestion des risques dans les différents niveaux hiérarchiques d'une organisation. De plus, il met l'accent sur l'aspect négatif du concept risque et l'associe particulièrement à l'incertitude qui caractérise les activités d'une organisation. Ce modèle est structuré en trois parties principales:

- les principes : pour réussir l'intégration du processus de gestion des risques dans une entreprise ;
- l'organisation : pour définir les étapes nécessaires pour consolider un composant de gestion des risques ;
- le processus : pour déterminer la manière d'implémenter la solution de gestion des risques définie par l'organisation.

4. Processus de gestion de risque

Bien avant l'émergence des standards ISO31000 et AS/NZS 4360, la gestion des risques a subi plusieurs évolutions. L'approche de gestion des risques typiques de [rèf34] se compose de trois éléments : l'identification, l'estimation et le contrôle qui représentent les trois principes de la gestion des risques. Ils sont la base des premiers processus proposés par Hertz & Thomas en 1983, Cooper & Chapman en 1987 et Hayes et al. en 1987 dans [Tummala et Burchett, 1999]. En dépit des bases fondamentales que représentent ces principes, ils étaient largement critiqués vu qu'ils sont basés sur la mesure du risque et non sur son aspect dynamique.

Pour pallier ce problème, ces trois principes ont été enrichis par un élément de recouvrement [rèf36] qui permet de contrôler et réinitialiser le processus pour pouvoir identifier de nouveaux risques. En vue de tenir compte de l'évolution des événements déclencheurs. Yacov *et al.* [Yacov et al., 1991] et Tummala et burchett [Tummala et Burchett, 1999] ont intégré des étapes supplémentaires pour le contrôle et le suivi des processus de gestion des risques. Par ailleurs, les standards AS/NZS 4360 et ISO31000 se basent sur un processus itératif pour la gestion des risques. La figure suivante illustre la structure de ce processus :

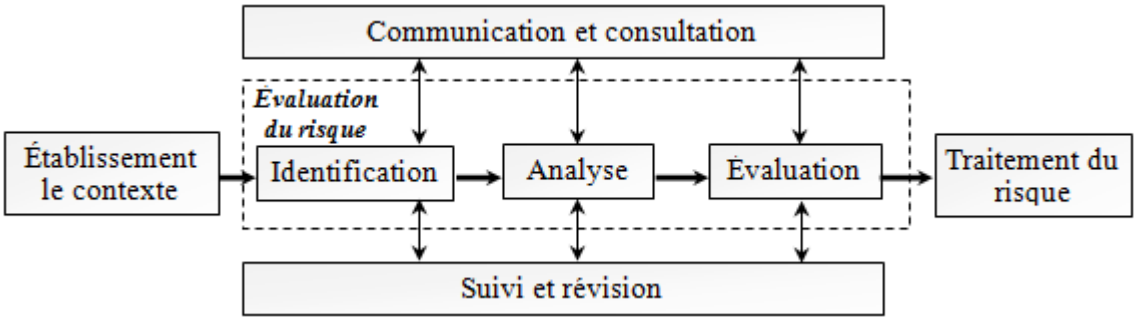

Figure II.1. Processus de gestion des risques ISO31000

Ce processus a été adopté par de nouveaux standards et pour différents domaines. Parmi ces standards, nous citons l'exemple de la norme ISO27005 relatif à la sécurité des informations [Everett, 2011] et l'étude du risque du déversement de pétrole et des produits dangereux [Lee et Jung, 2013]. En dépit de la généricité de ce processus, il a été adapté pour gérer les risques liés aux activités d'un fournisseur d'électricité en Grèce [Marhavilas et al., 2011]. Le but de cette adaptation est l'hybridation des méthodes utilisées pour l'évaluation des risques [Marhavilas et Koulouriotis, 2012]. Ceci est réalisé en combinant les méthodes qualitatives et quantitatives pour l'estimation des risques.

D'autres travaux ont proposé leur propre processus de gestions des risques en adéquation avec la spécificité du contexte de l'étude. Hallikas et al. [Hallikas et al., 2004] ont proposé un processus dédié à la chaîne logistique afin de gérer les risques d'une façon coopérative. Marcelino et al. [Marcelino et al., 2013] ont conçu un processus de gestion des risques qui s'exécutent en parallèle avec les phases d'exécution d'un projet. Ce processus couvre les niveaux stratégique et opérationnel. Le tableau suivant présente une comparaison en termes d'éléments de processus de gestion des risques par rapport aux étapes définies par le standard ISO310000 :

	Domaine	**Contexte**	**Identifier**	**Analyser**	**Évaluer**	**Traiter**	**surveiller**	**Apprendre**
[IEEE1540, 2001]	Cycle de vie logiciel		×	×	×	×	×	×
[CEI62198, 2001]	Projet de technologie	×	×	×	×	×	×	×
[AS/NZS 4360: 2004]	Générale	×	×	×	×	×	×	×
Everett, 2011	Sécurité des informations	×	×	×	×	×	×	×
[Jingkai, 2012]	Sécurité du travail		×		×	×		
[Tan et al., 2014]	Accident de propagation de gaz		×	×	×	×	×	
[Lee et Jung, 2013]	Transport maritime	×	×	×	×			

[Halikas et al., 2004]	Chaîne logistique		×	×	×	×	×	
[Yusta et al, 2011]	Protection des infrastructures	×	×	×	×	×	×	
[Marhavilas et al., 2011]	Évaluation de risque		×	×	×	×	×	
[Marcelino et al., 2013]	Gestion de projet	×	×	×	×	×	×	×
[Tummala et Burchett, 1999]	Ligne à haute tension		×	×	×	×	×	
[Hoj et Kroger, 2002]	Transport routier et ferroviaire	×	×	×	×	×		
[Conchuir, 2012]	Gestion de projet	×	×	×	×	×	×	
[Fredriksen et al., 2002]	Sécurité des systèmes critiques	×	×	×	×	×		
[Desroche et al., 2007]	Gestion du risque industrielle		×	×	×	×	×	

Tableau II.1. Composition des processus de gestion des risques

Ce tableau montre la multitude de processus de gestion des risques, néanmoins, nous constatons un consensus sur les étapes d'identification, d'évaluation et de traitement des risques. En réalité, les normes de gestion des risques font abstraction de la mise en œuvre de ces étapes. Pour pallier ce problème, nous détaillerons la mise en œuvre des trois principes de la gestion des risques dans ce qui suit.

4.1. Identification du risque

L'identification des risques permet aux décideurs d'être conscients des évènements susceptibles de créer de l'incertitude [Hallikas et al., 2004]. C'est une étape exigeante qui nécessite un effort d'analyse et d'imagination des sources de risques [Benaben et al., 2004]. Pour structurer l'étape d'identification de ces événements, le standard ASNZS4360 [AS/NZS 4360, 2004] 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 ?

TBMF consulting [TBMF, 2009] a proposé quatre recommandations pour identifier les risques dans un contexte de gestion de projets. Ces derniers sont l'identification des objectifs à atteindre, les ressources disponibles, les conséquences issues des défaillances d'une ressource et la consultation des experts pour recenser les sources des risques.

En outre, il existe des méthodes dédiées à l'identification des risques. Hillson [Hillson, 2002] les classifie en trois catégories :

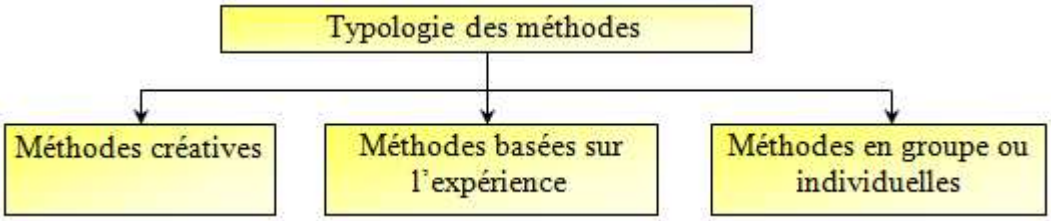

Figure II.2. Typologie des méthodes d'identification des risques

Les méthodes créatives ont conduit à mener une réflexion pour l'identification des risques, telle que la méthode Delphi. Les méthodes basées sur l'expérience utilisent les connaissances issues de l'analyse des situations à risques rencontrées dans le passé et l'expérience des personnes. À ce propos, Hillson [Hillson, 2002] a présenté la méthode NGT (Nominal Group Technique) qui débute par un brainstorming individuel, ensuite elle passe au partage et à l'évaluation des risques identifiés.

Les méthodes d'identification des risques dépendent aussi du domaine d'application. Desroches *et al.* [Desroches et al., 2007] ont présenté les méthodes HAZID « HAZard IDentification » et HAZOP « HAZard and OPerability » réservées à l'industrie des procédés.

Pour conclure cette analyse, nous avons constaté que l'identification des risques basée sur l'utilisation d'une seule méthode n'est pas suffisante et ne peut couvrir les différents aspects d'un risque. À cet égard, nous citons l'exemple des check-lists qui se limite à la vérification d'un ensemble de risques issus de l'expérience des organisations. En conséquence, l'application de cette méthode toute seule entrave le processus de réflexion pour la découverte de nouveaux risques. Par conséquent, il est judicieux d'opter pour une combinaison de méthodes pour achever cette étape. De plus, une identification des risques ne peut être réalisée sans une connaissance rigoureuse du cas étudié. D'où la nécessité d'une cartographie du système étudié avant d'entamer l'identification du risque.

4.2. Évaluation du risque

L'étape d'évaluation consiste à mesurer le niveau du risque associé aux événements générés par l'étape d'identification [Fredriksen et al., 2002]. Cette étape est d'une grande importance car elle détermine une hiérarchisation des risques selon leur importance et par conséquent elle influence la priorisation des acteurs à entreprendre pour les traiter. La

complexité de cette étape se manifeste dans le grand nombre de risques à évaluer et la précision des estimations effectuées. Pour pallier ce problème, la norme AS/NZS [Broadleaf, 2007], recommande l'élimination des risques mineurs dont le but est de réduire le nombre de risques à prendre en compte. De plus, elle prône une évaluation basée sur un processus itératif afin de réajuster les évaluations initiales et minimiser le biais résultant de la surestimation ou la sous-estimation des événements.

Pour réussir cette étape, la norme IEEE recommande une évaluation individuelle des risques, une évaluation des combinaisons de risques et une évaluation en tenant compte des interactions avec le système. Selon Marhavilas *et* Koulouriotis. [Marhavilas et Koulouriotis, 2012], cette étape doit être menée par un groupe de travail composé des experts en risque et des experts dans le domaine d'application. De surcroît, le processus d'évaluation des risques doit être itératif afin de minimiser le biais des évaluations initiales. Il existe deux approches principales pour l'évaluation des risques : l'approche qualitative et l'approche quantitative.

4.2.1. Approche qualitative

L'approche qualitative a été proposée pour les cas où la quantification numérique du risque ne peut aboutir à cause de l'absence d'informations ou de la complexité de cette tâche. À l'appui, nous citons le problème d'estimation des conséquences immatérielles engendrées par la dégradation de la réputation d'une entreprise [Hallikas et al., 2004].

L'évaluation qualitative dépend de plusieurs paramètres. Par exemple, pour le cas d'un accident de camion, l'évaluation de sa probabilité d'occurrence dépend de la probabilité de défaillance du matériel, la probabilité d'une erreur due au conducteur et celle d'avoir de mauvaises conditions météorologiques. Pour remédier à ce problème, Zepeda [Zepeda, 1998] a proposé une matrice combinant plusieurs probabilités. Le tableau 3 illustre un exemple de cette matrice [Zepeda, 1998] :

P événement 1	**P événement 2**			
	Négligeable	**Faible**	**Modérée**	**Élevée**
Négligeable	Négligeable	Faible	Faible	Modérée
Faible	Faible	Faible	Modérée	Modérée
Modérée	Faible	Modérée	Modérée	Élevée
Élevée	Modérée	Modérée	Élevée	Élevée

Tableau II.2. Matrice de combinaison des probabilités

Le résultat final de l'appréciation qualitative du risque est présenté par une expression telle que « le risque est intolérable » ou « le risque est acceptable ». Pour aboutir à ce résultat, il faut combiner l'estimation de son occurrence avec l'estimation de ses conséquences. À l'instar de la matrice de combinaison des probabilités, une matrice de classification des risques a été proposée :

		Classe de gravité				
		Négligeable	**Significative**	**Grave**	**Critique**	**Majeur**
Probabilité	**Négligeable**	C1	C1	C1	C2	C3
	Faible	C1	C1	C2	C2	C3
	Modérée	C1	C2	C2	C3	C3
	Élevée	C2	C2	C3	C3	C3

Tableau II.3. Matrice de classification de risques

Cette matrice définit trois classes de risque. La classe « C1 » pour un niveau de risque acceptable, la classe « C2 » pour un niveau de risque moyen et la classe « C3 » pour un niveau de risque intolérable.

4.2.2. Approche quantitative

Selon Marhavilas et al [Marhavilas, 2011], les techniques quantitatives considèrent le risque comme une quantité estimable par des relations mathématiques en exploitant des données réelles. En conséquence, la quantification d'un risque nécessite une capitalisation de connaissances au cours du temps. En revanche, cette tâche est coûteuse et ne concerne que les industries qui présentent des risques majeurs tels que l'aéronautique et les centrales nucléaires.

Desroche et al. [Desroche et al., 2007] distingue l'évaluation quantitative directe et l'évaluation quantitative indirecte. La première se base sur l'observation du cas étudié pour estimer le niveau du risque en utilisant une loi de valeurs extrême. La deuxième se base sur un modèle probabiliste d'occurrence et d'évolution du processus du risque.

La formule conventionnelle utilisée pour l'évaluation quantitative du risque repose sur la spécification de la probabilité d'occurrence d'un événement et le degré de son impact. La formule qui suit permet d'exprimer cette relation :

$$Risque = \text{Probabilité d'occurrence} \times \text{Conséquences}$$

Il existe d'autres variantes dont une formule de quantification du risque proposée par Mili et al. [Mili et al., 2009] qui spécifie deux types de probabilité : la probabilité d'émission et la probabilité d'exposition :

$$Risque = \text{Probabilité d'émission} \times \text{Probabilité d'exposition} \times \text{Conséquences}$$

Cette formule a été utilisée pour quantifier le risque d'intoxication suite à la consommation d'un produit contaminé. Dans ce contexte, la probabilité d'émission correspond à l'estimation de la prévalence de la contamination d'un produit et la qualité du système de surveillance. La probabilité d'exposition dépend de la fréquence de la consommation et des quantités consommées du produit.

En résumé, l'approche quantitative permet une évaluation objective du niveau du risque et facilite sa comparaison avec des mesures préventives existantes et du seuil tolérable. En revanche, nous précisons qu'une évaluation quantitative doit tenir compte de l'évolution de son impact.

Il existe une troisième approche pour l'estimation des risques, il s'agit d'une approche semi-quantitative ou hybride. Cette dernière est basée sur la combinaison des estimations qualitative et quantitative. À cet effet, une méthode qualitative peut être utilisée pour définir les scénarios d'évolution d'un risque et d'établir une estimation initiale. Après, une méthode quantitative peut être appliquée pour une quantification précise des risques.

4.3. Traitement du risque

Selon Mili et al. [Mili et al., 2009], le traitement du risque porte sur la spécification et l'implémentation des mesures susceptibles de l'atténuer. Ceci peut être achevé de différentes manières telles que la proposition de stages de formation pour le personnel, la réglementation et la supervision. Cependant, la norme IEEE [IEEE1540, 2001] précise qu'avant d'entamer cette étape, il faut déterminer jusqu'à quel niveau un risque est acceptable. Pour cela, il est nécessaire de spécifier un seuil de tolérance.

Au premier abord, nous croyons que le traitement d'un risque ne peut que l'éliminer ou bien l'atténuer à un niveau acceptable. Ce constat est appuyé par le diagramme de Farmer [Desroche et al., 2007] qui se base sur la probabilité d'occurrence d'un risque et la gravité de son impact pour tracer une courbe qui détermine la limite d'acceptabilité (Figure 3.a). Toutefois, cette catégorisation de l'acceptabilité en deux domaines exclusifs représente une

vision restreinte des choses car elle néglige le risque tolérable. Ainsi, la limite d'acceptabilité des risques définie par le diagramme de Farmer est remplacée par un domaine à risque tolérable (Figure 3.b) [Desroche et al., 2007].

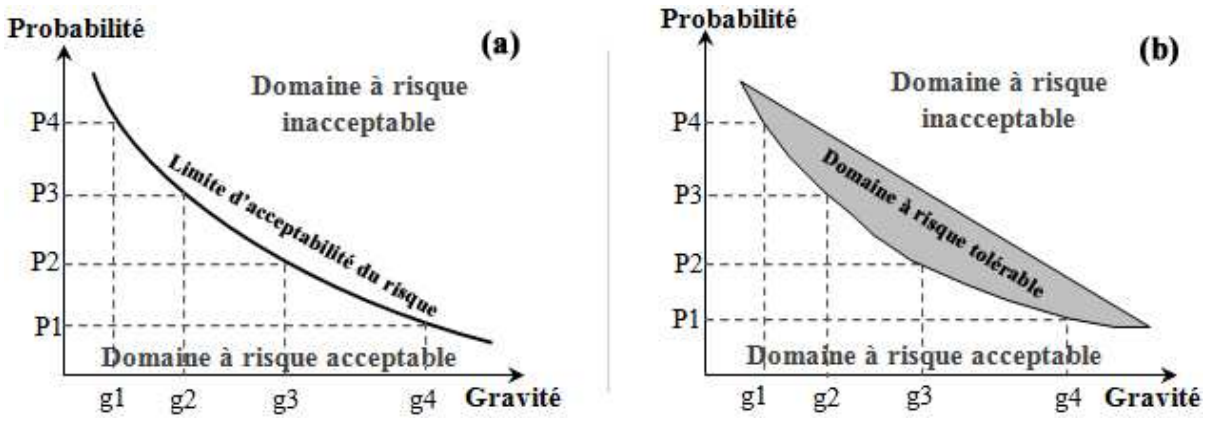

Figure II.3. (a) Diagramme de Farmer (b) domaine à risque tolérable

Hallikas et al. [Hallikas et al., 2004] prônent la structuration du traitement des risques en deux étapes. La première se focalise sur la spécification des contremesures. La deuxième est axée sur la mise en œuvre de ces contremesures et la spécification d'autres alternatives en cas d'échec du plan initial. Par ailleurs, Mees [Mees, 2007] a défini quatre stratégies pour le traitement des risques :

- éliminer le risque : par le changement de la manière de réaliser une activité afin d'obvier le déclenchement d'un événement indésirable.
- réduire le risque : par l'implémentation de contremesures susceptibles de minimiser la probabilité d'occurrence d'un risque ou d'atténuer ses conséquences.
- transférer le risque : par un contrat, à une partie tierce qui accepte de le gérer. Ceci permet à l'organisation d'avoir plus de garantie, ex. les assurances.
- accepter le risque : cette stratégie de rétention est adoptée par une organisation lorsque l'impact d'occurrence d'un événement indésirable est jugé faible. Cependant, il existe des cas où la prise en charge du risque n'est pas un choix, notamment dans le cas ou le coût de traitement des risques est très élevé.

5. Méthodes de gestion des risques

5.1. Classification

Il existe plusieurs classifications des méthodes de gestion des risques. Dans ce contexte, Desroches [Desroches et *al.*, 2007] a classifié ces méthodes en trois catégories

suivant le type d'information utilisé, le type de raisonnement et la dynamique de l'approche. La figure suivante illustre la classification proposée par Desroches [Desroches et *al.*, 2007]:

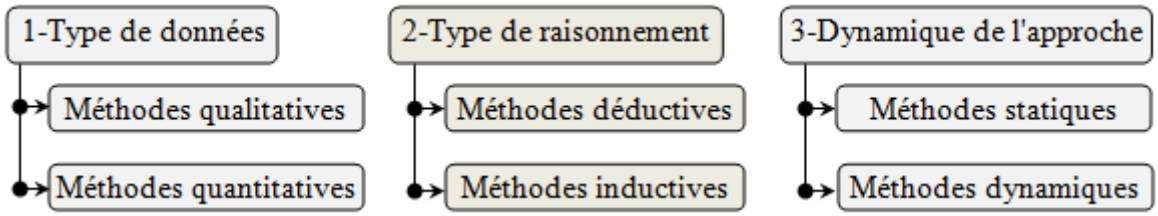

Figure II.4. Classification des méthodes de gestion des risques proposée par Desroche

Dans un premier travail concernant une revue de littérature des méthodes de gestion des risques, Marhavilas et al. [Marhavilas et al., 2011] ont classifié ces méthodes suivant une approche d'évaluation. Ainsi, il a déterminé les méthodes qualitatives, quantitatives et hybrides. Cette classification a été enrichie dans un travail ultérieur par Marhavilas et al. [Marhavilas et al., 2012] dans lequel il a spécifié deux catégories de méthodes : déterministes et stochastique. La figure suivante présente cette classification :

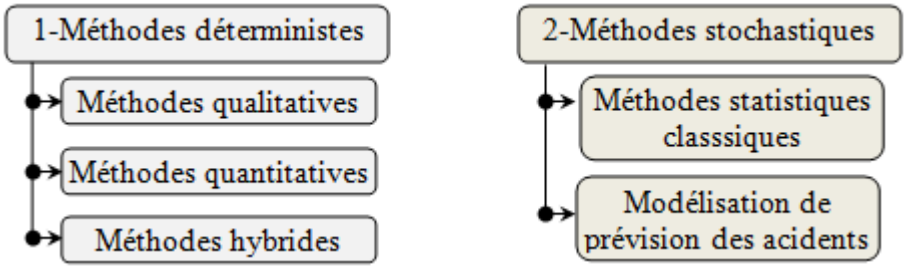

Figure II.5. Classification des méthodes de gestion des risques proposée par Marhavilas

Les méthodes stochastiques se basent sur l'utilisation de la probabilité d'occurrence d'un accident ou la fréquence d'exposition à une situation dangereuse. Les méthodes de cette catégorie sont classées en méthodes statistiques et méthodes de prévision.

Selon Tixier et al. [Tixier et al., 2002], les méthodes de gestion des risques peuvent être classées en quatre catégories : méthodes qualitatives, quantitatives, déterministes et probabilistes. Par ailleurs, il précise que les méthodes qualitatives et quantitatives représentent les principaux types de méthodes. Par ailleurs, elles peuvent être subdivisées en trois sous-catégories en les combinant avec les catégories déterministes, probabiliste et la catégorie hybride probabiliste-déterministe. La figure 6 présente la classification proposée par Tixier et al. [Tixier et al., 2002]:

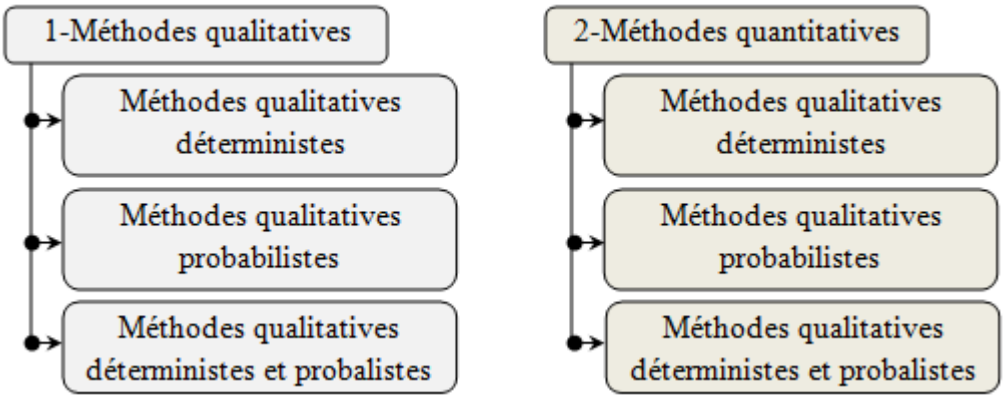

Figure II.6. Classification des méthodes d'analyse des risques selon Tixier

Dans ce travail nous adoptons la classification proposée par Marhavilas [Marhavilas et Koulouriotis, 2012] et nous nous limiterons à la présentation des méthodes déterministes dédiées à l'analyse et l'évaluation des risques.

1.1. Méthodes qualitatives

Sans vouloir entrer dans les détails, nous présentons les principales méthodes qualitatives dédiées à l'analyse et la gestion des risques. Le tableau 5 donne une brève description de ces méthodes.

Méthode	Description
Liste de vérification (check-list)	Est une méthode systémique qui porte sur la vérification de la conformité d'un système à un ensemble de critères qui garantissent son bon fonctionnement. Cette méthode est applicable à toutes les activités, systèmes, équipements et interventions humaines [Marhavilas et al., 2011].
Analyse des hypothèses	Se base sur le brainstorming des experts pour la spécification des hypothèses concernant les déviations possibles d'un système et l'estimation de leurs conséquences potentielles. Ceci permet de hiérarchiser les risques et de définir les contremesures appropriées pour traiter ces déviations [Marhavilas et al., 2011] [Renier et al., 2005].
Audit de la sûreté	Est un ensemble de procédures appliquées pour l'inspection des installations et des processus [Renier et al., 2005]. Cette méthode est généralement mener par une équipe externe afin de vérifier objectivement le niveau de prévention des risques et les protections existantes [Chola, 2014].
Analyse des tâches	Est une méthode dédiée à l'analyse des risques engendrés par des erreurs humaines [Chola, 2014]. Son but est de comparer les compétences des opérateurs des tâches avec les besoins du système.
Analyse hiérarchique des tâches	Représente une amélioration de la méthode d'analyse des tâches classiques. Le but de cette méthode est de hiérarchiser les tâches complexes en plusieurs sous-tâches afin de faciliter l'analyse des risques [Doytchin et al., 2009].

HAZOP	Est une méthode structurée dont le but est de déterminer les déviations de fonctionnement d'un système et qui sont susceptibles de générer des risques. Pour ce faire, HAZOP se base sur des brainstormings individuels et collectifs menés par une équipe pluridisciplinaire [Rossing et al., 2010] [Skelton, 1997].

Tableau II.4. Description des méthodes qualitatives de gestion des risques

5.2. Méthodes quantitatives

Les méthodes quantitatives permettent une évaluation numérique du niveau du risque basée généralement sur la combinaison de sa probabilité d'occurrence et le degré de son impact. Le tableau 6 donne une brève description de ces méthodes :

Méthode	Description
Évaluation quantitative du risque (QRA)	« Quantitative Risk Assessment » est une méthode pour la quantification des risques aux niveaux des réacteurs nucléaires. Elle se base sur l'évaluation de la probabilité et des conséquences d'un événement à risque [Pasman et Reniers, 2013].
Évaluation quantitative proportionnel du risque (PRAT)	« Proportional Risk-Assessment Technique » méthode de quantification des risques basée sur la détermination de la probabilité d'occurrence, la fréquence d'exposition et la sévérité des conséquences d'un risque [Marhavilas et al., 2011].
Évaluation quantitative d'un scénario à effet domino	« Quantitative Assessment of Domino Scenarios » est une méthode dédiée à la quantification des risques liés aux événements indésirables susceptibles de progresser et de déclencher de nouveaux risques.
Analyse des risques pondérés (WRA)	« Weighted Risk Analysis » permet d'établir une comparaison entre plusieurs risques suivant une seule dimension. Elle est appropriée pour équilibrer l'aspect sécuritaire par rapport aux autres aspects [Marhavilas et al., 2011] [Suddle, 2009].

Tableau II.5. Description des méthodes quantitatives de gestion des risques

5.3. Méthodes hybrides (semi-quantitatives)

Elles prônent la combinaison des deux approches qualitatives et quantitatives de traitement des risques pour une évaluation rigoureuse. Le tableau 7 présente une description de ces méthodes:

Méthode	Description
Analyse de l'arbre des défaillances	Cette méthode se base sur un raisonnement déductif pour déterminer les causes du déclenchement d'un événement indésirable. Elle permet d'établir des liens logiques entre les événements sources des risques.

	L'hybridation de cette méthode passe par l'association d'une probabilité d'occurrence à chacun de ces événements [Desroches et al., 2007].
Analyse de l'arbre des événements	Cette méthode se base sur un raisonnement inductif pour déterminer les conséquences engendrées par un événement initial. La conduite de cette analyse permet d'aboutir à une description qualitative des scénarios d'évolution d'un risque [Marhavilas et al., 2011]. L'hybridation de cette méthode passe par la spécification des probabilités d'occurrence des événements.
Analyse des Modes de Défaillances Effets et Conséquences	« AMDEC » permet l'analyse et l'hiérarchisation des défaillances associées aux processus et aux produits. Il s'agit d'une méthode itérative structurée en plusieurs phases qui couvre l'analyse, l'évaluation et le traitement [Nimanbeg et Lemarquis, 2011].
Hazard Analysis Critical Control Point	« HACCP » représente un processus de sûreté pour éliminer les défauts de préparation des aliments. Pour ce faire, elle détermine les points critiques du processus de production et intègre des mesures pour contrôler la qualité des produits au niveau des points critiques [Efstratiadis et al., 2000].

Tableau II.6. Description des méthodes semi-quantitatives de gestion des risques

6. Sûreté de fonctionnement des ports

Selon Jouve [Gningue, 2011], le port et ses installations sont devenus le lieu de toutes les vigilances. En conséquence, les politiques de gestion du transport maritime et les installations portuaires se sont renforcées par de nouvelles lois suite à la multiplication des activités frauduleuses. Le but de ces nouvelles réglementations est de pallier les risques qui émergent des opérations de manutention, les actes illicites et le potentiel dangereux des marchandises traitées.

Pour sécuriser les TC, les opérateurs portuaires se sont investis dans la mise en place de nouvelles mesures telles que l'éclairage, les systèmes de télésurveillance, la vidéo détection, et le contrôle accru de l'accès au terminal [Gningue, 2011]. De plus, pour diminuer les accidents au niveau du TC, les engins de manutention sont soumis à des contraintes qui limitent la vitesse de circulation et les zones accessibles.

Les organisations internationales et les industriels ont proposé plusieurs codes et initiatives pour améliorer la sécurité du transport maritime et des plateformes portuaires [Dahlman et al. , 2005] :

- Initiative de sécurité des conteneurs (CSI-Container Security Initiative) proposée par les États-Unis après les attentats du onze Septembre. Elle consiste en un échange bilatéral des informations entre les gardes-côtes américains et les ports étrangers ainsi que l'utilisation des détecteurs de radiations. L'objectif de cette initiative est d'identifier les conteneurs qui présentent une menace sécuritaire [Roach, 2004].
- Code international pour la sûreté des navires et des installations portuaires (ISPS) : représente un cadre de travail pour les acteurs du transport maritime et les gouvernements. L'objectif de ce code est de définir des mesures préventives mutuelles pour pallier les risques au niveau des ports et des porte-conteneurs [King, 2005].
- Customs Trade Partnership Against Terrorism (C-TPAT) : est un programme d'auto-certification volontaire destiné aux entreprises qui respectent les standards de sécurité afin d'acquérir le statut de transporteur maritime certifié [Wein et al., 2006]. Ce statut facilite aux entreprises les procédures douanières appliquées aux États-Unis.

Papa [Papa, 2012] a présenté une étude comparative entre les stratégies appliquées en Europe et aux États-Unis. Le tableau 3 présente une description de ces stratégies.

Stratégie	**Description**
Initiative Megaports	Tache à identifier les marchandises suspectes et la détection des produits radioactifs
Règle 24 heures	Impose la transmission des informations relatives à un conteneur 24 heures avant son chargement vers les états unis
Importer Security Filing (ISF)	Élimine l'incertitude de la déclaration d'un conteneur par la collecte des informations de l'importateur et du transporteur
100% scanning	Met le point sur le scanning de tous les conteneurs importés vers les États-Unis. Cette initiative est inapplicable des les grands ports

Tableau I.1. Stratégies de prévention des risques dans le transport maritime

7. Gestion des risques : cas d'un terminal à conteneurs

La sécurisation du fonctionnement des ports est nécessaire pour garantir la fiabilité du réseau de transport global. En revanche, la structure réticulaire de ce réseau et la répartition géographique de ces composants exposent l'acheminent des conteneurs à plusieurs risques. Ces derniers se manifestent principalement dans les actes de vols et les activités frauduleuses liées au trafic de marchandises illicites.

Plusieurs travaux ont abordé le problème de la sécurisation du fonctionnement des TC. Dans ce contexte, Chatterjee [Chatterjee, 2003] s'est intéressé aux actes terroristes susceptibles de survenir durant le transport maritime des conteneurs et il a déterminé des contremesures appropriées pour les gérer. Le processus de ciblage et d'inspection des conteneurs est considéré comme la principale mesure pour détecter le trafic de marchandises illicites. À cet effet, Ramirez-Marquez [Ramirez-Marquez, 2008] a proposé une stratégie pour l'identification des conteneurs suspects en utilisant des inspections non invasives basées sur des capteurs. Pour ce faire, il a déterminé un processus décisionnel basé sur les arbres de décision pour optimiser le choix de capteurs utilisés pour le scannage des conteneurs afin de minimiser le coût d'inspection. Longo [Longo, 2010] a étudié l'impact d'intégration des activités d'inspection des conteneurs au niveau du TC. Cariou et al. [Cariou et al., 2009] ont mené une analyse des archives d'inspection réalisées par les autorités portuaires afin d'extraire des critères pertinents pour le ciblage des navires.

Le fonctionnement des TC est caractérisé par la survenance des accidents. Dans la littérature, les solutions proposées pour pallier ce problème sont axées sur l'analyse des accidents passés au niveau des ports. En ce sens, Rigas et al. [Rigas et al., 2002] ont étudié les conséquences potentielles engendrées par un accident durant la manutention des matières dangereuses au niveau d'un port tel que la dispersion d'un gaz toxique. Lu et Yang [Lu et Yang, 2010] ont procédé par une analyse de l'historique des accidents au niveau d'un port pour déterminer les sources de risques. Cette étude a conclu que le facteur humain est la principale cause de déclenchement des événements indésirables au niveau des ports. Dans le but de cerner les scénarios à risques et l'estimation de leurs fréquences, Ronza et al. [Ronza et al., 2003] ont opté pour une analyse statistique des accidents survenus, combinée avec les arbres d'événements. Ceci a permis une spécification des scénarios d'évolution des risques ainsi que leurs probabilités d'occurrences.

En outre, Darbra et Casal [Darbra et Casal, 2004] ont établi un lien entre l'évolution du nombre des accidents et l'évolution du trafic de conteneurs au niveau d'un port. De plus, ils ont montré la fréquence des accidents dans les zones de chargement et de déchargement. Fabiano et al. [Fabiano et al., 2010], à travers une analyse statistique, ont mis en évidence la contribution de l'expérience des manutentionnaires à la minimisation du nombre de conteneurs.

En effet, la responsabilité de sûreté et de sécurité des TC ne se limite pas aux opérations de manutention. Elle dépend de la fiabilité des participants impliqués dans le processus de packaging et de consolidation de marchandises en amont du port. Dans ce contexte, Ellis [Ellis, 2011] a mené une étude pour déterminer les facteurs risques qui contribuent à l'occurrence des accidents durant le transport des matières dangereuses en se basant sur l'analyse des accidents reportés durant 11 ans. Les résultats de cette analyse prouvent que 66% des causes qui contribuent au déversement de matières dangereuses peuvent être assignées à des défauts d'emballage et 25% des causes sont liées aux activités de consolidation de marchandises.

La survenance des risques aux niveaux d'un TC est aussi liée à la nature dangereuse des marchandises. Selon Winder and Zarei [Winder et Zarei, 2000], les produits chimiques sont dangereux et présentent plus de risque quand ils sont mélangés. Ainsi, ils ont précisé que certaines catégories de produits chimiques sont soumises à une réglementation spécifique pour garantir leur sûreté. Ceci nous amène à aborder la sûreté de stockage des conteneurs de matières dangereuses au niveau d'un TC. Cette opération est régie par des réglementations qui imposent la ségrégation de marchandises incompatibles et définit des mesures pour anticiper l'amplification des conséquences engendrées par ce type de marchandises. En ce sens, Erkut et al. [Erkut et al., 2007] précisent que le transport de ces matières implique la participation de plusieurs parties qui ont des priorités différentes, ce qui engendre des responsabilités ambigües pour la gestion des risques.

Les accidents liés au transport des matières dangereuses sont caractérisés par une faible probabilité d'occurrence et ne sont généralement documentés qu'au niveau des sites industriels. En conséquences, une analyse statistique à elle seule ne peut aboutir, vu la taille des échantillons étudiés. Pour pallier ce problème, une simulation a été utilisée pour étudier les scénarios à risques possibles et anticiper leurs occurrences. En ce sens, Millazo *et al.* [Milazzo et al., 2009] ont opté pour la simulation d'une attaque terroriste durant le transport de matières dangereuses dans des zones urbaines. Cette simulation permet de définir des scénarios d'intervention pour gérer les situations d'urgence. Rigas et Sklavounos [Rigas et Sklavounos, 2002], ont utilisé la simulation pour étudier les conséquences d'un accident majeur lié aux matières dangereuses dans le port Ikonio en Grèce. La simulation a porté sur l'étude de la propagation d'un nuage toxique suite à une explosion en tenant compte des propriétés physiques des matières dangereuses, des conditions météorologiques et des

caractéristiques des zones urbaines affectées. Cette simulation a été utilisée par Pontiggia *et al.* [Pontiggia et al., 2011] pour l'évaluation des conséquences engendrées par le déraillement d'un train qui transporte des citernes de gaz liquéfié.

Selon Sallmann [Sallmann, 2007], l'exploitation des connaissances pour la gestion des risques demeure une pratique peu exploitée par les organisations. Toutefois, la capitalisation des connaissances représente une bonne base pour gérer les risques. À cet égard, Alhawary et al. [Alhawari et al., 2012] prône l'intégration des connaissances pour la réussite de la gestion des risques.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, notre objectif était de détailler un ensemble de termes et de concepts qui relèvent du domaine du risque en proposant des définitions pour dissiper l'ambigüité qui caractérise la terminologie dans ce domaine d'une part et une description comparative des différentes approches pour la conduite d'une étude de gestion des risques d'autre part. De plus, nous nous sommes focalisés sur le processus de gestion des risques et ses différentes phases. Ces dernières portent principalement sur l'analyse, la mesure et le traitement des risques.

En outre, nous avons présenté les standards de base de la gestion des risques tels que l'IEEE1540, CEI/IEC62198 et AS/NZS4360. De plus, nous avons présenté les différentes classifications des méthodes de gestion des risques et nous nous sommes focalisés sur leur classification en méthodes qualitatives, quantitatives et hybrides.

Nous considérons que les éléments que nous avons détaillés représentent de bons conseils pour la consolidation d'une solution de gestion des risques adéquate pour le transport des conteneurs. Ainsi, dans la suite nous aborderons plus spécifiquement les méthodes de gestion des risques et leurs applications particulièrement dans le transport maritime.

Chapitre III

Concepts de base, outils et méthodes de conception

Sommaire

1. Introduction

Ce chapitre présente les concepts de base qui ont contribué au développement des solutions proposées pour gérer les risques liés au transport des conteneurs. Il met le point sur les paradigmes et les standards de modélisation que nous avons utilisés et justifie la convenance de ces outils à la problématique traitée. Pour cela, ce chapitre présente plusieurs concepts à savoir la traçabilité, le produit intelligent, la modélisation des processus métiers, les systèmes multi-agent et les architectures dirigées par les modèles.

2. La traçabilité

Partant des travaux que nous avons passés en revue, nous constatons une divergence des définitions de la traçabilité selon le domaine étudié. Les normes ISO8402 [Botta-Genoulaz, 2005] et ISO9000 [ISO9000, 2000] associent la traçabilité à la capacité de retrouver l'historique, l'utilisation et la localisation d'une entité au moyen des identifications enregistrées.

Dans le domaine de l'industrie agroalimentaire, la traçabilité désigne la capacité de tracer et de suivre tous les produits échangés dans la chaîne logistique. Le suivi des produits relève de la capacité d'un système à déterminer le chemin en aval d'un produit le long de la chaîne logistique tandis que la traçabilité consiste à déterminer l'origine et les caractéristiques d'un produit. Dans ce qui suit, nous considérons que la traçabilité d'un produit est l'identification de son origine, les opérations qu'il a subies et sa localisation en utilisant des informations relevées à partir des systèmes d'informations utilisés par les acteurs d'une chaîne logistique.

2.1. Modèles de systèmes de traçabilité

Les systèmes de traçabilité prennent de plus en plus de place dans notre vie quotidienne. Ces derniers se différencient suivant les fonctionnalités qu'ils peuvent assurer. Selon Kim et al. [Kim et al., 1995], un système de traçabilité réussi doit être en mesure de tracer les produits et les activités par la détermination de deux éléments de base, l'unité de ressource traçable et les activités élémentaires. Le premier correspond à un groupe homogène de ressources qui se distingue par l'unicité de ses caractéristiques et le deuxième correspond à l'ensemble des opérations de base à appliquer sur une unité de ressource traçable [Kim et al., 1995].

En outre, Regatierie et *al.*, [Regatierie et al., 2007] ont enrichi les fonctionnalités de base que nous avons citées, auparavant, par la capacité du système de traçabilité à décrire les caractéristiques d'un produit et la confidentialité des informations. En conséquence, un système de traçabilité doit se détacher de la vision axée sur la localisation des produits vers une traçabilité des caractéristiques, tout en tenant compte des risques de divulgation de données de la traçabilité. Dans une autre vision, Gencod [Gencod-Ean, 2001] s'est focalisé sur les fonctions d'enregistrement et de communication des données de la traçabilité entre les acteurs de la chaîne logistique. De surcroit, il a abordé le problème de lotissement des produits en détaillant les fonctions de bases nécessaires pour établir des liens entre les produits et les lots. Ce problème de lotissement présente une grande entrave pour la pertinence des systèmes de traçabilité. Ainsi, il est indispensable de bien étudier la granularité des unités de ressource traçable afin de minimiser l'impact de dispersion des lots.

Les premiers systèmes de traçabilité ont été impactés par le recueil manuel des informations. Ce problème a été pallié grâce au développement de nouvelles technologies qui ont contribué à l'automatisation de la collecte des informations. Cependant, de nouveaux problèmes ont émergé principalement à cause de l'abondance des données. En conséquence, une analyse des besoins est nécessaire pour éviter d'amasser des informations inutiles et omettre les informations pertinentes. Par ailleurs, la spécification de la granularité de l'unité de ressource traçable est un facteur important qui influe sur l'exhaustivité des informations à collecter.

2.2. Utilisation des systèmes de traçabilité

Bien que les systèmes de traçabilité disposent plus au moins des mêmes fonctions de base, mais ils sont utilisés à des fins différentes. Nous mettons le point sur le modèle de traçabilité générique de Bechini et *al.*, [Bechini et al., 2007] qui permet la traçabilité des produits et des activités au niveau d'une chaîne logistique et assure le suivi des critères de qualité durant le transport des produits. Ce modèle générique représente une base solide pour le développement d'une solution de traçabilité appropriée pour le cas des marchandises. Il existe d'autres solutions spécifiquement axées sur le traitement de problématiques réelles. En ce sens, nous présentons le système de traçabilité proposé par [Woo et al., 2009] pour le suivi des produits qui assure le contrôle des contraintes de transport et gère les problèmes liés à la dispersion des lots de marchandises.

2.3. Système de traçabilité et gestion des risques

Les systèmes de traçabilité sont plus ou moins utilisés pour améliorer le processus de gestion des risques. D'une part, le suivi des produits permet de prévenir les situations à risques et d'une autre part l'analyse des informations de la traçabilité permet l'identification des responsabilités lors de l'occurrence d'un incident. Dans le cadre du projet MITRA [Planas et al., 2008], un système de traçabilité a été développé pour le suivi des interventions des différents acteurs lors de l'occurrence d'un accident de transport en Europe. Ce projet vise l'amélioration des interventions des centres de sécurité civile dans le cas des accidents de transport des matières dangereuses en utilisant les nouvelles technologies, telles que, les systèmes de navigation par satellites et les systèmes d'information géographique. De plus, il exploite les bases des connaissances relatives aux risques.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisés sur le système de traçabilité GOST, conçu pour améliorer la sécurité du transport multimodal des conteneurs [Boukachour et *al.*, 2011].

3. Le système de traçabilité GOST

Le système de traçabilité GOST a été développé dans le cadre d'un partenariat industriel. Ce système assure le suivi et le contrôle en temps réel des conditions de transport des conteneurs, en particulier des marchandises dangereuses, dans un environnement multimodal et transfrontalier et dans un contexte de gestion des risques [Boukachour et *al.*, 2011]. GOST répond aux attentes de l'ensemble des acteurs de la chaîne logistique : utilisateurs finaux, prestataires de services ou autorités (sécurité civile et collectivités locales) en leur fournissant de manière fiable, sécurisée et indépendante l'information dont ils ont besoin pour mener à bien leurs missions et répondre aux exigences qui leur sont imposées.

3.1. Fonctionnement de GOST

La première vision de développement de GOST est d'assurer la collecte des informations depuis la prise d'une commande de marchandises jusqu'à la facturation ainsi que la traçabilité du transport des marchandises et la communication de ces informations d'une manière fiable. Cependant, la mise en œuvre de cette plateforme a été axée sur la partie traçabilité et localisation en temps réel des marchandises. Pour ce faire, GOST se base sur l'équipement des conteneurs par des tags RFID, des capteurs (température, humidité) et des

balises GPS afin de localiser et d'identifier les conteneurs. En exploitant ces technologies, GOST génère des alertes lors de l'occurrence d'un incident durant le transport des conteneurs, telle que la transgression des conditions de transport d'un type de marchandises dont le but est de confirmer ou anticiper les actions logistiques. Par ailleurs, ces informations sont aussi exploitées pour l'identification des responsabilités des acteurs de la chaîne logistique lors de la survenance d'un incident.

Les informations collectées par GOST sont destinées pour plusieurs catégories d'utilisateurs potentiels. Ces derniers ont un intérêt en particulier pour les fonctionnalités offertes par ce système en ce qui concerne le suivi et de sécurisation des flux de marchandises. Les utilisateurs de ce système sont classés en trois catégories ; la première regroupe les utilisateurs qui ont accès à la localisation de leurs marchandises à tous moment, la deuxième regroupe les utilisateurs qui ont besoins des informations ponctuelles concernant l'état de leurs marchandises, tels que la température des marchandises et les délais de livraison et la troisième catégorie concerne les acteurs à contacter en cas d'accidents. GOST peut servir les besoins des opérateurs et les prestataires de service, par exemple, les sociétés logistiques, les commerciaux, les organisateurs de transport, et les utilisateurs gouvernementaux, telle que la douane.

3.2. GOST et la gestion des risques

GOST fournit des informations appropriées pour l'établissement d'un processus de gestion des risques. Ces informations concernent, entre autres, la provenance des marchandises, la fiabilité des opérateurs qui ont manipulé les conteneurs et le statut OEA (Opérateur Economique Agrée) ou non des acteurs ainsi que la liste des pays à risque. GOST relève aussi des alertes lors d'un stationnement anormal d'un camion dans un parc non surveillé, la violation du plan de transport initial, le non-respect des conditions de transport, telle que la violation de la température de transport ainsi que l'ouverture du conteneur durant son transport. Ces alertes sont communiquées aux acteurs concernés par l'envoi d'e-mail ou des SMS afin de prendre des actions pour remédier à ces problèmes. Les images suivantes donnent une vue de la trace en temps réel d'itinéraire d'un conteneur et une alerte envoyée par SMS :

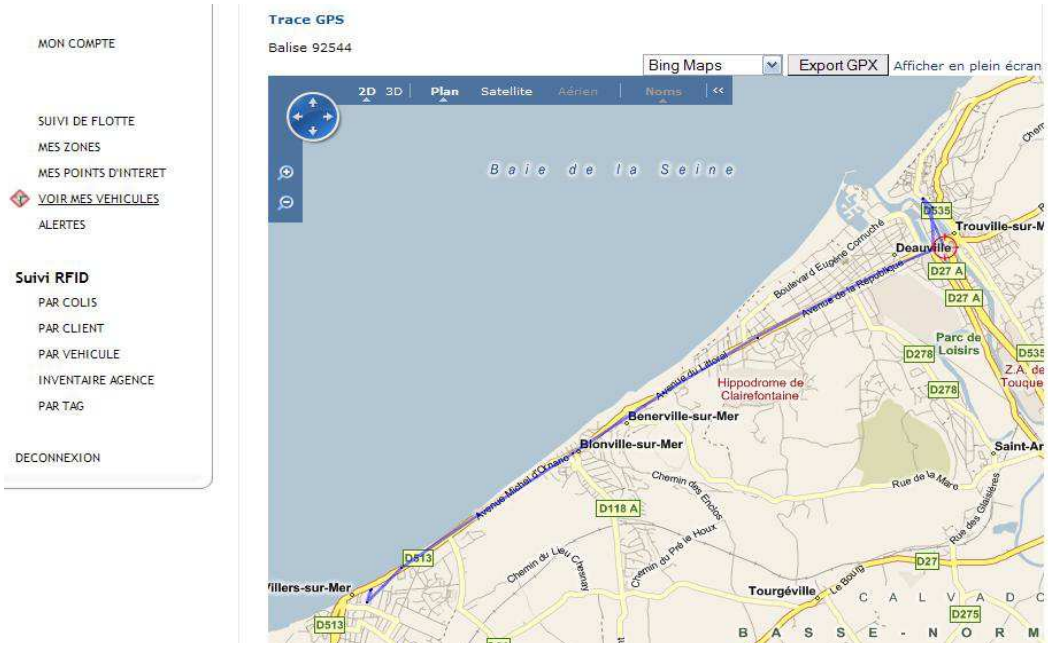

Figure III.1. Le tracée d'itinéraire de transport d'un conteneur

GOST offre également le Geofencing pour le suivi en temps réel des camions dans une zone géographique précise, une zone portuaire, un entrepôt, un corridor, etc. Par ailleurs, GOST tient compte des règles de ségrégation des marchandises dangereuses. Ces règles imposent le maintien d'une distance de sécurité entre les matières dangereuses incompatibles afin d'obvier le déclenchement des interactions. L'image suivante illustre un exemple du non-respect la distance de ségrégation entre des matières de classes incompatibles (classe 2.1 et 1.6) :

Figure III.2. Envoie des alertes par SMS

Le développement des nouveaux systèmes de traçabilité a été accompagné par l'émergence de nouvelles technologies, telles que les capteurs embarqués au niveau des produits, les technologies d'auto-identification des produits, telles que les tags RFID et les technologies de localisation, telles que les GPS. Ceci a contribué au développement du concept du produit intelligent qui exploite ces technologies pour relever des informations de

son environnement et communiquer avec des systèmes externes. De plus, ce concept à faciliter la synchronisation des flux informationnel et physique au niveau d'une chaîne logistique par l'exploitation des avancées réalisées dans les technologies d'auto-identification.

4. Le produit intelligent

4.1. Définition

Selon Mc Farlane et *al.* [Mcfarlane et al., 2003], le concept du Produit Intelligent (PI) couvre la représentation physique et informationnelle d'un produit. Il se caractérise par un identifiant, la capacité de communiquer 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. En outre, on distingue deux niveaux d'intelligence d'un PI ; le premier concerne la capacité du produit à communiquer des informations relatives à son état, par exemple, sa localisation et le deuxième englobe la capacité du produit à évaluer et influencer ses fonctions en sus de la communication avec son environnement.

Kärkkäinen et *al.* [Kärkkäinen et *al., 2003*] associent le concept du PI à sa capacité à prendre des décisions. En ce sens, ils citent l'apport de cette caractéristique au déploiement d'un contrôle centré produit des flux de marchandises échangées dans la chaîne logistique. Cette intelligence est déployée en se basant sur l'analyse des informations liées au cycle de vie d'un produit et elle est appropriée pour l'amélioration de la performance de livraison de marchandises.

Dans une autre vision, Venta et *al.* [Venta et al., 2007], ont associé le PI à l'incorporation d'un ensemble de capteurs au niveau du produit physique et aux capacités de prise de prise des décisions et de communication avec d'autres acteurs. De plus, on se focalise sur la capacité du produit à adapter ces opérations pour réagir aux changements afin de maintenir une performance optimale. Cette définition est plus au moins axée sur la capacité du produit à prendre des décisions et met en évidence l'équipement du produit par le matériel de communication et de calcul nécessaire pour établir une liaison avec d'autres systèmes d'information. Venta et *al.* [Venta et al., 2007] ont déterminé les fonctions de base assurées par un PI :

- Suivre les variations de son état interne et de son environnement ;
- S'adapter au changement des conditions opérationnelles ;

- Maintenir un fonctionnement optimal dans des cas d'exceptions ;
- Communiquer activement avec les utilisateurs, l'environnement et les autres produits.

4.2. Classification des produits intelligents

Partant des définitions que nous avons citées auparavant, Meyer et al. [Meyer et al., 2009] ont proposé une classification des modèles de 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. Ce critère différencie le cas où l'intelligence est embarquée au niveau du produit et le cas de l'intelligence par le réseau où le produit est lié à une unité de calcul distante. 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. [Wong et al., 2002]. Ils classifient les PI en modèles communicatifs et en modèles décisionnels. La figure suivante illustre la classification des modèles du PI :

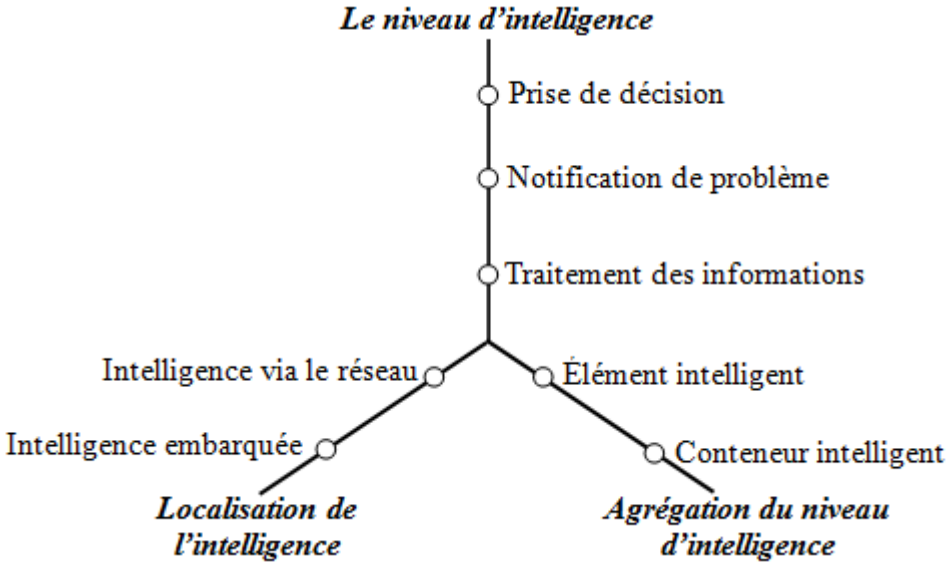

Figure III.3. Classification des modèles de produit intelligent [Meyer et al., 2009]

4.3. Les modèles conceptuels de produit intelligent

Le développement des PIs n'est pas fondé sur des technologies standardisées. Les contributions existantes sont multiples et se focalisent sur l'amélioration de ce concept. Cette amélioration concerne, d'une part, les modèles conceptuels existants ou la proposition de nouveaux modèles, et d'autre part, l'expérimentation et le développement de nouveaux produits.

D'un point de vu théorique, Främling et *al.* [Främling et *al.*, 2003] ont proposé un format d'identification ID@URI pour lier le produit physique à un agent logiciel qui gère son cycle de vie. Le but est d'exploiter une syntaxe similaire à celles des adresses e-mail afin de garantir l'unicité des identifiants attribués aux produits. La partie URI (Uniform Resource Identifier) sert à identifier les acteurs alors que la partie ID identifie de manière unique les produits de chaque acteur.

Contrairement au modèle précédent, le modèle proposé par Valckenaers et *al.* [Valckenaers et *al.*, 2009] outrepasse le problème d'identification des PIs pour aborder la structuration des produits composés de plusieurs éléments. Pour ce faire, ils se sont basés sur la combinaison des Holons et des agents pour la spécification du modèle de PI. Le concept de Holon a été proposé par Fischer et al. [Fischer et al., 2003], est un concept qui représente à la fois un tout et une partie d'autre chose. Ainsi, il consiste en une structure stable, cohérente qui se compose de plusieurs Holons et qui est en même temps une partie d'un ensemble plus grand. Le modèle du produit intelligent de Valckenaers et *al.* [Valckenaers et *al.*, 2009] est structuré en trois parties ; la première est le produit physique, la deuxième représente la représentation informationnelle du produit et assure la traçabilité et le suivi du produit physique et la troisième consiste en un agent intelligent qui est responsable du traitement des informations relatives à un produit pour la prise de décision.

Yang et al. [Yang et al., 2009] ont proposé un modèle du PI qui se compose de trois éléments de base. Ces derniers sont l'unité de donnée intelligente qui assure le stockage le traitement des données relatives au cycle de vie d'un produit, un facilitateur de services qui permet le déploiement des services et l'infrastructure de communication qui facilite l'interconnexion du produit avec des systèmes distants. Ce modèle prône l'interfaçage du PI avec des systèmes externes afin de le doter d'une intelligence via le réseau où la prise de décision est réalisée par un système distant.

4.4. Utilisation des produits intelligents

Du point de vu expérimental, Kiritsis [Kiritsis, 2011] a exploité le concept du PI pour améliorer la gestion des informations issues du cycle de vie d'un produit. Pour ce faire, il a proposé une ontologie basée sur les standards de la gestion des connaissances pour pouvoir gérer les différentes phases du cycle de vie d'un produit à partir de sa conception et sa réalisation, son utilisation et sa maintenance et jusqu'à la spécification des scénarios de recyclage du produit en fin de vie. Yang et *al.* [Yang et al., 2009] ont exploité le concept du produit intelligent pour collecter des informations concernant le cycle de vie d'une console de jeux. Cette solution permet d'exploiter les informations collectées pour faciliter le diagnostique des consoles et identifier les sources de pannes. Nous citons l'exemple d'embarquement des détecteurs de chocs au niveau de la console et l'enregistrement des informations qui décrivent le fonctionnement de ses composantes.

Réduit au contexte de la chaîne logistique, de nombreux travaux se sont basés sur le concept du PI pour améliorer les conditions et les performances du transport des marchandises. Dans ce sens, Malhéné et Deschamps [Malhéné et Deschamps, 2010] ont exploité ce concept pour concevoir une chaîne d'information afin de communiquer aux acteurs de la chaîne logistique des données en relation avec les conditions d'acheminement des produits. Ces derniers sont exploités pour la proposition d'une solution agile pour l'acheminement des marchandises en utilisant le routage orienté produit. Cette initiative vise l'amélioration de la performance du système de transport en procédant à la reconfiguration des réseaux de transport et la mutualisation des ressources disponibles en améliorant l'interopérabilité des systèmes utilisés par les acteurs de la chaîne logistique.

En outre, Ngai et *al.* [Ngai et al., 2007] ont proposé un système à base de tag RFID et des services mobiles pour améliorer le suivi des conteneurs et des gerbeurs dans un dépôt. Ce système offre une visibilité sur les opérations de manutention exécutées dans le dépôt de conteneurs. Dans le but d'améliorer la sécurité de transport des conteneurs, Rizzo et *al.* [Rizzo et al., 2010] ont proposé un sceau intelligent à base de tag RFID actif pour sceller les conteneurs. Ils assurent l'enregistrement des tentatives d'intrusion dans un conteneur et leurs localisations afin de déterminer la responsabilité des acteurs de la chaîne logistique.

Nous avons conviction en l'apport que présente le concept du produit intelligent pour améliorer la traçabilité des marchandises. En revanche, la nature distribuée d'une chaîne logistique et sa composition de plusieurs acteurs impliquent une bonne compréhension de ces

processus pour garantir la traçabilité des produits échangés. Pour cela, nous proposons d'aborder les standards de modélisation des processus métiers.

5. Modélisation des processus métiers

Un processus métier (PM) représente un ensemble d'activités ayant comme objectif la production d'un résultat spécifique d'un seul client [Davenport, 1993]. Selon Muehlen et *al.* [Muehlen et *al.* 2009], le PM consiste en une collection des actions qui traitent un ensemble de valeurs en entrées afin de fournir un résultat. Partant de ces définitions, nous associons le PM à un ensemble structuré d'activités assurées par un ou plusieurs acteurs sous certaines contraintes et dont le but d'atteindre un objectif fixé par son concepteur.

5.1. Classification des méthodes de modélisation

Dans un environnement évolutif, la gestion des PMs et leurs adaptations sont des facteurs clés de survie d'une organisation. En conséquence, l'importance d'amélioration de ces processus et la difficulté de compréhension de leurs structures par des acteurs non spécialisés ont fait émerger le besoin de développer de nouvelles techniques de modélisation. Ces dernières ont été classifiées par Vergidis [Vergidis, 2008] en trois catégories :

- Les méthodes à base de diagramme sont les premières méthodes qui ont été utilisées pour la modélisation des PMs. Elles portent sur une représentation simplificatrice des PMs basés sur des diagrammes. Pour ce faire, les méthodes existantes dédiées pour la modélisation des logiciels ont été réutilisées pour assurer cette tâche. Cependant, la modélisation des PMs en utilisant ces méthodes n'était pas standardisée. Pour pallier ce problème, de nouvelles notations standardisées ont été proposées, telles que le BPMN [Chinosi et Trombetta, 2012]. L'atout principal de ces méthodes est la représentation intuitive des PMs et la facilitation de leurs compréhensions par des non-informaticiens.
- Les méthodes mathématiques (formelles) ont été proposées pour fournir une spécification formelle et rigoureuse des PMs. Ces méthodes outrepassent la simple compréhension des PMs et permettent de les analyser et d'en extraire des connaissances. Par ailleurs, la spécification formelle des PMs permet de pallier toute ambigüité et dispose d'outils mathématiques pour la vérification et la validation de ces derniers. Ce type de méthodes est adéquat pour la modélisation des systèmes critiques.

- Les méthodes communicatives prônent la spécification des PMs en utilisant des langages basés sur XML. Ceci permet d'atténuer la difficulté de spécifier formellement les processus et présente une bonne base pour automatiser leurs exécutions. Pour ce faire, ils optent pour une invocation de services web en procédant à une description de l'ordre d'exécution des traitements par des balises XML.

Nous présentons, par la suite, les principaux standards dédiés pour la modélisation des processus métiers.

5.2. Standards de modélisation

Selon EL Fazziki et al. [El fazziki et al., 2012], il existe plusieurs standards de modélisation des processus métier, tel que le XPDL (XML Process Definition Language), BPML (Business Process Modeling Language), BPEL4WS (Business Process Execution Language For Web Serrvices) et le Business Process Modeling Notation (BPMN). Ces derniers ont vocation de spécifier les PMs suivant les trois modèles que nous avons présentés auparavant (modèles communicatifs, formels ou à base de diagramme) ainsi que la combinaison de ces modèles.

5.2.1. Le BPMN

Ce standard a été proposé par l'OMG pour fournir une notation intuitive pour la modélisation des PMs [Vergidis, 2008]. Ceci permet d'élargir la compréhension des modèles par une communauté non spécialisée. Ainsi, les diagrammes BPMN sont utiles pour la spécification des processus par des analystes spécialisés, les techniciens responsables de l'implémentation de ces processus et les utilisateurs qui assureront leur gestion [OMG-BPMN]. Chinosi et Trombetta [Chinosi et Trombetta, 2012] a proposé une étude globale de cette notation de modélisation, sa spécification et sa relation avec d'autres outils de modélisation des PMs.

Le BPMN permet une modélisation des PMs à plusieurs niveaux d'exhaustivité. Ce standard est adéquat pour la modélisation des processus internes et externes d'une organisation. Pour les processus internes, il ne tient compte que des activités internes à l'organisation et fait abstraction des interactions avec les acteurs externes. En ce qui concerne la modélisation des PMs externes, il tient compte de l'aspect collaboratif des processus par la modélisation des activités qui assurent les interactions avec l'environnement de l'entreprise.

Ceci est en adéquation avec les besoins de modélisation des activités dans une chaîne logistique.

L'avantage principal de cette notation se manifeste dans le fait qu'elle comble l'écart qui existe entre la modélisation des PMs et leur exécution. En ce sens, le BPMN est compatible pour la représentation des langages XML dédiés pour l'exécution des PMs.

5.2.2. Le XPDL

C'est un langage à base de XML pour la spécification des processus métier. Il a été conçu afin de garantir la compatibilité du modèle graphique d'un processus métier entre différents systèmes de gestion PMs. Il détermine aussi l'ordre d'exécution des activités qui composent un processus par un moteur de workflow [White, 2003].

L'objectif principal du XPDL est de définir un format pour échanger les modèles de PMs entre plusieurs outils nécessaires pour la modélisation, l'analyse, l'exécution et le suivi des PMs. En ce sens, XPDL est adopté par la Workflow Management Coalition (WMC) comme format pour l'exportation des diagrammes BPMN.

5.2.3. Le BPEL4WS

Le BPEL4WS connue aussi par BPEL et de WSBPEL est un langage basé sur XML pour la modélisation des PMs. Il définit un processus comme une composition d'un ensemble de services web élémentaires [Mendling, 2006]. Ce langage été conçu pour fournir un model de processus interopérable qui facilite la composition de nouveaux services web. L'exécution d'un processus se passe à travers un BPEL-engine qui assure l'invocation des services web élémentaires suivant la logique métier du processus. En conséquence, le résultat de l'exécution d'un processus consiste en le déploiement d'un nouveau service web composite.

5.2.4. Les Réseaux de Petri

Ils ont été inventés dans les années soixante par Carl Petri. Le point fort des RdP se manifeste dans la possibilité de simuler le comportement d'un système. Murata et *al.* [Murata et al., 1986] notent que les Rdps permettent de modéliser les caractéristiques principales concernant la structure et le comportement d'un système.

Plusieurs travaux ont utilisé les RdPs pour la modélisation des processus métiers. El Fazziki et *al.* [EL Fazziki et al., 2014] ont exploité les RdPs pour modéliser les processus métiers d'une entreprise dont le but de développer un système de gestion de workflow. Smata et *al.* [Smata, 2013] ont utilisé les RdPs pour modéliser et simuler le fonctionnement d'une entreprise d'approvisionnement.

5.2.5. UML

Le Langage de Modélisation Unifié (UML) est un langage de modélisation graphique, orienté objet et multi-usage qui a repris des concepts de bases des approches orientées objets existantes telles que Coad/yourdon, Booch et al. [Booch et al., 2005]. La première version d'UML a été définie et validée par l'OMG en 1997. Tout d'abord, il a été conçu pour supporter le processus de développement logiciel, ensuite UML s'est imposé comme une notation universelle pour l'analyse et la conception pour l'industrie du logiciel. Vue la généricité de sa notation, de nouvelles extension de UML ont été proposées pour modéliser de nouveaux concept, tels que le AUML, pour modéliser les agents et SysML pour la modélisation des systèmes.

UML a été utilisé pour la modélisation des PMs en exploitant les diagrammes qui permettent la modélisation de la dynamique d'un système. En ce sens, Engels et al. [Engels et al. 2005] précisent que le diagramme d'activité est l'outil fondamental d'UML pour la modélisation des PMs. Ce diagramme permet de représenter le comportement d'une activité sous forme d'une séquence d'actions en tenant compte de la coordination de l'exécution de ces actions. De plus, Engels et al. [Engels et al., 2005] ont détaillé comment UML couvre les aspects majeurs d'un processus, tels que les actions, les flux de contrôle, les objets de flux, la structure organisationnelle d'un PM et la vue centrée interactions d'un processus.

Tous les standards de modélisation des PMs que nous avons présentés sont uniquement axés sur la spécification des activités. Toutefois, la spécification des processus uniquement d'un point de vu orienté activité est restrictif et n'est pas suffisant pour aboutir à une spécification précise.

5.3. Modélisation orientée objectif

Les standards de modélisation des PMs existants font abstraction des objectifs d'un processus et sont axés sur la modélisation de son comportement [Jander et al., 2011]. De la

même manière, Zheng et *al.* [Zheng et *al., 2005*] ont mentionné le besoin de prendre en considération les buts, les croyances et les capacités des acteurs qui exécutent les activités pour améliorer la modélisation des PMs. De plus, ils ont précisé que la prise en considération des objectifs permet de piloter l'exécution des PMs d'une manière à atteindre les buts prédéfinis. En conséquence, de nouveaux standards de modélisation orientés objectifs ont été proposés.

5.3.1. Le GO-BPMN

Le Goal Oriented Business Process Modelling Notation (GO-BPMN) est un langage de modélisation visuel qui été proposé par Whitestein technologies pour une modélisation orientée objectif des PMs. Il s'agit d'une amélioration du langage de modélisation BPMN (section3.3.1). Ce langage permet de structurer le processus métier en plusieurs objectifs et plans. Ces plans déterminent la séquence des actions à exécuter afin d'atteindre les objectifs [Greenwood et Ghiziolli, 2009]. La figure suivante illustre les éléments de la modélisation orientée objectif :

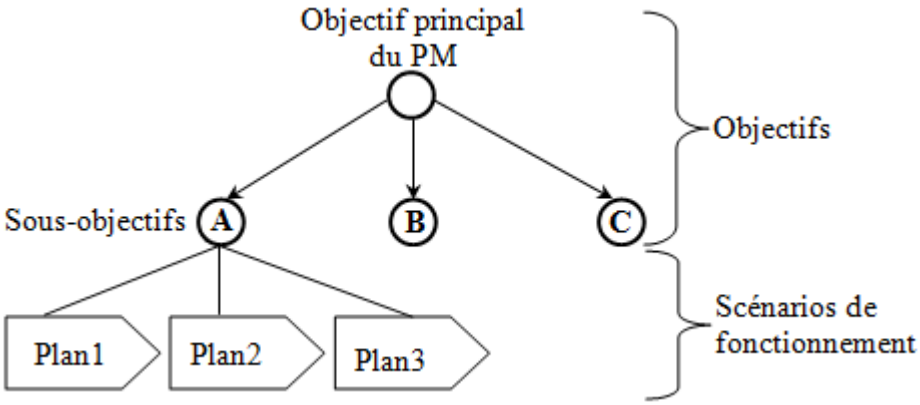

Figure III.4. La structure d'un diagramme orienté objectif d'un processus métier

5.3.2. Le GPMN

Goal Process Modeling Notation (GPMN) a été proposé dans le cadre du projet Go4Flex [Jander et al., 2011]. Similaire au GO-BPMN, ce langage permet de donner une vue orientée objectif d'un PM et associe à chaque objectif les plans à suivre pour l'atteindre. L'avantage du GPMN est le support technique au modèle BDI des agents (Belief, Desire, Intention) ainsi que la facilitation de l'exécution des processus métier en utilisant la plateforme Jadex [Jander et al., 2011].

GPMN détermine quatre types d'objectifs d'un processus, atteindre un objectif, exécuter un objectif, questionner un objectif et maintenir un objectif. Le premier vise à atteindre un état spécifique d'un processus, le deuxième ordonne l'exécution d'une tâche, le troisième aborde la collecte des informations concernant l'état du processus et le quatrième assure le suivi de l'état d'un processus. Par ailleurs, GPMN distingue deux types de plans à exécuter pour atteindre les objectifs d'un processus. Le premier type est le plan d'activation qui est utilisé pour décomposer un objectif principal en plusieurs sous-objectifs. Le deuxième type est appelé le plan BPMN. Ce dernier définit les activités à exécuter pour atteindre un objectif précis.

6. Les systèmes multi-agents

6.1. Présentation générale

Avec la croissance des technologies de l'information et des télécommunications, l'émergence de l'informatique ubiquitaire et le concept de produit intelligent, les applications doivent souvent fonctionner dans des systèmes ouverts, c'est à dire, des systèmes intelligents où l'ensemble des entités concernées peuvent évoluer et s'adapter dans le temps, par exemple, l'intégration de la mobilité, l'émergence de l'informatique mobile et l'informatique ubiquitaire, l'accès à l'information multi-source (Web, informations structurées et non structurées,..). Les agents sont considérés comme une technologie prometteuse pour répondre à ces défis. Parmi les motivations, nous pouvons citer : les limites du raisonnement centralisé, la distribution physique, fonctionnelle, naturelle (réseau de transport), les problèmes complexes, les systèmes multi-experts, l'aspect dynamique, les problèmes d'interopérabilité, de routage, de saturation, les données hétérogènes et volumineuses, la simulation de phénomènes complexes, etc.

L'importance grandissante des systèmes multi-agents est liée au besoin croissant de coordonner des opérations distribuées, de simuler des systèmes toujours plus complexes de façon décentralisée, d'accompagner le développement de l'infrastructure de communication, de modéliser et réaliser des systèmes à un niveau d'abstraction élevé.

Par leurs capacités d'auto-organisation et d'adaptation, les agents sont aptes à fonctionner dans un environnement à très forte dynamique et à faire face à des imprévus. Ils sont adaptés pour résoudre des problèmes complexes et distribués pour lesquels un contrôle global est impossible à mettre en œuvre. Avec l'essor des nouvelles technologies comme

l'Internet et l'évolution des réseaux de machines, les multi-agents apportent des solutions aux problèmes de conception de logiciels adaptés à des applications réparties de grande complexité. Le développement de plusieurs applications a montré qu'après la définition des composants du système que sont les agents, il faut les doter d'aptitude pour décider de leurs interactions. Ainsi, le concepteur de l'application implémente les agents et ensuite le système en cours de fonctionnement se configure de manière automatique par auto-organisation sans l'intervention du concepteur.

Le point clé des systèmes multi-agents réside dans la formalisation de la coordination, la perception et le contrôle [Weiss et Dillebourg 1999]:

- La décision : quels sont les mécanismes de décision d'un agent ? Quelle est la relation entre les perceptions, les représentations et les actions à entreprendre ? Comment décomposer les buts et les tâches ? Comment construire les représentations ?
- Le contrôle : quelles sont les relations entre les agents ? Comment sont-elles coordonnées ? Cette coordination est une coopération ou une négociation.
- La communication : quels types de message s'envoient-ils ? A quelle syntaxe obéissent ces messages ? quel protocole est adopté par les agents.

Les systèmes multi-agents ont des applications dans le domaine de l'intelligence artificielle où ils permettent de réduire la complexité de la résolution d'un problème en divisant le savoir nécessaire en sous-ensembles, en associant un agent intelligent indépendant à chacun de ces sous-ensembles et en coordonnant l'activité entre eux [Ferber, 1995]. On parle ainsi d'intelligence artificielle distribuée.

6.2. Agent et systèmes multi-agents

Le paradigme agent constitue une nouvelle vision de développement des systèmes dans laquelle ces derniers peuvent être décomposés en sous-composants autonomes.

Dans la littérature, nous avons relevé différentes définitions qui varient selon le contexte et la nature de l'application pour laquelle il été conçu. Il est extrêmement difficile de donner une définition du terme d'agent car même celle de la notion d'agent n'est ni unique ni claire. Une définition acceptée à l'unanimité n'existe pas, mais nous citons les plus courantes et qui semblent couvrir les caractéristiques des agents que nous allons présentés.

Selon les définitions de [Jennings et al., 1998] et [Jennings et al., 1998+] :"Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs (buts) pour lesquels il a été conçu".

Selon la définition dans [Shoham 1993] :"Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent".

Et selon la définition danse [Ferber, 1995] :"Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents".

Un agent n'est pas seul dans son environnement, il y a d'autres agents présents autour de lui et au sein d'un système qui peut être caractérisé par des buts à atteindre, des plans à suivre, et des tâches à remplir vis-à-vis d'autres agents.

Un système multi-agents est donc un système composé d'agents autonomes ayant pour but de coopérer, interagir et communiquer afin d'atteindre un objectif collectif. Des enjeux sociaux, tels que la coopération, la communication, la coordination, la compétition, etc. entre les agents caractérisent les systèmes multi-agents.

6.2.1. Caractéristiques

Selon les définitions déjà présentées pour la notion d'agent, nous pouvons identifier les caractéristiques suivantes :

- **Situation** : un agent est situé dans un environnement, sur le quel il peut agir à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement.
- **Autonome** : un agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne. On peut même dire que l'agent n'est pas guidé par l'extérieur mais par ses tendances [Ferber, 1995].
- **Flexible** : un agent flexible est un agent qui est capable de répondre à temps aux changements effectués par son environnement. Il n'est pas réactif, il doit réagir selon des objectifs et il peut prendre des initiatives. Aussi l'agent flexible est capable d'interagir avec les autres agents intelligents et humains pour qu'il puisse atteindre ses propres objectifs et aider les autres dans leurs activités.

- **Communication** : un agent est en interaction avec un ou plusieurs agents. La communication n'est qu'un des modes principaux d'interaction existant entre les agents. Il existe d'autres formes telles que la négociation, la coopération et la coordination.

D'autres caractéristiques sont aussi liées à la notion d'agent, tels que la mobilité, l'apprentissage, l'aspect asynchrone et l'auto-déclenchement et la localité.

6.2.2. Types d'agent

Un agent est considéré comme une entité reliant ses perceptions à ses actions, c'est à dire, la manière dont les perceptions sont liées aux actions. Cette définition distingue différentes architectures d'agents. On distingue traditionnellement deux types d'agents :

- **Agent réactif** : Il ne possède pas d'une représentation complète de son environnement et n'est pas capable de tenir compte de ses actions passées. Il ne dispose ni de mécanismes de planification ou de délibération ni de raisonnement pour agir, mais seulement de mécanismes de réaction aux événements. Il ne fait que réagir aux changements qui surviennent dans l'environnement. Il se caractérise d'un comportement simple de type réflexe qualifié aussi de biologique. C'est comme une manière d'agir chez l'humain, quand il s'agit de réagir immédiatement sans penser.
- **Agent cognitif** : Contrairement à l'agent réactif, l'agent cognitif est un agent intelligent, doté d'une représentation du monde à partir de laquelle il est capable de formuler des raisonnements. Il est capable de résoudre certains problèmes par lui-même à l'aide des objectifs et des plans. Il est doté d'une base de connaissance comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de ses tâches et à la gestion des interactions avec les autres agents. Les agents cognitifs sont dans la plupart du temps intentionnels, c'est-à-dire qu'ils ont des buts fixés qu'ils tentent d'accomplir. Il se caractérise d'un comportement intelligent qualifié de social. L'une des architectures cognitives les plus connues est l'architecture BDI pour Belief (*Croyance*), Desire (*Désir*), Intention (*Intention*).

Ce qui fait la richesse de la technologie agent, ce sont ses propriétés d'autonomie, de flexibilité, de sociabilité, ce qui distingue complètement les systèmes multi-agents de systèmes conventionnels comme les systèmes distribués, les systèmes orientés objets et les systèmes experts.

6.2.3. Spécification d'un agent

On peut relever cinq problématiques principales [Ferber, 1995] lors de la spécification d'un système multi-agents :

- La problématique de l'action : comment un ensemble d'agents peut agir de manière simultanée dans un environnement partagé et réciproquement comment cet environnement interagit avec les agents ? Les questions sous-jacentes sont entre autres celles de la représentation de l'environnement par les agents, de la collaboration entre agents et de la planification multi-agent.
- La problématique de l'agent et de sa relation au sein de la société, qui est représentée par le modèle cognitif dont dispose l'agent. L'individu d'une société multi-agents doit être capable de mettre en œuvre les actions qui répondent au mieux à ses objectifs. Cette capacité de décision est liée à un "état mental" qui reflète les perceptions, les représentations, les croyances et ses désirs.
- La problématique de la nature des interactions, comme source de possibilités d'une part, et de contraintes d'autre part. La problématique de l'interaction s'intéresse aux moyens de l'interaction (quel langage ? quel support ?), à l'analyse et la conception des formes d'interactions entre agents. Les notions de collaboration et coopération (en considérant que la coopération est collaboration + coordination d'actions + résolution de conflits) sont ici centrales.

Nous pouvons évoquer ensuite la problématique de l'adaptation en termes d'individualité ou d'apprentissage, d'une part, et d'adaptation collective ou évolution, d'autre part. Et enfin, la problématique de la mise en œuvre.

De ces problématiques, nous pouvons déduire les principales caractéristiques à prendre en compte lors de la spécification d'un agent :

- Définition d'une base de connaissances sur l'environnement et sur les autres agents.
- Modélisation de la capacité de raisonnement et de la réaction aux aléas.
- Accointances.
- Apprentissage.
- Position sociale? (hybride, rationnel, proactif, situé,…)

6.2.4. Architecture des agents

En prenant en compte les cinq problématiques précédentes, nous pouvons décrire quelques éléments de l'architecture d'un système multi-agents. L'architecture d'un agent est une description de son organisation interne : ses données et ses connaissances, les opérations qui peuvent être effectuées sur ses composantes et le flux de contrôle des opérations. Le choix d'une architecture ou d'une autre est, bien sûr, lié à la décision du concepteur sur la façon de bâtir un agent.

6.2.5. Rôles d'agent

La spécification fonctionnelle d'un agent et ses interactions dépendent de son rôle (ses rôles). Différents rôles peuvent être attribués à un agent parmi lesquels celui de :

- Médiateur
- Décideur
- Fournisseur
- Exécutant
- Agents d'information/Internet,
    - gestionnaire de courrier, secrétaire virtuelle, moteur de recherche
- Agents de détection d'intrusion
- Agents de base de données
    - répartition, collecte
- Agents de datamining
- Agents de commerce électronique
- Planificateur
- Ordonnanceur

6.2.6. Interactions

Selon [Ferber, 1995] : "un agent sans interaction avec d'autres agents n'est plus qu'une entité isolée, ce n'est qu'un système de traitement d'information, dépourvu de caractéristiques adaptatives".

Une interaction est la mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. L'interaction entre agents peut être de différents modes : compétition, coordination ou coopération.

Compétition : en état de compétition, les agents doivent pouvoir communiquer entre eux dans le but de maximiser leur propre satisfaction, surtout quand il s'agit d'acquérir la même ressource. Dans une telle situation, l'interaction n'est plus une communication mais devient une négociation visant à résoudre un conflit jusqu'à ce qu'ils arrivent à un accord ou qu'ils se rendent compte qu'un accord est impossible. Généralement, les négociations se terminent par la satisfaction de l'un des buts des agents et la non-satisfaction chez d'autres agents.

Coopération : contrairement à l'état de compétition, les agents en coopération ne cherchent pas seulement à maximiser leur propre satisfaction mais de travailler ensemble afin de résoudre un problème commun. Généralement, un agent doit coopérer avec d'autres agents du fait qu'il n'est pas capable d'accomplir une tâche tout seul ou que les autres agents sont plus efficaces. Leur principal objectif est la réussite du groupe. L'intérêt de la communication est d'améliorer la performance du groupe, échanger des informations sur l'environnement ou bien se communiquer leurs buts pour que les agents puissent avoir une idée de ce que les autres font lorsqu'ils ont les mêmes buts ou buts compatibles mais il y a insuffisance de ressources ou de compétences.

Coordination (cas particulier de coopération : insuffisance de ressources et de compétences) : Les agents en coordination sont des agents totalement coopératifs qui peuvent délaisser leurs buts pour répondre aux besoins d'autres agents afin d'assurer une meilleure coordination entre eux. L'objectif principal de cette coordination est de maintenir la cohérence de la société d'agents : c'est le rôle de l'agent superviseur, qui détient des informations de haut niveau afin de créer des plans d'actions et assigner les tâches aux autres agents en vue d'une meilleure coordination.

6.2.7. Spécification d'un SMA

La spécification d'un SMA consiste en une spécification fonctionnelle et une spécification structurelle. La première définit un ensemble de plans organisés selon des buts. Tandis que la deuxième définit les rôles, les relations entre rôles, l'organisation et les interactions pour structurer un SMA. Les principales questions qui se posent lors de la spécification d'un SMA sont les suivants :

- Au niveau agent? Qui connaît qui? Qui connaît quoi? Qui fait quoi?
- Qui assure la cohérence des interactions (le contrôle)?

- Gestion des conflits entre agents
- La coordination de l'exécution des agents
- Comment éviter les comportements chaotiques
- Définir l'environnement de mise en œuvre.
- Comment prendre en charge les relations sociales

6.3. Une revue de littérature

6.3.1. Méthodologies orientées agent

Plusieurs travaux ont étudié et classifié les méthodologies orientées agent selon différents axes dans le but d'une amélioration ou d'une standardisation. Ces méthodologies sont comparées [Dam et Winikoff, 2003] [strum et shehory, 2003] selon quatre axes : les concepts manipulés, les notations utilisées, le processus de développement et la pragmatique. En ce qui suit nous présentons deux des principales méthodologies orientées agents:

- ADELFE : [Bernon, et al, 2003] (atelier de développement de logiciels à fonctionnalité émergente) est une méthodologie dédiée à des systèmes multi-agents très spécifiques : les systèmes adaptatifs. Ceci implique que certains concepts ne soient pas abordés explicitement.

- Gaia [Wooldridge, et al., 2000] est une approche considérée comme générique, complète et applicable à n'importe quel domaine. Elle prend en considération deux niveaux : un macro-niveau qui modélise une société d'agents et un micro-niveau qui modélise les agents. Elle est basée sur six modèles d'analyse et de conception différents (rôle, interaction, agent, service, organisation et environnemental) [Moraitis et al., 2002].

6.3.2. Langages de modélisation orientés agent

Différents types de langages existent pour une modélisation orientée agent. Il existe des notations informelles basées sur des descriptions faites en langage naturel, des notations semi-formelles simples, faciles à comprendre et efficaces et des langages formels, tel que le langage Z.

Généralement pour modéliser les systèmes multi-agents à l'aide d'UML, deux possibilités d'extensions non exclusives sont possibles, soit en modifiant la notation en créant

des profiles comme dans AOR (Agent-Object-Relationship) [Wagner, 2002] ou en classifiant les concepts par des stéréotypes comme dans AUML et AML. Ces derniers sont détaillés comme suite :

- AUML (Agent UML) : AUML [Bauer, 2001] est une extension de la notation UML qui porte essentiellement sur les protocoles d'interactions entre agents:
- AML (Agent modeling langage) : AML [Cervenka et al., 2005] est une extension d'UML 2.0, c'est un langage semi-formel dédié à la modélisation et la documentation des systèmes multi-agent.
- AORML (Agent Object Relationship Modeling Language):AORML [Wagner, 2002] une autre extension proposée par Wagner et qui est basée sur le concept de profil d'UML pour la modélisation des systèmes multi-agent. Deux sortes de modèles sont proposées : des modèles externes et des modèles internes qui sont le moyen pour définir le comportement interne des agents.

6.3.3. Modélisation des interactions entre agents

La communication entre les agents permet l'échange et l'interprétation des messages d'une part et l'interopérabilité entre les agents d'une autre part. Les langages de communication se concentrent essentiellement sur la manière de décrire totalement des actes de communication d'un point de vue syntaxique et sémantique. Deux langages de communication entre agent existent :

- KQML (Knowledge Query and Manipulation) [Finin et al., 1994], développé pour échanger des informations et des connaissances entre des systèmes à base de connaissances. Il a été ensuite repris pour décrire les messages échangés entre les agents.
- FIPA-ACL (FIPA Agent Communication Language) [FIPA, 1997], proposé dans le cadre d'un travail de standardisation mené au sein l'organisation FIPA (Foundation of Intelligent Physical Agents). Il définit les actions que les agents peuvent faire pour communiquer les uns avec les autres (Extension et reformalisation de KQML).

6.3.4. Les plateformes orientées Agent

Les plateformes orientées agents permettent aux développeurs de concevoir et de réaliser leurs systèmes sans perdre de temps dans la réalisation des fonctions de base pour la définition des agents et leurs interactions. Elles fournissent une couche d'abstraction permettant l'implémentation et le déploiement des concepts des systèmes multi-agents.

Pour assurer une conception uniforme des agents indépendamment d'une plateforme. FIPA a produit les normes qui décrivent comment une plateforme agent devrait être. Parmi les plateformes les plus connues, nous pouvons citer JADE [Bellifemine et al., 2003], JADEX [Pokahr, 2010], MadKit [Ferber et Gutknecht, 2000] etc. La majorité de ces plateformes se distinguent par les types des systèmes visés, par les architectures d'agents supportées (agent collaboratif, agent cognitif, etc.) et le langage de mise en œuvre (généralement le langage java). Ces plateformes sont détaillées comme suite :

- La plateforme JADE (Java Agent DEvelopment framework) [Bellifemine et al., 2003] est une plateforme développée en Java par CSELT (Groupe de recherche de Gruppo Telecom, Italie) pour développer et exécuter des applications distribuées basées sur le concept d'agents et d'agents mobiles. Elle est compatible à la plateforme FIPA. Plusieurs méthodologies telles que Gaia et PASSI prennent JADE comme plateforme cible.

- JADEX [Pokahr, 2010] est une extension de JADE, développée par l'université de Hambourg qui se veut modulaire, compatible avec de nombreux standards et est basée sur une architecture BDI.

- La plateforme MadKit (Multi-Agents Developement kit) [Ferber et Gutknecht, 2000] est basée sur les concepts d'agent, de groupe et de rôle.

6.4. SMA dans la gestion d'une chaine logistique

6.4.1. Présentation

Le fonctionnement d'une chaîne logistique est une partie intégrante des entreprises modernes et son bon fonctionnement est une valeur ajoutée. Actuellement, avec la globalisation et l'émergence de la collaboration entre entreprises, le partage d'informations est devenu incontournable ainsi que le partage d'une partie de processus métiers pour le bon fonctionnement des chaînes d'approvisionnement.

Pour améliorer leur compétitivité, les entreprises cherchent à optimiser leurs processus métiers et augmenter leur productivité et leur capacité d'innovation. Pour cela, souvent elles concentrent leurs efforts sur les métiers et leurs organisations, alors qu'elles doivent s'impliquer dans des collaborations avec leur environnement et leurs partenaires. L'émergence des organisations interentreprises a un intérêt particulier sur les opérations logistiques. La performance d'une chaine logistique repose sur l'optimisation des processus métiers, d'une part, et d'autre part, sur un processus adéquat de coopération et de partage de l'information entre les partenaires. Par conséquent, pour sa performance, la mise en œuvre d'une chaine logistique doit s'appuyer fortement sur une technologie de l'information appropriée. L'optimisation d'une chaine logistique ne peut se concevoir sans une bonne gestion de l'information, mais au delà des systèmes traditionnels qui permettent une gestion automatique des processus métiers, il convient de s'appuyer sur des systèmes intelligents.

6.4.2. Une brève revue de littérature

La collaboration joue un rôle important dans la conception et la mise en œuvre d'une chaîne d'approvisionnement et spécialement celle composée de plusieurs entreprises autonomes. Chan and chan [Chan et Chan, 2006] ont analysé l'effet de la collaboration basée sur le partage d'informations dans des environnements distribués modélisés avec des systèmes multi-agents. L'information peut seulement être échangée à travers la négociation entre les agents en se basant la quantité de livraison et la flexibilité de la date de livraison.

Dans un autre travail, [Verdicchio et Colombetti, 2002] ont montré que le partage d'informations est un facteur critique pour le succès de la gestion des processus métiers. Ils mettent en évidence que la meilleure approche pour le partage d'informations et la collaboration est l'utilisation d'un cadre de développement à base d'agents pour la modélisation de la dynamique et de la structure des chaînes logistiques.

Généralement, les décisions dans une chaîne logistique sont largement améliorées par le partage de l'information et la collaboration. Néanmoins, les partenaires dans cette chaîne sont fréquemment hésitants pour un accès complet à l'intégralité de leurs informations. Ainsi, un mécanisme de prise de décisions basées sur des informations globales sans un accès complet à ces informations est requis dans une chaîne logistique. Les agents mobiles peuvent accomplir cette tâche, car ils peuvent migrer d'une machine à l'autre via le réseau ou communiquer entre eux.

Gupta et al. [Gupta et al., 2001] ont discuté l'apport des agents mobiles et comment ils peuvent servir dans la gestion d'une chaîne logistique. Ainsi, ils ont présenté un système multi-agent d'aide à la décision pour une chaîne logistique (SCADAS).

Allwood et Lee ont proposé l'utilisation des agents pour prendre en compte la compétitivité dans une chaîne logistique : faire des choix entre plusieurs fournisseurs concurrents, établir des ordres préférentiels parmi plusieurs clients, gérer la production et les inventaires et déterminer les prix en se basant sur un comportement concurrentiel [Allwood et Lee, 2005].

Caridi et al. [Caridi et al., 2005] ont mené une étude sur la planification collaborative des prévisions d'approvisionnement pour des partenaires commerciaux faisant partie de la même chaîne logistique et qui souhaitent échanger des informations concernant les ventes et les commandes. Les obstacles qui se posent pour l'implémentation de cette solution montre le besoin d'établir des processus de collaboration avec un outil intelligent pour optimiser la négociation. Pour atteindre cet objectif, deux modèles de système ont été proposés suivant les différentes capacités des agents.

6.5. Les apports des SMA

Face à la montée de la complexité des systèmes informatiques et à leurs exigences en terme de qualité et d'agilité, le paradigme agent trouve son utilité en s'attaquant à la modélisation de ces systèmes. Ce paradigme agent offre des principes à l'aide desquels nous pouvons faire évoluer les modèles des processus métiers pour répondre à une vision réactualisée de l'organisation des activités. En effet, le choix d'une approche multi-agents est justifié par les mécanismes suivants :

- Un SMA distribue les ressources et les capacités de calcul à travers un réseau d'agents interconnectés.
- Un SMA permet l'interconnexion et l'interopérabilité de systèmes hétérogènes.
- Un SMA représente un système en termes d'agents qui interagissent de manière autonome et qui se révèle être un moyen plus naturel pour la répartition des tâches, la planification, les préférences, les environnements ouverts, et ainsi de suite.
- Un SMA perçoit efficacement, filtre et coordonne l'information issue de sources distribués.

- Un SMA offre des solutions dans des situations où l'expertise est géographiquement et temporellement distribuée.
- Un SMA améliore la performance globale du système, en particulier au niveau de l'efficacité de calcul, la fiabilité, l'extensibilité, la robustesse, la maintenabilité, la réactivité, la flexibilité et la réutilisation.

7. Architectures dirigées par les modèles (MDA) : présentation

Le MDA (Model Driven Architecture) est une initiative de l'OMG qui vise à accroître la productivité et la réutilisation du logiciel en se basant sur l'abstraction et la séparation des préoccupations [Liang et Des, 2009]. Par défaut, le MDA spécifie quatre types de modèles pour chaque système correspondant à trois points de vue (vue métier, vue fonctionnelle, vue applicative et vue technique). Ces modèles peuvent être décrits comme des niveaux d'abstraction. A partir de chacun de ces niveaux, plusieurs modèles peuvent être élaborés dont chacun correspond à une vue spécifique du système.

Le principe de base est l'utilisation d'une architecture à quatre niveaux. Le niveau CIM contenant les modèles CIM souvent désignés comme modèles du domaine, car ils utilisent un vocabulaire familier aux experts métier. C'est une représentation exacte de ce que le système doit et devrait faire. Le niveau PIM (Plate-forme Independant Model) décrit les modèles indépendants des plateformes. Ces modèles abstraits contiennent suffisamment d'informations pour conduire à un ou plusieurs modèles PSM (Platform Specific Model). Les artefacts possibles d'un PSM peuvent inclure du code source, des DDL, des fichiers de configuration XML et autres concepts spécifiques à une plateforme cible. L'objectif du MDA vise à améliorer la portabilité par le biais de séparation des architectures logique et spécifique. Les PIMs décrivent la structure et le fonctionnement d'un système et non pas sa mise en œuvre.

En plus, le MDA dispose de suffisamment d'outils permettant de définir des transformations automatiques entre des modèles de même niveau ou de niveaux différents : CIM-CIM, CIM-PIM, PIM-PIM, PIM-PSM et PSM-code. Ceci faciliterait le développement d'un système par abstractions successives et simplifie sa mise en œuvre à travers une variété de plateformes cibles.

7.1. Pourquoi adopter le MDA?

Un modèle est une abstraction d'un système ou d'une partie de celui-ci. Selon le type du modèle, il représente soit une vue partielle ou simplifiée ou une vue détaillée et complète du système. Au niveau génie logiciel, la modélisation a une longue et riche histoire. Les concepteurs utilisent souvent des modèles pour le développement et la validation de leurs projets. Ces modèles sont normalement des schémas simples qui ne contiennent pas toutes les informations pertinentes nécessaires à la bonne mise en œuvre du système. En fonction des besoins et à des niveaux différents, une description plus ou moins détaillée du système est donnée, donc des modèles plus ou moins spécialisés. Aujourd'hui, la plupart des modèles couramment utilisés sont des modèles à base du langage UML. Généralement le langage UML peut être utilisé pour définir, des ébauches de systèmes, des modèles conceptuels ou comme une base pour la programmation. Cette dernière possibilité ne cesse de croitre grâce à au principe du MDA.

Aujourd'hui, un grand nombre de développeurs utilisent le langage UML pour la description et la modélisation des systèmes logiciels qu'ils conçoivent. Il constitue un outil efficace pour la communication entre les concepteurs surtout si les systèmes à développer sont complexes et impliquent une équipe importante dans la conception.

7.2. Le MDA : base d'industrialisation du logiciel ?

Les exigences d'un système sont souvent décrites à l'aide de scénarios textuels, les modèles sont souvent représentés par des schémas annotés, les programmes sont presque toujours du code source dans un langage de programmation et les rapports de bugs sont archivés dans des bases de données. Mais aucune des relations entre ces parties du logiciel n'est généralement archivée. Ceci enlève la possibilité de l'automatisation de certaines tâches et ne fournit pas de cohérence entre les différents aspects du système. Cette situation est problématique notamment en cas de retro-ingénierie ou réutilisation. C'est là que le paradigme MDA entre en jeu. C'est une approche de développement de logiciels qui utilise une source unique qui contient toutes ces informations. Les principaux objectifs sont la simplification et la standardisation des activités incluses dans le cycle de vie d'un projet logiciel. Le MDA définit des normes pour le développement dirigé par les modèles.

7.3. Mise en œuvre du MDA

Pour expliquer la fonctionnalité du MDA, nous devons expliquer une partie de la terminologie de base. Le principe fondamental est la hiérarchisation des modèles en quatre

niveaux, le modèle des besoins ou d'analyse, le modèle de conception PIM, le modèle spécifique PSM et le modèle correspondant au code source.

A ceci, il faut rajouter la définition des règles de transformation permettant le passage d'un modèle à un autre moyennant des transformations automatiques ou manuelles.

7.3.1. Transformation de modèles

La transformation de modèles est le processus de génération d'un modèle cible à partir d'un modèle source du même système.

Il existe plusieurs façons pour la spécification et l'élaboration des règles de transformations, nous détaillons en bref trois approches permettant de spécifier les règles de correspondances entre les concepts de différents méta-modèles. Différentes approches de transformations de modèles existent, parmi les quelles :

Approche par programmation : Son principe est simple, il suffit d''utiliser les langages de programmation orientés objet et des interfaces de manipulation de modèles. La programmation d'une transformation est une application permettant la manipulation. Cette approche est la plus utilisée car elle est très puissante et fortement outillée. Certains outils (IBM Rational Software Modeler [Sebastiani et al., 2004] et Softeam MDA Modeler [Gomez et Fuentes, 2002]) utilisent cette approche en offrant plusieurs outils et Frameworks facilitant la mise en œuvre des transformations.

Approche par templates : Son principe consiste à définir des modèles cibles paramétrés ou des modèles templates. Les paramètres définis seront remplacés par des informations contenues dans les modèles sources. La définition des modèles templates se fait par des langages particuliers : langage graphique spécifique au méta-modèle cible (Les templates UML) ou un langage textuel indépendant des méta-modèles (Langages fondés sur XMI). De tels langages sont en cours d'élaboration et n'ont pas encore la maturité des langages de programmation orientés objet utilisés dans la première approche.

Approche par modélisation : Son principe est de modéliser les transformations de modèles afin de les rendre pérennes et productives. L'idée est d'appliquer les concepts de l'ingénierie des modèles aux transformations des modèles elles-mêmes. La réalisation de cette approche est basée sur le standard MOF2.0 QVT [Caire et al., 2001] (Query, View,

Transformation) qui a pour objectif de définir des méta-modèles permettant l'élaboration et la structuration des modèles de transformation.

7.3.2. Les standards dédiés

Les standards et les langages conçus spécifiquement pour réaliser des transformations de modèles sont plus ou moins intégrés dans les environnements de développement. Parmi ces outils, nous pouvons citer Mia-Transformation de Mia-Software [THIEFAINE et al., 2003], et le plug-in ADT qui implémente le langage ATL [Guessoum et Briot, 1999] du groupe ATLAS de l'INRIA-LINA.

7.3.2.1. Le standard MOF2.0 QVT

L'approche par modélisation est basée sur le standard MOF2.0 (Query/View/Transformation) QVT [Caire et al., 2001] qui vise à définir le méta-modèle permettant le développement et la structuration des modèles de transformation. Le modèle de transformation est un composant essentiel de l'ingénierie dirigée par les modèles. La définition de ce modèle est structurée selon le méta-modèle QVT MOF2.0 et explicite les règles structurelles de correspondance entre le méta-modèle source et le méta-modèle cible d'une transformation. Les méta-modèles source et cible ainsi que le méta-modèle QVT sont conformes au méta-modèle MOF. Le modèle de transformation correspond à la syntaxe abstraite du langage de transformation. La figure suivante illustre l'approche par modélisation MOF2.0 QVT.

7.3.2.2. Le langage ATL (ATLAS Transformation Language)

ATL [Guessoum et Briot, 1999] est un langage de transformation de modèles, défini pour être utilisé dans le cadre du MDA et est spécifié à la fois comme un méta-modèle et comme une syntaxe textuelle. Ce langage est basé sur une programmation hybride : déclarative et impérative. Les transformations peuvent être définies selon le standard MOF1.4 ou le Framework EMF [Giorgini et al., 2005] à base de méta-modèles et par la spécification des règles qui définissent comment les concepts du modèle source seront transcrits dans les concepts du modèle cible.

7.4. Les apports du MDA

Les principaux avantages de l'utilisation du MDA sont:

- La portabilité, la réutilisation croissante, la réduction du coût et de la complexité du développement d'applications et de gestion de la maintenant.
- Interopérabilité des plate-formes
- Indépendance de la plateforme, ce qui réduit considérablement le temps, le coût et la complexité associés avec des applications re-ciblage pour les différentes plates-formes, y compris celles qui restent à introduire.
- Productivité, en permettant aux développeurs, concepteurs et les administrateurs système à utiliser des langages et des concepts facilitant le développement.

Ceci réduit le coût et le temps tout au long du cycle de vie des applications, permet l'amélioration de la qualité des applications et l'adaptation aux nouvelles technologies émergentes mais ce n'est pas toujours le cas.

7.5. Inconvénients du MDA

Même si l'approche MDA paraît séduisante par ses apports dans un processus de développement, elle présente aussi des inconvénients. Certaines remises en question ont été adressées :

- chaque développeur peut utiliser son propre scénario du MDA, en adaptant le processus de développement selon les besoins visés, ce qui risque de provoquer une perte des principes ainsi que les avantages de cette architecture;
- le va-et-vient s'intègre difficilement dans un processus MDA. Chaque nouvelle fonctionnalité ou ajout nécessite une reprise du modèle, puis une génération et un risque de perte du code manuel. De plus, les étapes « modélisation, génération, intégration » sont souvent très coûteuses;
- la synchronisation entre les différents modèles devient difficile à maintenir au fil des changements d'un modèle à un autre;
- la génération du code ne se fait pas à 100 %, on se retrouve donc à mélanger du code source généré et du code source manuel. Ce procédé est souvent source d'erreurs, de bogues et donc de perte de temps.

7.6. Limites du MDA

La principale limite du MDA est qu'il n'est pas assez concis au niveau analyse du domaine. Il a été créé dans un but de génération de code et non dans un but d'alignement

opérationnel (métier/TI). Nous constatons que le MDA ne décrit pas formellement comment les modèles d'analyse sont définis au niveau CIM et comment ils doivent être manipulés et associés aux modèles de conception PIM. De nombreux travaux portant sur le MDA sont basés sur les niveaux PIM et PSM, [Revault, 1995] [Jarraya, 2006] sans prendre véritablement en compte le domaine métier.

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base que nous avons utilisée pour la consolidation d'une solution pour la gestion des risques. En ce sens, nous avons mis le point sur la traçabilité et ses notions de base. En suite, nous avons présenté les fonctionnalités du système de traçabilité GOST et son utilisation pour la gestion des risques. D'autre part, nous avons présenté le concept du produit intelligent et les travaux qui ont abordé ce concept d'un point de vu théorique par la proposition d'un modèle conceptuel ou d'un point de vu pratique par la mise en œuvre d'un produit intelligent.

En outre, nous avons présenté les principaux outils de modélisation et particulièrement les langages et les notations dédiés pour la représentation des processus métiers. De surcroît, nous avons abordé les concepts de bases liés à l'utilisation des systèmes multi-agent et des architectures dirigées par les modèles.

En ce qui suit, nous mettons le point sur l'utilisation de l'ensemble des concepts présentés dans ce chapitre pour la mise en ouvre d'une solution de gestion des risques liés à l'acheminement des conteneurs par les TC.

Deuxième partie : Contributions

Chapitre I

Urbanisation du système de traçabilité GOST

Sommaire

1. Introduction

Le processus de consolidation des marchandises dans des conteneurs et leur acheminement à destination implique la participation de plusieurs acteurs intermédiaires. Ce processus est assujetti à des risques qui peuvent survenir à tout instant. De ce fait, le développement des outils pour prévenir ces risques et identifier les responsabilités des acteurs de la chaîne logistique est nécessaire. Pour pallier ces problèmes, nous proposons l'urbanisation du système de traçabilité GOST afin de l'aligner sur les nouveaux besoins pour la gestion des risques.

Ce chapitre présente l'approche de développement que nous avons adoptée pour l'urbanisation du système de traçabilité GOST, basée sur l'utilisation des services web, le concept du produit intelligent et les architectures dirigées par les modèles. En outre, il met en évidence la mise en œuvre de cette approche pour une adaptation du système de traçabilité GOST d'une manière appropriée afin de répondre aux nouveaux besoins liés à la gestion des risques.

2. Motivations

Souvent au niveau de la chaîne logistique plusieurs aléas peuvent survenir, en particulier durant le transport des conteneurs. La complexité de la sécurisation des conteneurs ne cesse de croitre à cause de l'hétérogénéité et la distribution des acteurs qui participent dans le transport des marchandises. Cette situation est aggravée par l'absence d'un acteur pivot qui contrôle le transport des conteneurs de bout en bout. L'usage d'un système de traçabilité pour le suivi des conteneurs s'avère une solution intéressante pour l'amélioration de la sécurité du transport des marchandises. D'une part, la traçabilité permettrait l'établissement d'un processus pour la prévention des situations à risques. D'autre part, elle faciliterait l'identification des causes d'occurrence d'un incident par la mise à disponibilité des informations pertinentes. La mise en œuvre de cette solution doit tenir en compte de la spécificité de l'organisation, de l'hétérogénéité et de la dynamique des acteurs d'une chaîne logistique. Ceci permettrait le développement d'une solution de traçabilité adéquate à ce contexte distribué et évolutif.

L'organisation réticulaire des acteurs d'une chaîne logistique et leurs interventions dans plusieurs réseaux entravent le processus de la traçabilité. D'une part, à cause de la réticence de ces acteurs à partager des informations qui détaillent leurs activités internes en

raison du risque de divulgation de ces informations aux concurrents. D'autre part, à cause de l'hétérogénéité des systèmes informatiques utilisés et du coût d'adaptation de ces derniers pour répondre aux besoins de la traçabilité. En dépit de ces contraintes, les acteurs d'une chaîne logistique doivent adopter une solution de traçabilité afin de s'aligner sur les nouvelles règlementations internationales qui imposent la traçabilité de leurs marchandises, notamment dans le cas du transport des matières dangereuses. De plus, la capacité d'un acteur à tracer ses conteneurs est considérée comme un facteur de compétitivité grâce à l'assurance qu'il présente aux clients.

En outre, l'urbanisation d'un système de traçabilité est aussi motivée par la contribution à un besoin lié à l'application de l'Initiative de la Sécurité des Conteneurs (ISC) [Papa, 2012]. Cette initiative a été proposée à la suite de l'émergence des activités frauduleuses qui exploitent le transport multimodal des conteneurs pour le trafic de marchandises illégales. Pour remédier à ce problème, l'ISC impose l'inspection des conteneurs suspects au niveau des ports maritimes avant leurs expéditions. Ce pendant, le manque de ressources nécessaires pour l'inspection impose l'application d'un processus de ciblage des conteneurs suspect. La pertinence de cette décision est étroitement liée à la disponibilité et la véracité des informations de la déclaration d'un conteneur auprès de la douane. Ce problème peut être pallié par l'analyse des données de la traçabilité qui assure la collecte des informations liées au cycle de vie du conteneur.

3. Aperçu de l'approche

La conception et l'implémentation d'un système de traçabilité dépendent principalement de la finalité de son utilisation. Un système de traçabilité peut être conçu pour répondre à une nouvelle réglementation qui impose l'intégration de cet outil à la sécurisation du transport des marchandises afin de limiter les aléas qui surviennent durant le transport et pour déterminer la responsabilité des acteurs d'une chaîne logistique. Par ailleurs, le système de traçabilité est outil efficace pour améliorer la visibilité des flux d'une chaîne logistique, ce qui permet d'optimiser son fonctionnement et en conséquence améliorer sa performance.

Les besoins qui ont conduit au développement d'un système évoluent dans le temps, ce qui engendre des adaptations fréquentes afin de garantir sa pérennité. Ces modifications doivent tenir compte des concepts de base d'un système de traçabilité qui se manifestent dans l'adaptation des processus métier du système de façon à définir des scénarios de

fonctionnement qui permettent d'atteindre les nouveaux objectifs du système de traçabilité en termes d'amélioration de la gestion des risques. L'exécution de ces nouveaux processus métier doit être supportée par la modification de la couche applicative qui décrit le nouveau mode de fonctionnement du système de traçabilité urbanisé et la modification de la couche technique pour intégrer des nouveaux outils qui supportent son fonctionnement. Ceci ne peut être intègre sans la spécification d'une démarche qui permet de mener l'adaptation des couches que nous avons citées auparavant d'une manière adéquate.

Afin de répondre aux besoins d'alignement du système de traçabilité GOST sur les besoins émergents de gestion des risques liés au transport des conteneurs et en particulier le transport des matières dangereuses, nous proposons une démarche pour urbaniser le système de traçabilité GOST pour répondre aux besoins que nous avons cités auparavant. Cette démarche est axée sur les architectures dirigées par les modèles, les architectures orientées services et le concept du produit intelligent.

3.1. Urbanisation des systèmes

3.1.1. Présentation générale

L'urbanisation du système d'information est un concept fondé sur des techniques et la terminologie du domaine de l'urbanisme des villes. Son but est d'adapter un système tout en exploitant judicieusement les avancées technologiques, en limitant le coût des modifications et en maintenant un fonctionnement normal du système durant l'implémentation des modifications [Longépé, 2006]. Par ailleurs, l'atout principal d'adopter une approche d'urbanisation se manifeste dans la valorisation des logiciels utilisées par entreprise afin de les faire évoluer pour répondre aux nouvelles attentes en termes de besoins métier et technique. En ce sens, l'urbanisation des systèmes consiste en une démarche pour piloter la transformation d'un système source en un système cible qui répond aux besoins de l'entreprise, d'une manière continue, tout en favorisant la réutilisation des composants existants et en limitant le coût de cette transformation.

Les travaux de développement d'une solution de traçabilité ont pour objectif l'implémentation d'un système de traçabilité qui assure principalement la localisation des marchandises durant le transport. Or, il est judicieux de considérer le développement d'une solution de traçabilité comme un outil qui servira l'entreprise d'atteindre d'autres objectifs. L'omission de cette vision implique une adaptation continue de la solution de la traçabilité

afin de répondre aux nouveaux besoins de l'organisation qui exploite le système. En conséquence, il est primordial de mener une analyse du système à urbaniser et bien déterminer les objectifs à atteindre de façon à cerner les raisons qui impliquent l'urbanisation du système de traçabilité GOST.

À cet égard, l'urbanisation de GOST vise à améliorer la sécurité du transport des conteneurs pour s'aligner sur les nouvelles réglementations qui imposent le suivi des convois de marchandises dangereuses. Pour déterminer ces besoins, nous proposons les questions suivantes :

- Comment GOST peut contribuer à l'amélioration de la sécurité du transport des conteneurs ?
- Que sont les fonctionnalités à développer pour s'aligner sur exigences de l'initiative de la sécurité des conteneurs ?
- Quelles sont les lacunes du mode de fonctionnement du système de traçabilité GOST et comment remédier à ces problèmes ?
- Déterminer les adaptations à réaliser pour atteindre le système cible en se basant sur un processus efficient ?

Les réponses de ces questions permettent de justifier l'urbanisation du système de traçabilité GOST. Par ailleurs, elles permettent de déduire les besoins concrets de ce système et les fonctions à développer pour les atteindre.

3.1.2. Les concepts liés à l'urbanisation

Dieudonné [Dieudonné, 2008] a déterminé un ensemble de concepts liés à l'urbanisation. Ces derniers sont :

- La spécification d'un cadre d'analyse pour l'approche d'urbanisation des systèmes d'information qui couvre les vues métier, fonctionnelle et informatique d'un système. La première vue aborde la spécification des processus métier et des événements pour le captage de la logique métier de l'entreprise. La deuxième détermine les fonctions du système et les traitements qui composent les processus métiers. La troisième englobe l'ensemble des applications et de l'infrastructure technique pour automatiser l'exécution des processus métier.

- La cartographie est l'outil de base de l'urbanisation d'un système. Il permet la spécification du système source, le système cible et le plan d'occupation des sols. Ce dernier consiste en un ensemble de règles qui déterminent des bonnes pratiques à respecter durant l'urbanisation d'un système. Longépé [Longépé, 2006] a déterminé quatre types de cartographie et qui sont la cartographie métier, fonctionnelle, applicative et technique. Par ailleurs, il a précisé que la cartographie d'un système permet, dans un premier temps, de faire l'inventaire les composants du système existant, dans un deuxième temps, elle facilite la simulation des différents scénarios d'urbanisation pour atteindre le système cible.
- Il existe trois types d'urbanisme ; le premier est l'urbanisme cadastral qui se focalise sur l'amélioration de la visibilité du système à urbaniser par l'inventaire des ces composants afin de les réutiliser. Le deuxième est l'urbanisme prospectif qui met le point sur la spécification des systèmes cibles et les scénarios pour les atteindre. Le troisième est l'urbanisme et projets. Il se focalise sur la validation des projets et des scénarios d'adaptation d'un système par rapport aux contraintes d'urbanisme spécifiées dans le plan d'occupation des sols.

3.2. Les architectures orientées services, les services-web et l'urbanisation

L'objectif de l'urbanisation d'un système d'information est de l'adapter afin de supporter les entreprises dans la modification de leurs stratégies pour tirer profit des opportunités et anticiper les actions des concurrents. Ces modifications sont généralement imposées par le changement de la stratégie de l'entreprise, la modification de ses processus métier ou le changement de son périmètre d'action. Elles sont fréquentes et couteuses en temps et en ressources. À cet égard, il faut utiliser des technologies qui facilitent la réutilisation des applications et supporte l'intégration des solutions existantes proposées par des tiers. De plus, il faut tenir compte des futures adaptations et adopter une structure modulaire caractérisée par un couplage faible entre les modules d'une manière à limiter le périmètre de la modification d'un système.

Les architectures orientées services (SOA) représentent une solution appropriée pour l'urbanisation des systèmes. Ceci est dû à la capacité des SOA à la spécification des applications modulaires basées sur l'intégration des composants existants et l'assurance de leur agencement pour répondre à l'évolution des besoins d'une organisation. Ceci permet une meilleure visibilité des ressources informatiques de l'entreprise et favorise leur réutilisation

sous forme de service modulaire indépendamment déployé pour la composition du système urbanisé. Bien que le SOA représente une architecture adéquate pour la structuration d'un système distribué, elle nécessite une technologie qui permet l'implémentation de ses services et qui garantit leur interopérabilité. À cet égard, Oliveira et *al.* [Oliveira et al., 2012] précise que la combinaison des SOA et des services-web (SW) est la base des nouvelles technologies d'intégration et développement des systèmes distribués.

Selon Zhao et cheng. [Zhao et cheng, 2005], le SW représente un langage neutre et indépendant de la technologie et de la plateforme de son implémentation. Il permet aux décideurs de spécifier des services orientés métiers qui répondent à leurs besoins en se basant sur des standards ouverts. Il consiste aussi en une interface qui décrit des opérations accessibles à travers le réseau et qui peuvent être invoquées par des requêtes XML standardisées. Cette interface masque l'implémentation des SW et permet leur invocation indépendamment de la technologie d'implémentation et de la plateforme de déploiement. Ainsi, les SW permettent une spécification modulaire d'un système et ils sont adéquats pour un processus d'urbanisation rapide basée sur l'intégration des solutions existantes déployées en tant que services.

La combinaison des SW et des architectures orientées services permet de gérer les interactions entre les organisations qui fournissent les services et les entités qui les utilisent et de s'assurer de leur bon fonctionnement. De plus, cette combinaison permet une mutualisation de l'exploitation des services avec d'autres collaborateurs et par conséquent elle supporte l'établissement de processus métier qui dépasse le périmètre d'intervention de l'entreprise.

L'exploitation des SW pour l'urbanisation des systèmes permet de s'affranchir des problèmes liés à la compatibilité des composants réutilisés. En outre, les SW sont flexibles et peuvent être orchestrés pour déployer un nouveau SW composite. L'invocation de ce SW entraine une invocation des SW élémentaires qui le composent suivant un ordre bien défini. Pour ce faire, cette opération est supportée par des outils tels que le bus des services de l'entreprise (ESB – Enterprise Services Bus) et le langage d'exécution des processus métier (BPEL – Business Process Execution Language).

3.3. Les architectures dirigées par les modèles et l'urbanisation

Le challenge principal rencontré durant la mise en œuvre de la démarche d'urbanisation se manifeste dans la maîtrise du coût des adaptations du système à réaliser. De

plus, il faut s'assurer de la continuité du système en prenant en considération les anciennes modifications par la réutilisation des composants existants et anticiper les futures modifications du système. Les architectures dirigées par les modèles (MDA) proposent un processus de développement du logiciel basé sur l'utilisation des modèles dans les différentes phases d'analyse, de conception et d'implémentation d'une application. Pour ce faire, les MDA automatisent la transformation de ces modèles pour une génération automatique du code d'implémentation par la spécification des règles de transformation qui permettent de convertir un modèle qui décrit l'aspect fonctionnel de l'application en un modèle spécifique à l'environnement d'implémentation. Ceci contribue à l'accélération du processus de développement et valorise les modèles conceptuels réalisés pour la spécification des besoins fonctionnels.

Les MDA remédient au problème d'interopérabilité des systèmes en facilitant la migration vers d'autres technologies d'implémentation. La spécification du système sous une forme de modèle conceptuel permet de définir des transformations vers plusieurs technologies d'implémentation. Par ailleurs, la mise en œuvre des futures adaptations du système peut être réalisée au niveau des modèles qui seront exploités pour la génération automatique du code d'implémentation des nouvelles fonctions du système. Ainsi, les MDA contribuent à la réduction du temps nécessaire à la maintenance d'une application et garantissent la continuité d'adaptation d'un système par rapport aux modèles réalisés durant la phase de conception.

3.4. Cadre de développement

Nous proposons un cadre de développement structuré en deux étapes principales. La première se focalise sur l'urbanisation de GOST pour pallier les problèmes liés à l'architecture centralisée de ce système et propose une architecture distribuée de ce système en se basant sur les SOA. La deuxième étape consiste en la spécification d'une démarche basée sur les MDA pour la génération automatique du code des SW qui composeront la nouvelle architecture du système de traçabilité GOST.

3.4.1. Démarche d'urbanisation de GOST

Nous proposons l'adaptation du système de traçabilité GOST pour une collecte des données de traçabilité à partir des systèmes d'information appartenant aux acteurs d'une chaîne logistique. Pour ce faire, nous suivrons la démarche d'urbanisation proposée par

[Simonin et al., 2010] pour rendre le système GOST plus apte à servir la gestion des risques. Ce cadre est structuré en quatre vues:

- La vue métier détermine l'objectif de l'urbanisation système de traçabilité GOST.
- La vue fonctionnelle présente les fonctions existantes et détaille les fonctions nécessaires pour atteindre le système cible.
- La vue technique décrit les outils et les technologies utilisées pour développer les nouvelles fonctionnalités.
- La vue applicative établit un lien entre la vue fonctionnelle et la vue technique.

Nous utilisons les quatre vues du cadre d'urbanisation que nous avons présenté ci-dessus pour donner une vue globale des fonctions existantes de GOST et les améliorations à faire pour couvrir les besoins de la gestion des risques.

La satisfaction des besoins inhérents à la traçabilité des conteneurs dans le contexte d'une chaîne logistique est une tâche fastidieuse. En conséquence, nous adoptons une approche structurée en quatre étapes pour atténuer la complexité l'urbanisation de GOST. La figure suivante donne une vue globale de ces étapes :

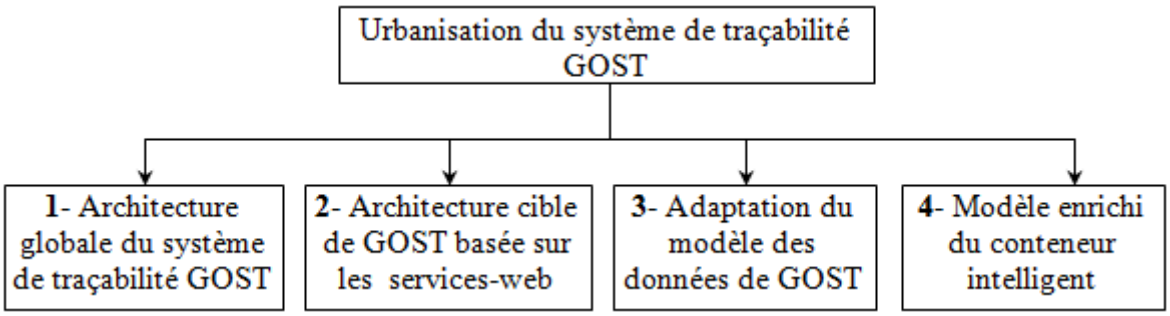

Figure I.1. Les étapes principales du processus d'urbanisation de GOST

La première étape présente la structure actuelle du système de traçabilité GOST et met le point sur les limites de cette architecture. La deuxième étape décrit une nouvelle architecture distribuée pour GOST basée sur les SW. La troisième étape met le point sur la modification du modèle de données de GOST dans le but de supporter la gestion des risques. Dans la dernière étape, nous proposons le concept du conteneur intelligent capable d'invoquer les SW pour la collecte des données de la traçabilité.

3.4.2. Génération du code des services web

Cette approche est basée sur l'utilisation des concepts suivants, les MDA, les SW et le PI. Elle détaille les étapes à suivre à partir de l'analyse du domaine jusqu'à la mise en œuvre de la solution. La figure 2 illustre les principales étapes de cette approche.

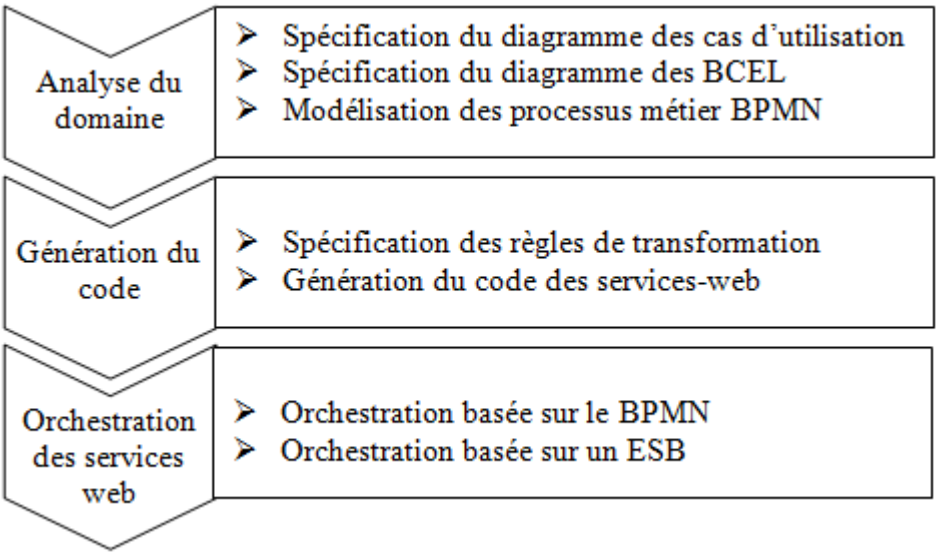

Figure I.2. Les étapes de la génération du code des SW

3.4.2.1. Analyse de domaine

Cette étape met le point sur l'identification des besoins du domaine en précisant les caractéristiques du système à développer et la compréhension de son contexte d'utilisation. Cette analyse facilite l'identification des acteurs impliqués dans le processus du transport des conteneurs et décrit le rôle des parties prenantes qui y interviennent. Dans un premier temps, nous adoptons une approche à bases des cas d'utilisation en nous appuyant sur le diagramme de cas d'utilisation (DCU) d'UML afin d'aboutir à une vue statique des acteurs et des fonctions du système. Dans une deuxième étape, nous utilisons le schéma BEC (Boundary, Entité et de Contrôle) [BEC, 2014]. Ce schéma utilise les besoins fonctionnels fixés par le DCU pour spécifier les classes du système à implémenter. Pour déterminer une vue dynamique des processus métier et modéliser l'ordre d'exécution des tâches identifiées par le DCU, nous utilisons le BPMN.

3.4.2.2. Génération du code

L'étape de génération du code des SW traite des problèmes liés à l'adaptation des systèmes utilisés par les acteurs de la chaîne logistique pour permettre le partage de l'information de traçabilité. Pour ce faire, nous avons opté pour les SW pour la collecte des

informations à partir des systèmes d'informations utilisés par les acteurs de la chaîne logistique. L'objectif de cette étape est de générer automatiquement des SW en se basant sur une approche dirigée par les modèles MDA. La Figure 3 illustre un aperçu global du processus MDA pour la génération automatique des SW.

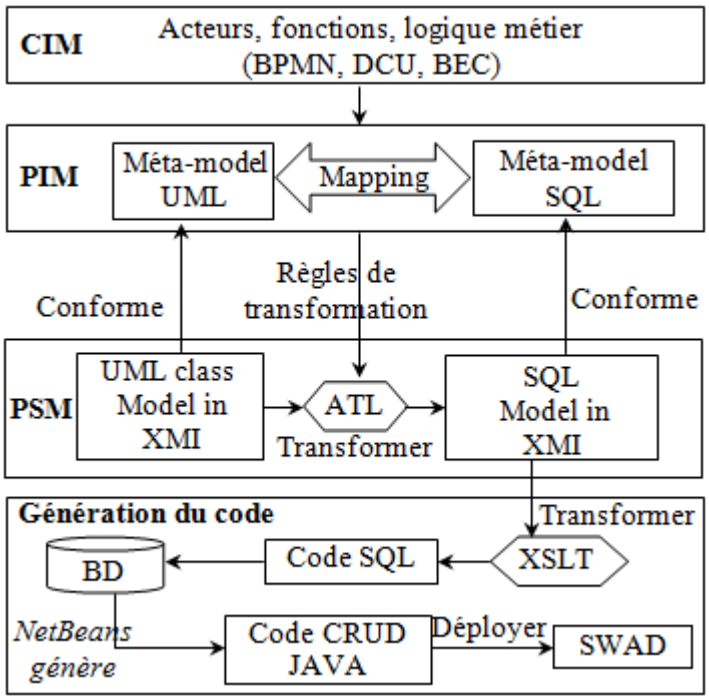

Figure I.3. Processus de génération du code des SW

Le processus MDA commence par la spécification du modèle métier indépendant de l'informatisation (Computation Independent Model - CIM) [EL Fazziki et al., 2012]. Le CIM permet la conduite d'une analyse du domaine pour comprendre la mission du système étudié. La seconde étape de ce processus se focalise sur la spécification du modèle indépendant de la plate-forme (Platform Independent Model - PIM) des modèles source et cible. Ainsi, le PIM spécifie le métamodèle du diagramme de classe UML et du métamodèle du langage de requête structuré (Serveur Query Language - SQL). En outre, le PIM nous permet d'établir un mapping entre les concepts de base de ces deux métamodèles et de s'assurer de la conformité du modèle source et du modèle généré avec leur métamodèle. La troisième étape de ce processus porte sur la spécification des règles de transformation entre les deux métamodèles en utilisant Object Constraints Language (OCL). Les transformations sont effectuées en utilisant l'Atlas Transformation Language (ATL) [El Fazziki et al., 2012].

L'ATL assure la transformation d'un modèle du diagramme de classe exprimé en XMI (XML Metadata Interchange) en un PSM conforme à SQL exprimé aussi en XMI. Le PSM

résultant est transformé en SQL en utilisant le XSLT (eXtensible Stylesheet Language Transformations) [Ming-zhe, 2013] afin de pouvoir déployer une base de données (BD). La dernière étape de ce processus consiste à utiliser l'environnement de développement Netbeans pour la génération du code CRUD (Create, Read, Update, Delete) en JAVA nécessaire pour la manipulation de la BD créée. Les classes de consultation des tables, *classe READ*, sont déployées en tant que SW d'Accès aux données (SWAD).

3.4.2.3. Orchestration des services web

Les technologies d'orchestration des SW sont les plus prometteuses pour garantir l'interopérabilité au niveau des processus de la chaîne logistique [Tewoldeberhan et Janssen, 2008]. L'orchestration des SW est le processus de combinaison de plusieurs services en un service composite pour atteindre un but [Mueller, 2006]. Ainsi, Le but de cette étape est de proposer une solution pour l'orchestration des SW granulaires que nous avons générés dans l'étape précédente. L'orchestration nous permet de générer un nouveau SW composite capable de fournir les informations liées à la traçabilité d'un conteneur et qui sera exploitée par le conteneur intelligent. Nous proposons deux alternatives pour l'orchestration des SW :

- **1ère alternative**: prône l'utilisation du diagramme BPMN que nous avons spécifié dans le CIM. Le BPMN est supporté par le standard Business Process Execution Language (BPEL) qui fournit une description des interactions entre le processus métier et les SW. La séquence d'exécution des activités définit l'ordre d'invocation des SW granulaires pour atteindre l'objectif du processus métier. En conséquence, l'exécution du processus métier est équivalente à l'invocation d'un nouveau SW composite basé sur l'orchestration des SW granulaires interfacés aux activités du processus.
- **2ème alternative** : se base sur la configuration d'un Bus de Service d'Entreprise (ESB - Enterprise Service Bus) pour le déploiement du SW composite par le produit intelligent. Pour ce faire, nous avons opté pour MuleESB qui est une plateforme ouverte de droits. Ce dernier ne se limite pas à l'interfaçage des SW mais il propose d'autres services tels que le transfert de données, le déploiement des services d'accès aux bases de données et le routage intelligent des messages.

4. Mise en œuvre

Dans cette section, nous présentons la mise en œuvre des étapes de la démarche proposée pour l'urbanisation du système de traçabilité GOST.

4.1. Urbanisation

Le système de traçabilité GOST est basé sur une architecture centralisée et utilise un flux poussé pour la collecte des informations de la traçabilité. Ces informations sont enregistrées dans sa base de données et elles sont utilisées pour répondre aux requêtes des utilisateurs (figure 4). Les lacunes de ce mode de fonctionnement se manifestent dans la collecte massive de données susceptibles d'être inutiles en absence d'un événement qui nécessite l'analyse des données amassées. De plus, la centralisation et la confidentialité des informations remettent en question la fiabilité de l'entité qui assure cette tâche. Par ailleurs, ceci est le principal facteur de réticence des acteurs de la chaîne logistique pour partager les informations liées à leurs activités.

En tenant compte des besoins spécifiques pour le déploiement d'une solution de traçabilité adaptée à la structure distribuée et dynamique de la chaîne logistique, nous proposons la conduite d'une urbanisation du système GOST afin de pallier les problèmes liés à l'architecture centralisée du système. De plus, nous abordons aussi la difficulté d'adaptation des systèmes hétérogènes pour le partage des informations de la traçabilité ainsi que les lacunes du flux poussé pour la collecte des informations. Le tableau-1 présente une description succincte des adaptations du système de traçabilité GOST suivant le cadre d'urbanisation que nous avons détaillé auparavant.

Vues	Système existant	Système cible
Métier	- Assurer la traçabilité et le suivi des conteneurs	- Collecter des informations pour la gestion des risques
Fonctionnelle	- Localiser les conteneurs - Vérifier les conditions de transport - Générer des alertes	- Tracer les activités des acteurs de la chaîne logistique - Faciliter la communication avec des systèmes externes
Technique	- Balise GPS, capteurs de température et d'humidité - Base de données pour l'enregistrement des informations	- Utiliser les architectures orientées services - Orchestrations des services web - Modélisation des processus métiers

Applicative	- Enregistrer les données de localisation et les données collectées dans la base de données.	- Utiliser les services web pour communiquer avec les systèmes externes - Exploiter la modélisation des processus métier pour l'orchestration des services web

Tableau IV.1. Les adaptations suivant les vues métier, fonctionnelle, technique et applicative

4.1.1. Architecture globale de GOST

L'architecture de GOST est centralisée et adopte une stratégie push, flux poussé, pour la collecte des informations de la traçabilité. GOST assure l'archivage de ces informations et les exploite pour répondre aux requêtes des utilisateurs. La figure 4 illustre ce mode de fonctionnement :

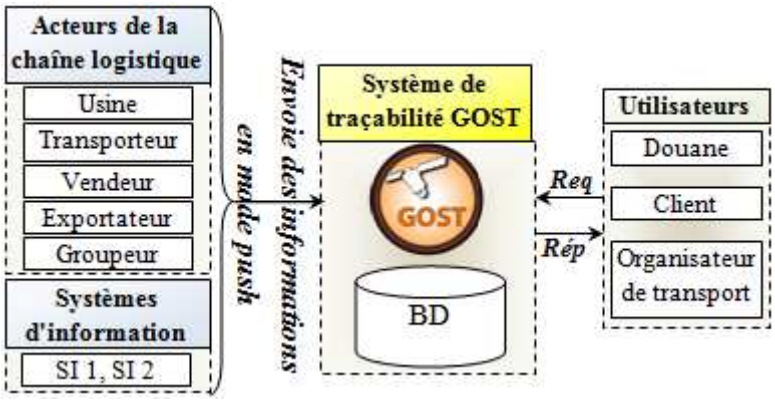

Figure I.4. Architecture existante de GOST

Les lacunes de ce mode de fonctionnement se manifestent dans la collecte massive des informations susceptibles d'être inutiles en absence d'un événement qui nécessite l'analyse des données de la traçabilité. De plus, la centralisation et la confidentialité de ces informations remettent en question la fiabilité de l'entité qui assure cette tâche.

Pour remédier à ces problèmes, nous proposons une SOA du système de traçabilité GOST. Il s'agit d'une architecture distribuée qui réserve une grande partie des traitements au conteneur intelligent. Ce dernier consiste en un conteneur capable de rechercher et communiquer des informations relatives à son cycle de vie. Dès lors, cette nouvelle solution ne communique que les informations d'une seule entité tracée, conteneur, au moment opportun. Par conséquent, l'architecture centralisée de l'ancien système de traçabilité et le mode push d'envoi des informations sont abandonnés pour une structure décentralisée et un mode pull, flux tiré, pour la collecte des informations. La figure suivante illustre la nouvelle architecture du système de traçabilité GOST.

4.1.2. Architecture urbanisée de GOST

La nouvelle structure du système de traçabilité GOST repose sur une SOA. Pour ce faire, les acteurs de la chaîne logistique déploient des SW d'Accès aux données (SWAD). Ces SW sont exploités par le système de traçabilité GOST afin de rechercher les informations liées à la traçabilité d'un conteneur. Cette nouvelle structure du système facilite la collecte et la centralisation des informations. Ainsi, les informations de la traçabilité ne sont communiquées qu'au moment opportun. Ceci nous permet de nous détacher de la stratégie basée sur le flux poussé des informations pour une stratégie qui se base sur un flux tiré des informations déclenché par une requête externe. La figure suivante présente une vue globale de la nouvelle architecture de GOST :

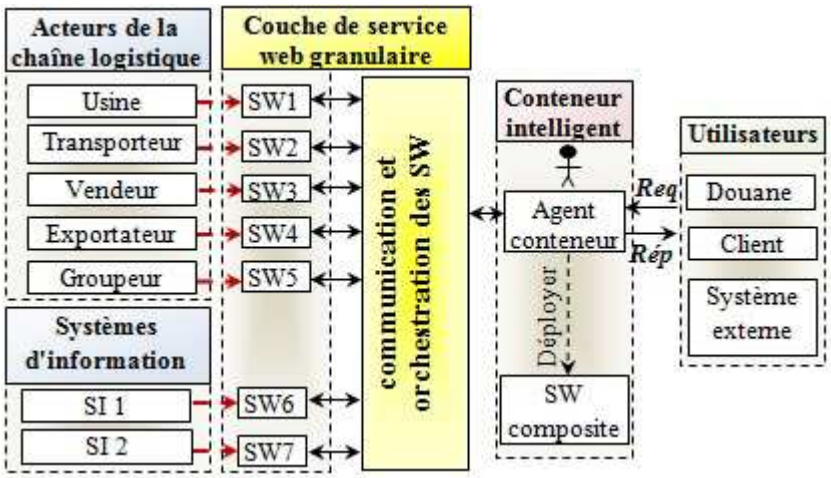

Figure I.5. Architecture cible de GOST

Cette nouvelle architecture impose aux acteurs de la chaîne logistique de déployer des SW d'Accès aux Données (SWAD) pour partager les informations de la traçabilité du conteneur. Ces SWAD sont interfacés à une couche qui les connecte au conteneur intelligent. Ce dernier orchestre ces SW granulaires pour déployer un nouveau SW composite qui fournit l'ensemble des informations qui décrivent l'intervention et le rôle de chacun des acteurs de la chaîne logistique qui ont altéré son état. Le SW composite est invoqué pour répondre aux requêtes externes pour collecter les informations de traçabilité.

La nouvelle structure de GOST nécessite un modèle de PI qui s'affranchit de la simple liaison entre le produit physique et sa représentation informationnel pour un modèle qui tient compte des interactions avec les systèmes hétérogènes. Pour ce faire, nous proposons un modèle enrichi du PI pour le développement d'un conteneur intelligent capable d'exploiter les SWAD déployés par les acteurs de la chaîne logistique.

4.1.3. Conteneur intelligent : Modèle enrichi

Le modèle enrichi proposé est structuré en trois packages, le premier représente la partie physique du produit. Il est composé d'un tag RFID pour l'identification, une balise GPS pour la localisation, des capteurs pour le suivi de son état interne (température, humidité, ...) du conteneur et un modem pour la remonter de ces informations. Le deuxième donne une représentation informationnelle du PI. Il se compose des informations statiques qui décrivent les propriétés des marchandises transportées (ex. type de marchandise) et des informations dynamiques qui évoluent dans le temps (ex. température) en sus d'un agent qui gère ces informations. Le troisième package représente la couche service qui contient les SW et le médiateur qui seront utilisés par l'agent conteneur pour le déploiement des nouveaux services composites. La figure 6 présente le modèle enrichi du conteneur intelligent :

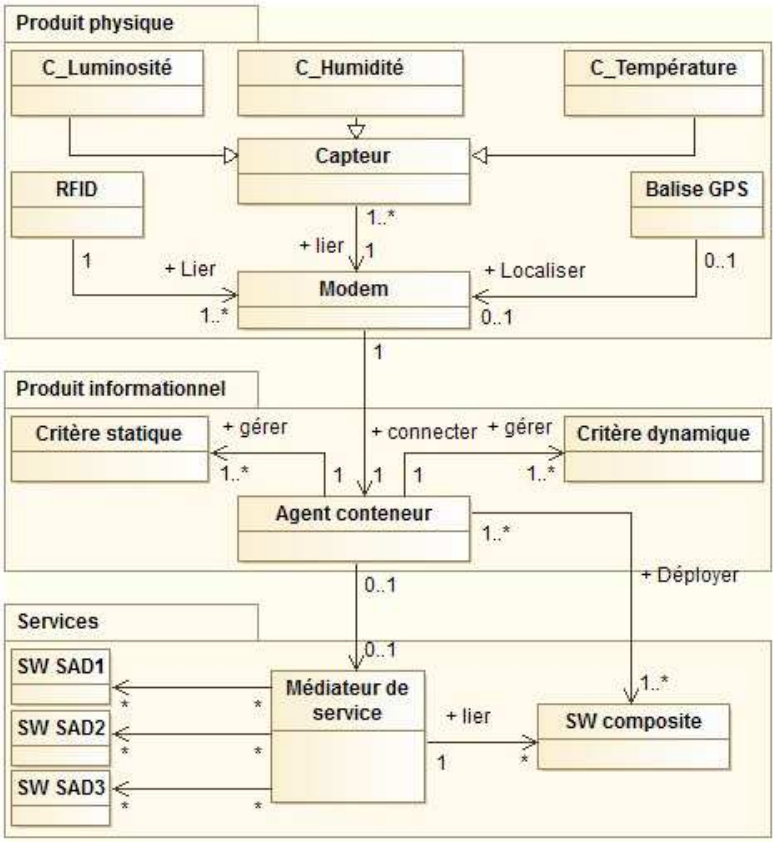

Figure I.6. Modèle enrichi du conteneur intelligent

4.1.4. Modèle de données

Pour répondre aux besoins de la gestion des risques liés au transport des conteneurs. Nous avons procédé à l'adaptation du modèle de données de GOST. Ce modèle a été conçu en se basant principalement sur le modèle théorique proposé par [Bechini et al., 2007]

[Boukachour et al., 2011]. Ce dernier se focalise sur la spécification de l'unité tracée en traitant le problème de lotissement du produit physique et en tenant compte de la traçabilité des activités réalisées. Ainsi, ce modèle se base sur le concept de l'entité tracée pour garder la traçabilité du produit physique et des actions qu'il a subi. De plus, il traite le problème de composition de cette entité en tenant compte de ses différents niveaux de granularité (palette, lot, conteneur) ainsi que le type des marchandises transportées notamment les matières dangereuses. Voici le package traçabilité correspond au modèle de données de GOST dans sa version initiale (figure7) :

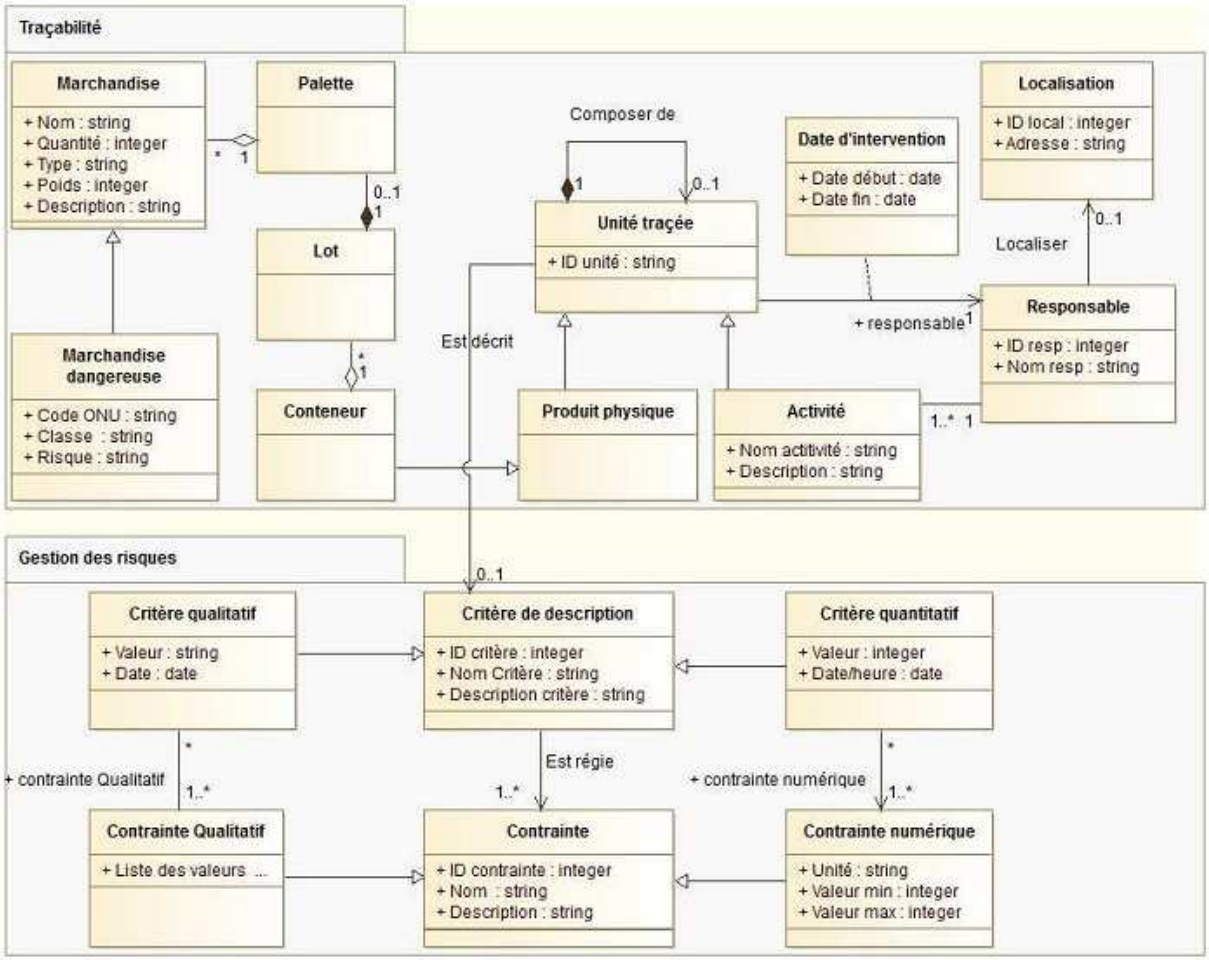

Figure I.7. Modèle de données de traçabilité enrichi

Le modèle de données a été enrichi par le paquetage « gestion des risques » (Figure 7) qui définit l'ensemble des contraintes à respecter durant le transport des conteneurs. Ceci permet de proposer un processus de gestion des risques proactif. À cet égard, le conteneur intelligent assure le contrôle des informations qui sont fournies par les capteurs embarqués au niveau des conteneurs et de générer des alertes suite au non-respect des contraintes prédéfinies.

4.2. Génération des services web

4.2.1. Analyse du domaine

Le cas d'étude que nous avons choisi traite le processus de préparation et d'un conteneur de groupage (LCL – Less than a Container Load). Ce dernier repose sur le regroupement des colis expédiés par des clients différents vers la même destination. Chaque expéditeur prépare son colis et l'envoi au groupeur qui assure l'entreposage de ces colis le temps nécessaire pour la réception d'un nombre suffisant de colis pour remplir le conteneur. Ces colis sont empotés dans un conteneur qui sera expédié vers le terminal maritime par un transporteur routier. Le groupeur fournit les informations qui décrivent la nature et l'origine des marchandises à exporter. Ces informations sont utilisées par les douaniers afin d'autoriser l'entrée du conteneur au niveau du terminal. La figure suivante présente ce processus :

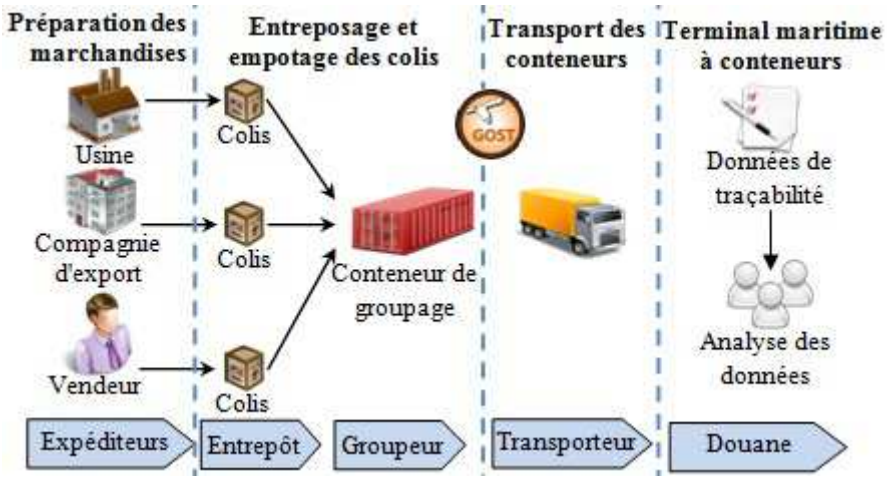

Figure I.8. Cas d'étude: Préparation et transport d'un conteneur de groupage

La figure 9 présente le diagramme de cas d'utilisation globale du processus de préparation et de transport d'un conteneur de groupage. Ce digramme présente une vue statique des différents acteurs impliqués dans ce processus et met le point sur leurs principales tâches :

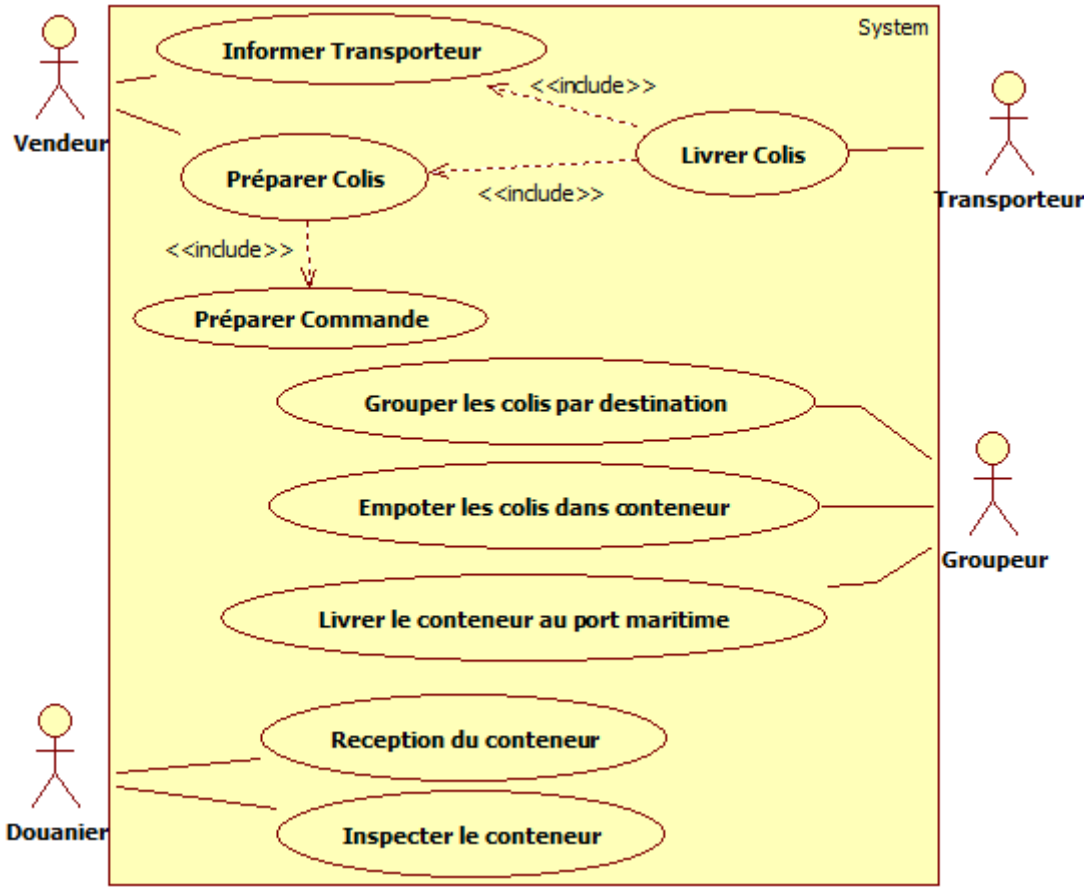

Figure I.9. Diagramme de cas d'utilisation de la préparation d'un conteneur de groupage

L'établissement d'un processus de traçabilité doit être précédé par une analyse pour déterminer les informations à collecter. Pour ce faire, le diagramme de BEC permet d'identifier les entités persistantes des systèmes informatiques utilisés par ces intervenants. Ces entités sont porteuses des informations relatives aux activités des acteurs. Nous présentons l'exemple simple de préparation d'une commande par un vendeur. Le diagramme de BEC (figure 10) montre que le système utilisé par le vendeur se compose des classes interfaces et des classes contrôles qui représente respectivement l'interface utilisateur et l'entité qui assure le contrôle des opérations que le vendeur peut exécuter. Nous nous focalisons sur les entités persistantes du système qui déterminent les entités porteuses des informations de la traçabilité de la préparation de la commande. En conséquence, il faut tenir compte des classes persistantes déterminées par le diagramme de BEC (figure 10) et qui sont la commande, le client, les articles de la commande et le type de chaque article.

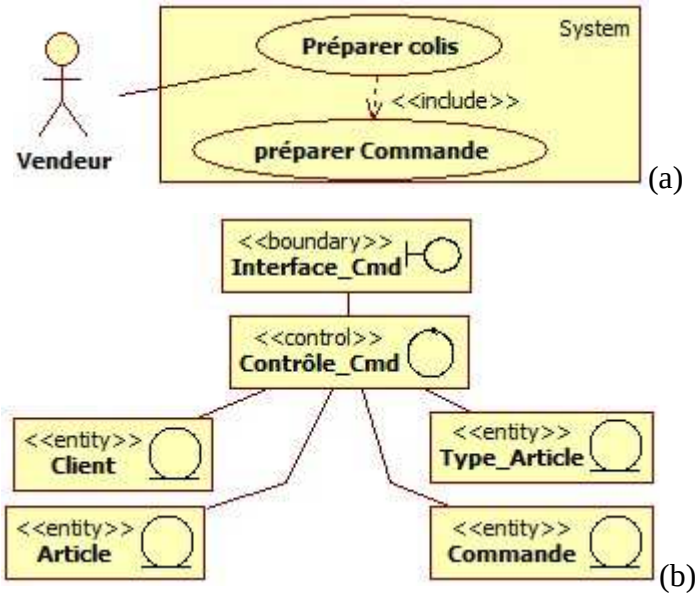

Figure I.10. (a) Diagramme de cas d'utilisation, (b) diagramme BEC: Ordre de production

Pour avoir une vue dynamique du processus de préparation et d'acheminement d'un conteneur de groupage vers le port, nous avons opté pour une modélisation basée sur le BPMN. La modélisation de ce processus est réalisée suivant le niveau descriptif défini par Silver [Silver, 2009]. Ainsi, le modèle suivant donne une vue macroscopique de ce processus limité au traitement du colis envoyé par le vendeur sans détailler les sous-processus internes à chacun des intervenants identifiés (figure 11).

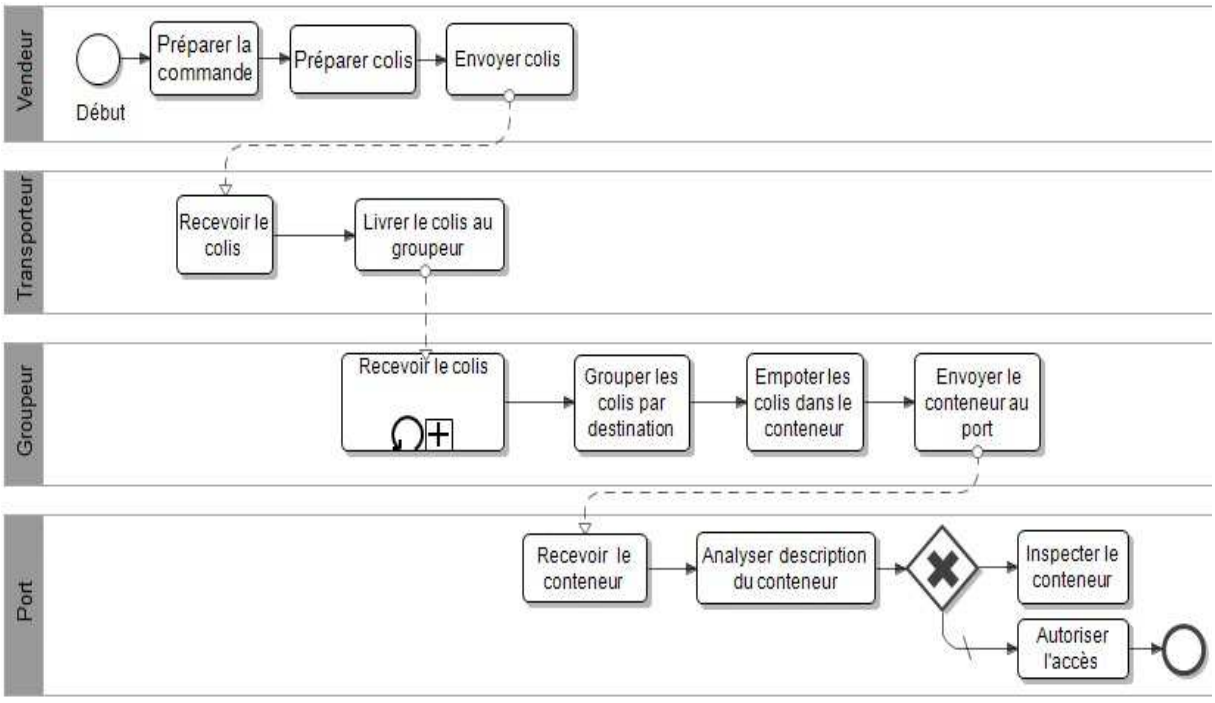

Figure I.11. Processus de préparation et d'acheminement d'un conteneur de groupage

4.2.2. Génération automatique du code

Le processus de génération des SW basé sur l'approche MDA commence par la spécification du CIM pour le captage des besoins métier. Ceci a été détaillé dans la section précédente, analyse du domaine, par la spécification d'une vue statique des principales fonctionnalités du système et d'une vue dynamique par la modélisation du processus métier étudié.

La génération des SW repose sur l'exploitation des données de traçabilité que les acteurs de la chaîne logistique souhaitent partager et la création de nouvelles bases de données qui seront accessibles par des SWAD. Pour ce faire, les acteurs donnent une description des données de traçabilité que nous filtrons pour spécifier un diagramme de classes d'UML. Ce diagramme de classe est utilisé pour la génération du code Server Query language nécessaire pour la création de la nouvelle BD. Ceci nous amène a utiliser, dans un premier temps, le métamodèle du diagramme de classe pour garantir la conformité du modèle en entrée avec les spécificités d'un diagramme de classe d'UML, et dans un deuxième temps, le métamodèle du SQL qui garantie la conformité du modèle généré aux spécificités de la plateforme d'implémentation SQL. La figure suivante présente une version simple des métamodèles que nous avons utilisés spécifiquement pour le cas étudié :

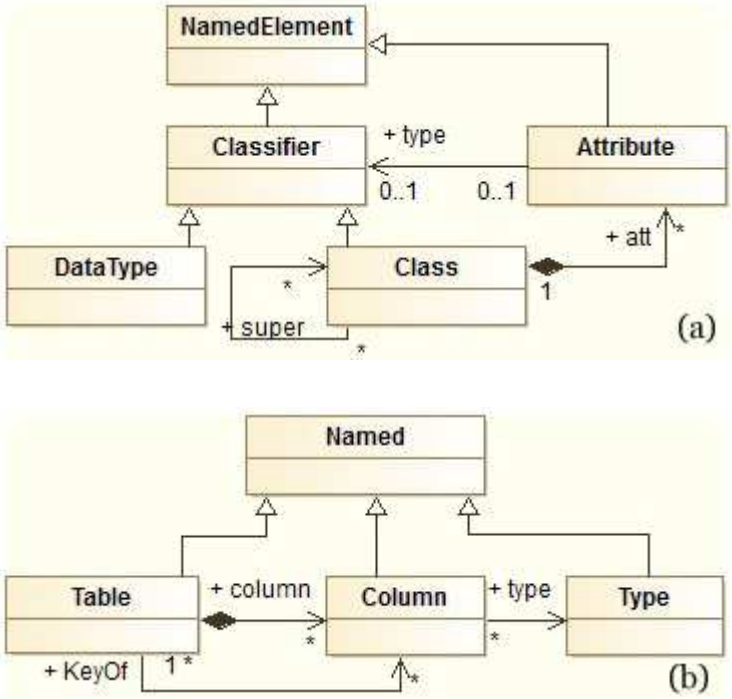

Figure I.12. Métamodèle : (a) diagramme de classe UML, (b) SQL

Le passage d'un diagramme de classe à un modèle SQL est fondé sur des règles de transformation entre les deux modèles. Ces règles de transformations sont issues d'un mapping qui détermine la correspondance entre les éléments des deux métamodèles que nous avons présentés :

- **NamedElement to Named** : établit un lien entre les classes parents des deux modèles. Nous utilisons ces classes parents afin d'obtenir un nœud principal lors de la spécification des modèles utilisant XML. Ainsi, toutes les classes qui composent un métamodèle étendent une classe parent ;
- **DataType to Type :** lie les types des attributs d'une classe au types des colonnes d'une table, par exemple elle lie le type « String » au type « Varchar(45) ». Ceci nous permet de garantir la compatibilité des paramètres utilisés par un SWAD avec les types des colonnes qui composent les tables de la base de données ;
- **Class to Table :** transforme les classes du modèle en entrée en table SQL; Ainsi, les tables SQL sont utilisées pour déployer une base de données qui sera interrogée par les services web ;
- **Attribute to Column** : permet la transformation des attributs d'une classe en colonnes dans une table SQL. Ceci représente la transformation de base pour la création des tables pour l'enregistrement des données de la traçabilité ;
- **Association Column+** : transforme la liaison entre une classe et ses attributs en une table et les colonnes qui la composent. Cette règle de transformation assure le regroupement des colonnes appartenant à la même table SQL ;
- **Association KeyOf** : détermine la clé primaire des tables générées afin d'identifier les enregistrements de la traçabilité des conteneurs d'une manière unique.

Dans le cas étudié, le passage du diagramme de classe en un modèle SQL d'une BD est assuré par l'ATL. En conséquence, l'implémentation des transformations que nous avons définies porte sur la spécification des règles de transformations en Object Constraints Language (OCL). Par exemple, la règle de transformation qui détermine le lien entre les types des attributs d'une classe et les types d'une colonne d'une table en SQL « ***DataType to Type*** » est implémentée comme suit :

```
Rule DataType2Type {
        from dt : Class !DataType
        to out : Relational !Type( name<- dt.name )
}
```

L'ATL nécessite la spécification des deux métamodèles, SQL et le diagramme de classe, en ECORE qui est un standard de spécification de modèles de données proposé par Eclipse. Pour ce faire, nous avons utilisé Eclipse Modeling Framework (EMF) qui propose des outils pour la génération des métamodèles en ECORE à partir des diagrammes présentés dans la figure 12. De plus, le modèle en entrée qui sera transformé par l'ATL doit être spécifié en XMI (XML Metadata Interchange). Ceci est achevé par les outils proposés par l'EMF qui permettent la génération du code XMI qui correspond à un diagramme de classe et assure la validité du code généré par rapport à son métamodèle. La figure suivante présente un modèle XMI :

```
<?xml version="1.0" encoding="ASCII"?>
<xmi:XMI xmi:version="2.0"
xmlns:xmi="http://www.omg.org/XMI" xmlns="Class">
 <Class name="Groupeur">
  <attr name="idCritere" multiValued="false" type="/1"/>
  <attr name="idConteneur" multiValued="false" type="/1"/>
  <attr name="valeur" multiValued="false" type="/1"/>
 </Class>
</xmi:XMI>
```

Figure I.13. Modèle en XMI de la classe groupeur

Les transformations réalisés par l'ATL permettent le passage d'un modèle en entrée à un modèle en sortie qui respecte les spécificités de la plate-forme d'implémentation, il est exprimé en XMI. Ce dernier n'est pas directement exploitable et nécessite une deuxième transformation de type « ModèleToText » pour la génération du code SQL afin de déployer la nouvelle BD. Cette étape est achevée par l'utilisation du eXtensible Stylesheet Language Transformations (XSLT). Il s'agit d'un langage de transformation XML qui a été proposé par la W3C pour la conversion des documents XML en d'autres langages. En conséquence, le passage du modèle généré en XMI à SQL est réalisé par la spécification d'un script XSLT qui détermine les règles de transformation et l'utilisation d'un processeur XSLT pour les exécutées. Le résultat de cette étape est la génération du code SQL pour la création de la nouvelle BD. Le script suivant présente le code d'implémentation de la table qui correspond au groupeur avec des critères qui décrivent son intervention :

```
CREATE TABLE Groupeur ( idConteneur varchar(255), c1
 varchar(255),c2 varchar(255),c5 varchar(255),c6
 varchar(255),c9 varchar(255),c10 varchar(255),c18
 varchar(255) );
ALTER TABLE  Groupeur ADD CONSTRAINT
pk_Groupeur PRIMARY KEY (idConteneur);
```

Figure I.14. Code SQL généré de la table groupeur

La deuxième phase de ce processus de génération des SWAD porte sur l'exploitation de l'IDE Netbeans pour la génération des classes CRUD en JAVA pour l'exploitation de cette BD. Nous nous focalisons sur les classes de consultation des tables pour répondre au besoin de collecte des informations de la traçabilité. L'environnement de développement Netbeans dispose des outils pour l'identification des classes entités à partir du chargement de la BD que nous avons déployé. Les classes générées par cette étape sont déployées en tant que SW. Le script suivant présente un exemple de fichier WSDL qui donne la description du SWAD pour la récupération de l'intégralité des informations du vendeur:

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<definitions xmlns:tns=
"http://expediteurVendeur.ws/" xmlns=
"http://schemas.xmlsoap.org/wsdl/"
targetNamespace="http://expediteurVendeur.ws/"
name="expediteurVendeurWS">
<types>
<xsd:schema>
</types>
<message name="findAll">
<message name="findAllResponse">
<portType name="expediteurVendeurWS">
<operation name="findAll">
<input wsam:Action=
"http://expediteurVendeur.ws/expediteurVendeurWS/f
indAllRequest" message="tns:findAll"/>
<output wsam:Action=
"http://expediteurVendeur.ws/expediteurVendeurWS/f
indAllResponse" message="tns:findAllResponse"/>
</operation>
</portType>
<binding name="expediteurVendeurWSPortBinding"
type="tns:expediteurVendeurWS">
<service name="expediteurVendeurWS">
```

Figure I.15. WSDL script describing the generated web-service

4.3. Orchestration des services web

Dans cette étape nous proposons deux solutions pour l'exploitation des SWAD granulaires pour le déploiement d'un nouveau service web composite qui sera exploité par le conteneur intelligent afin de répondre aux requêtes de la traçabilité. La première solution est axée sur l'exploitation des processus métiers pour l'orchestration des services. La deuxième solution prône la configuration d'un ESB (Bus des Services de l'Entreprise).

4.3.1. Orchestration des SW basée sur les processus métier

Afin d'exploiter la modélisation du processus métier de préparation et d'acheminement d'un conteneur de groupage pour l'orchestration des SWAD granulaires, nous avons opté pour le BPEL Designer proposé par IDE Eclipse. Ce dernier permet de modéliser l'ordre d'invocation des SWAD en adéquation avec l'ordre d'exécution des activités qui composent le processus métier que nous avons présenté dans la figure 9. Le BPEL Designer facilite la génération du code BPEL qui permet d'exécuter le processus métier. En conséquence, l'automatisation de l'exécution de ce processus métier en l'associant à des SW correspond à la proposition d'un nouveau service composite basée sur l'orchestration des SWAD granulaires. Le service web généré sera exploité par le conteneur intelligent pour répondre aux requêtes externes. La figure 16 présente un modèle BPEL pour l'invocation de trois SW.

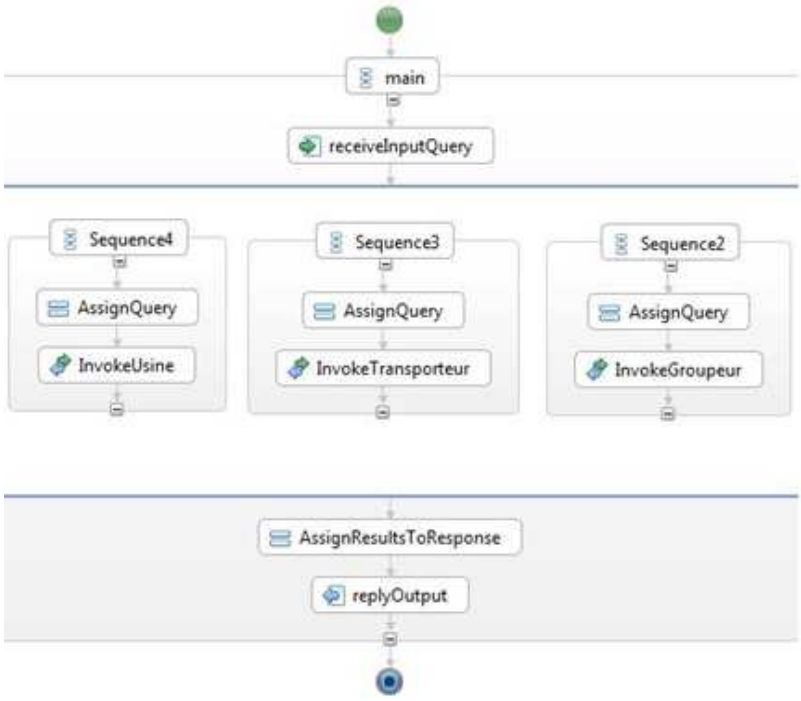

Figure I.16. Diagramme BPEL pour l'invocation des SWAD granulaires

L'exécution du code BPEL permet l'invocation des SWAD suivant la logique du processus métiers qui décrit les étapes franchies par le conteneur et le déploiement d'un nouveau SW composite. Ce dernier est exploité par le conteneur intelligent pour collecter les informations qui décrivent l'intervention de chaque acteur de la chaîne logistique dans le processus de préparation et de transport d'un conteneur de groupage.

4.3.2. Orchestration des SW basée sur la configuration d'un ESB

L'orchestration des SW granulaires en utilisant un ESB présente une grande différence par rapport à la solution précédente. ESB dispose d'un ensemble d'outil pour interconnecter des systèmes hétérogènes à un bus de services qui permet le routage des messages entre ces systèmes. Pour le cas traité, ESB permet d'interfacer le conteneur intelligent avec les SWAD granulaires sans générer un SW composite. Il permet de répondre aux requêtes de l'agent qui représente la partie virtuel du conteneur intelligent en assurant le routage de ses requêtes uniquement vers les SWAD qui disposent des informations recherchées. Pour implémenter cette solution, nous avons opté pour une solution open source MuleESB. La figure suivante présente la structure de cette solution :

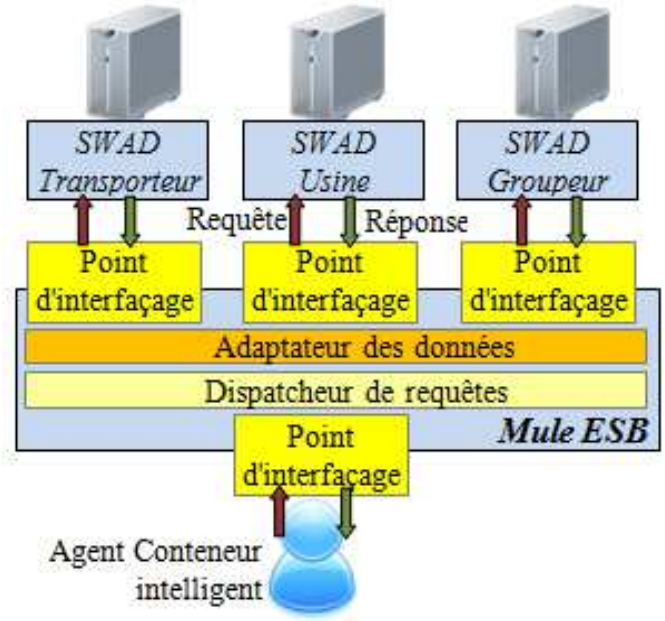

Figure I.17. Structure d'interfaçage des SWAD et Mule-ESB

5. Discussion

Notre contribution est de proposer une démarche pour l'urbanisation du système de traçabilité GOST afin de l'aligner sur les nouveaux besoins de la gestion des risques. La nouvelle architecture de GOST permettra d'améliorer le processus de collecte des données liées à la traçabilité de la préparation et le transport des conteneurs afin de supporter le processus de gestion des risques liés au transport d'un conteneur.

Dans la première partie de ce travail, nous nous sommes focalisés sur le problème de la centralisation des informations de la traçabilité et les lacunes du flux poussé pour l'envoi des informations par la proposition d'une nouvelle structure distribuée du système de traçabilité GOST basée sur une SOA et les SW. Nous avons exploité le concept du PI pour la

proposition d'un modèle enrichi d'un conteneur intelligent capable d'exploiter les SW pour communiquer avec des systèmes hétérogènes externes. Cette adaptation nous a permis d'établir un flux tiré pour la collecte des informations de la traçabilité. Ainsi les données de la traçabilité sont collectées par le conteneur intelligent suite à une demande extérieure. Ceci nous permet d'obvier l'archivage inutile des données de traçabilité et de pallier le problème de la réticence des acteurs d'une chaîne logistique à partager des informations avec une entité tierce.

Les adaptations que nous avons réalisées ont aussi porté sur la modification du modèle de données de GOST pour tenir compte des contraintes liées au transport des marchandises. Ceci permet de déléguer la vérification du respect de ces contraintes au conteneur et de relever des alertes lorsqu'elles sont transgressées.

Dans la deuxième partie de cette contribution, nous avons abordé le problème d'adaptation des systèmes utilisés par les acteurs de la chaîne logistique pour le partage des informations de la traçabilité. Pour pallier ce problème, nous nous sommes basés sur une approche dirigée par les modèles pour la génération du code des SW afin de faciliter la collecte des informations de la traçabilité. Pour ce faire, nous avons utilisé ATL pour automatiser la génération des SW d'accès aux données à partir d'un diagramme de classe.

La démarche de développement basée sur le MDA présente une bonne base pour remédier au problème d'adaptation des systèmes hétérogènes par la génération des SW aux données. L'atout principal de cette approche se manifeste dans la séparation des aspects d'un système en plusieurs modèles et l'automatisation du passage d'un modèle à l'autre en utilisant des règles de transformation. Ceci facilite l'adaptation des SW générés pour s'aligner sur les nouveaux besoins qui émergent du contexte évolutif de la chaîne logistique. Nous avons opté la génération de SW en raison de la facilité de déploiement et d'invocation de ces derniers via internet. Les SWAD déployés présentent une grande agilité pour la composition de nouveaux services qui décrivent le cycle de vie d'un conteneur.

En outre, l'utilisation des cas d'utilisation nous a permis d'identifier les rôles des acteurs qui interviennent dans la préparation et l'acheminement d'un conteneur de groupage. Ces cas d'utilisation on été exploité aussi pour la spécification du diagramme de BEC afin de déterminer les classes entités du système étudié. Ces dernières représentent les entités persistantes du système, elles permettent l'enregistrement des informations de la traçabilité.

Les cas d'utilisation et le diagramme de BEC se limitent à la spécification d'une vue statique du système étudié, en conséquence nous avons opté pour le BPMN pour modéliser l'aspect dynamique du cas étudié. La spécification du diagramme BPMN porte sur le regroupement et l'ordonnancement des activités issues des cas d'utilisation de chaque acteur tout en tenant compte des interactions entre ses activités. Le BPMN présente une notation adéquate pour une modélisation précise des processus métier.

En dernier lieu, nous nous sommes intéressés à la proposition de deux alternatives pour l'interfaçage du conteneur intelligent et les SW d'accès aux données. Dans la première alternative, nous avons exploité la modélisation des processus métier en BPMN pour décrire les opérations réalisées par les différents acteurs qui sont intervenus dans le processus d'acheminement d'un conteneur et pour l'orchestration des SW granulaires fournies par les acteurs d'une chaîne logistique. Ceci nous permet de déployer un nouveau SW composite capable de donner de traçabilité correspond à un seul conteneur. La deuxième alternative que nous avons présentée se base sur la configuration d'un bus de services de l'entreprise pour lier le conteneur intelligent aux SW. L'ESB gère la communication entre le conteneur intelligent et les SW élémentaires.

6. Conclusion

Ce chapitre concerne l'urbanisation du système de traçabilité GOST pour répondre aux besoins de la gestion des risques liés au transport des conteneurs. Nous avons procédé par la proposition d'une structure décentralisée du système de traçabilité de GOST basée sur l'exploitation du concept du PI, les SOa et les SW. La contribution principale de ce travail est la proposition d'une ADM et SW pour faciliter la collecte des informations de la traçabilité. À cette fin, nous avons utilisé l'ATL pour automatiser la génération des SW d'accès aux données à partir d'un diagramme de classe. De plus, nous avons exploité la modélisation des processus métier en BPMN ainsi que la configuration d'un ESB pour l'orchestration des SW. Ces derniers sont déployés pour permettre aux conteneurs intelligents de répondre aux requêtes concernant leurs cycles de vie.

Chapitre II.

Système de Gestion d'un Terminal à Conteneurs : Conception

Sommaire

1. Introduction

Dans ce chapitre nous proposons une démarche de conception d'un système de Gestion d'un Terminal à Conteneurs (SGTC) dont une validation sera réalisée par l'étude du cas du terminal de France (TC-TDF) au port du Havre. La particularité de cette démarche, c'est qu'elle intègre un processus de gestion des risques. Cette démarche est basée sur le paradigme agent, la classification du système en composants et des règles d'agentification. Le but de ce système est d'analyser l'impact de l'application des mesures de prévention des risques au niveau d'un terminal à conteneurs afin de mener cette opération d'une manière appropriée. Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la modélisation du SGTC en utilisant le langage de modélisation des agents (AML).

2. Aperçu de l'approche

Pour structurer le système SGTC, nous proposons l'utilisation d'une approche basée sur la classification du système défini à partir des rôles et sur un processus de développement itératif et incrémental piloté par les cas d'utilisation. De surcroît, la classification en sous-système permet une conception modulaire qui regroupe les traitements interdépendants dans le même sous-système et favorise leur réutilisation par d'autres sous-systèmes.

2.1. Démarche de conception proposée

La démarche adoptée pour le développement du SGTC est structurée en quatre étapes principales. La figure suivante donne une vue globale du processus de modélisation :

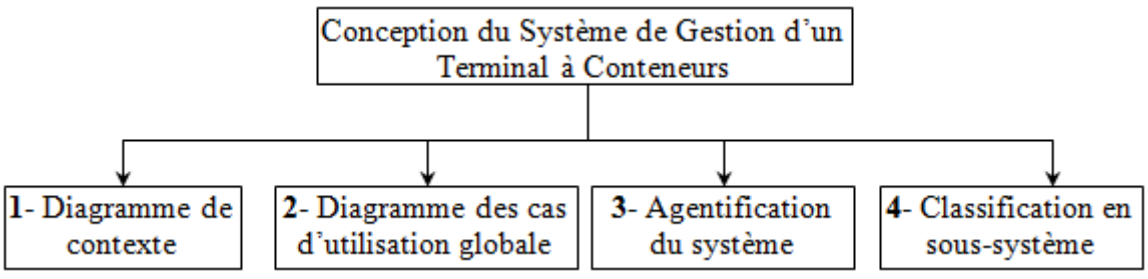

Figure II.1. Les étapes principales de la démarche de conception du SGTC

- Le diagramme de contexte : l'utilisation du diagramme de contexte est une étape primaire pour l'identification des frontières du système et ces interactions avec les acteurs externes ;

- Le diagramme des cas d'utilisation : dans un premier temps, on procède à la spécification du diagramme de cas d'utilisation global afin d'identifier les principaux acteurs du système et leurs rôles. Dans un deuxième temps, on définit des diagrammes de cas d'utilisation correspondant aux sous-systèmes ;
- L'agentification : consiste à définir des agents qui correspondent aux différents acteurs et matériels de manutention existant dans le TC. On procède à une définition de l'ensemble des agents formant le système puis par la spécification de leurs fonctions et leurs interactions ;
- La classification du système : la classification en plusieurs sous-systèmes à base d'un regroupement fonctionnel des entités cohérentes ayant le même but.

2.2. Conception du SGTC

Dans un premier temps, pour la modélisation du SGTC proposé et en concordance avec la démarche proposée dans la section 4.2, nous procéderons à une description macroscopique du système et ses interactions avec d'autres acteurs dans son environnement. La deuxième partie se focalise sur une spécification détaillée des agents composant le système et leurs interactions.

2.3. Concepts de base de l'approche

La modélisation du SGTC est une tâche fastidieuse et consiste à définir les spécifications des vues statique et dynamique du système. La première se focalise sur l'identification des rôles, les composants du système et la spécification de son architecture globale. Tandis que la deuxième met le point sur le comportement et les interactions des différents éléments qui le composent. Pour garantir une bonne conception du système, nous nous sommes basées sur les concepts des cas d'utilisation, la classification et la réutilisation que nous détaillons dans ce qui suit.

2.3.1. Approche pilotée par les cas d'utilisation

Dans le cas des systèmes complexes, le passage d'une description informelle du système, en une seule étape, à une spécification formelle du système ne semble pas faisable. Notamment dans le cas d'un TC où son fonctionnement dépend d'un ensemble de paramètres, ainsi la modélisation du fonctionnement des TC est une tâche laborieuse. Les différents modes de fonctionnement des TC dans le même port, la dépendance au type du matériel de

manutention et la politique de gestion appliquée impliquent une modélisation spécifique à chaque TC.

Dans ce travail, pour modéliser le SGTC, nous avons opté pour une Approche pilotée par les Cas d'Utilisation (APCU). Les concepts de base de cette approche sont les acteurs et les actions. Un acteur est un rôle spécifique joué par un utilisateur, il représente une catégorie des utilisateurs du système. Un acteur peut être assimilé à une classe et les utilisateurs aux instances de cette classe. Les cas d'utilisation sont exprimés dans un langage naturel avec des termes du domaine du problème étudié. Les cas d'utilisation représentent un artefact qui établit le comportement souhaité du système, les interactions entre ses différents acteurs et les tâches de bases qu'ils assurent.

Les cas d'utilisation représentent un outil puissant pour le captage des exigences fonctionnelles du système. Plusieurs méthodes utilisent cette approche, par exemple la méthode des Processus Unifié (UP), pour le développement agile des applications. Le principal avantage de cette approche se manifeste dans la facilitation du processus d'analyse des besoins tout en gardant les utilisateurs au cœur du processus en adoptant ces besoins en langage naturel. L'adoption de l'APCU pour la spécification du système étudié, assure la concordance entre les besoins des utilisateurs et la vue fonctionnelle d'un système.

2.3.2. Classification

L'analyse de l'intégralité d'un système complexe en tant qu'une unité atomique est une tâche fastidieuse. Pour remédier au problème de la complexité des SGTC, nous avons procédé à un découpage du problème en nous basant sur la technique de la classification.

La classification est une technique fondamentale qui consiste à décomposer le système étudié en plusieurs sous-systèmes afin de réduire sa complexité globale, réduire la complexité de vérification de son fonctionnement et de sa concordance aux spécifications. Une bonne structuration est caractérisée par une forte cohésion entre les entités qui composent les sous-systèmes, réduisant ainsi les interactions entre les sous-systèmes. En conséquence, le faible couplage entre les composants d'un système minimise l'impact de dysfonctionnement ou de modification d'un sous-système sur l'intégralité du système. Le découpage doit être dirigé par des critères d'évaluation de la qualité de fonctionnement et de robustesse du système.

2.3.3. Réutilisation

Ce concept réduit le temps de développement d'un système tout en garantissant sa fiabilité. La réutilisation consiste à concevoir un système en un ensemble d'entités spécialisées réutilisables par les différents modules du système. L'adoption de cette approche limite l'impact des modifications sur la globalité du système et réduit son cycle de développement en éliminant les tâches répétitives. Notamment dans la phase de test, la réutilisation supprime les tests unitaires à chaque réutilisation d'un module et se focalise sur la phase d'intégration de l'ensemble des composantes du système.

2.4. Diagramme de contexte

Le diagramme de contexte est la base d'une étude préliminaire permettant de situer le système dans son environnement et de repérer les flux d'informations échangés avec les acteurs externes et les domaines connexes.

Dans le cas étudié, le SGTC échange des informations avec un ensemble de prestataires de transport afin de préparer les procédures de réceptions et expéditions des conteneurs. Le SGTC est alimenté par les connaissances des experts et les alertes relevées par le système de traçabilité GOST. De plus, il échange avec d'autres organisations représentant des domaines connexes, tels que la douane pour la collecte des informations relatives au contenu et l'origine du conteneur ou bien les pompiers en cas d'occurrence d'un accident (Figure2).

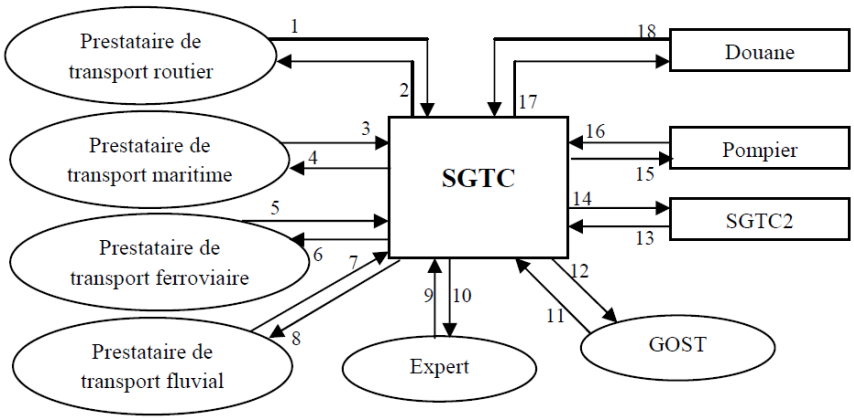

Figure II.2. Diagramme de contexte du SGTC

- [1 ; 3 ; 5 ; 7] : Informer le SGTC de la livraison des conteneurs
- [2 ; 4 ; 6 ; 8] : Informer les prestataires de transport de la disponibilité des conteneurs
- [9] : Alimenter le SGTC par des connaissances nécessaires pour la prévention des risques

- [10] : Juger les nouveaux cas
- [11] : Relever des alertes et surveillance de l'état des conteneurs
- [12] : Demander des informations relatives à l'état des conteneurs
- [13 ; 14] : Échanges d'informations avec d'autres SGTC
- [15] : Fournir des informations sur la nature des produits en cas d'accident
- [16] : intervenir lors d'occurrence d'un accident
- [17] : Cibler les conteneurs à inspecter
- [18] : Alimenter le système des informations des conteneurs.

2.5. Diagramme des cas d'utilisation

Le diagramme des cas d'utilisation permet d'identifier les besoins fonctionnels du système et les acteurs qui les exécutent. De plus, il facilite la classification du système en un ensemble de composants cohérents en se basant sur la dépendance entre ces cas d'utilisation. La figure suivante illustre une vue globale des acteurs du SGTC et leurs principaux rôles :

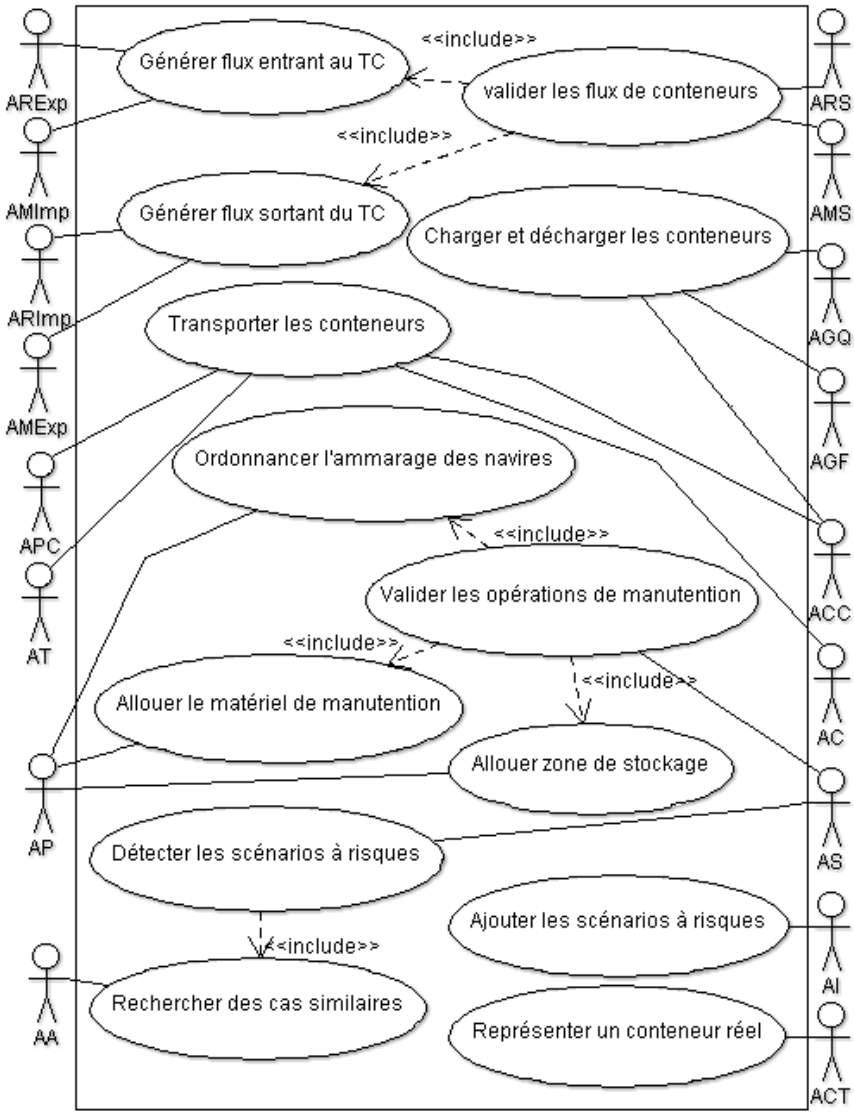

Figure II.3. Diagramme de cas d'utilisation global du SGTC

- **ARExp** : Agent Routier export
- **ARImp** : Agent Routier Import
- **ARS** : Agent Routier de Synchronisation
- **AMExp** : Agent Maritime Import
- **AMImp** : Agent Maritime Import
- **AMS** : Agent Maritime de Synchronisation
- **APC** : Agent Porte Conteneur
- **AGQ** : Agent Grue de Quai
- **ACC** : Agent Chariot Cavalier
- **AC** : Agent Camion
- **AP** : Agent Planification
- **AI** : Agent interface
- **AS** : Agent Superviseur
- **ACT** : Agent ConTeneur
- **AT** : Agent Train
- **AA :** Agent administrateur
- **AGF :** Agent Grue Ferroviaire

2.6. Agentification

L'agentification consiste à associer les agents qui composent le SGTC aux acteurs réels opérant au niveau du TC. Afin de remédier à la complexité de la modélisation des processus métiers dans un TC, la spécification du comportement individuel des agents à un niveau détaillé d'un SMA permettra la reproduction du fonctionnement global du TC lors des interactions collectives des agents au niveau macro du SMA. La modélisation du système proposé et la spécification de ses fonctionnalités sont réalisées en utilisant le Langage de Modélisation Agent AML [Whitestein, 2004].

En AML le diagramme d'agents permet de spécifier l'ensemble des agents formant le SGTC et donne une vue globale de l'architecture du SMA (Figure 4). De plus, il permet de spécifier l'ensemble des interactions et des dépendances entre les agents par des associations sociales.

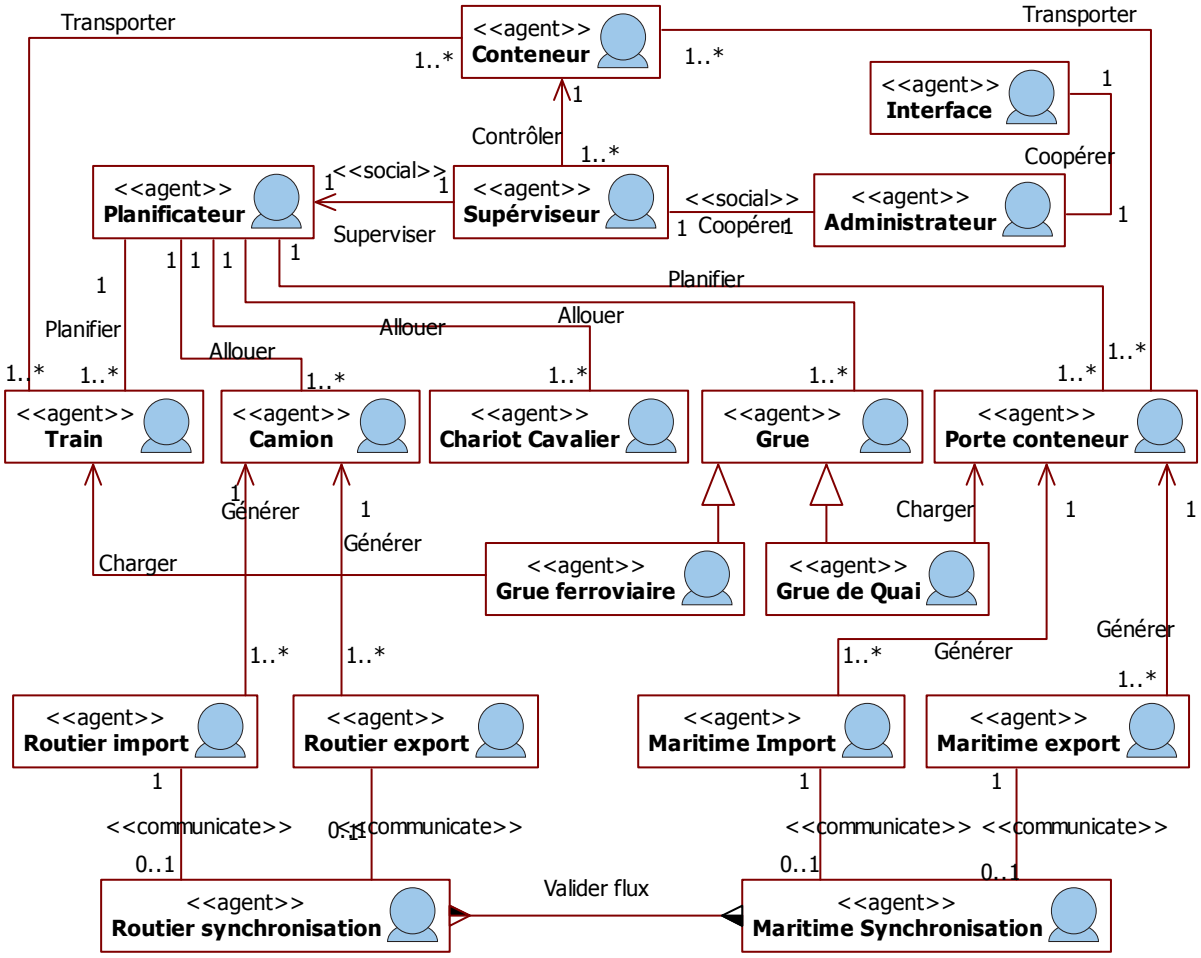

Figure II.4. Diagramme d'agents du SGTC

Les agents qui composent le système SGTC sont intentionnels, suivent le modèle BDI (Beliefs, Desirs, Intentions), et disposent d'une description de leur environnement et des connaissances sur les autres agents. De surcroît, la définition d'un processus d'apprentissage permettra l'acquisition de nouvelles connaissances du système et par conséquent une adaptation continue du système pour la détection des nouveaux scénarios à risques.

2.7. Classification du système

L'approche proposée consiste à modéliser un SGTC par un SMA classifié en plusieurs sous-systèmes dans le but de faciliter la phase de développement. La classification consiste à grouper les agents ayant les mêmes buts pour former des sous-ensembles cohérents. De plus, le découpage du système est guidé par des critères d'évaluation de la qualité du groupage des agents, tels que la forte cohésion entre les agents du même sous-système et le faible couplage entre les sous-systèmes.

Le SGTC proposé se compose de deux parties principales, la première traite la prise de décision pour la gestion des risques et se compose de trois sous-systèmes : sous-système d'apprentissage, sous-système de supervision et le sous-système de planification. La deuxième partie du système porte sur la reproduction des opérations de manutention dans le TC et se compose de trois sous-systèmes : sous-système de représentation, sous-système d'interfaçage avec les prestataires de transport routier et le sous-système d'interfaçage avec les prestataires de transport maritime (figure 5).

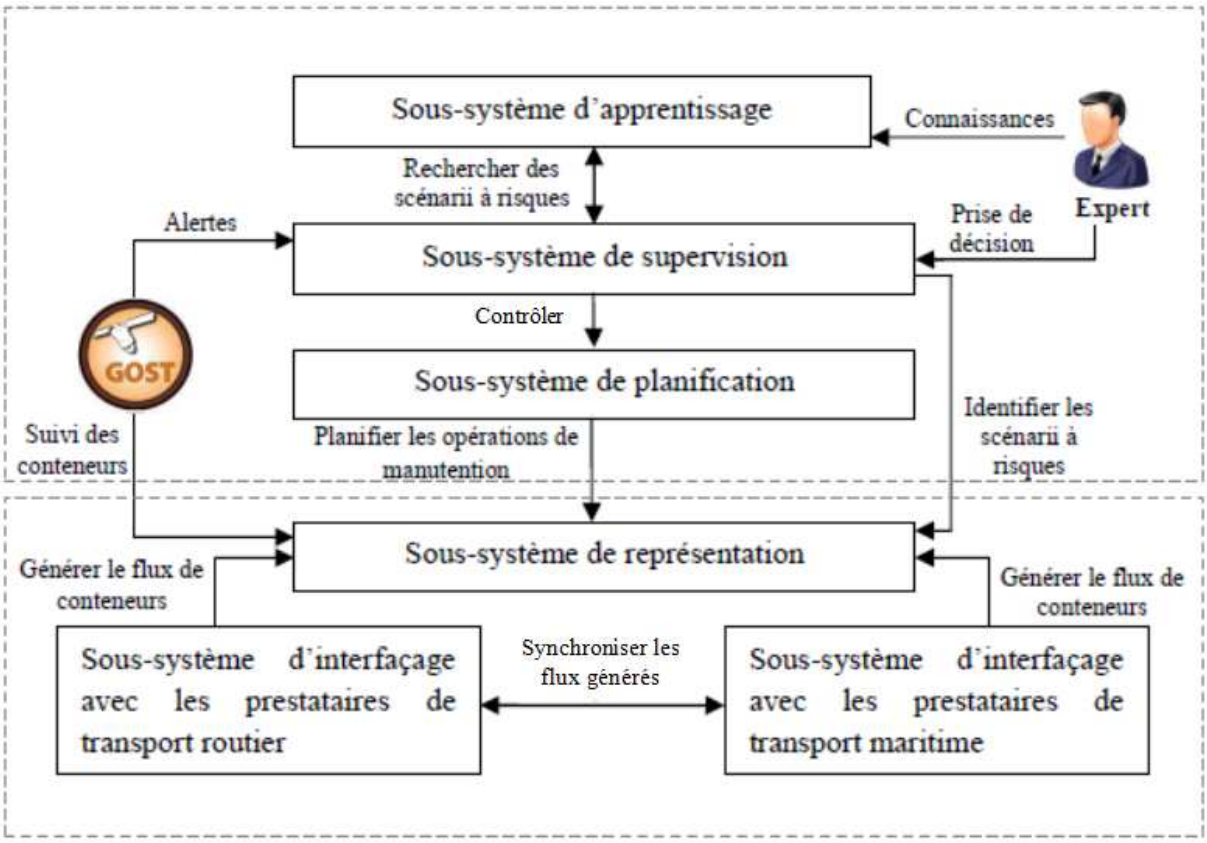

Figure II.5. Classification du SGTC

2.7.1. Les interactions entre les sous-systèmes

La communication entre les sous-systèmes du SGTC se base sur un échange de messages pour la diffusion des ordres et la planification des opérations de manutention. Les agents utilisent le langage de communication agent (ACL) de la fondation des agents intelligents physique (FIPA) [ACL, 2002]. Le tableau 1 spécifie les échanges entre les sous-systèmes. Une description détaillée des interactions communicatives entre les agents, basée sur le FIPA Contract Net Interaction Protocol, est réalisée dans la partie classification en sous-systèmes.

Sous-système	Apprentissage	Supervision	Planification	Représentation	Prestataire de transport routier	Prestataire de transport maritime
Apprentissage	- Gérer la base de connaissances - Archivages des connaissances des experts	- Recherche des scénarios à risques	-	-	-	-
Supervision	-Demander des scénarios à risques -Envoyer les nouveaux scénarios à risques	- Évaluer le risque - Traitements des nouveaux cas par un expert	- Valider les ordres de manutention	- Cibler les conteneurs suspects	-	-
Planification	-	- Demander la validation des emplacements des conteneurs	- Allouer les emplacements de stockage	- Planifier les opérations de manutention	-	-
Représentation	-	- Fournir les informations liées aux conteneurs	-	- Collecte des caractéristiques des conteneurs par GOST	-	-
Prestataire de transport routier	-	-	-	- Générer le flux de conteneurs	-	- Synchroniser les flux entrant et sortant
Prestataire de transport maritime	-	-	-	- Générer le flux de conteneurs	- Synchroniser les flux entrant et sortant	-

Tableau II.1. Les interactions entre les sous-systèmes du SGTC

2.7.2. Sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport routier

Il représente l'ensemble des acteurs du transport routier assurant le transport des conteneurs vers ou à partir du TC. Ce sous-système génère le flux entrant de conteneur au niveau de l'interface terrestre du TC et génère des camions et les trains pour acheminer les conteneurs entrant par l'interface maritime aux clients. La figure suivante présente un diagramme des cas d'utilisation spécifiques au sous-système de transport routier :

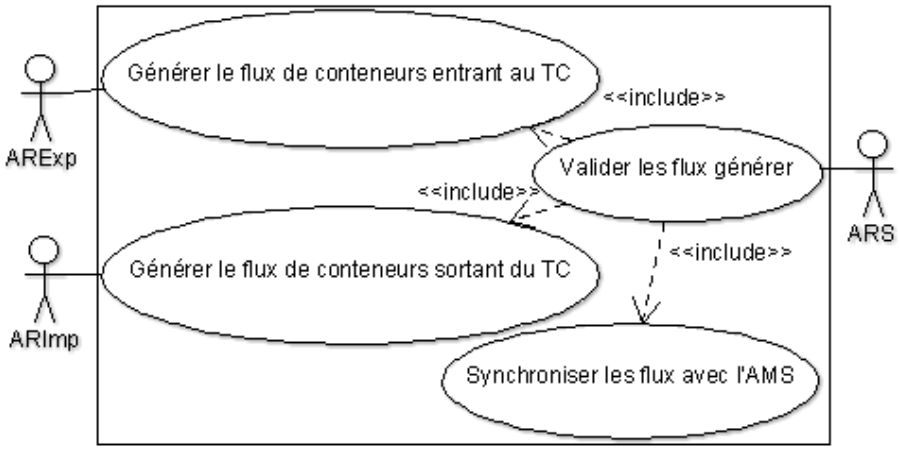

Figure II.6. Sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport routier

Ce sous-système se compose de trois agents :

- Agent Routier Export (AExp) : génère le flux de camion transportant les conteneurs vers la plateforme et par conséquent le flux entrant par la zone terrestre (Figure 7).
- Agent Routier Import (ARImp): génère le flux de camion livrant les conteneurs du TC vers les clients et par conséquent le flux sortant de la zone terrestre (Figure 8).
- Agent Routier de Synchronisation (ARS) : valide le flux de conteneurs généré en coopérant avec l'agent AMS pour s'assurer de la prise en charge de tous les conteneurs (figure 9).

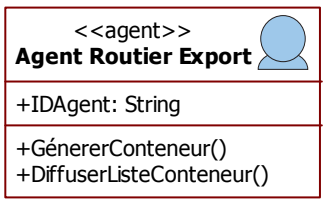

Figure II.7. Agent Routier Export

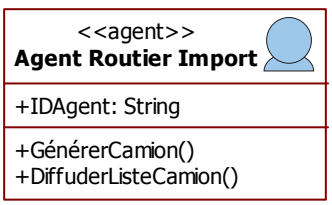

Figure II.8. Agent Routier Import.

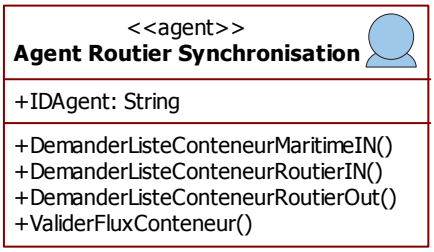

Figure II.9. Agent Routier de Synchronisation

Le fonctionnement de ce sous-système est piloté par l'agent ARS, son rôle principal est d'assurer la concordance des flux de conteneurs entrant et sortant de l'interface terrestre et maritime du TC. Il commence par l'envoi d'un ordre à l'agent ARExp pour la récupération de la liste des conteneurs générés au niveau de l'interface terrestre du TC. Ensuite il récupère la liste des conteneurs entrant par l'interface maritime afin de demander à l'agent ARImp de générer les camions et trains nécessaires pour acheminer les conteneurs aux clients (figure10).

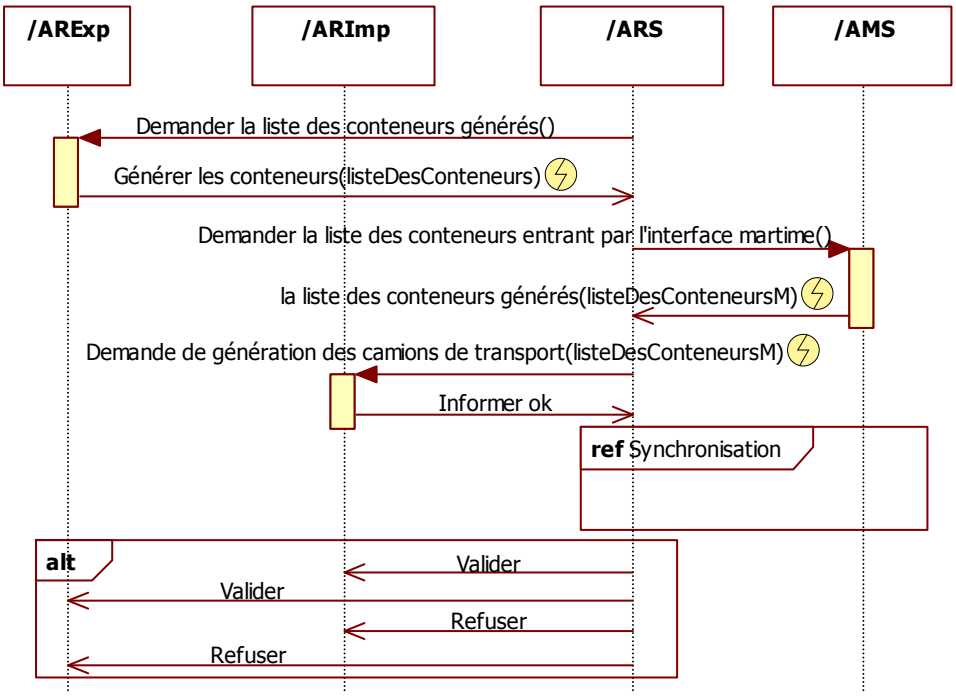

Figure II.10. Diagramme de séquence AML pour le sous-système d'interfaçage avec les prestataires de transport routier

2.7.3. Sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport maritime

Ce sous-système assure la génération d'un flux de conteneur entrant et sortant via l'interface maritime du TC. La figure suivante illustre le rôle principal de chacun des agents qui composent ce sous-système :

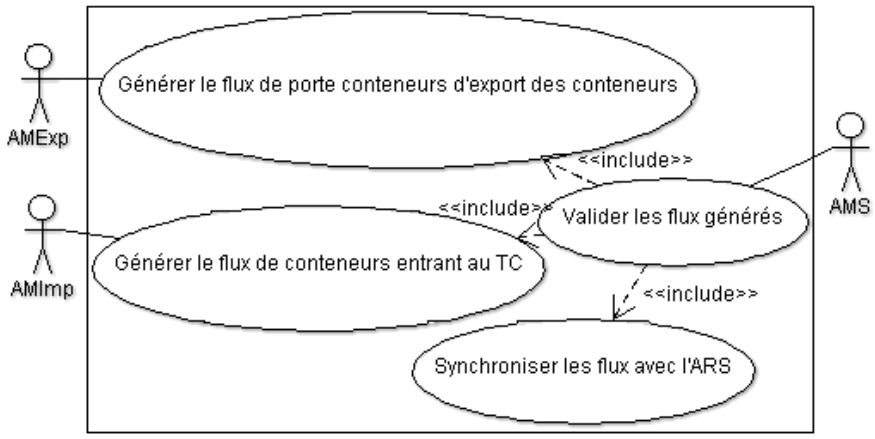

Figure II.11. Sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport maritime

Ce sous-système se compose de trois agents :

- Agent Maritime Export (AMExp) : génère les navires qui transporteront les conteneurs, flux sortant, vers d'autres ports maritimes (Figure 12).
- Agent Maritime Import (AMImp) : génère le flux entrant de conteneurs et les navires qui les transporteront vers le TC étudié (Figure 13).
- Agent Maritime de Synchronisation (AMS) : valide le flux de conteneurs généré par les deux agents AMExp et AMImp en communiquant avec l'agent ARS du sous-système d'interfaçage, avec les prestataires du transport routier pour vérifier la concordance entre le flux entrant et sortant des deux interfaces, maritime et terrestre, du TC (Figure 14).

Figure II.12. Agent Maritime Export

Figure II.13. Agent Maritime Import

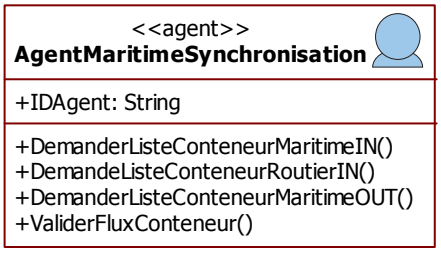

Figure II.14. Agent Maritime Synchronisation

À l'image du sous-système d'interfaçage avec les prestataires de transport routier, le sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport maritime assure la génération du flux entrant et sortant des conteneurs via l'interface maritime du TC. L'agent AMS assure le pilotage et la synchronisation de son fonctionnement avec en coopérant avec l'agent ARS. La figure 15 présente le diagramme de séquence AML qui décrit les interactions des agents du sous-système d'interfaçage avec les prestataires du transport maritime.

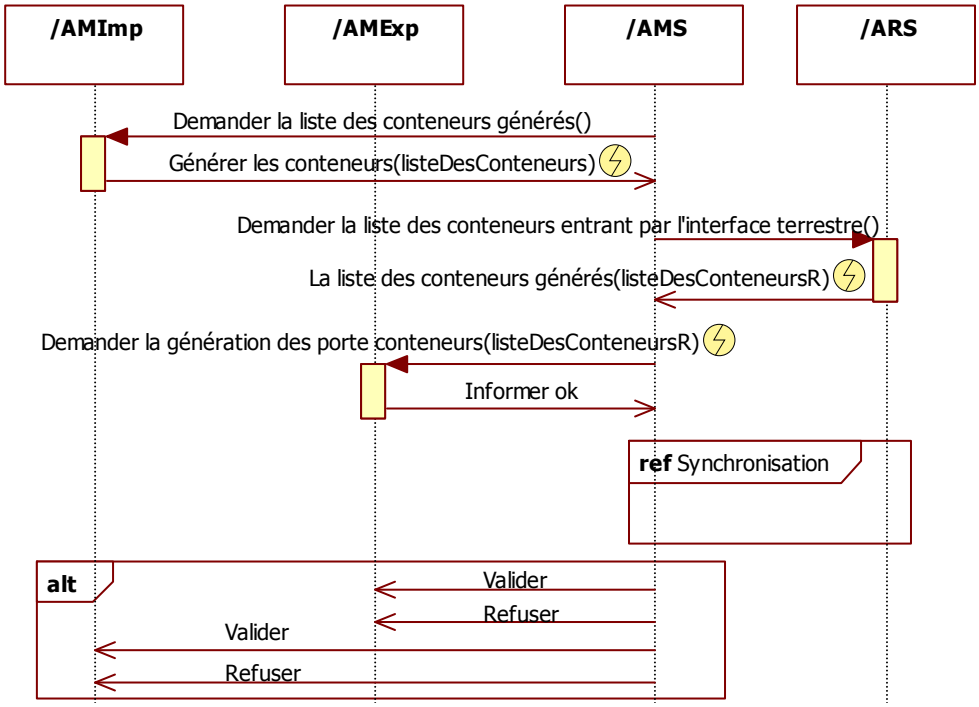

Figure II.15. Diagramme de séquence AML du sous-système d'interfaçage avec les prestataires de transport maritime

1.1.1. Sous-système de représentation

Le sous-système de représentation permet de reproduire les opérations de manutention des conteneurs réalisées au niveau des différentes zones du terminal. Le but de ce sous-système est d'étudier l'impact des différentes stratégies de prévention des risques sur la performance du terminal. Ainsi, nous avons assimilé des agents aux différents acteurs existants au niveau du TC. La figure 16 présente le rôle des engins de manutention.

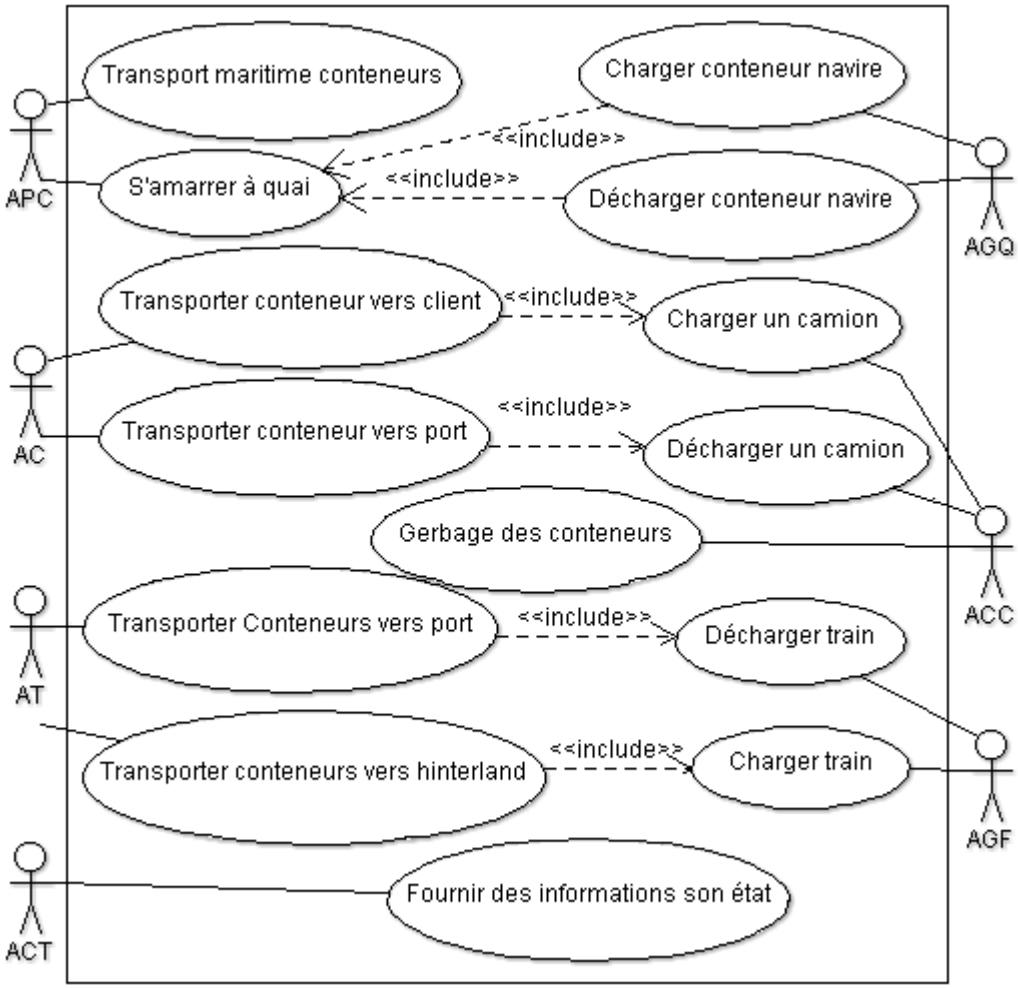

Figure II.16. Diagramme de cas d'utilisation des outils de manutention

Les acteurs de ce sous-système sont classifiés en deux catégories, la première englobe l'ensemble des entités actives du système représentant le matériel de manutention. La deuxième catégorie englobe l'ensemble des agents correspondant aux conteneurs générés au niveau des deux interfaces du terminal.

Le sous-système de représentation se compose des six types agents:

2.7.3.1. Le matériel de manutention

- Agent Porte-Conteneurs (APC) : représente le navire transportant les conteneurs, il est caractérisé par sa capacité (EVP), sa taille, la date d'arrivé et par la date de départ (Figure17).
- Agent Grue de Quai (AGQ) : assure l'empotage et le dépotage des conteneurs, il est caractérisé par la durée d'exécution d'une opération de chargement d'un conteneur (Figure18).

- Agent Train (AT) : Assure le transport massifié des conteneurs entre les TC à l'intérieur du port ou bien vers d'autres ports (Figure19).
- Agent Chariot Cavalier (ACC): assure la récupération des conteneurs transportés par les camions et les place dans la zone allouée. Cet agent est caractérisé par sa vitesse de déplacement (Figure 21).
- Agent Camion de Transport (ACT): assure le transport des conteneurs vers le port ou vers les clients. Il est caractérisé par le type et le volume des conteneurs qu'il peut transporter (Figure 20).
- Agent Grue Ferroviaire (AGF) : assure le chargement et le déchargement des conteneurs à transporter par voie ferrée. La grue ferroviaire réalise des mouvements transversaux pour atteindre les conteneurs existants dans les buffers ferroviaires et les wagons. Elle est caractérisée par sa vitesse de déplacement et la durée nécessaire pour charger ou décharger un conteneur (Figure 22).

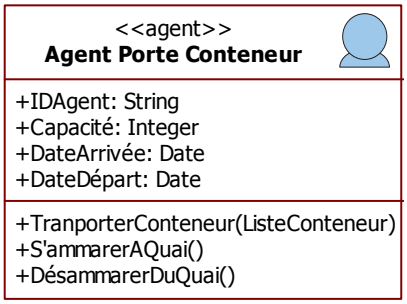

Figure II.17. Agent Porte Conteneur

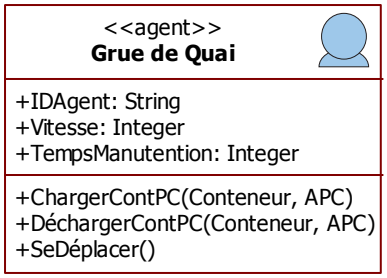

Figure II.18. Agent Grue de Quai

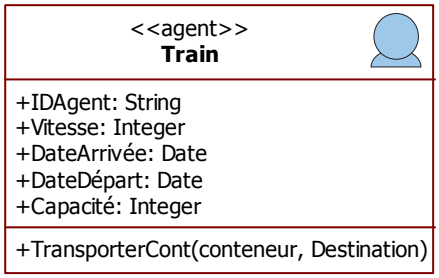

Figure II.19. Agent Train

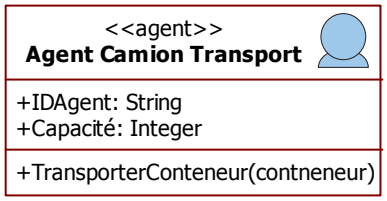

Figure II.20. Agent Camion de Transport

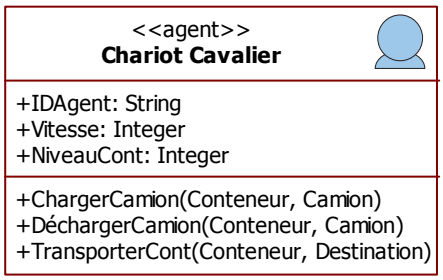

Figure II.21. Agent Chariot Cavalier

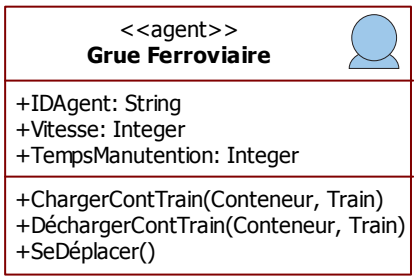

Figure II.22. Agent Grue ferroviaire

2.7.3.2. Les conteneurs

Les agents conteneur représentent des entités porteuses d'informations, ils sont caractérisés par la taille, nature de la marchandise, la quantité de la marchandise, leur origine des marchandises et l'historique des ports par lesquels les conteneurs ont transité. L'agent conteneur met à jour ses caractéristiques en communiquant avec le système de traçabilité GOST :

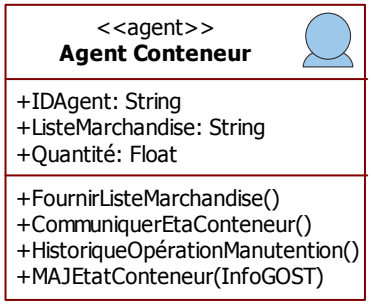

Figure II.23. Agent Conteneur

Les agents de ce sous-système sont pilotés par l'agent AP, ce dernier affecte des tâches de manutention aux agents pour acheminer les conteneurs entre les deux interfaces maritime et terrestre. La figure suivante illustre les interactions entre les agents du sous-système de représentation pour la réception d'un conteneur livré au terminal à conteneur par camion et son expédition par voie maritime :

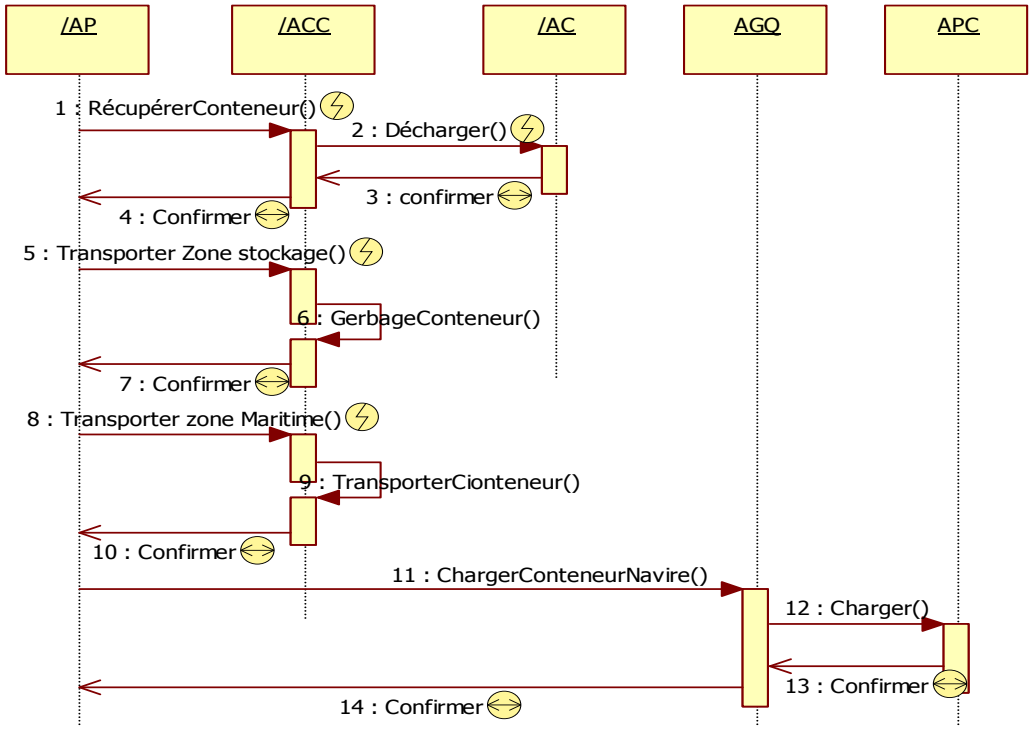

Figure II.24. Diagramme de séquence AML sous-système de représentation

2.7.4. Sous-système de planification

Ce sous-système de composé d'un agent planificateur qui prend en charge les tâches d'allocation des ressources du port pour la manutention des conteneurs. De plus, il assure la réservation des places nécessaires pour le stockage des conteneurs et des quais. La figure suivante présente les principales actions de l'agent planificateur :

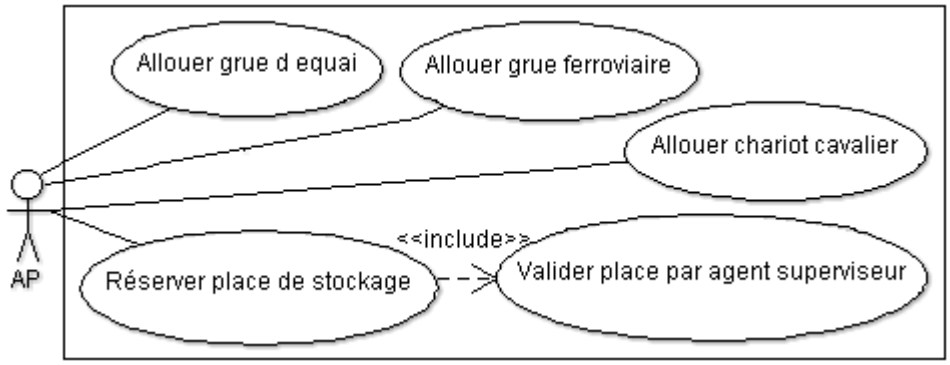

Figure II.25. Diagramme des cas d'utilisation du sous-système de planification

La figure suivante représente la spécification de l'agent de planification en AML :

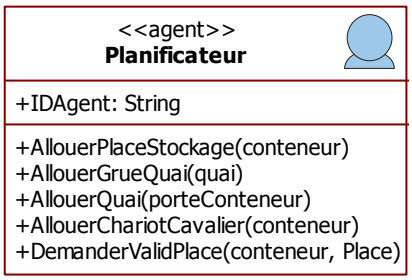

Figure II.26. Agent de Planification

L'agent AP assure le pilotage des opérations de manutention en donnant des ordres aux agents du sous-système de représentation. De plus, il reçoit des ordres du sous-système de supervision lors de la détection d'un risque, par exemple dans le cas d'attribution d'un emplacement dans la zone de stockage à un conteneur qui contient des matières dangereuses sans respecter les règles de ségrégation. La figure 24 illustre les interactions de l'agent planificateur avec le sous-système de représentation pour planifier la réception d'un conteneur par camion et son expédition par voie maritime.

2.7.5. Sous-système de supervision

Assure le suivi des opérations de manutention au niveau du TC et analyse les informations relatives aux conteneurs pour assurer le ciblage des conteneurs suspects afin de les inspecter par les douaniers. D'une part, l'agent superviseur valide l'emplacement de stockage alloué par l'agent planificateur en vérifiant le respect des règles de ségrégation des matières dangereuses. D'autre part, il cible les conteneurs à risques en se basant sur une base de règles alimentée par des connaissances issues des précédentes interventions des douaniers et qui ont conduit à l'identification de conteneurs frauduleux (fausse déclaration de marchandises, trafic de drogue, etc.).

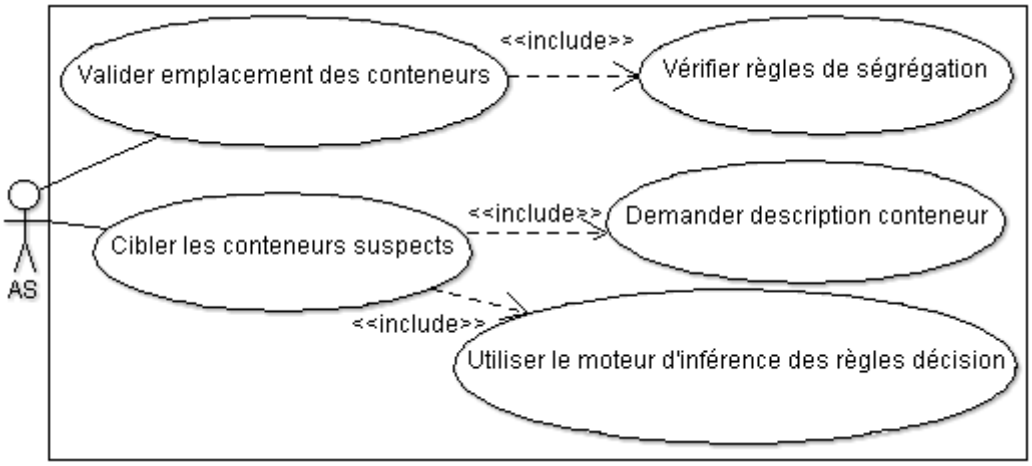

Figure II.27. Diagramme des cas d'utilisation du sous-système de supervision

La figure suivante représente la spécification de l'agent superviseur en AML :

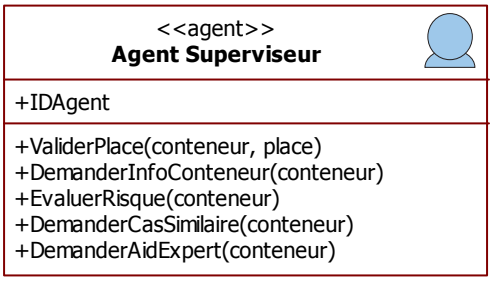

Figure II.28. Agent Superviseur

Pour la prévention des risques au niveau du terminal à conteneurs, l'agent AS analyse les informations relatives à chaque conteneur pour évaluer le risque probable, de plus, il contrôle les décisions de l'agent planificateur, notamment dans le cas du stockage des conteneurs. La figure suivante illustre les interactions de l'agent superviseur :

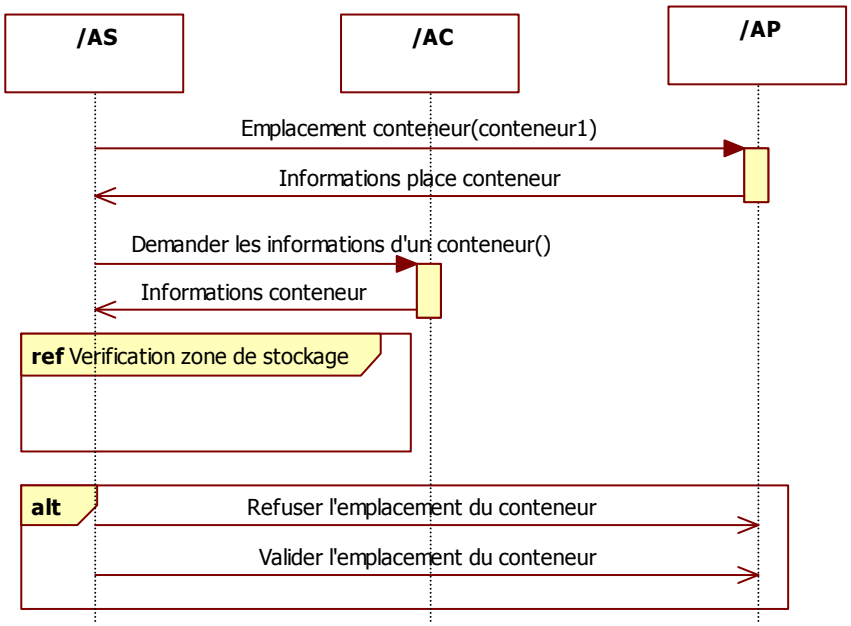

Figure II.29. Diagramme de séquence AML du sous-système de supervision

2.7.6. Sous-système d'apprentissage

Ce sous-système assure la gestion des connaissances qui permettent le ciblage des conteneurs suspects et qui doivent être inspectés par les douaniers et établit un processus d'apprentissage pour la découverte de nouvelles règles de décisions. La figure suivante présente les principales tâches de ce sous-système :

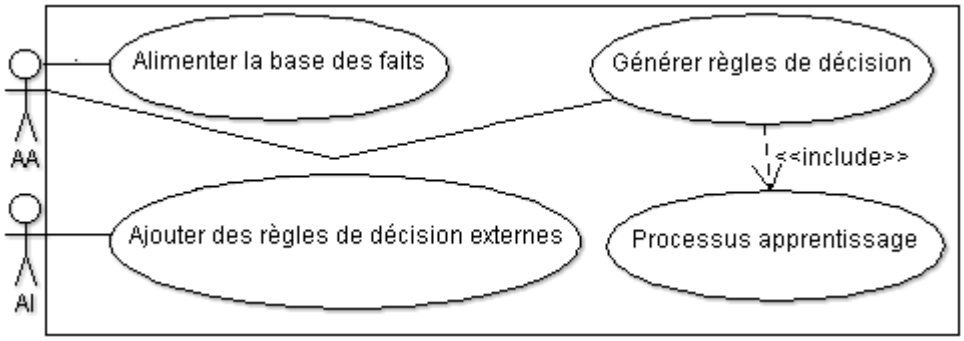

Figure II.30. Diagramme des cas d'utilisation du sous-système d'apprentissage

Les tâches d'apprentissage et de gestion des connaissances sont réalisées par l'agent administrateur et l'agent interface. Le premier assure la gestion de la base de données pour l'archivage de la description des conteneurs frauduleux identifiés lors des inspections menées par les douaniers. De plus, il permet d'établir un processus d'apprentissage pour la génération des règles de décisions à partir de la description des conteneurs frauduleux. Le deuxième agent assure l'interfaçage de ce sous-système avec des sources d'informations externes

permettant l'intégration de nouveaux scénarios à risques fournis par des experts. Le fonctionnement de ce sous-système et le processus d'apprentissage sont détaillés d'une manière exhaustive dans le chapitre suivant.

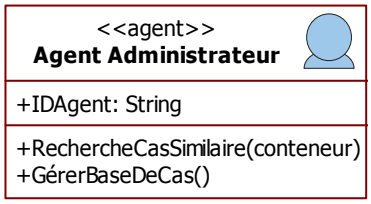

Figure II.31. Agent Administrateur

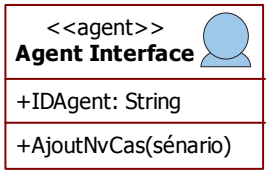

Figure II.32. Agent Interface

3. Discussion

Nous avons proposé une démarche itérative pilotée par les rôles pour la conception du système de gestion d'un terminal à conteneurs. Le but de ce système est de reproduire le fonctionnement d'un terminal à conteneur et d'y intégrer des mesures de gestion des risques afin d'évaluer leur impact sur son fonctionnement.

Nous avons adopté pour une démarche structurée pour la conception du système SGTC basée sur les cas d'utilisation. Dans un premier temps, nous avons procédé à la spécification du contexte de ce système afin d'identifier ses interactions avec les acteurs externes et nous avons établi le diagramme de cas d'utilisation globale pour la spécification des principaux acteurs opérant au niveau du terminal à conteneurs. Ceci nous a facilité la classification du SGTC en plusieurs sous-systèmes qui regroupent les acteurs qui ont une forte cohésion et qui participent aux mêmes missions.

4. Conclusion

Nous avons présenté une démarche de conception du système de gestion d'un terminal à conteneurs basée sur le paradigme agent. Pour ce faire, nous avons proposé un processus de développement itératif piloté par les rôles, les cas d'utilisation, pour identifier les acteurs du terminal à conteneurs étudié. Nous avons opté pour le langage de modélisation AML pour la spécification des agents qui composent le SGTC et leurs interactions. Ceci nous a permis de classifier notre système en plusieurs sous-systèmes cohérents qui ont des missions bien définies, ce qui atténue la complexité du système étudié.

L’objectif principal de ce système est de reproduire le fonctionnement du terminal à conteneurs TDF du port du Havre et de permettre l’intégration de nouvelles mesures préventives pour sécuriser son fonctionnement. En ce sens, nous nous focalisons sur l’intégration des règles de ségrégation des matières dangereuses dans le stockage des conteneurs et le ciblage des conteneurs suspects dans le fonctionnement du TDF.

Dans le chapitre suivant, nous développons l’implémentation d'un système de gestion d’un terminal à conteneurs et de nouvelles mesures pour le sécuriser. D’autre part, nous proposons plusieurs scénarios de simulation du TDF pour analyser l’impact des processus d’inspection et de ségrégation.

Chapitre III.

Analyse des risques et mise en œuvre

Sommaire

1. Introduction

L'intégration de nouvelles mesures pour la gestion des risques au niveau d'un terminal à conteneurs est primordiale pour garantir sa sécurité et sûreté de fonctionnement face à la montée des activités frauduleuses et les risques engendrés par ces activités de manutention des conteneurs. Dans ce chapitre, nous présentons une analyse des risques susceptibles de survenir au niveau d'un terminal à conteneurs. D'une part, nous allons présenter la mise en œuvre du SGTC en intégrant un processus de gestion des risques dont le but est d'assister les douaniers dans le ciblage des conteneurs suspects et le respect des règles de ségrégation lors du stockage des matières dangereuses. D'une autre part, nous présentons une simulation de plusieurs scénarios de fonctionnement du TC-TDF.

Nous proposons une démarche de développement structurer en trois étapes principales pour faciliter la mise en œuvre du SGTC. La première met le point sur la spécification des processus de gestion des risques. La deuxième présente l'implémentation des agents et leurs interactions. La dernière étape se focalise sur la spécification des scénarios de simulation du fonctionnement du TC-TDF et sur l'évaluation de ses indicateurs de performance. Le schéma suivant illustre une vue globale de la démarche de développement :

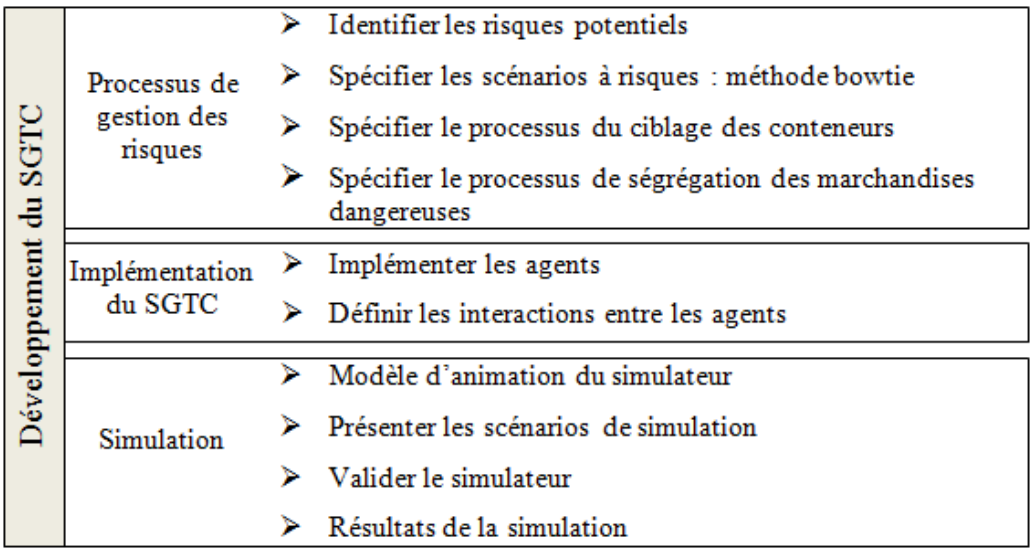

Figure III.1. Démarche de développement du SGTC

2. Le processus de gestion des risques

2.1. Une analyse des risques

L’analyse des risques a pour but d'analyser les processus de fonctionnement du TC-TDF afin d'identifier les risques qui menacent son fonctionnement. Pour cela, nous allons analyser le processus de manutention d’un conteneur en export. En suite, nous allons spécifier les risques potentiels liés aux activités qui composent le diagramme BPMN relatif au processus d’export au niveau du TC-TDF.

Notre cas d’étude concerne le processus d'exportation d'un conteneur qui transite par le terminal de France du port du Havre. Le conteneur est livré par un camion qui assure son transport jusqu’à l’interface terrestre du TC-TDF. À l’arrivé du camion à la guérite terrestre du terminal, les agents de la douane procèdent à la vérification de l'identité du chauffeur du camion, à la vérification de l’état du conteneur afin de détecter des anomalies éventuelles et à la concordance des informations fournies par le chauffeur avec la déclaration du conteneur pour pouvoir autoriser l’accès du camion à l’intérieur du TC. Dans le cas où toutes les informations sont conformes, les douaniers autorisent l’entrée du camion et lui communique la place de stationnement dans le parking intérieur des camions.

À l’arrivée du porte-conteneurs qui exportera le conteneur vers un autre port, le système de planification alloue un chariot-cavalier pour transporter le conteneur vers un buffer tout près du du quai. De plus, le planificateur génère un plan de manutention des grues de quai, de manière à charger les conteneurs en export sur le navire avant son départ.

Ce processus a été enrichi par la spécification d’un ensemble d’événements à risques qui peuvent survenir durant le processus d’export. En ce sens, nous avons identifié, entre autres, les risques suivants : la fausse déclaration, le non-respect de la ségrégation des conteneurs, les collisions durant la manutention des conteneurs par les chariots-cavaliers et les grues de quai et les collisions des porte-conteneurs durant l’amarrage à quai. La figure 2 illustre le processus d’exportation d’un conteneur via le terminal de France et les risques qui menacent le fonctionnement de ce terminal.

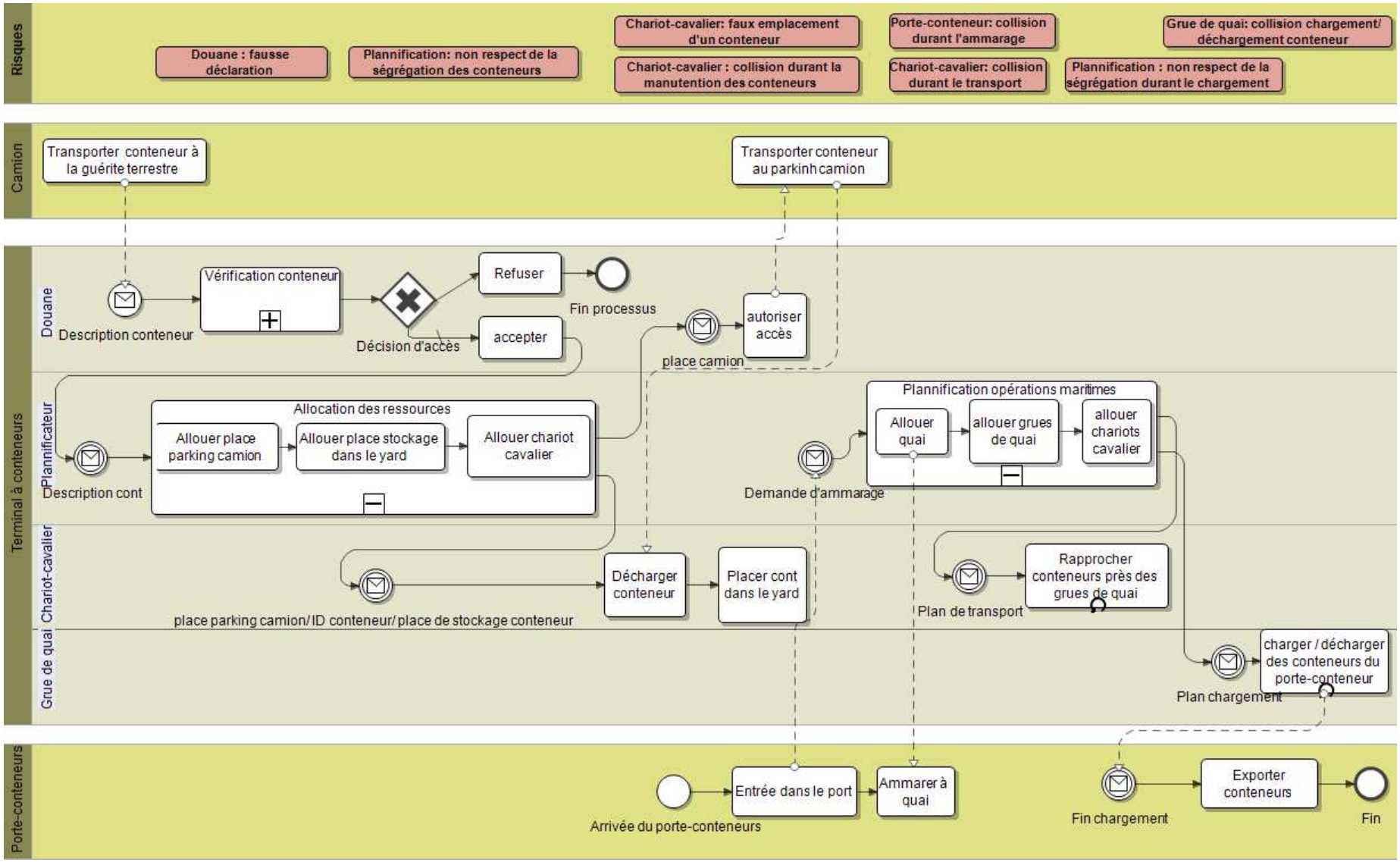

Figure III.2. Processus d'acheminement d'un conteneur en export via le terminal de France

2.2. Les Scénarios à risques

Un TC est assujetti à une pléthore de risques susceptibles de survenir à cause de plusieurs facteurs internes ou externes. L'objectif de cette étape est de spécifier des scénarios à risques crédibles pour pouvoir identifier les causes d'un événement indésirable et la prévision de l'évolution de ses conséquences. Ceci est d'une grande importance pour la priorisation des contremesures à mettre en œuvre.

La spécification d'un scénario à risques consiste à décrire l'évolution d'un événement indésirable dans le temps par la spécification de ses causes et ses conséquences potentielles. Pour cela, nous proposons l'utilisation de la méthode nœud de papillon « bowtie » afin de mener une analyse précise et spécifier des scénarios à risques réalistes [Marhavilas et al., 2011]. Cette méthode se base sur la combinaison de deux autres méthodes analyse de l'arbre des événements (ETA- Event Tree Analysis) [Marhavilas et al., 2011] et analyse l'arbre de défaillances (FTA- Fault Tree Analysis) [Desroches et al., 2007]. Chaque scénario à risques comporte les événements amont et aval associés à l'événement étudié.

La gestion des risques au niveau d'un TC est plus au moins liée à la sûreté de fonctionnement, tel que les risques liés à la manutention des conteneurs et notamment les collisions. Cependant, l'émergence des activités qui exploitent les conteneurs à des fins frauduleuses implique le traitement des risques liés à des facteurs externes au port. Par la suite, nous allons détailler deux scénarios à risques ; le premier, est lié à la sécurité du TC et concerne les risques de fausse déclaration de conteneurs, le deuxième est lié à la sûreté de fonctionnement d'un TC et concerne la ségrégation des conteneurs de matières dangereuses dans la zone de stockage.

2.2.1. La fausse déclaration d'un conteneur

La figure suivante illustre un diagramme bowtie qui représente les différentes causes et conséquences de la fausse déclaration des conteneurs :

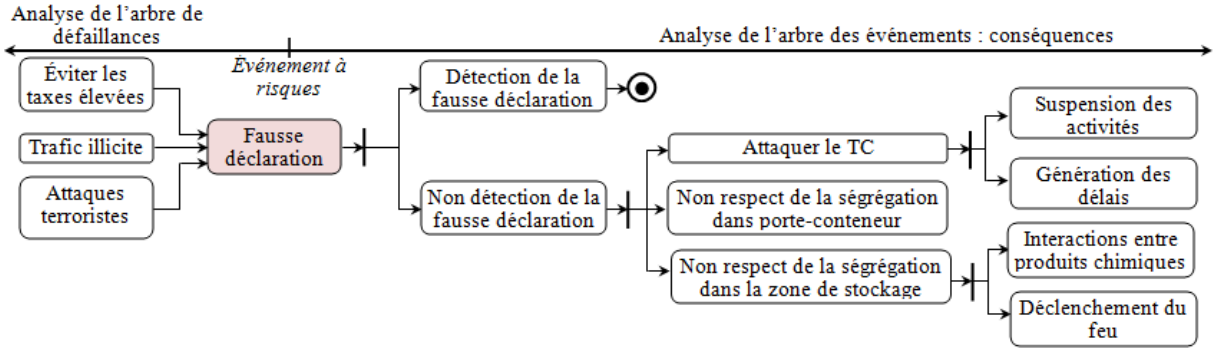

Figure III.3. Scénario à risques : fausse déclaration d'un conteneur

Ce diagramme montre que les causes du risque de fausse déclaration d'un conteneur sont diverses. Ce risque peut engendrer différentes conséquences, tel que la suspension des activités totales ou partielles au niveau du TC suite à une attaque terroriste au niveau du TC. De plus, la fausse déclaration de produit chimique est susceptible d'engendrer des interactions entre les produits incompatibles dus au non-respect de la ségrégation.

2.2.2. La ségrégation des matières dangereuses

La figure suivante présente un diagramme bowtie qui donne une vue globale concernant les causes et les conséquences du non-respect de la ségrégation des marchandises dangereuses au niveau de la zone de stockage d'un TC :

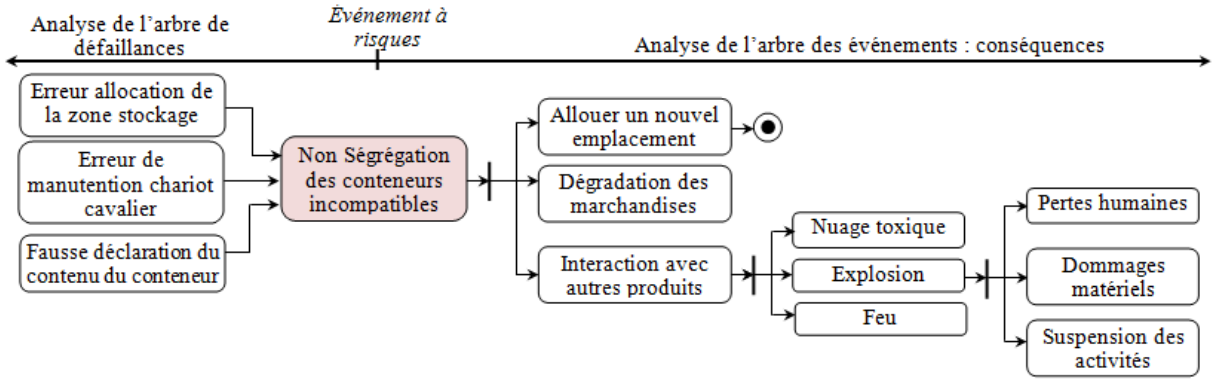

Figure III.4. Scénario à risques : non-ségrégation des marchandises dangereuses

Le non-respect de la ségrégation des marchandises dangereuses est causé soit par des actions intentionnelles telles que la fausse déclaration ou par des erreurs involontaires durant la réservation d'une place de stockage par le planificateur ou une erreur de manutention par un chariot-cavalier. La transgression des règles d'entreposage des produits dangereux peut entrainer une dégradation de la qualité des marchandises et des interactions qui peuvent avoir

des conséquences, telles que le déclenchement du feu et les nuages toxiques. Ceci est susceptible d'engendrer des pertes matérielles et humaines.

Le traitement de ces risques passe par la spécification d'une barrière de contrôle avant un des événements qui compose le scénario à risque afin de stopper son évolution. Ci-dessous, nous proposons des contremesures pour pallier les fausses déclarations et le non-respect de la ségrégation des conteneurs.

2.3. La mitigation du risque

L'objectif de cette section est de proposer des contre-mesures à mettre en œuvre pour atténuer les risques que nous avons identifiés. Pour cela, nous proposons un processus d'aide à la décision pour supporter les douaniers dans le ciblage des conteneurs suspects et un processus pour la vérification des règles de ségrégation durant l'allocation des places pour le stockage des conteneurs.

2.3.1. Le ciblage des conteneurs suspects

En ce qui concerne le traitement du risque de fausse déclaration des conteneurs, nous proposons un processus d'aide à la décision à base des règles afin d'aider les douaniers à cibler des conteneurs suspects en les inspectant avant leur expédition. Les règles de décision représentent les connaissances acquises par les douaniers durant les inspections passées. La relation suivante illustre un exemple d'une règle d'association utilisée pour la prise de décision :

(Destination du conteneur **est** A) **et** (Transporteur **est** B) ⟶ Conteneur suspect

2.3.1.1. Vue globale du processus décisionnel pour le ciblage

L'implémentation de cette solution se base sur l'utilisation du moteur d'inférence des règles JESS [Friedman-Hill, 2003]. JESS est utilisé pour permettre à l'agent superviseur du SGTC de prendre une décision concernant l'inspection d'un conteneur. La figure suivante illustre le fonctionnement global de ce processus :

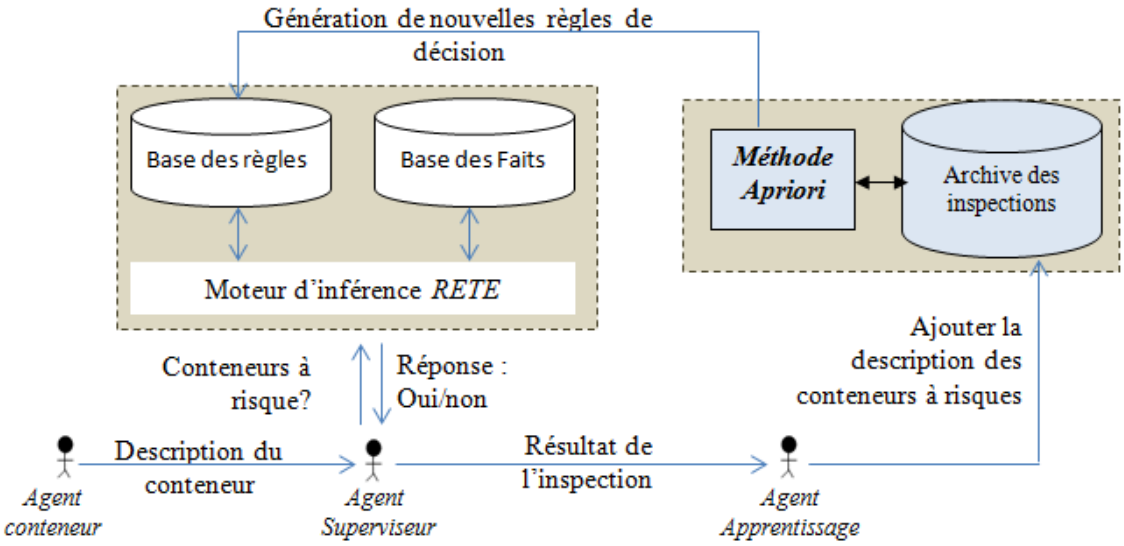

Figure III.5. Vue globale du processus de ciblage des conteneurs suspect

L'agent superviseur commence par la récupération de la description d'un conteneur fournie par l'agent conteneur et charge cette description dans la base des faits pour lancer le processus de prise de décision. Le raisonnement est assuré par le moteur d'inférence des règles RETE qui exploite la base des règles pour prendre une décision [Friedman-Hill, 2003]. Dans le cas où le conteneur est jugé suspect, l'agent superviseur demande à l'agent planificateur de planifier l'inspection du conteneur dans la zone d'inspection. Si le conteneur inspecté est frauduleux, l'agent d'apprentissage enregistre sa description dans une base de données des archives des inspections. La base de données est exploitée par l'agent administrateur pour générer de nouvelles règles en se basant sur l'algorithme Apriori [Agrawal et Srikant, 1994].

2.3.1.2. Processus d'apprentissage

Le processus d'aide à la décision proposé s'affranchit de la simple utilisation de JESS en tant que système expert par l'intégration d'un processus d'apprentissage pour la découverte de nouvelles règles de décisions à partir des données massives qui représentent l'archive des descriptions des conteneurs frauduleux détectés. Pour cela, nous utilisons l'algorithme d'extraction des règles d'association Apriori proposé par Agrawal [Agrawal et Srikant, 1994]. Cet algorithme est décri par le pseudo-code suivant :

```
1)  L1 = {large 1-itemsets} ;
2)  for ( k =2; Lk-1 ≠ Ø ; k ++ ) do begin
3)      Ck = apriori-gen(Lk-1); // Nouveau candidat
4)      forall transactions t ∈ D do begin
5)          Ct = subset( Ck , t); // Candidats existants dans t
6)          forall candidates c ∈ Ct do
7)              c.count++;
8)      end
9)      Lk ={ c ∈ Ck | c.count ≥ minsup }
10) end
11) Answer = Uk Lk ;
```

L'algorithme « Apriori » repose sur l'utilisation des ensembles fréquents pour la génération des règles d'association. Cet algorithme fonctionne en deux étapes :

- **L'étape jointure** : consiste en l'utilisation de la fonction « Apriori-gen » pour la génération des ensembles fréquents en augmentant le nombre d'items qui les composent à chaque itération. Pour ce faire, cette fonction procède par la génération de tous les ensembles candidats possibles qui ont une longueur **n** en se basant sur la jointure des ensembles candidats qui ont une longueur égale **n-1**.

- **L'étape élagage** : élimine les ensembles candidats qui ont des « (k-1)itemsets » peu fréquents. Pour ce faire, « Apriori » calcul le support S des règles d'association générées en déterminant le pourcentage de leurs « itemsets » parmi toutes les transactions et garde seulement les règles d'association qui ont un indice de support supérieur au support minimal afin d'éliminer les règles d'association impertinente. La relation suivante présente le calcul de l'indice de support :

Règle d'association $\mathbf{R : X \rightarrow Y}$

$$Indice\ de\ Support\ (R) = \frac{\text{Nbr d'occurrence de } (X \cup Y)}{\text{Nbr de transactions}}$$

Apriori propose l'indice de confiance pour l'élagage des règles générées qui ont un indice inférieur au seuil déterminé. Ceci permet d'éliminer les règles caractérisées par une faible probabilité. La relation suivante illustre le calcul de l'indice de confiance :

Règle d'association $R : X \rightarrow Y$

$$Indice\ de\ Confiance\ (R) = \frac{\text{Nbr d'occurrence de } (X \cup Y)}{\text{Nbr d'occurence de } X}$$

Pour illustrer l'application de cette méthode d'extraction des règles d'association, nous proposons de traiter un exemple simple. Le tableau suivant représente les résultats de quatre inspections réalisées par la douane.

ID	Description des résultats de l'intervention
1	Conteneur de groupage, pays d'origine en Europe, déclaration exacte
2	Conteneur de groupage, transporteur non agréé, pays d'origine en Asie, fausse déclaration
3	Conteneur complet, transporteur non agréé, fausse déclaration
4	Conteneur de produits dangereux, transporteur agréé, pays d'origine en Asie, fausse déclaration

Tableau III.1. Liste des transactions : description des résultats d'inspection

La première étape de l'algorithme Apriori consiste à générer toutes les associations possibles en se basant sur les « items » élémentaires qui existent dans le tableau 1. Pour faciliter cette étape, nous nous limitons au traitement des deux règles d'associations suivantes :

- Si le transporteur n'est pas agréé alors c'est une fausse déclaration
- Si c'est un conteneur de groupage alors c'est une fausse déclaration

La deuxième étape porte sur le calcul de l'indice de support de ces règles d'association. En ce sens, l'indice de support pour la première règle correspond au nombre de transactions qui contiennent les deux items ***transporteur non-agréé*** et ***fausse déclaration*** divisé par le nombre total des de transactions du tableau 1. Ainsi, le support de la première règle est de 2/4 =0,5 et le support de la deuxième règle est 1/4 = 0,25. Nous supposons que le seuil minimal pour garder une règle d'association est égal à 0,25. Les deux règles sont donc gardées pour le calcul de l'indice de confiance.

En ce qui concerne le calcul de l'indice de confiance de la première règle, il est égal au nombre de transactions qui contiennent les deux items ***transporteur non agréé*** et ***fausse***

déclaration divisé par le nombre de transaction qui contiennent le ***item transporteur non agréé*** seulement. Ainsi, l'indice de confiance de la première règle est égale à 2/3=0,66 et l'indice de confiance pour la deuxième règle est 1/3 = 0,33. Nous supposons que l'indice de confiance minimum pour garder une règle est 0,5 pour éliminer les règles non fréquentes. En conséquence, nous éliminons la deuxième règle parce que son indice de confiance est inférieur au seuil que nous avons fixé.

2.3.1.3. Mise en œuvre

La mise en ouvre de ce processus se base sur l'analyse de la description des conteneurs. Ainsi, nous avons exploité des critères utilisés par la douane pour la déclaration d'un conteneur. Ces critères sont détaillés dans [Gningue, 2011] comme suit :

1. Le propriétaire du dépôt de conteneurs vide est un Opérateur Économique Agréé (OEA) ?
2. L'exportateur est OEA ?
3. Le transporteur est OEA ?
4. Le transporteur entre les terminaux est OEA ?
5. Le destinataire final est OEA ?
6. Le dépôt de conteneurs vides est sous vidéo surveillance ?
7. Le numéro de conteneur vide transmis est référencé ?
8. Un arrêt long du transport d'un conteneur dans un parc de stationnement non sécurisé ?
9. Le Client à communiquer le numéro de scellé au port ?
10. Zone d'empotage de marchandises dans le conteneur est sécurisé ?
11. Numéro du scellé est différent du numéro communiqué par le client ?
12. Scellé est mal posé ?
13. Exportateur est connu dans le pays de destination ?
14. Le pays de destination n'est pas une destination à risque ?
15. Le conteneur est en, transbordement ?
16. Le Pays d'origine est un pays à risques ?
17. Le conteneur en export est vide ?
18. Le conteneur est équipé de détecteur d'ouverture ?
19. L'accès à la zone de stockage du TC est contrôlé ?
20. Le scellé est fragilisé ?
21. Le conteneur est transfert entre les terminaux ?
22. La zone portuaire est sécurisée ?
23. Le conteneur a été contrôlé dans le port d'export ?
24. Le conteneur contient des matières dangereuses ?

Nous avons développé un outil qui permet de générer un jeu de données qui correspond aux déclarations de conteneurs et de générer aléatoirement des conteneurs frauduleux. Cet outil permet aussi de gérer la base des règles du système, de simuler le

processus d'inspection des conteneurs et de lancer le processus d'apprentissage pour la génération des nouvelles règles de décision. La figure suivante illustre l'interface de cet outil :

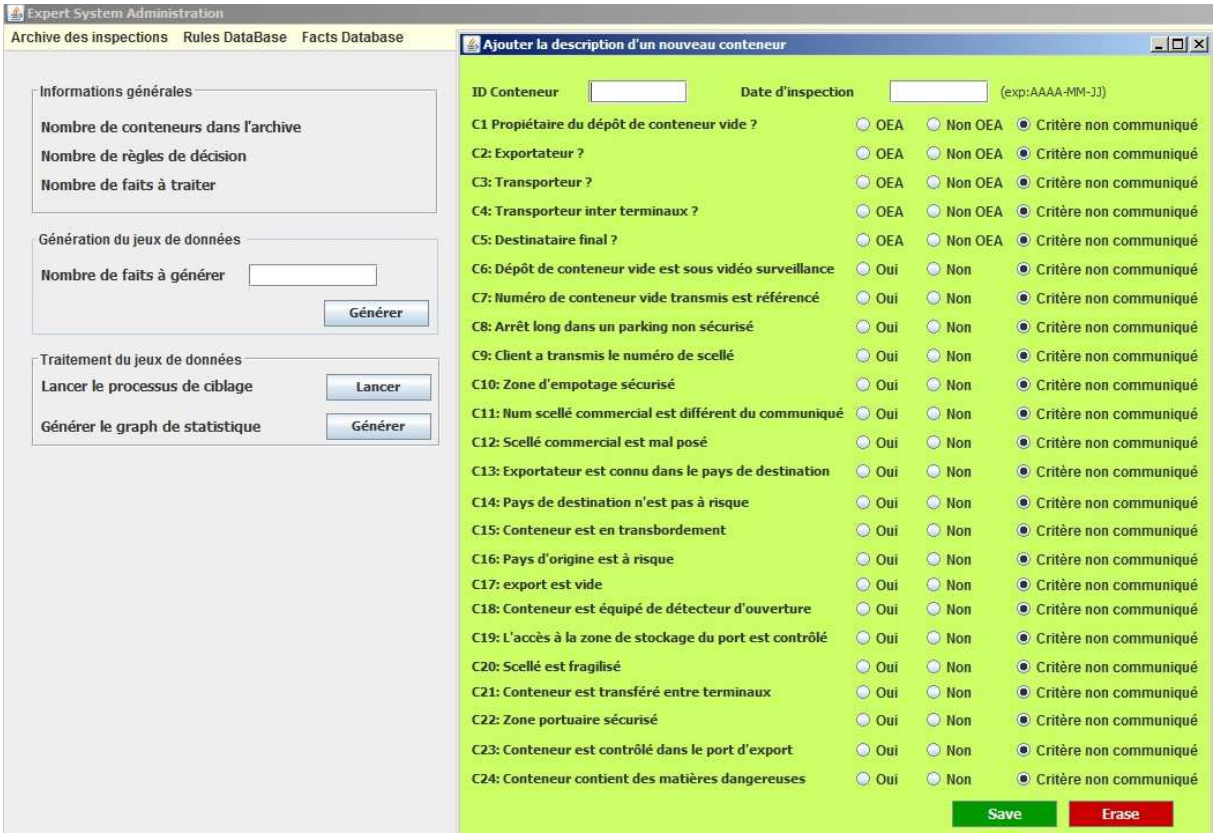

Figure III.6. Interface graphique pour ajouter la déclaration d'un conteneur

Pour tester le processus de ciblage des conteneurs suspects, nous générons un jeu de données qui représente la déclaration de 1 million de conteneurs. Parmi ces conteneurs seulement 0.6% sont frauduleux et ils sont choisis aléatoirement avec une distribution aléatoire dans l'échantillon de données étudié. Selon [Dahlman et al., 2005] les ressources dont dispose le port du Havre en termes de scanners de conteneur et d'agents douaniers pour l'inspection intrusive des conteneurs permettent d'inspecter seulement 0.5% des conteneurs qui transitent par le TC-TDF. Dans une récente réunion des autorités portuaires, ils ont montré que la capacité d'inspection du port du Havre en 2013 est de 1.6% du nombre total de conteneurs.

2.3.1.4. Résultats

Le processus d'inspection des conteneurs débute avec une base de connaissances vide et les conteneurs sont inspectés aléatoirement. En suite, le processus d'apprentissage est lancé après chaque transit de 100.000 conteneurs pour la génération des règles de décisions. La

figure 7 présente une comparaison entre le nombre de conteneurs ciblés par le système d'aide à la décision et le nombre de conteneurs à risques détectés après le traitement de 100.000 conteneurs. La comparaison de ces deux paramètres permet de comprendre comment le système améliore la pertinence de ses décisions sur la base des règles générées par le processus d'apprentissage. En conséquence, nous constatons une nette amélioration du nombre de conteneurs frauduleux identifiés par rapport au nombre de conteneurs suspects ciblés.

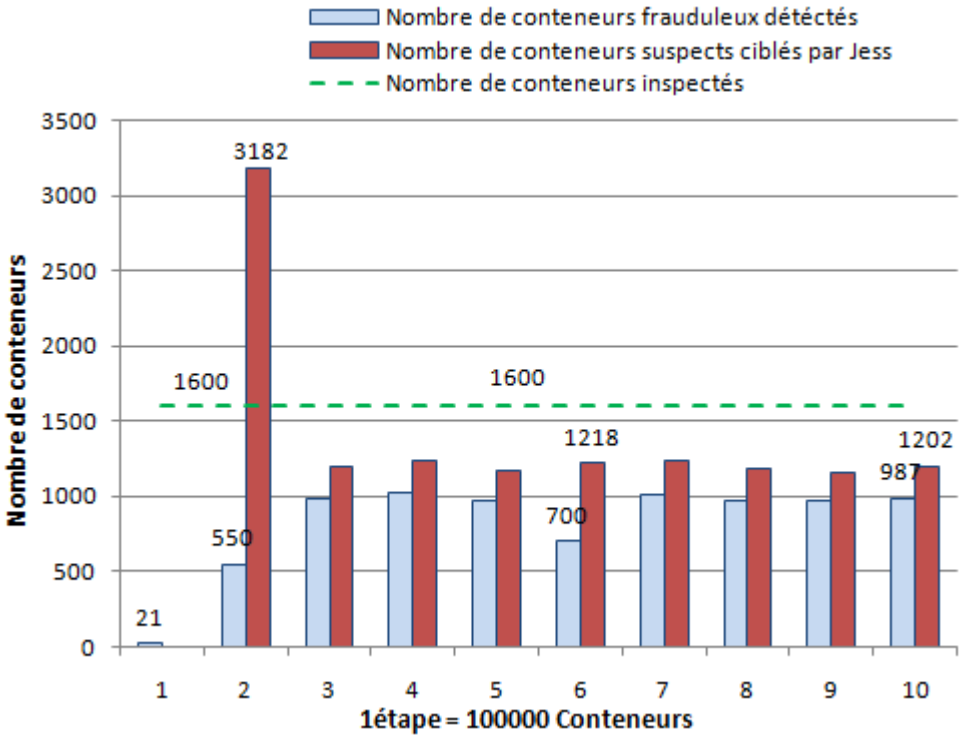

Figure III.7. Comparaison du nombre de conteneurs frauduleux détectés et le nombre de conteneurs ciblés

L'exécution du processus d'apprentissage une fois après chaque analyse de 100.000 conteneurs permet la mise à jour de la base des règles. Ceci permet l'adaptation du processus de décision en supprimant des règles non pertinentes et la génération de nouvelles règles. Dans la première étape, nous avons détecté seulement 21 conteneurs frauduleux parmi 1600 conteneurs inspectés à cause du choix aléatoire des conteneurs et l'absence des règles de décision. Dans la deuxième étape, le système a ciblé 3182 conteneurs et détecté 550 conteneurs, ce qui présente une légère amélioration des décisions due à la génération des règles de décision. À partir de la troisième étape, nous constatons une grande amélioration des décisions suite à la génération à l'amélioration de la pertinence des règles. En conséquence, le nombre de conteneurs suspects est inférieur au nombre maximal des conteneurs inspectés.

Nous exploitons la diminution du nombre de conteneurs suspects afin de choisir aléatoirement d'autres conteneurs, d'identifier de nouveaux conteneurs frauduleux qui ont un profil non identifiable et de générer des règles appropriées à ces cas.

Le graphe suivant présente le changement du nombre de règles de décision durant le processus de ciblage et les variations du taux de bonnes décisions :

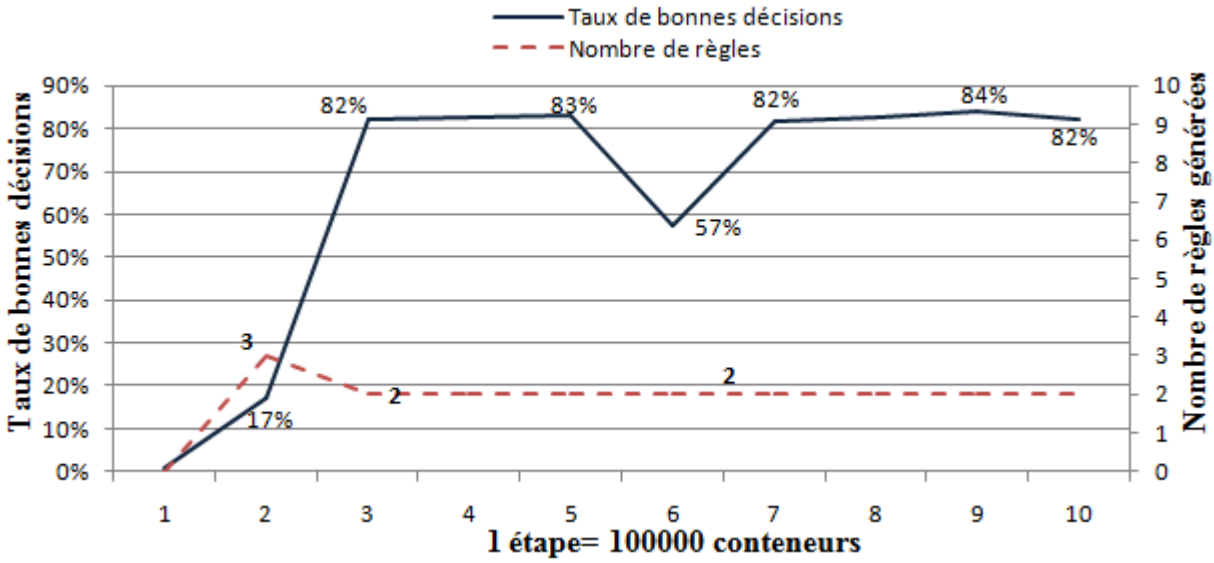

Figure III.8. Évolution du taux de bonnes décisions et le nombre de règles générées

Dans la première étape, le taux de bonne décision est de 1% en raison du ciblage aléatoire des conteneurs. Dans la seconde étape, le processus d'apprentissage a généré trois règles de décision ce qui a contribué à l'amélioration du taux de bonnes décisions à 17%. Ce taux reste faible à cause de l'impertinence des règles de décision générées due au faible nombre de description des conteneurs que nous avons exploités pour la génération des règles. La troisième étape montre que le système utilise seulement deux nouvelles règles et le taux de bonne décision a évolué à 82%. Ce résultat signifie que les nouvelles règles générées sont appropriées pour le ciblage des conteneurs frauduleux. Les résultats obtenus dans les autres étapes gardent les mêmes règles avec un taux de bonne décision en moyenne égale à 77,6%.

2.3.2. La ségrégation des conteneurs

Nous avons proposé un processus de supervision de la gestion de la zone de stockage des conteneurs pour pallier le problème de la transgression des règles de ségrégation. Ce processus consiste à superviser des décisions du planificateur durant l'allocation des emplacements de stockage.

2.3.2.1. Vue globale du processus de ségrégation des conteneurs

Le mécanisme de coordination entre les agents pour le respect des contraintes de ségrégation commence par l'identification des agents qui représentent les conteneurs de matières dangereuses. Pour ce faire, l'agent superviseur (AS) communique avec l'agent conteneur (AC) pour récupérer la description des marchandises qu'il contient. Ainsi, s'il s'agit d'un conteneur de matières dangereuses, l'AS détermine les règles de ségrégation à respecter. Pour cela, l'AS dispose d'une matrice qui détermine les distances à respecter entre les produits incompatibles. Ensuite, les contraintes à respecter sont communiquées à l'agent planificateur (AP) afin d'allouer un espace de stockage en cours de validité. L'AP explore après les zones de stockage des conteneurs pour vérifier la disponibilité d'un lieu de stockage approprié et communique les résultats à l'agent AS. La figure suivante présente une vue globale du processus de ségrégation des conteneurs :

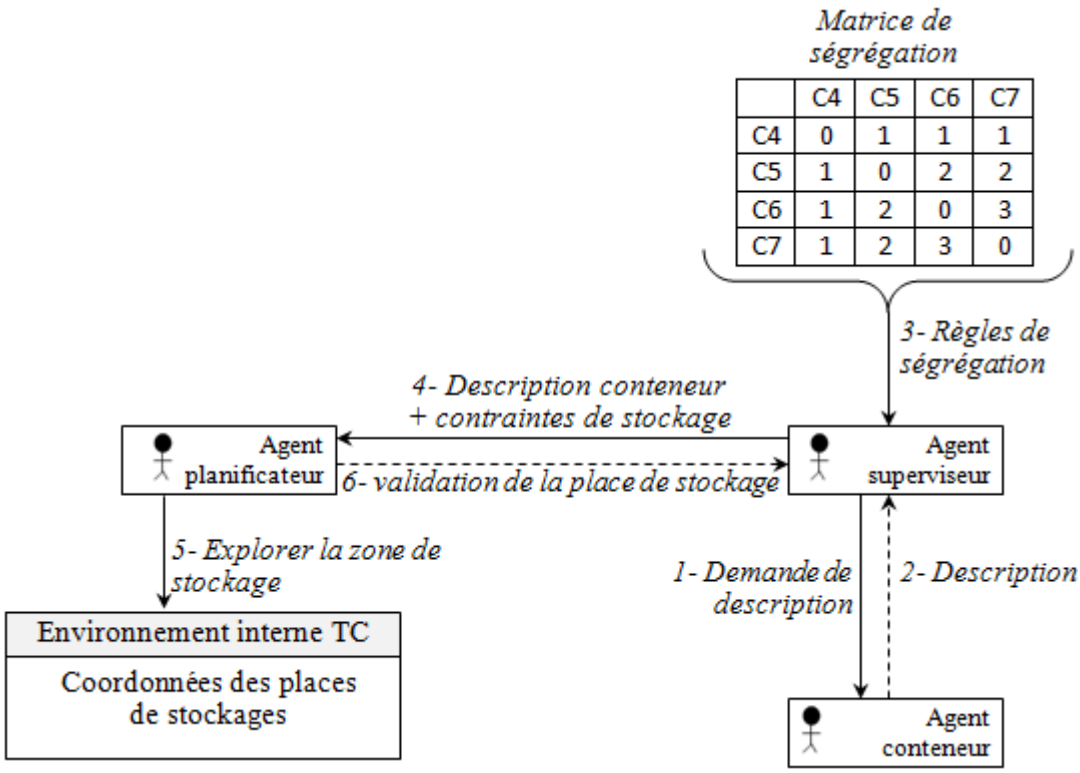

Figure III.9. Processus de supervision de la ségrégation des conteneurs

2.3.2.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre de ce processus met le point sur la vérification des conditions de stockage des conteneurs au niveau du TC. Pour cela, nous avons traité le cas de quatre classes de marchandises qui sont la classe 4 des solides inflammables, la classe 5 des matières

comburantes, la classe 6 des matières toxiques et infectieuses et la classe 7 des matières radioactives. La ségrégation entres ces classes de produits se passe par la spécification de distances suffisantes pour obvier leurs interactions. Les distances entre ces conteneurs sont exprimées par le nombre de conteneurs qui les séparent en respectant les distances mentionnées dans la matrice de ségrégation suivante :

	Solides inflammables	Matières comburantes	Matières toxiques et infectieuses	Matières radioactives
Solides inflammables	Compatible	1EVP	1EVP	1EVP
Matières comburantes	1EVP	Compatible	2EVP	2EVP
Matières toxiques et infectieuses	1EVP	2EVP	Compatible	3EVP
Matières radioactives	1EVP	2EVP	3EVP	Compatible

Tableau III.2. Distance de ségrégation entre les classes incompatibles

3. L'implémentation du SGTC

Nous avons opté pour la plateforme agent JADE pour implémenter les agents qui composent le SGTC. Dans cette section, nous allons présenter l'implémentation des agents et leurs interactions suivant la logique de plateforme d'implémentation.

3.1. Le comportement des agents en logique JADE

Nous avons opté pour des comportements composés de JADE pour pouvoir décrire le comportement des agents qui composent le SGTC. Pour ce faire, nous avons combiné des comportements de type FSMBehaviour et les comportements parallèles. Le premier type consiste en la spécification d'un automate à états finis qui décrit l'ordre d'exécution des comportements élémentaires. Le deuxième type permet l'exécution de plusieurs comportements en parallèle d'une manière asynchrone. Ci-dessous, nous présentons le comportement des agents qui représentent le matériel de manutention au niveau du TC-TDF. Nous nous focalisons sur la description des comportements des agents planificateurs, chariot-cavalier et camion.

3.1.1. Le comportement de l'agent planificateur

Pour assurer ces interactions, le fonctionnement du planificateur consiste en deux comportements exécutés en parallèle. Le premier est un comportement cyclique qui reste en écoute des messages des agents et un autre comportement qui assure l'envoie des messages. La figure suivante illustre ce comportement :

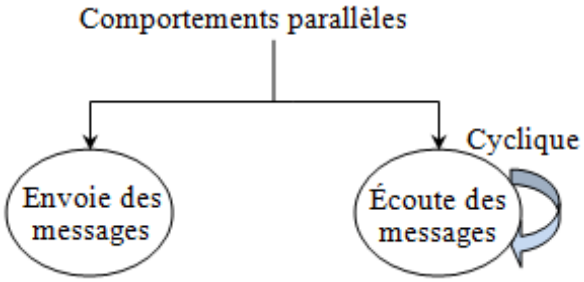

Figure III.10. Comportement de l'agent planificateur

3.1.2. Le comportement de l'agent chariot-cavalier

Le fonctionnement de l'agent chariot-cavalier consiste en un comportement composé qui se base sur l'exécution de deux comportements principaux. Le premier assure la réception des messages envoyés par le planificateur. Le deuxième comportement composé de plusieurs comportements élémentaires qui représentent les fonctions de base d'un chariot-cavalier. Ces derniers sont le déplacement, l'empilement et le dépilement des conteneurs dans la zone de stockage, le chargement et le déchargement des conteneurs. La figure suivante illustre le comportement du chariot-cavalier :

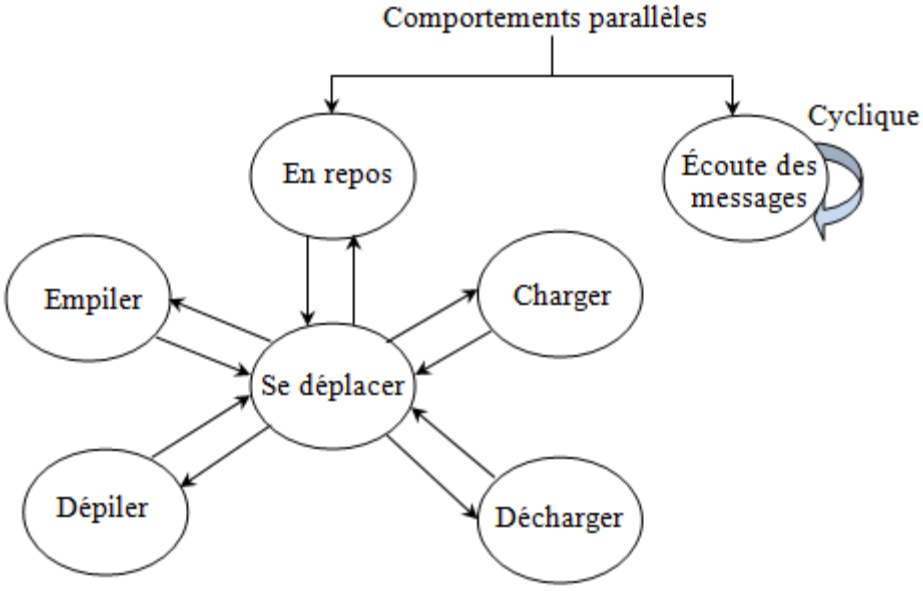

Figure III.11. Comportement de l'agent chariot cavalier

3.1.3. Le comportement de l'agent camion

Le fonctionnement de l'agent camion consiste en un FSMBehaviour composé d'un comportement cyclique qui représente l'attente du camion à l'extérieur du TC, d'un comportement simple qui représente le déplacement du camion et d'un comportement cyclique qui représente l'attente du camion dans le parking interne du TC pour la réalisation des opérations de chargement et de déchargement. La figure suivante illustre un automate à états finis qui représente le comportement de cet agent :

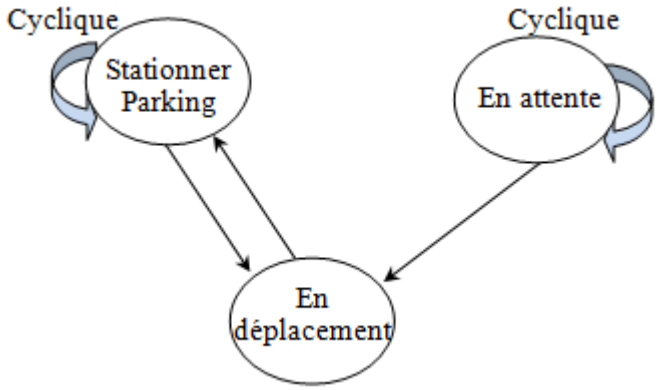

Figure III.12. Comportement de l'agent camion

3.2. La communication entre les agents

La plateforme JADE se base sur l'échange des messages ACL (Agent Communication Language) pour définir les interactions entre les agents. Pour cela, JADE propose l'utilisation des pages jaunes pour permettre aux agents d'enregistrer et publier leurs services et faciliter la découverte de ces services par d'autres agents. Nous détaillons par la suite la communication entre les agents du SGTC.

3.2.1. Message ACL

La communication entre les agents du SGTC est basée sur un message ACL. Selon la logique JADE, les interactions entre les agents commencent par la consultation d'une page jaune qui représente un annuaire qui regroupe les adresses des agents et leurs services. La page est gérée par agent facilitateur (DF- Directory Facilitator) ainsi :

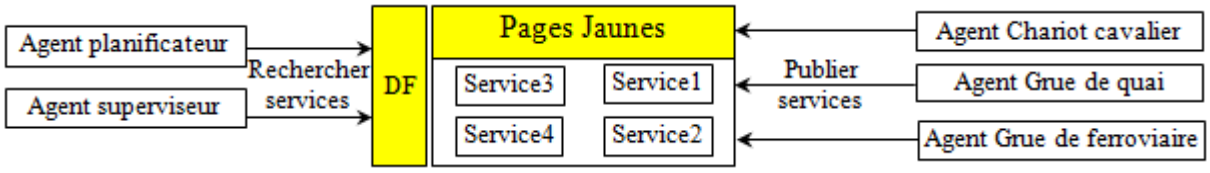

Figure III.13. Fonctionnement des pages jaunes en JADE

Après la découverte de l'agent qui fournit un service, la communication entre les agents se passe, dans le cas simple, par échanges de messages ACL. Nous proposons l'exemple d'un message ACL pour ordonner la manutention d'un conteneur envoyé par l'agent planificateur à un agent chariot-cavalier :

(**INFORM**
:*sender* (agent-identifier :name AS@127.0.0.1:1099 /JADE :addresses (sequence http: //MNA-PC.home:7778/acc))
:*receiver* (set (agent-identifier :name AR@127.0.0.1:1099 /JADE)) :content "ContainerID = 320, ContainerFromPlace= X, ContainerTo-Place= Y").

Via ce message, le planificateur ordonne à un ACC de transporter un conteneur avec ID320 de la place X à une place Y. Cet échange est simple, mais dans certains cas, la communication entre les agents nécessite plusieurs échanges. Pour cela, nous avons adopté le Contract Net interaction Protocol pour structurer ces interactions.

3.2.2. Protocol CNP « Contract Net interchange »

Le SGTC se compose de plusieurs agents qui proposent les mêmes services, tels que les chariots-cavaliers. Pour cela, l'affectation des tâches de manutention impose à l'agent planificateur de suivre un processus structuré en plusieurs étapes. Ces derniers se manifestent dans la découverte des agents disponibles et le choix de la meilleure offre. Pour ce faire, l'AP affecte les tâches de manutention aux différents agents en se basant sur le Contract Net interaction Protocol (CNP). Par exemple, pour l'allocation d'un chariot-cavalier, l'AP diffuse un message CFP « Call for Proposal » à tous les ACC et compare les propositions qu'il a reçues pour choisir la meilleure. En ce qui concerne les tâches de manutention, il choisit l'offre du premier agent libre afin de lancer la mission de manutention dans le meilleur délai. La figure suivante illustre la demande de service d'un chariot-cavalier suivant le CNP :

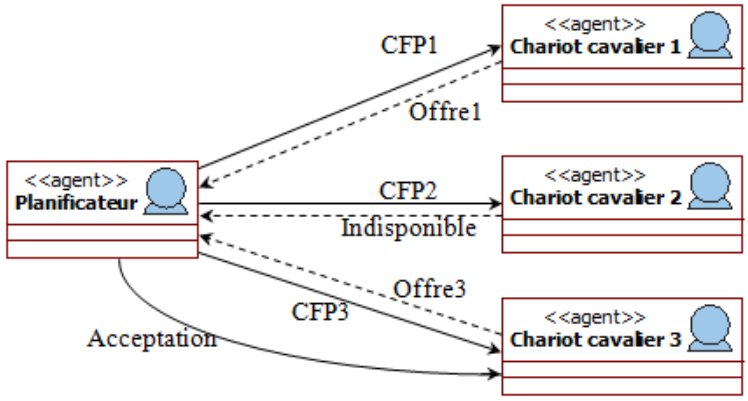

Figure III.14. Interaction du planificateur basée Contract Net interaction Protocol

4. La simulation

4.1. Interface d'animation du modèle de simulation

Le sous-système de représentation offre une interface graphique pour la visualisation des comportements des agents durant la simulation du fonctionnement du TC-TDF. Ainsi, cette interface d'animation du modèle de simulation intègre l'ensemble des objets qui composent l'environnement interne et les dimensions réelles du cas étudié. La disposition et les dimensions de l'environnement ont été définies grâce à la segmentation d'une image satellite du TC-TDF.

En outre, ce modèle intègre un graphe pondéré pour spécifier les itinéraires de circulation des camions, des chariots-cavaliers, des grues de quai, des grues ferroviaires et des trains. Ce graphe est particulièrement utilisé par les chariots-cavaliers pour calculer le plus court chemin pour atteindre un emplacement dans le terminal. Il se compose d'un ensemble de nœuds qui représentent des points d'accès aux places de stockage des conteneurs, reliés par des arcs valués par les distances entre les deux nœuds. Pour l'implémentation de ce graphe, nous avons opté pour la bibliothèque des graphes dynamique « Graphstream » [Graphstream, 2014]. Nous avons associé aux agents des icônes pour chaque type de matériel de manutention. De plus, nous avons associé aux zones de stockages des conteneurs quatre couleurs différentes :

- Gris : une place libre
- Vert : une place avec un seul conteneur
- Jaune : une place avec deux conteneurs empilés
- Bleu : une place avec trois conteneurs empilés
- Rouge : une place de stockage avec quatre conteneurs empilés

L'implémentation des animations est basée sur l'utilisation de la bibliothèque JAVA « 2D graphics API ». La figure suivante donne un aperçu global sur l'interface principale du simulateur.

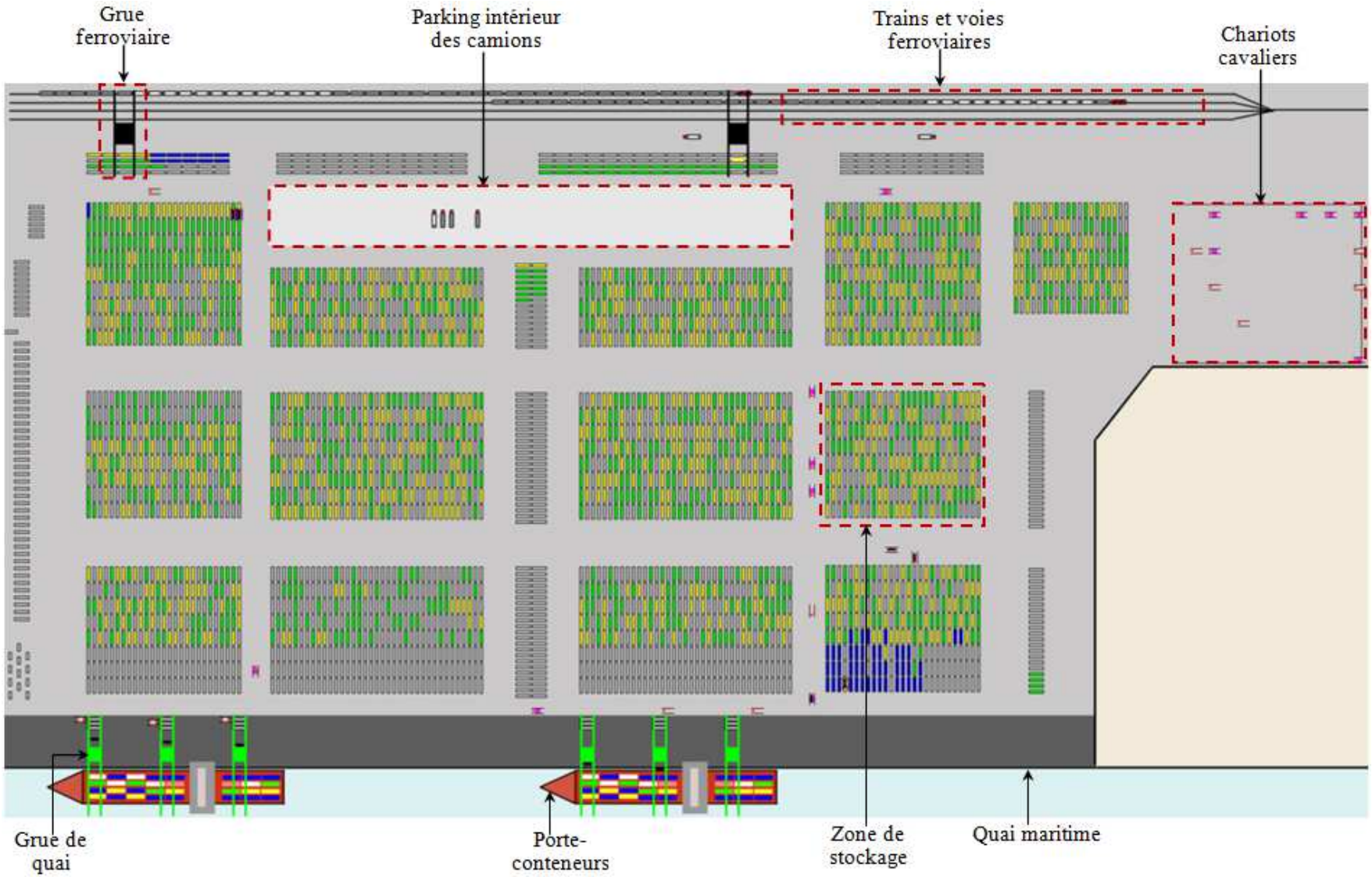

Figure III.15. Interface du modèle d'animation de la simulation

4.2. Les scénarios de la simulation

L'objectif de la simulation est d'évaluer l'impact de la gestion des risques sur la performance du TC-TDF. Pour cela, nous nous focalisons sur l'évaluation de la performance opérationnelle du terminal. Ainsi, nous proposons plusieurs scénarios de simulation afin d'évaluer l'impact individuel de chaque mesure de gestion des risques. En sus, nous proposons des scénarios basés sur la combinaison des mesures de ségrégation et d'inspection des conteneurs avec plusieurs niveaux de contrôle.

4.2.1. Le scénario de fonctionnement normal

Ce scénario vise la simulation du fonctionnement normal du TC-TDF. Nous supposons que le nombre moyen de conteneurs qui transitent par ce terminal varie entre 1400 et 2000 conteneurs/jour. L'objectif de ce scénario est de prouver que la stratégie de fonctionnement que nous avons spécifiée pour la planification des opérations de manutention permet le transit des conteneurs sans retard. De plus, les résultats de la simulation représentent l'évaluation de l'impact des mesures de prévention sur la performance du TC-TDF.

4.2.2. Le scénario de ségrégation

Ce scénario vise la simulation du fonctionnement du TC-TDF avec l'intégration des règles de ségrégation entre les conteneurs de matières dangereuses incompatibles. Pour cela, nous avons étendu le scénario de fonctionnement normal par l'introduction de quatre types de marchandises incompatibles (Voir la section 2.3.2). Ainsi, en adéquation avec les statistiques concernant le nombre de conteneurs de marchandises dangereuses qui transitent par le TC-TDF, nous avons fixé un taux de 10% de conteneurs de marchandises dangereuses. De plus, ces conteneurs sont répartis irrégulièrement sur le temps de la simulation d'une manière à varier le nombre de conteneurs de marchandises dangereuses qui transite par le terminal à conteneurs d'une journée à l'autre.

4.2.3. Le scénario ciblage et inspection des conteneurs suspects

Ce scénario étend le scénario de fonctionnement normal du TC-TDF par l'intégration d'un processus de ciblage et d'inspection des conteneurs suspects. Le taux d'inspection des conteneurs est fixé à 1,6% du nombre global de conteneurs. Le scénario intègre le transfert des conteneurs suspects vers la zone d'inspection et considère aussi le temps nécessaire pour

le scanning des conteneurs et l'inspection intrusive par les douaniers. Le taux de 1,6% représente la capacité réelle de scanning du port du Havre.

4.2.4. Le scénario ségrégation + inspection

Ce scénario est basé sur la combinaison des deux scénarios de ciblage et de ségrégation. Il concerne l'évaluation de l'impact de la combinaison des activités de ségrégation et d'inspection sur les indicateurs de performance opérationnelle. Nous avons varié le taux de conteneurs inspectés afin d'évaluer l'évolution de la durée moyenne d'attente pour le scanning des conteneurs. Pour cela, nous avons défini quatre taux d'inspection de conteneurs avec 1,6%, 3%, 4,5% et 6%.

4.3. La validation du modèle de simulation

Le but de cette étape est de s'assurer de la validité du modèle de simulation proposée, ce qui garantit la précision des résultats générés par la simulation. Pour ce faire, nous avons opté pour la démarche de vérification et validation des modèles de simulation proposée par Sargent [Sargent, 2010]. Cette démarche est structurée en trois étapes principales: la validation du modèle conceptuel, la vérification du modèle informatique et la validation opérationnelle.

La validation du modèle conceptuel consiste en la vérification de la fidélité du modèle conceptuel au cas d'étude et de sa capacité à représenter ses spécificités. Pour cela, nous avons adopté un processus itératif et incrémental pour affiner le modèle et répondre à la réalité. De plus, nous avons visité le TC-TDF plusieurs fois afin de comprendre son fonctionnement et recenser les règles qui régissent son fonctionnement.

La validation du modèle informatique consiste en la vérification de l'adéquation du programme informatique pour l'implémentation du modèle conceptuel. Cette étape a été facilitée par le découpage du SGTC en plusieurs sous-systèmes. D'une part, nous avons procédé au développement et la vérification de chaque sous-système d'une manière indépendante puis nous avons entamé l'intégration de ces sous-systèmes. D'une autre part, la plate-forme JADE garde la même la logique d'un automate à états finis au niveau du codage du comportement des agents.

La validation opérationnelle met le point sur la validation du comportement résultant du modèle de simulation. Pour ce faire, nous nous sommes focalisés sur l'ergonomie du

paramétrage de ce système pour faciliter le calibrage du modèle de simulation et aboutir à une représentation précise du fonctionnement du TC-TDF. De plus, la validation opérationnelle consiste en la vérification de la capacité de la stratégie de fonctionnement du modèle de simulation à servir les conteneurs qui transitent par le TC-TDF en respectant les délais, en particulier au niveau de l'interface maritime du terminal.

Nous nous sommes basés sur le scénario de fonctionnement normal pour la validation opérationnelle du modèle de simulation. Les courbes suivantes illustrent une comparaison entre le délai de livraison maximal d'un conteneur et le délai livraison résultant de la simulation suivant le mode d'expédition par train, porte-conteneurs et camion.

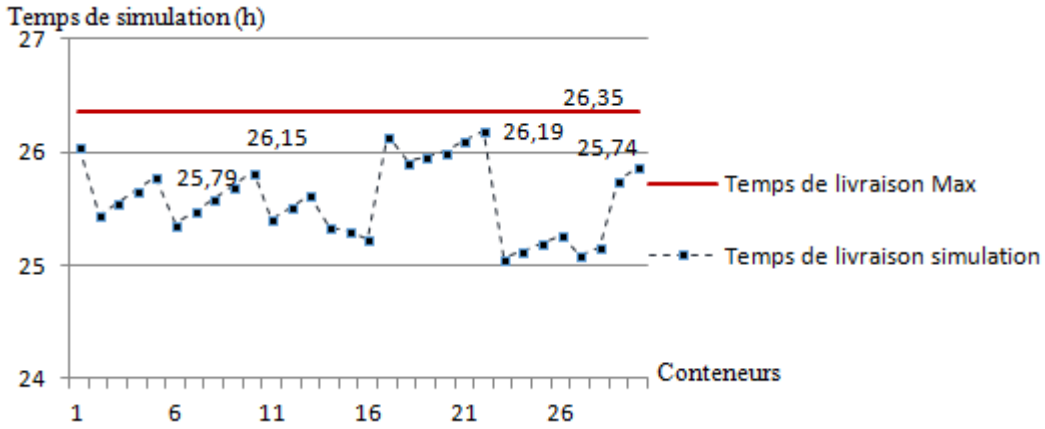

Figure III.16. Comparaison du délai de livraison maximal et simulé cas d'un train

Cette courbe illustre une comparaison entre le délai maximal pour la livraison et le délai de livraison résultant de la simulation pour le cas des conteneurs expédiés par train en analysant un échantillon de 30 heures de simulation. Ce graphe prouve que la stratégie de gestion que nous avons proposée pour la planification des opérations de manutention a permis d'expédier les conteneurs en respectant sans engendrer des retards.

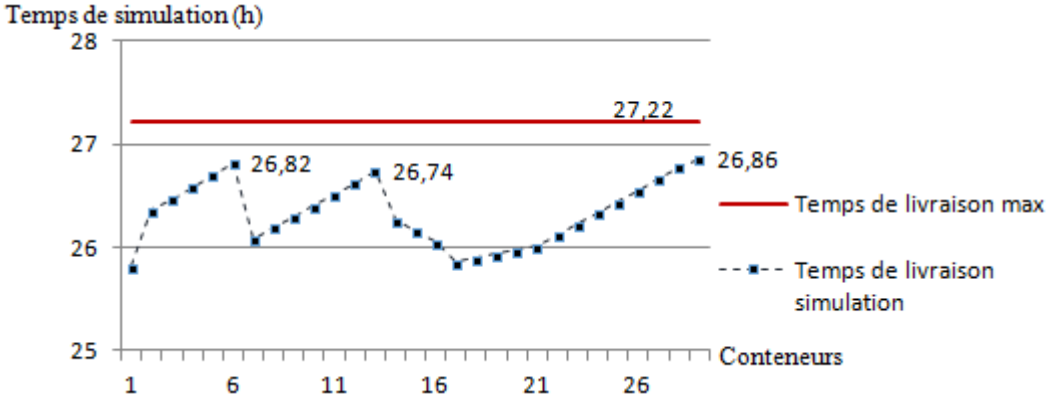

Figure III.17. Comparaison du délai de livraison maximal et simulé cas d'un porte-conteneurs

En ce qui concerne l'expédition des conteneurs par voie maritime, le graphe (fig.17) prouve que la planification des opérations de chargement des conteneurs sur les porte-conteneurs s'est déroulée en respectant les délais de livraison. Ceci prouve la validité de la stratégie de gestion du TC au niveau de l'interface maritime. De plus, l'anticipation de l'arrivée des porte-conteneurs au port par le rapprochement des conteneurs près de l'interface maritime du TC nous a permis d'achever le chargement des conteneurs en moyenne une demi-heure avant la date planifier du départ des navires.

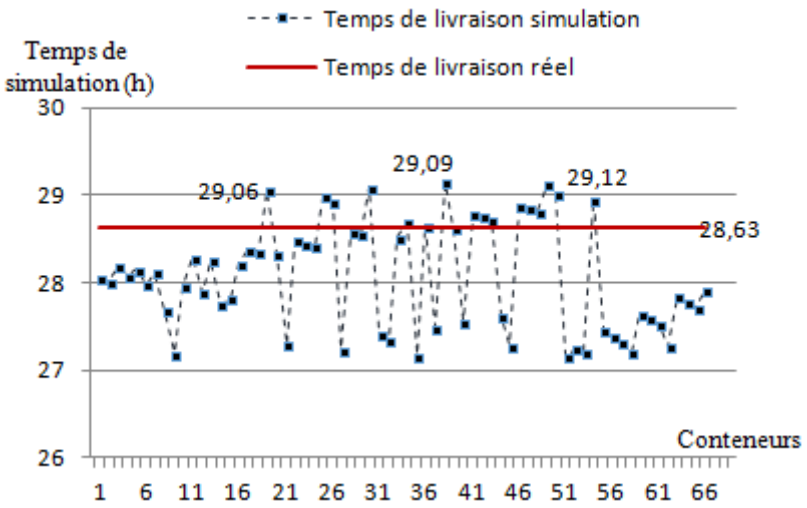

Figure III.18. Comparaison du délai de livraison maximal et simulé cas des camions

Ce graphe présente une comparaison entre le temps résultant de la simulation pour l'expédition d'un conteneur par camion et le temps maximal pour la réalisation de cette tâche. Nous constatons que certains conteneurs ont été expédiés avec un retard de 30 minutes par rapport à l'heure planifiée pour la réalisation de ces tâches. Nous précisons que ces conteneurs n'ont pas été abandonnés au niveau du TC, car les camions tolèrent ce retard. Nous précisons que durant toute la simulation aucun conteneur n'a été abandonné. En conséquence, cet indicateur de temps de livraison des conteneurs prouve la validité opérationnelle de la stratégie de fonctionnement appliquée par le modèle de simulation.

4.4. Résultats de la simulation

Il existe plusieurs indicateurs pour évaluer la performance d'un terminal à conteneurs. Nous considérons ici la performance opérationnelle que nous mesurons avec quatre indicateurs relatifs aux équipements de manutention utilisés au niveau du TC-TDF. Le premier indicateur est le temps de livraison de conteneur. Il permet de vérifier si les navires et les trains sont servis sans retard. Le temps de servir les camions est également important, mais

ce moyen de transport tolère les retards raisonnables. Nous avons utilisé cet indicateur pour la validation opérationnelle du modèle de simulation (voir section 4.3). Le second indicateur est la distance parcourue par les chariots-cavaliers pour évaluer l'impact de l'intégration des règles de ségrégation des conteneurs de marchandises incompatibles sur les distances parcourues pour stocker dans les conteneurs dans des emplacements valides. Le troisième indicateur est le temps d'utilisation total d'un engin de manutention. Dans le cas étudié, cet indicateur ne concerne que les chariots-cavaliers, car ils représentent l'outil de manutention principale concerné par les mesures de gestion des risques. Le dernier indicateur est le temps d'attente moyen pour un conteneur dans la zone d'inspection et de scanning. Cet indicateur est utilisé pour évaluer l'impact de l'augmentation du nombre de conteneurs à inspecter sur la durée globale du transit du conteneur par le TC-TDF.

4.4.1. Indicateur : distance totale parcourue par les chariots cavaliers

La ségrégation affecte le fonctionnement des chariots-cavaliers, car les conteneurs ne sont plus stockés à proximité de l'interface où ils seront expédiés. Par exemple, en raison du manque de places valides pour un conteneur de matières dangereuses qui sera expédié par voie maritime, le planificateur est obligé de le placer loin des quais. En conséquence, les chariots-cavaliers sont amenés à parcourir une grande distance. De plus, la procédure d'inspection impose le transfert des conteneurs vers la zone d'inspection ce qui engendre une charge de travail supplémentaire pour les chariots-cavaliers. La figure suivante illustre les distances parcourues par les chariots-cavaliers suivant les différents scénarios de simulation :

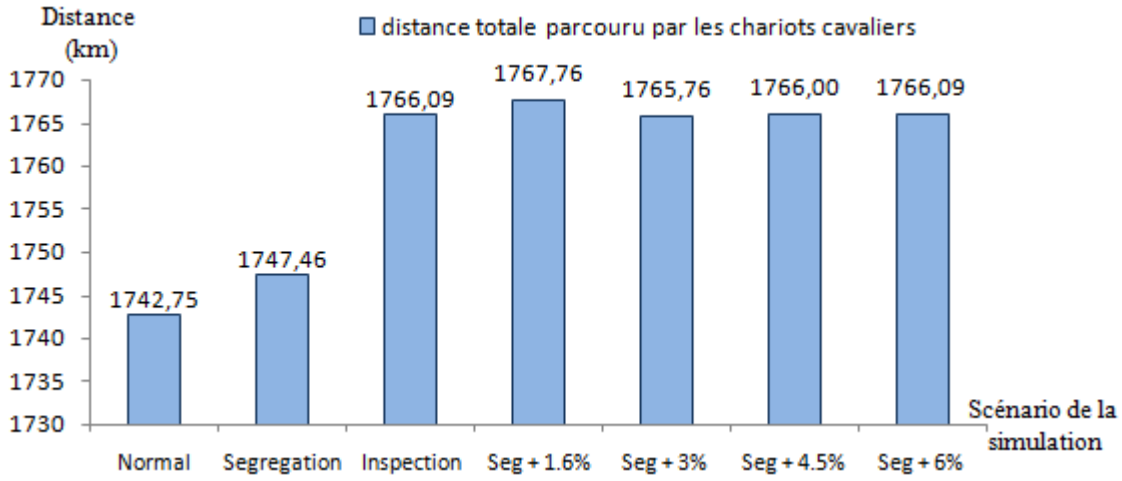

Figure III.19. Distances parcourues par les chariots cavaliers

Cette courbe illustre l'augmentation des distances parcourues par les chariots-cavaliers. Nous constatons une augmentation des distances parcourues de 5 km lors de l'application de la ségrégation et une augmentation de 24km en moyenne lors de l'application du processus d'inspection des conteneurs sur une durée de 44h de simulation. L'inspection engendre une grande augmentation des distances à parcourir, car la zone d'inspection est située en de hors du TC-TDF.

4.4.2. Indicateur : temps d'utilisation des chariots-cavaliers

L'évaluation des distances parcourues ne couvre pas la charge de travail engendrée par les mesures de gestion des risques. En conséquence, nous proposons l'évaluation de l'indicateur du temps total de fonctionnement. La courbe ci-dessous illustre la durée de fonctionnement des chariots-cavaliers suivant les différents scénarios de simulation :

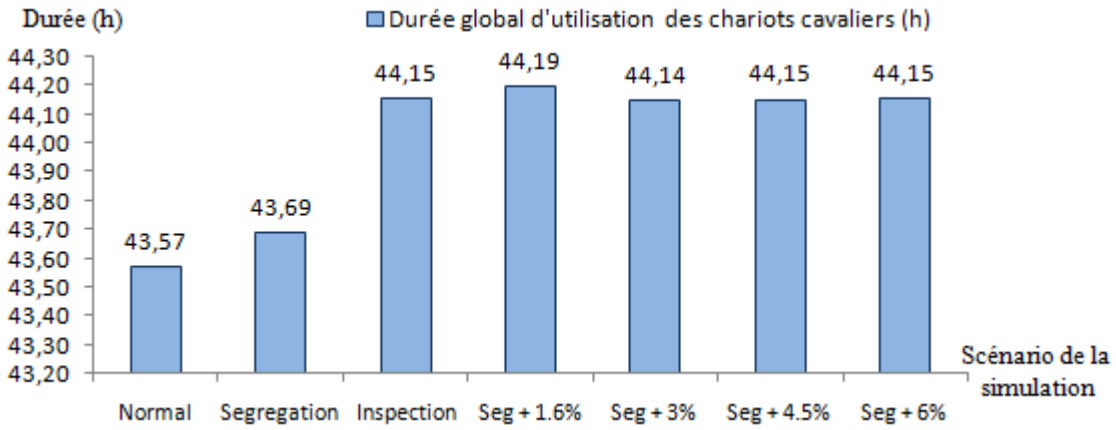

Figure III.20. Indicateur temps global d'utilisation des chariots-cavaliers

En adéquation avec les résultats précédents, nous constatons une augmentation de la durée d'utilisation des chariots-cavaliers. Cet indicateur a subi une légère augmentation lors de l'application de la ségrégation. Cependant, une augmentation importante de 40 minutes pour une durée de fonctionnement de trois jours du TC-TDF est due à l'intégration des activités d'inspection. Ces délais sont engendrés par le temps de transfert des conteneurs à la zone d'inspection et également par le remaniement causé par l'empilement des conteneurs caractérisés par des dates départs non homogènes imposé par l'ordre de priorité de la ségrégation par rapport à la date de départ.

4.4.3. Indicateur : durée moyenne d'attente pour le scanning des conteneurs

Cet indicateur évalue des activités d'inspection non intrusives assurées par les douanes à l'aide de scanners. Les ressources allouées à cette tâche sont limitées et les scanners sont exploités pour servir tous les TC du port du Havre et ne sont pas exclusivement réservés pour servir le TC-TDF. Ainsi, nous avons opté pour cet indicateur pour évaluer l'impact de l'augmentation du taux de scanning des conteneurs sur la durée d'attente dans la zone d'inspection des conteneurs. La courbe suivante illustre l'évolution du temps d'attente par rapport au taux de scanning :

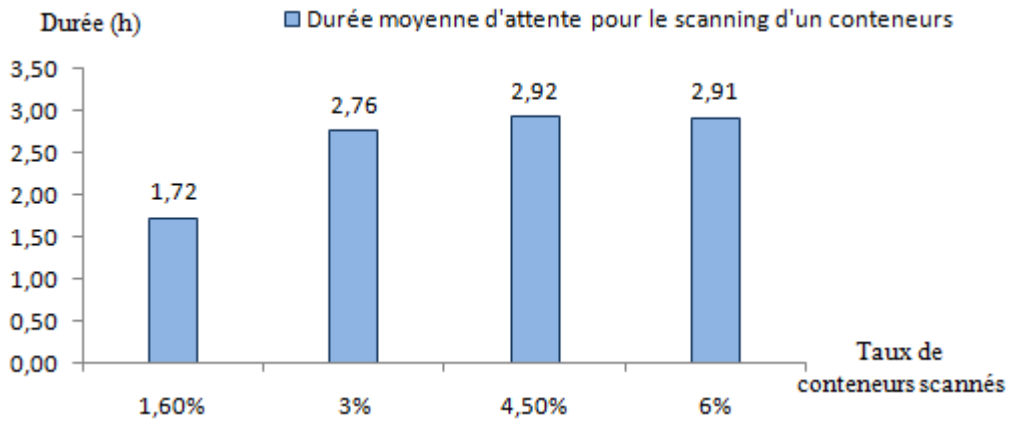

Figure III.21. Indicateur temps d'attente moyen dans la zone de stockage

La courbe montre une augmentation de la durée d'attente d'un conteneur pour être scannée suite à l'augmentation du taux de scanning. Ainsi, pour un taux de 1,6%, la durée d'attente moyenne est estimée à 103 minutes. Cet indicateur atteint les 154 minutes lorsque le taux de contrôle est augmenté à 6% du nombre de conteneurs. En conséquence, nous constatons que le coût d'intégration du processus d'inspection ne se limite pas au coût direct lié à l'utilisation des scanners, mais il est coûteux en temps et il est susceptible de prolonger le temps de séjour d'un conteneur dans un terminal à conteneurs.

En conséquence, l'amélioration de l'inspection des conteneurs ne doit pas être axée exclusivement sur la mise à disponibilité des ressources nécessaires pour le scanning. En revanche, le processus d'inspection doit être supporté par un processus décisionnel pour le choix des conteneurs à inspecter.

5. Discussion

L'établissement d'un processus de gestion des risques est primordial pour garantir la sécurité et la sûreté des ports maritimes vu l'augmentation des risques qui menacent leur fonctionnement. Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur l'analyse des risques qui

menacent le fonctionnement du TC-TDF en proposant des solutions préventives pour les traiter. De plus, nous avons étudié l'impact de l'intégration de la gestion des risques sur sa performance.

Dans un premier temps, nous avons procédé à l'analyse du processus d'acheminement d'un conteneur par le TC. Cette étape nous a permis d'identifier un ensemble des risques potentiels et nous avons choisi de traiter le cas de la fausse déclaration des conteneurs suspects et le cas du respect de la ségrégation des conteneurs dans la zone de stockage. De surcroît, nous avons détaillé les scénarios à risques à partir de ces deux événements indésirables afin d'analyser leurs causes et leurs conséquences potentielles. Pour ce faire, nous avons opté pour la méthode bowtie qui combine l'analyse de l'arbre des événements et l'analyse de l'arbre de défaillances. L'identification de la séquence des événements qui ont déclenché les risques facilite la spécification des mesures préventives pour empêcher l'occurrence du risque. De plus, l'identification des différentes conséquences potentielles susceptibles d'être engendrées permet la spécification des contremesures appropriées pour atténuer leurs ampleurs.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé une solution pour remédier au problème de la fausse déclaration de marchandises. La solution proposée se base sur l'utilisation d'un système à base de règle pour le ciblage des conteneurs. Ce système est alimenté par des règles de décision des douaniers. Le processus décisionnel est enrichi par un processus d'apprentissage axé sur l'utilisation de l'algorithme de fourrage des règles d'association « Apriori ». Ceci garantit l'adaptation du système pour le ciblage des conteneurs frauduleux et la suppression des règles d'association qui ne sont pas pertinentes. De plus, nous avons proposé un processus pour superviser la gestion de la zone de stockage des conteneurs et la vérification du respect des règles de ségrégation lors de l'allocation d'un emplacement de stockage.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'intégration des mesures de gestion des risques et à l'évaluation de leur impact sur la performance opérationnelle du TC-TDF. Pour cela, nous avons opté pour la simulation pour reproduire le fonctionnement du terminal étudié suivant plusieurs stratégies, car la modification du système réel n'est pas possible.

6. Conclusion

Nous avons proposé une analyse des risques liés au processus de manutention d'un conteneur au niveau du TC-TDF. Nous nous sommes focalisés sur les risques de fausse déclaration des conteneurs et de la transgression des règles de ségrégation des marchandises. De plus, nous avons spécifié des scénarios détaillés de ces risques en se basant sur la méthode bowtie.

Pour remédier à ces risques, nous avons proposé deux mesures préventives. La première utilise un système à base de règles enrichi par un processus d'apprentissage pour le ciblage des conteneurs suspects et la détection des fausses déclarations. La deuxième est axée sur la vérification du respect des règles de ségrégation au niveau de la zone de stockage.

En outre, nous avons opté pour un modèle de simulation à base d'agent pour simuler le fonctionnement du TC-TDF avec l'intégration des processus de gestion des risques. Le but de cette simulation est d'évaluer l'impact de la gestion des risques sur la performance opérationnelle du terminal.

Conclusion générale

1. Les apports

L'objectif de la thèse est de proposer une solution pour la gestion des risques liés au transport des conteneurs et remédier aux menaces potentielles à la sécurité des terminaux à conteneurs. L'établissement d'un processus de gestion des risques et son intégration dans la stratégie de gestion d'un TC doivent prendre en considération les spécificités de cette plateforme maritime en termes d'hétérogénéité et de distribution des acteurs portuaires, les interactions, la coopération et le respect des échéances qui sont imposées par le transit des conteneurs. L'intégration de la gestion des risques dans la stratégie de gestion d'un TC implique une réconciliation entre l'aspect sécurité et sûreté de fonctionnement et l'aspect performance. Les actions à mettre en œuvre nécessitent la prise en compte des points suivants :

- Définir un processus de gestion des risques qui prend en considération le contexte d'un TC et qui facilite la collecte des informations fournies par des partenaires externes ;
- Proposer une solution flexible qui permet de reproduire le fonctionnement d'un TC et d'y intégrer les processus de gestion des risques ;
- Spécifier des processus de gestion des risques adaptatifs enrichis par des processus d'apprentissage afin de maintenir un bon fonctionnement au gré des fluctuations des cas traités.

La littérature sur la gestion des risques est très riche vu la quantité des publications dans une pléthore de domaines. Il existe plusieurs méthodes de gestion des risques qui varient en termes d'approche d'analyse, d'évaluation et de traitements des risques. Bien que la gestion des risques est au cœur de la gestion des terminaux à conteneurs, les travaux qui concernent l'environnement portuaire sont axés sur l'analyse statistique des archives des accidents pour l'identifier les causes de la survenance des risques et les conséquences susceptibles d'être engendrées, la spécification des plans d'intervention en cas d'occurrence d'un événement indésirable, le développement de nouvelles technologies pour l'inspection des conteneurs et la détection des produits radioactifs. D'autres travaux optent pour la

simulation afin d'étudier l'évolution des conséquences engendrées par un événement à risques afin de spécifier des contremesures appropriées. À titre d'exemple, nous présentons le cas de l'étude de la propagation d'un nuage toxique au niveau d'un TC [Rigas et al., 2002] ou le déversement des produits chimiques résultant d'un accident de transport d'un conteneur citerne qui contient des produits dangereux [Planas et al., 2008]. À l'exclusion des travaux de Longo [Longo, 2010], nous constatons l'absence des travaux qui abordent la gestion des risques au niveau des TC en prenant en considération l'aspect performance. C'est dans ce contexte que nous avons proposé une solution pour l'amélioration de la sécurité et la sûreté de fonctionnement des TC en prenant en considération de l'aspect performance.

a. La traçabilité des conteneurs : un levier pour une gestion efficace des risques

Nous nous sommes focalisés sur l'amélioration de la sécurité du transport des conteneurs en amont du TC en étendant, d'une part, le système de traçabilité GOST et en exploitant, d'autre part, le concept du produit intelligent. Ainsi, nous avons procédé à l'urbanisation de GOST de manière à proposer une nouvelle architecture distribuée basée sur les services web. Nous avons opté pour les services web vu leur flexibilité et leur convenance pour pallier le problème de l'hétérogénéité des systèmes utilisés par les acteurs de la chaîne logistique. Par ailleurs, nous avons adopté GOST pour faciliter le partage des informations de la traçabilité en utilisant des architectures dirigées par les modèles pour automatiser la génération de services web d'accès aux données.

La nouvelle architecture de GOST est conçue de manière à remédier aux problèmes liés au flux poussé pour l'envoi des informations de la traçabilité et la centralisation du stockage de données. Pour cela, nous avons adopté un flux tiré pour la collecte des informations d'une façon à que chaque acteur de la chaîne logistique assure la gestion de ses propres données de la traçabilité et que ces dernières se soient communiquées qu'en cas de besoin, par exemple, suite à l'occurrence d'un risque. En outre, nous avons exploité le concept du produit intelligent pour proposer un modèle du conteneur intelligent capable de générer des alertes à la suite de l'occurrence d'un risque et de communiquer avec son environnement. Le modèle du conteneur proposé est enrichi par une couche service qui lui permet de collecter des informations qui décrivent son cycle de vie. Le conteneur intelligent est représenté par un agent qui assure la collecte des informations en exploitant les deux solutions suivantes :

- La première solution consiste en l'automatisation de l'exécution du processus métier qui décrit l'acheminement d'un conteneur via la chaîne logistique en se basant sur les services web. L'exécution de ce processus correspond à la génération d'un service web composite qui orchestre les services web granulaires déployés par les différents acteurs qui interviennent dans le cycle de vie du conteneur.

- La deuxième solution est la configuration d'un bus de communication d'entreprise pour l'interconnexion des services web élémentaires et le conteneur intelligent. L'agent conteneur intelligent assure l'invocation des services web pour la collecte des informations souhaitées.

Cette première contribution a pour but de sécuriser l'acheminement des conteneurs vers le port maritime. De surcroît, elle tâche à enrichir la traçabilité des conteneurs afin d'améliorer la mise à disponibilité des informations nécessaires au processus de gestion des risques au niveau du terminal de France du port du Havre. Ceci nous a conduits à spécifier des solutions appropriées pour une exploitation efficiente de ces informations pour améliorer la sécurité.

b. Vers une réconciliation entre les aspects sécurité et performance d'un TC

Notre deuxième contribution a porté sur la gestion des risques à l'intérieur du terminal de France. Pour cela, nous avons proposé le développement du système multi-agent SGTC qui permet de simuler le fonctionnement d'un TC et l'intégration des processus de gestion des risques dans sa stratégie de fonctionnement. Nous avons opté pour le paradigme agent pour le développement de ce système vu la convenance des agents à représenter des systèmes distribués ainsi que la représentation fidèle des interactions et les processus de coopération et coordination entre les acteurs d'un TC.

Dans premier temps, nous avons proposé une démarche de développement incrémentale pour la spécification du SGTC à base d'agent. Cette étape a porté sur l'analyse du fonctionnement du terminal à conteneur de France pour l'identification de l'ensemble des acteurs et leurs rôles. Ensuite, nous avons procédé à l'agentification des acteurs réels et la proposition de nouveaux agents pour décrire la gestion du terminal à conteneur et y intégrer des processus de gestion des risques. Par ailleurs, nous avons structuré le SGTC en plusieurs sous-systèmes qui regroupent les agents ayant une forte cohésion. En conséquence, nous

avons abouti à des sous-systèmes qui assurent la génération des flux de conteneurs, la simulation d'un TC, la planification des opérations de manutention, la supervision du fonctionnement du TC et l'apprentissage pour assurer l'adaptation du système.

Dans un deuxième temps, nous avons analysé des processus de manutention des conteneurs au niveau d'un TC et géré des risques relatés dans la littérature. Nous avons traité principalement deux risques : un risque sécuritaire lié la fausse déclaration des conteneurs pour la dissimulation de marchandises illicites et un risque lié à la sûreté de fonctionnement d'un TC et porte sur la transgression des règles de ségrégation des conteneurs de marchandises dangereuses. De plus, nous avons consolidé des scénarios à risques pour comprendre les causes et les conséquences engendrées afin de spécifier des solutions appropriées.

En ce qui concerne le risque de fausse déclaration des conteneurs, nous avons proposé un système d'aide à la décision à base des règles pour le ciblage des conteneurs suspects. Le système l'analyse des informations liées au cycle de vie d'un conteneur pour décider s'il doit être inspecté ou non. En sus, il est enrichi par un processus d'apprentissage qui permet de générer de nouvelles règles de décisions à partir d'une base de données des descriptions des conteneurs frauduleux inspectés par les douaniers. Pour cela, nous avons opté pour la méthode de fourrage des règles d'association « Apriori » proposée par Agrawal et Srikant [Agrawal et Srikant, 1994] qui permet une adaptation du système pour l'identification de nouveaux cas.

En ce qui concerne le risque de la transgression des règles de ségrégation des conteneurs, nous avons proposé un processus qui contrôle l'ensemble des décisions du planificateur pour l'allocation d'un emplacement dans la zone de stockage. Ce processus vérifie le respect des distances de séparation entre les conteneurs des marchandises incompatibles et ordonne l'allocation d'un autre emplacement en cas de non-respect de la ségrégation.

La dernière partie de cette thèse a porté sur l'évaluation de l'impact d'intégration des processus de gestion des risques, présentés auparavant, dans le fonctionnement d'un TC. Pour cela, nous avons opté pour la simulation du fonctionnement du TC-TDF en utilisant le SGTC. Ainsi, nous avons proposé plusieurs scénarios qui représentent le fonctionnement normal du TC-TDF, le fonctionnement avec intégration du processus de ségrégation des conteneurs, le

fonctionnement avec intégration du processus de ciblage et d'inspection des conteneurs avec différents taux d'inspection. Nous avons constaté que l'amélioration de la sécurité d'un TC ne dépend pas exclusivement de la mise à disponibilité des ressources, mais elle est étroitement liée à l'efficacité d'utilisation des ressources disponibles et à la pertinence des décisions prises.

2. Les limites

Les limites de nos solutions concernent les points suivants :

- La difficulté d'avoir des informations sur l'historique des accidents qui ont eu lieu au niveau du TC-TDF. Ces informations sont d'une grande importance pour la spécification des scénarios à risques et pour établir une quantification des risques et de leurs conséquences potentielles. Ceci permet de se détacher de la priorisation des contremesures à établir en se basant sur une estimation qualitative des risques.

- La stratégie proposée pour la planification des ordres de manutention permet de manutentionner les conteneurs en respectant les délais de livraison. En revanche, nous n'avons pas accès à la stratégie de gestion réelle appliquée au niveau du TC-TDF car elle est confidentielle.

- Notre solution pour l'automatisation de la génération des services web nous a permis de minimiser le coût d'adaptation des systèmes informatiques, mais la spécification des règles de transformation est laborieuse et nécessite l'établissement des transformations entre les métamodèles.

En dépit des limites citées auparavant, les solutions que nous avons proposées ont été implémentées et validées.

3. Les perspectives

Nous projetons d'améliorer nos modèles par l'intégration de l'optimisation pour déterminer les variables de décision de la simulation. Le couplage de l'optimisation et la simulation permet également de gérer les incertitudes et les aléas. En outre, nous souhaitons nous détacher du modèle de gestion centralisé d'un TC par un seul planificateur qui assure la synchronisation de l'ensemble des opérations de manutention, pour un modèle qui se base sur des processus de négociation et de coopération entre les agents qui composent le SGTC. Ceci

nous permettra d'obvier la suspension totale des activités de manutention au niveau d'un TC et de maintenir un fonctionnement réduit en cas d'occurrence d'un événement indésirable. La suspension totale des activités est due à l'utilisation d'un seul planificateur qui a une perception de l'intégralité du TC car tous les changements de l'environnement ne dépendent que des actions qu'il a affectées aux autres agents. En revanche, en cas d'occurrence d'un accident l'environnement n'est plus déterministe et son évolution dépend de nouveaux facteurs. En conséquence, l'utilisation d'un modèle de planification décentralisée basée sur la coopération entre un groupe d'agent qui a une perception partielle de l'environnement permettra de pallier les problèmes liés à l'évolution imprévisible de l'environnement du TC.

Références

- [ACL, 2002] , FIPA ACL Message Structure Specification, foundation for intelligent physical agents, SC00061G, 2002.

- [Agrawal, et Srikant, 1994] Agrawal R., Srikant R., Fast Algorithms for Mining Association Rules. Proceedings of the 20th VLDB Conference Santiago, Chile, 1994.

- [Alain et al., 2007]Alain D., Alain L., Frédérique V., La gestion des risques Principes et pratiques Hermès - Lavoisier, Management et Informatique, 2007.

- [Alhawari et al., 2012] Alhawari S., Karadsheh L., Talet A.N., Mansour E., Knowledge-Based Risk Management framework for Information Technology project, International Journal of Information Management 32 50– 65, 2012.

- [Allwood et Lee, 2005] Allwood. J.M, Lee J.H, The design of an agent for modelling supply chain network dynamics, International Journal of Production Research, Vol. 43, No.22, pp 4875–4898, 2005.

- [AS/NZS, 2004] AS/NZS4360, 2004, RIsk management AUstralia standards ISBN 0 7337 5904 1, 2004.

- [Bauer et al., 2001] Bauer B., Muller J.P, Odell.J. Agent UML: Formalism for Specifying Multiagent Software Systems. The International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2001.

- [BEC, 2014] The Entity-Control-Boundary Pattern. http://www.cs.sjsu.edu/~pearce/modules/lectures/ooa/analysis/ecb.htm , 2014.

- [Bechini et al., 2007] Bechini A., Cimino MGCA., Marcelloni F., Tomasi A., Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business. Information and Software Technology. 50:342-359. http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2007.02.017 , 2007.

- [Bellifemine et al., 2003], Bellifemine F., Caire G., Trucco T., et Rimassa G., Jade Programmer's Guide. JADE 3.0b1. Available at http://sharon.cselt.it/projects/jade/ 2003.

- [Benaben et al., 2004] Benaben F., Gourc D., Villarreal C., Ravalison B., Pingaud H., Une méthode d'identification des risques Application à un projet coopératif, Congrès francophone du management de projet 2004 « Projets, Entreprise, Intégration »

- [Bernon et al., 2003] Bernon .C, Valérie C, Gleizes. M.P, Picard.G, ADELFE : atelier de développement de logiciels à fonctionnalité émergente. Technique et Science Informatiques 22(4): 387-391. 2003.

- [Booch et al., 2005] Booch G., Rumaugh J., Jacobson I., The Unified Modeling Language User Guide, ISBN-10: 0321267974, 2005.

- [Botta-Genoulaz, 2005] Botta-Genoulaz V., Principes et méthodes pour l'intégration et l'optimisation du pilotage des systèmes de production et des chaînes logistiques, HDR de l'INSA de Lyon, 2005 .

- [Boukachour et al., 2011] Boukachour J, Fredouët CH, Gningue MB Building an expert-system for maritime container security risk management. International journal of applied logistics. 2:35-56. http://dx.doi.org/10.4018/jal.2011010103, 2011.

- [Broadleaf, 2007] Broadleaf, tutorial notes the australian and newzealnd standard on risk management AS/NZS 4360:2004 Broadleaf capital international Pty ltd, 2007.

- [Caire et al., 2001] Caire G., Leal F., Chainho P., Evans R., Garijo F., Gomez J., Pavon J., Kearney P., Stark J., Massonet P. Agent-oriented analysis using message/uml, 2001.

- [Caridi et al., 2005] Caridi M., Cigoloni R. MarcoD, Improving supply-chain collaboration by linking intelligent agents to CPFR, International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 20, pp 4191–4218, 2005.

- [Cariou et al., 2009] Cariou P., Maximo Q., Mejia., Wolff F.C., Evidence on target factors used for port state control inspections, Marine Policy, 2009.

- [Caron et al., 2013]Caron F., Vanthienen J., Baesens B., A comprehensive investigation of the applicability of process mining techniques for enterprise risk management, Computers in Industry 64 464–475 2013.

- [CCHST,2014]CCHST 2014 http://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/hazard_risk.html centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail ,2014.

- [CEI62198, 2001]CEI62198 Norme Internationale CEI IEC International Standard, Gestion des risques liés à un projet – Lignes directrices pour l'application IEC, 2001.

- [Cervenka et al., 2005] Cervenka R., Trencansky I., Calisti M., Greenwood D., AML: Agent Modeling Language. Toward Industry-Grade Agent-Based Modeling. In In Odell, J., Giorgini, P., Muller, J., eds. : Agent-Oriented Software Engineering V : 5th International Workshop, AOSE 2004, Springer-Verlag. 2005

- [Chan et Chan, 2006] Chan HK, Chan FTS, Effect of information sharing in supply chains with flexibility, International Journal of Production Research, pp1–20. DOI: 10.1080/00207540600767764, 2006.

- [Charette, 1990]Charette R., Applications Strategies for Risk Management, McGraw-Hill, New York, 1990.

- [Chatterjee, 2003] Chatterjee A., An overview of security issues involving marine containers and ports, The Annual Conference of Transportation Research Board, Washington, USA, 2003.

- [Chinosi, et Trombetta, 2012] Chinosi, M.; Trombetta, A. BPMN: An introduction to the standard. Computer Standards & Interfaces, volume 34, issue 1, pp. 124–134, 2012.

- [Conchúir, 2012] Conchúir D.Ó., Overview of the PMBOK® Guide: Paving the Way for PMP® Certificatio DOI 10.1007/978-3-642-31803-0_11, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

- [Dahlman et al. , 2005] Dahlman, O. et al., Container Security A Proposal for a Comprehensive Code of Conduct, Defense & Technology Papers. Web site last visit 31/05/2013: http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA434718 , 2005.

- [Dam et Winikoff, 2003] Dam K. H., Winikoff M. Comparing Agent-OrientedMethodologies, Fifth International Bi-Conference Workshop on Agent-Oriented Information Systems (AOIS-2003), Melbourne, Australia, at AAMAS'03, vol. 3030 de LNCS, Springer, p. 78-93, 2003.

- [Darbra, et Casal, 2004] Darbra R.M., Casal J., Historical analysis of accidents in seaports. Safety Science, volume 42, issue 2, pp. 85–98, 2004.

- [Davenport, 1993] Davenport T.H., Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology. Harvard Business School Press, Boston, 1993.

- [David, 2002]David H., Extending the risk process to manage opportunities, International Journal of Project Management 20, 235–240, 2002.

- [Dieudonné, 2008] Dieudonné N., La démarche d'urbanisation des systèmes d'information : un changement organisationnel, thèse université Montpellier 2, 2008.

- [Dirk et al., 2004] Dirk Steenken S.V., Robert S., Container terminal operation and operations research - a classification and literature revue, OR spectrum 26: 3–49, Springer-Verlag 2004.

- [Doytchin et al., 2009] Doytchin E. Doytchev ∗, Gerd Szwillus, Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: A case study from Bulgaria, Accident Analysis and Prevention 41 1172–1179, 2009.

- [Dubreuil, 2008]Dubreuil J., la logistique des terminaux portuaires de conteneurs, Thèse Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport, 2008.

- [Dufour et Pouillot, 2002] Dufour B., Pouillot R., APPROCHE QUALITATIVE DU RISQUE, Epidémiol. et santé anim., 41, 35-43, 2002.

- [Efstratiadis et al., 2000] Efstratiadis M.M., Ioannis S., Arvanitoyannis., Implementation of HACCP to large scale production line of Greek ouzo and brandy: a case study, Food Control 11 19±30, 2000.

- [El Fazziki et al., 2012] Abdelaziz EL Fazziki A., Nouzri S., Sadgal M., NAJIB M., Une approche agents pour la modélisation des Processus Métiers, cal montpellier, 2012.

- [El Fazziki et al., 2014] EL Fazziki A., Najib M., Samiri M.Y., Sadgal M., An Agent Based Framework for an Adaptive Workflow Management: Model Driven Approach, 2014.

- [El Fazziki, 2012] Elfazziki A., Lakhrissi H., Yetognon K., Sadgal M., A service oriented information system: a model driven approach. Proceeding of the 8th international conference on signal image technology and internet based systems. 466-473, 2012.

- [Ellis, 2011]Ellis J., Analysis of accidents and incidents occurring during transport of packaged dangerous goods by sea. Safety Science, volume 49, issues 8–9, pp. 1231–1237, 2011.

- [Engels et al., 2005] Engels G., Forster A., Heckel R., Thone S., Process Modeling using UML , Process-Aware Information Systems, 85-117, wiley. 2005.

- [Erkut et al., 2007] Erkut E., Tjandra S. A., Verter V., Handbook in OR & MS. C. Barnhart and G. Laporte Eds. North-Holland Elsevier. Oxford UK, pp 539-621, 2007.

- [Everett, 2011] Everett C., A risky business: ISO 31000 and 27005 unwrapped, Computer Fraud & Security, February 2011.

- [Fabiano et al., 2010]Fabiano B. et al., Port safety and the container revolution: A statistical study on human factor and occupational accidents over the long period. Safety Science, volume 48, issue 8, pp. 980–990, 2010.

- [Ferber et al., 2000] Ferber J., et Gutknecht O., Madkit : A generic multi-agent platform. In 4 th International Conference on Autonomous Agents., 2000.

- [Ferber, 1995] Ferber, J. Les systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective. InterEditions, ISBN 2-7296-0665-3, 1995.

- [Finin et al., 1994] Finin T., Fritzson R., McKay D., McEntire R., KQML as an agent communication language, In Third international conference on information and knowledge management. ACM Press, November.1994

- [FIPA, 1997], FIPA Foundation for Intelligent Physical Agents (1997). "FIPA 07 Specification part 2-Agent Communication Language", disponible sur : http://www.fipa.org.

- [Firesmith, 2003] Firesmith D.G., Common concepts underlying safety, secu-rity, and survivability engineering, Technical Note CMU/SEI-2003-TN-033, Carnegie Mellon University, Software Engi-neering Institute, Dec. 2003.

- [Fischer et al., 2003] Fischer K, Schillo M, Siekmann J Holonic Multiagent Systems: A foundation for the organisation of multiagent systems. Proceedings of the First International Conference on Applications of Holonic and Multiagent Systems. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.14.1097 , 2003.

- [Flanagan, et Norman, 1993] Flanagan R., Norman G., Risk Management and Construction, Wiley, 228 pages, 20 août 1993 .

- **[**FORM EDIT, 2012**]** FORM EDIT ONU , Le transport des marchandises dangereuses, www.formedit.fr, 2012.

- [Framling et al., 2003] Framling K., Holmström J., Ala-risku T., Kärkkäinen M Product agents for handling information about physical objects. Espoo, ISBN: 951-22-

6853-
http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?rep=rep1&type=pdf&doi=10.1.1.80.6382 , 2003.

- [Fredriksen et al., 2002] Fredriksen R., Kristiansen M., Gran B.A, Ketil Stølen, Opperud T.A., Dimitrakos T., The CORAS Framework for a Model-Based Risk Management Process. S .Anderson et al . (Eds.): SAFE CO M P 2002, LNCS 2434, p p . 94– 105, 2002. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

- [Friedman-Hill, 2003] Friedman-Hill E., JESS in action rule based systems in Java. Manning publication Co, ISBN 1-930110-89-8 , 2003.

- [Froquet, 2005] Froquet L.,Contribution à l'analyse des risques : Proposition d'une méthode par scénarios et capitalisation de la connaissance, STITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2005.

- [Gencod-Ean, 2001] Gencod-Ean., La traçabilité dans les chaînes d'approvisionnement, de la théorie à la pratique, Issy-les-Moulineaux : GENCOD, 2001.

- [Giorgini etal., 2005] Giorgini P.,Kolp M.,Mylopoulos J., Castro J., Tropos: A Requirements-Driven Methodology for Agent-Oriented Software », Henderson-Sellers B., Giorgini P. (dir.), Agent Oriented Methodologies, Idea Group, p. 20-45, 2005.

- [GMP, 2014] GMP, general manutention le Havre, http://www.gmportuaire.fr/index.php/fr/lien-parent/terminal-de-france , 2014.

- [Gningue, 2011] Gningue M.B, Gestion Du Risque Securitaire Dans La Chaine Logistique Globale : Le Cas Du Transport International De Marchandises, université Le Havre, 2011.

- [Gomez et Fuentes, 2002] Gomez J., Fuentes R., Agent Oriented System Engineering with INGENIA, Fourth Iberoamerican Workshop on Multi-Agent Systems, Iberagents, 2002.

- [Gordana, 2012] Gordana R., Risto R., Maja G., Services sector in terms of changing environment Transport of dangerous substances in the Republic of Macedonia, Procedia - Social and Behavioral Sciences 44 289 – 300, 2012.

- [GPMH, 2002] GPMH, Rapport d'activités 2002 port du Havre http://www.haropaports.com/fr/le-havre/grand-public/mediatheque , 2002.

- **[**GPMH, 2012+] GPMH., règlement local pour le transport et la manutention des marchandises dangereuses dans le port du havre, 2012.

- [Graphstream, 2014] Graphstream official web-site http://graphstream-project.org dernière visite le 14/10/2014

- [Greenwood, et Ghizzioli, 2009] Greenwood D., Ghizzioli R. , Goal-Oriented Autonomic Business Process Modelling and Execution, Intech, Austria, 2009.

- [Guessoum et Briot, 1999] Guessoum Z. and Briot J.-P., From active objects to autonomous agents" In Special Series on Actors and Agents, edited by Dennis Kafura and Jean-Pierre Briot, IEEE Concurrency, 7(3):68-76, July-September 1999.

- [Gupta et al., 2001] Gupta A, Whitman L, Agarwal RK, Supply Chain Agent Decision Aid System (SCADAS), Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, pp 553-559, 2001.

- [Hafen-Hamburg, 2014], Port of hamburg statistics, comparison of Europe ports, http://www.hafen-hamburg.de/en/content/container-port-throughput-global-comparison , 2014.

- [Hallikas et al., 2004] Hallikas J., Karvonenb I., Pulkkinenb U., Virolainen V., Tuominen M., Risk management processes in supplier networks, Int. J. Production Economics 90 47–58, 2004.

- [Hillson, 2002] Hillson D., Extending the risk process to manage opportunities, International Journal of Project Management 20 235–240, 2002.

- [Høj, et Kroger, 2002] Høj N.P., Kroger W., Risk analyses of transportation on road and railway from a European Perspective, Safety Science 40 337–357, 2002.

- [IEEE 1540, 2001] IEEE 1540, IEEE Standard for Software Life Cycle Processes—Risk Management, IEEE-SA Standards Board ISBN 0-7381-2835-X SS94925, 2001.

- [INERIS, 2014] INERIS, Directive n° 96/82 du 09/12/96 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses , http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/1027 ,2014.

- [ISO 31000, 2009] ISO31000, structured approach to Enterprise Risk Management (ERM) and the requirements of ISO 31000, Airmic, Alarm, Irm , 2009.

- [ISO 73, 2009] ISO 73, Management du risque — Vocabulaire, Révision de l'ISO/CEI Guide 73:2002, international organization for standardization, 2009.

- [ISO 9000, 2000] ISO 9000:2000., Systèmes de management de la qualité — Principes essentiels et vocabulaire, ISO 9000 Deuxième édition, 2000-12-15.

- [ISSMGE, 2004] ISSMGE TC32 - Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms – Excerpts from Version 1, July 2004.

- [Jander et al., 2011] Jander K., Braubach L., Pokahr A., Lamersdorf W., Wack K-J., “Goal-oriented process with GPMN”, International Journal on Artificial Intelligence Tools, World Scientific Publishing, vol. 20, no. 6, pp.1021-1041, 2011.

- [Jander, et Lamersdorf, 2011] Jander K., Lamersdorf W., “GPMN-Edit: High-level and Goal-oriented Workflow Modeling”, in the proceeding of Workshops der wissenschaftlichen Konferenz Kommunikation in verteilten Systemen, pp.12, 2011

- [Jarraya, 2006] Jarraya T., 2006, rréutilisation des protocoles d’interaction et Démarche orientée modèles pour le développement multi-agents, Université de Reims Champagne Ardenne en Informatique.

- [Jennings et Wooldridge, 1998] Jennings N, Sycara K., Wooldridge M, A Roadmap of Agent Research and development, in Autonomous Agents and Multi-Agent Systems,, Kluwer Academic Publishers,Boston,1998.

- [Jennings et Wooldridge, 1998+] Jennings. N et Wooldridge. M, Applications of Intelligent Agents, Queen Mary & Westfield College, University of London. 1998.

- [Jingkai, 2012] Jingkai L., Establishment of Emergency Management System Based on the Theory of Risk Management, Procedia Engineering 43 108 – 112, 2012.

- [Jose et al., 2011] Jose M., Yusta, Gabriel J., Correa., Lacal-Arantegui R., Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art, Energy Policy 39 6100–6119, 2011.

- [Jurgen, 2011], Handbook of Terminal Planning, Operations Research/Computer Science Interfaces Series Vol49, 2011.

- [Kärkkäinen et al., 2003]Kärkkäinen M, Holmstrom J, Framling K, Artto K Intelligent products - a step towards a more effective project delivery chain. Computers in industry. 50:141-151. http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00116-1 , 2003.

- [Karlsen et al., 2011] Karlsen K.M., Donnelly K.A.-M., Olsen P., Granularity and its importance for traceability in a farmed salmon supply chain, Journal of Food Engineering 102 1–8 , 2011.

- [Kim et al., 1995] Kim H.M., Fox M.S., Gruninger M., An ontology of quality for enterprise modelling, 4th Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, Berkeley Springs, West Virginia, USA, 1995.

- [Kim, et Gunther, 2007] Kim K.H., Gunther H., Container terminals and terminal operations, Container terminals and cargo systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 978-3-540-49549-9, 2007.

- [King, 2005] King J., The security of merchant shipping. Marine Policy, volume 29, issue 3, pp. 235–245, 2005.

- [Kiritsis, 2011] Kiritsis D., Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the internet of things. Computer-Aided Design. 43:479-501. http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.03.002 , 2011.

- [Lee, et Jung, 2013] Lee M., Jung-Yeul J., Risk assessment and national measure plan for oil and HNS spill accidents near Korea, Marine Pollution Bulletin 73 339–344, 2013.

- [Liang et Des, 2009] Liang X, Des G., Adaptive Agent Model: Software Adaptivity using an Agent-oriented Model-Driven Architecture. Information and Software Technology. 51:109-137. http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2008.02.002, 2009

- [Line et al., 2006] Line M.B., Nordland O., Røstad L., Tøndel I.A., Safety vs. security? in: Proceedings of the 8th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM, New Orleans, Louisiana, USA, 2006.

- [Longépé, 2006] Longépé C., Le projet d'urbanisation du S.I. Démarche pratique avec cas concret, Dunod 2006 EAN13 : 9782100500932, 2006.

- [Longo, 2010]Longo F., Design and integration of the containers inspection activities in the container terminal operations, IJ Prod Eco.125: 272–283, 2010.

- [Lu, et Yang, 2010] Lu C-S., Yang C-S., Safety leadership and safety behavior in container terminal operations. SSCI. 48: 123–134, 2010.

- [Lun et al., 2010] Lun Y.H.V., Lai K.-H., Cheng T.C.E., Shipping and Logistics Management, ISBN 978-1-84882-996-1 Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2010.

- [Maersk, 2014], Maersk fleet, http://www.maerskfleet.com/#vessels/Maersk_Line, 2014.

- [Malhéné, et Deschamps, 2010] Malhéné N., Deschamps J-C., De la traçabilité au routage des produits en transport routier, 8èmes Rencontres Internationales de Recherche en Logistique, RIRL'2010, Bordeaux : France, 2010.

- [Marcelino et al., 2013] Marcelino-Sádaba S., Pérez-Ezcurdia A., Echeverría Lazcano A., Villanueva P, Project risk management methodology for small fi rms, International Journal of Project Management, 2013.

- [Marhavilas et al., 2011] Marhavilas P.K., Koulouriotis D.E., Mitrakas C., On the development of a new hybrid risk assessment process using occupa tional accidents ’ data: App lication on the Greek Public Electric Power Provider, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24 671-687, 2011.

- [Marhavilas et al., 2011+] Marhavilas P.K., Koulouriotis D., Gemeni V., Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000-2009, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24 477-523, 2011.

- [Marhavilas, et Koulourioti, 2012]. Marhavilas P.K, Koulouriotis D.E., 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, 50 448–462, 2012.

- [Matthew et Petering, 2009], effect of block width and storage yard layout on marine container terminal performance, Transportation Research Part E 45 591–610, 2009.

- [Mazouni, 2008] Mazouni M., Pour une Meilleure Approche du management des risques de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision, Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008.

- [Mcfarlane et al., 2003]Mcfarlane D, Sanjay S, Jin LC, Wong CY Auto ID systems and intelligent manufacturing control. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 16:365–376. http://dx.doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00077-0, 2003.

- [Mees, 2007] Mees W., Risk management in coalition networks, Third International Symposium on Information Assurance and Security, DOI 10.1109/IAS.2007.76, 2007.

- [Mendling, 2006] Mendling J., Business Process Execution Language for Web Service(BPEL), Augasse 2-6, A-1090 Wien, Austria, 2006.

- [Meyer et al., 2009] Meyer G., Framlin K., Holmstrom J., Intelligent Products: A survey. Computers in Industry. 60:137-148. http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.005 , 2009.

- [Milazzo et al., 2009] Milazzo M.F. et al., Risk management of terrorist attacks in the transport of hazardous materials using dynamic geoevents. Journal of loss prevention in the process industries, volume 22, issue 5, pp. 625–633, 2009.

- [Mili et al., 2009]Mili A., Bassetto S., Siadat A., Tollenaere M., Dynamic risk management unveil productivity improvements, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 25–34 2009.

- [Ming-zhe , 2013] Ming-zhe Y., Design on enterprise service bus message conversion protocol based on XSLT. The journal of china universities of posts and telecommunications. 20:50-54. http://dx.doi.org/10.1016/S1005-8885(13)60249-6, 2013.

- [Mojtahedi et al., 2010] Mohammad S., Mojtahedi H., Meysam M.S., Ahmad M., Project risk identification and assessment simultaneously using multi-attribute group decision making technique, Safety Science 48 499–507, 2010.

- [Moraitis et al., 2002] Moraitis P., Petraki E., Spanoudakis N., « Engineering JADE Agents with Gaia Methodology », Kowalczyk R., Muller J., Tianfield H., Unland R. (dir.), Agent Technologies,Infrastructures, Tools and Applications for E-Services – Best (revised) papers of NODe Agent-Related Workshops, vol. 2592 de LNAI, Springer, p. 77-92. 2002.

- [Muehlen, et Indulska, 2009] Muehlen M., Indulska M,. Modeling languages for business processes and business rules: A representational analysis, Information Systems, 2009.

- [Mueller, 2006] Mueller H., State of the Art in Service-Oriented Architecture: Current Advances and Approaches to its Implementation Achieving Distributed Business Process Integration, Dresden university of thechnology, 2006.

- [Murata et al., 1986] Murata T., Komoda N., Matsumoto K., Haruna K. « A Petri Net Based Controller for Flexible and Maintainable Sequence Control and its Application in Factory Automation ». IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 1, n°33, pp. 1–8, 1986.

- [Nagai et al., 2007] Ngai E.W.T., Cheng T.C.E., S.Auc., Lai K., Mobile commerce integrated with RFID technology in a container depot, Decision Support Systems 43 62 – 76, 2007.

- [Nedaylkov et al., 2011] Nedyalkov T., Andreeva N., Trends in the container shipping and need of a new generation container terminals and container vessels. International virtual journal Machines, technologies, materials, volume 5, issue 3, pp. 20-23, 2011.

- [Nimanbeg, et Lemarquis, 2011]Nimanbeg F., Lemarquis V., Application d'une analyse AMDEC au LBM, gestion, qualité OptionBio, n° 461, Lundi 24 octobre 2011.

- [Oliveira et al., 2012] Oliveira S.B., Ballonibn A.J., Oliveirac F.N.B., Todad F.A., Information and Service-Oriented Architecture & Web Services: enabling integration and organizational agility. Procedia Technology 5 141 – 151, 2012.

- [Papa, 2012] Papa P., US and EU strategies for maritime transport security: A comparative perspective. Transport Policy, DOI: 10.1016/j.bbr.2011.03.031, 2012.

- [Pasman, et Reniers, 2013]Pasman H., Reniers G., Past, present and future of Quantitat ive Risk Assessmen t (QRA) and the incentive it obtained from Land-Use Plannin g (LUP), Journal of Loss Prevention in the Process Industries 1-8, 2013.

- [Piètre-Cambacédès et Chaudet, 2010] Piètre-Cambacédès L., Chaudet C., The SEMA referential framework: Avoiding ambiguities in the terms “security” and “safety”, international journal of critical infrastructure protection 3 ,2010.

- [Planas et al., 2008]Planas E., Pastor E., Presutto F., Tixier J., Results of the MITRA project: Monitoring and intervention for the transportation of dangerous goods. J. Hazard. Mater. 152:516-526. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.032 , 2008.

- [Pokahr, 2010], Alexander Pokahr, 2010, « Jadex Sofware Project », Last modified by HORACIO PAGGI on 2012/08/03, http://jadex.informatik.uni-hamburg.de/xwiki/bin/view/About/Overview

- [Pontiggia et al., 2011] Pontiggia M., Landucci G., Bonvicini V.S., Cozzani V., Rota R., CFD mode l simulation of LPG dispersion in urban areas, Atmospheric Environment 45 3913-3923, 2011.

- [Ramirez-Marquez, 2008]Ramirez-Marquez J.E., Port-of-entry safety via the reliability optimization of container inspection strategy through an evolutionary approach. RESS. 93: 1698–1709, 2008.

- [Raspotnig, et Opdahl, 2013] Raspotnig R., Opdahl A., Comparing risk identification techniques for safety and security requirements, The Journal of Systems and Software 86 1124–1151, 2013.

- [Regattieri et al., 2007] Regattieri A., Gamberi M., Manzini R., Traceability of food products: general framework and experimental evidence. J. Food Eng. 81:347-356. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.032 , 2007.

- [Renier et al., 2005], Reniers G.L.L., Dullaertb W., Alec B.J.M., Soudan K., Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 18 127–138 2005.

- [Revault, 1995] Revault N., Sahraoui H.A., Blain G., Perrot J.-F., A Metamodeling Technique: the MetaGen System, in proc. TOOLS Europe'95 proceedings, TOOLS 16, Prentice Hall, 1995.

- [Rigas, et Sklavounos, 2002] Rigas F., Sklavounos S., Risk and consequence analyses of hazardous chemicals in marshalling yards and warehouses at Ikonio/Piraeus harbour, Greece. Journal of loss prevention in the process industries, volume 15, issue 6, pp. 531–544, 2002.

- [Rizzo et al., 2011] Francesco Rizzo, Marcello Barboni, Lorenzo Faggion, Graziano azzalin, Marco Sironi, improved security for commercial container transports using an

innovative active RFID system, journal of Network and Computer Applications, May 2011.

- [Roach, 2004] Roach J.A., Initiatives to enhance maritime security at sea. Marine Policy, volume 28, issue 1, pp. 41–66, 2004.

- [Ronza et al., 2003] Ronza A., Fe´ lez S., Darbra R.M., Carol S., Vı´lchez J.A., Casal J., Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003.

- [Rossing et al., 2010] Rossing N.L., Lind M., Jensen N., Jørgensen S.B., A functional HAZOP methodology, Computers and Chemical Engineering 34 244–253, 2010.

- [Safety Audit, 2014] http://www.cholarisk.com/SafetyAudit.asp , 2014.

- [Safyalioglu, et kartal, 2012]Safyalioglu, Kartal, The selection of global supply chain risk management strategies by using fuzzy analytical hierarchy process a case from Turkey Procedia - Social and Behavioral Sciences 58 1448 – 1457, 2012.

- [Sallmann, 2007]Sallmann F., Knowledge-based risk management. VDM Ver lag Dr. Mueller e.K, 2007.

- [Samer et al., 2012] Samer A., Louay K., Amine N., Talet E.M., Knowledge-Based Risk Management framework for Information Technology project, International Journal of Information Management, 32, 50–65, 2012.

- [Sargent, 2010] Sargent R.G, Verification and validation of simulation model, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan, and E. Yücesan, Eds. IEEE. USA 2010. pp.166,183.

- [Sebastiani et al., 2004] Sebastiani R., Giorgini P., J. Mylopoulos. Simple and minimum-cost satisfiabilityfor goal models. In Proceedings of the 16th Conference On AdvancedInformation Systems Engineering (CAiSE 04), LNCS Springer, 2004.

- [Shoham, 1993] Shoham. Y., Agent-oriented programming. D. G. Bobrow. Artificial Intelligence Volume 60. Elsevier. Amsterdam.. pp.51-92. 1993.

- [Silver, 2009] Silver B., BPMN method and style. Cody-Cassidy Press, Aptos, California. pp.236. ISBN: 0982368100, 9780982368107, 2009.

- [Simonin et al., 2010] Simonin, J, Picouet P, Jézéquel J-M, Conception fonctionnelle de services d'entreprise fondée sur l'alignement entre cœur de métier et système d'information. Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série ISI. 15(4): 37-61, 2010.

- [Skelton, 2007]Skelton B., Process safety analysis—An introduction. UK: IChemE., 1997.

- [Smata, 2013] Smata N., contribution a la modelisation et a l'analyse de la chaine logistique en utilisant les reseaux de petri, thèse université le Havre, 2013.

- [Smith, 2009] Smith A, The wealth of nations. Penguin, London, 2009.

- [Sturn et Shehory, 2003] Sturm A., Shehory O., A Framework for Evaluating Agent-Oriented Methodologies , Fifth International Bi-Conference Workshop on Agent-Oriented Information Systems (AOIS-2003),Melbourne, Australia, at AAMAS'03, vol. 3030 de LNCS, Springer, p. 94-109, 2003.

- [Suddle, 2009] Suddle S., The weighted risk analysis, Safety Science 47 668–679, 2009.

- [TBMF, 2014] TBMF consulting, Identification du risque, http://www.tbmfconsulting.com/2009/12/identification-des-risques.html ,2014.

- [TC, 2014] http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/opssvs/apropos-menu-910.htm#definition aviation civile de transports Canada, 2014.

- [Tewoldeberhan, et Janssen, 2008] Tewoldeberhan T., Janssen M., Simulation-based experimentation for designing reliable and efficient Web service orchestrations in supply chains, Electronic Commerce Research and Applications 7 82–92, 2008.

- [Thiefaine et al., 2003] Thiefaine A., Guessoum Z., Perrot J-F, et Blain G., Génération de systèmes multi-agents à partir de modèles. Actes des Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, pages 107–111, 2003.

- [Tixier et al., 2002] Tixier J., Dusserre G., Salvi O., Gaston D., Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 15 291–303, 2002.

- [Tummala, et Burchett, 1999] Tummala V.M.R., Burchett J.F., Applying a Risk Management Process (RMP) to manage cost risk for an EHV transmission line project International Journal of Project Management Vol. 17, No. 4, pp. 223 - 235, 1999.

- [Uved, 2014] http://www.e-sige.ensmp.fr/uved/risques/1.1/html/2_2-2_1.html , 2014.

- [Valckenaers et al., 2009] Valckenaers P., Saint-Germain B., Verstraete P., Van Belle J., Hadeli., Van Brussel H., Intelligent products: Agere versus Essere. Comput. Ind. 60:217-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.008 , 2009.

- [Ventä, 2007] Ventä O., Intelligent Products and Systems Technology theme – Final report, VTT PUBLICATIONS 635 VTT Technical Research Centre of Finland 2007 ISSN 1235-0621, 2007.

- [Verdicchio et Colombetti, 2002] Verdicchio M., Colombetti M, Commitments for Agent-Based Supply Chain Management, ACM SIGecom Exchanges, Vol. 3, No. 1, pp 13-23. 2002.

- [Vergidis, 2008] Vergidis K., Business Process Analysis and Optimization: Beyond Reengineering. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, volume 38, issue 1, pp. 69-82, 2008.

- [Wagner, 2002] Wagner G., The Agent-Object-Relationship Metamodel : Towards a Unified View of State and Behavior. Rapport technique, Eindhoven Univ. of Technology, Fac. of Technology Management, 2002.

- [Wein L.M. et al., 2006]Wein L.M. et al., Preventing the Importation of Illicit Nuclear Materials in Shipping Containers. Risk Analysis, volume 26, No. 5, DOI: 10.1111/j.1539-6924.2006.00817.x, 2006.

- [Weiss et Dillebourg, 1999] Weiss, G., Dillenbourg, P. "What is ‘multi’ in multi-agent learning". In P. Dillenbourg (Ed.) Collaborative Learning: Cognitive and Computationnal Approaches. Amsterdam: Pergamon/Elsevier Science, 1999.

- [White, 2003] White A.S., White, SeeBeyond, United States SeeBeyond, United States, Workflow Handbook, Future strategies 221-238, 2003.

- [Whitestein, 2004] Whitestein, Agent modeling language, language specification version 0.9 whitestein technologies AG, 2004 .

- [Winder, et Zarei, 2000] Winder C., Zarei A., Incompatibilities of chemicals., J Hazard Mater. 1;79(1-2):19-30, 2000.

- [Wong et al., 2002] Wong CY., McFarlane D., Zaharudin AA., Agrawal V., The Intelligent product Driven supply chain, autoidcenter.org. http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1173319 , 2002.

- [Woo et al., 2008]Woo S.H., Choi J.Y., kwak C., Kim CO., An active product state tracking architecture in logistics sensor networks. Computers in Industry. 60:149-160. http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.001 , 2008.

- [Wooldridge et al., 2000] Wooldridge J., Jennings N.R., Kinny D., The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. In Autonomous Agents and Multi-Agent systems, volume volume 3, pages 285–312, "The Netherlands", 2000.

- [Worldbank, 2012], World bank statistics, port container traffic measures, Containerisation International Yearbook, http://data.worldbank.org/indicator/ IS.SHP.GOOD.TU/countries? display=graph ,2012.

- [Yacove et al., 1991] YACOV Y., HAIMES., DUAN Li., A Hierarchical-multiobjective Framework for Risk Management, 1 International Federation of Automatic Control, Automatica, Vol. 27, No. 3, pp. 579-584, 1991.

- [Yang et al., 2009] Yang X;, Moore P., Chong S.K., Intelligent products: From lifecycle data acquisition to enabling product-related services, Computers in Industry 60 184–194, 2009.

- [Zepeda, 1998] Zepeda S.C., Méthode d’évaluation des risques zoosanitaires lors des échanges internationaux. In Séminaire sur la sécurité zoosanitaire des échanges dans les Caraïbes (ed. O.I.E.), pp. 2-17. Office international des épizooties, Paris, 1998.

- [Zhao, et Cheng, 2005] Zhao J.L., Cheng H.K., Web Services and the Process Management: a union of convenience or a new area of research? USA/ELSEVIER: ScienceDirect/Decision Support 40, 1-8, 2005.

- [Zhaoyang et al., 2014] Zhaoyang T., Jianfeng L., Guangyu H., Risk assessment and countermeasures of gas accidents in the sensitiveareas under control during the Olympic Games in Beijing, Safety Science 62 187–204, 2014.

- [Zheng et al., 2005] Zheng Z., Yang D., Yang H., “Modeling Business Process: Analysis of Goal-Oriented Approaches”, in the Proceeding of the Fifth International Conference on Electronic Business, pp.827-831, 2005.