

PROTOTYPE D'UN SYSTEME EXPERT POUR LA SECURISATION DU PASSAGE PORTUAIRE DU CONTENEUR

Charles-Henri FREDOUËT*, Jaouad BOUKACHOUR**, Dalila BOUDEBOUS***
et Mame GNINGUE****

Résumé. - Du fait de la mondialisation des échanges, plus de 150 millions de conteneurs transitent chaque année dans plus de 200 ports. Une telle circulation pose de redoutables défis en matière de sécurité pour le transport des marchandises. Pour autant, il ne faut pas perdre de vue l'exigence de performance que continue d'avoir la chaîne logistique en matière de coût et de délai. La sécurisation ne peut se faire au détriment de ces deux autres facteurs de compétitivité, et c'est donc vers une optimisation combinée de la sécurité des opérations logistiques et de la facilitation du commerce international que doivent tendre les solutions mises en œuvre en chaque maillon, y compris portuaire, de la supply chain globale. La recherche dont cet article rend compte s'inscrit dans cette démarche de sécurisation et de fluidification combinée des échanges internationaux, et s'appuie sur des travaux réalisés dans le cadre du projet ANR-PREDIT 2007 GOST relatif aux « Transports Sécurisés, Fiables et Adaptés ». Plus spécifiquement, l'article présente un modèle d'aide à la décision en matière de gestion des risques liés au transport maritime des conteneurs ; ce modèle, adapté de la méthode HACCP et qui prend la forme d'un système-expert, est alimenté en temps réel par les outils de traçabilité issus du projet GOST (Géolocalisation, Optimisation et Sécurisation du Transport des Conteneurs).

Mots-clés : Conteneurs, Traçabilité, Gestion des Risques Logistiques, Transport Maritime, Système-Expert.

* Professeur, Université du Havre, chf@univ-lehavre.fr.

** Maître de conférences, Université du Havre, boukachour@univ-lehavre.fr.

*** Maître de conférences, Université du Havre, boudebous@univ-lehavre.fr.

**** Professeur, Ecole de Management de Normandie, mamegningue@gmail.com.

1. Introduction

Du fait de la mondialisation des échanges, plus de 20 millions de conteneurs transitent chaque année dans plus de 200 ports. Une telle circulation pose de redoutables défis en matière de sécurité pour le transport des marchandises. Ainsi, l'intégralité de la chaîne logistique internationale allant du fournisseur initial au client final doit se préoccuper de trouver des solutions susceptibles d'améliorer le suivi et le contrôle des conteneurs, pour une meilleure gestion des risques associés à leurs déplacements.

Pour les parties prenantes à la chaîne logistique, les enjeux sont la réduction des vols et des dommages à la marchandise, mais aussi plus généralement la sécurisation de leurs réseaux d'approvisionnement et de distribution ; pour les pouvoirs publics et les institutions régissant le commerce international, il s'agit d'assurer la sécurité du territoire et le respect des réglementations.

Pour autant, il ne faut pas perdre de vue l'exigence de performance que continue d'avoir la chaîne logistique en matière de coût et de délai. La sécurisation ne peut se faire au détriment de ces deux autres facteurs de compétitivité, et c'est donc vers une optimisation combinée de la sécurité des opérations logistiques et de la facilitation du commerce international que doivent tendre les systèmes de gestion des risques mis en œuvre en chaque maillon, y compris portuaire, de la supply chain globale.

Partant de ce constat, les opérateurs de la place portuaire du Havre, qui entendent bien gagner des places sur la scène internationale et ainsi rivaliser avec leurs concurrents nord-européens, et plus généralement les acteurs de la logistique régionale, tant chargeurs que prestataires, se sont intéressés à l'élaboration d'une solution de traçabilité globale dédiée à la gestion des risques de transport des conteneurs.

La recherche dont cet article rend compte, et qui entre dans le cadre du projet ANR-PREDIT 2007 GOST relatif aux "Transports Sécurisés, Fiables et Adaptés", s'inscrit dans cette démarche collaborative : elle porte en effet sur le développement d'un modèle d'aide à la décision en matière d'identification, d'évaluation et de traitement optimal des risques associés à l'acheminement et à la manutention des marchandises conteneurisées ; ce modèle est adapté de la méthode HACCP et prend la forme d'un système-expert, destiné à être alimenté en temps réel par les outils de traçabilité issus du projet GOST (balise GPS/GPRS, informatique embarquée, RFID,...).

Ainsi, une première section de l'article détaille les différentes approches respectivement de la traçabilité et de la gestion des risques auxquelles la recherche s'est adossée. Une deuxième section décrit les phases successives de conception et d'exploitation du système-expert d'aide à

la décision. La troisième section est consacrée à la présentation des modalités d'alimentation du système-expert en temps réel.

2. L'état de l'art en matière de traçabilité et de gestion des risques de transport

Les spécificités des trafics conteneurisés nécessitent de développer des solutions de gestion des risques de transport qui soient adaptées, tant au niveau des modèles et méthodes mobilisés qu'à celui de l'organisation et du suivi des opérations d'acheminement des conteneurs. L'exigence de traçabilité des marchandises et de leurs vecteurs de transport est rendue d'autant plus forte que les acteurs économiques et les pouvoirs publics sont plus soucieux les uns de sécuriser leurs processus opérationnels et les autres d'assurer la protection des territoires et des personnes.

2.1 La traçabilité des marchandises

D'après la norme ISO 9000-2000, la traçabilité est l'aptitude à retrouver l'historique, la mise en œuvre ou l'emplacement de ce qui est examiné. Dans le cas d'un produit, elle peut être liée à l'origine des matériaux et des composants, à l'historique de réalisation, à la distribution et à l'emplacement du produit après livraison.

Selon GS1 [1] un système de traçabilité « produit » doit assurer les quatre fonctions suivantes :

1. Identifier les produits à tracer ;
2. Enregistrer les données de traçabilité ;
3. Gérer les liens entre les différents lots de produits ;
4. Communiquer la traçabilité entre les maillons d'une chaîne.

Mais pour Kim et al., un système de traçabilité idéal [2] doit être en mesure de tracer l'historique non seulement des produits mais aussi des activités, ce qui revient à tracer les TRU (« Traceable Resource Units ») et les activités élémentaires (« primitive activities »). On note de fait que, bien souvent, la chaîne logistique est perturbée par la non-synchronisation du flux physique et du flux d'information.

Terzi [3] propose un méta-modèle orienté produit, basé sur le concept holonique, où un « holon » est considéré comme l'agrégation qui combine à la fois la partie matérielle d'un produit donné et l'ensemble des informations relatives au produit [4]. Baina et al. [5] proposent

eux aussi une approche de modélisation orientée produit qui couvre tous les aspects liés à l'information produit et à sa gestion en adoptant également le concept du "holon" pour modéliser les deux aspects du produit, à savoir l'information et le matériel dans le cadre de modélisation de Zachman [6]. Cette représentation unifiée du produit facilite l'interopérabilité entre systèmes d'information.

Sur la base de ces modèles, le produit est capable de porter l'information et de participer au pilotage de son propre cycle de vie, notamment grâce aux technologies mobiles (RFID, Balise GSM, GPS,...). Ce concept de "produit intelligent" est décrit par Mcfarlane et al. [7] comme une représentation physique et informationnelle d'un produit. La connexion entre le produit physique et sa représentation est assurée par un tag (identification unique) et un lecteur. Les produits intelligents peuvent ainsi garantir la visibilité tout le long de la chaîne logistique.

La conception et la gestion de l'information produit sont donc des étapes importantes de contrôle de la qualité des produits et des services. L'amélioration de la fonctionnalité et de la sécurité de la chaîne logistique seraient garanties par l'adoption du produit intelligent. En maintenant l'identité du produit, il est possible de repérer où des événements tels que les vols se produisent, de vérifier l'authenticité du produit et enfin de réduire les risques. L'approche multi-agents est également utilisée pour modéliser le concept de produit intelligent. Meyer et al. [8] présentent un modèle de gestion de l'information basé sur des agents qui peut être utilisé pour assurer la modélisation, la simulation et l'analyse des opérations de la chaîne logistique. En effet, les agents ont été utilisés pour représenter diverses fonctions de la chaîne logistique, e.g. agents ordre d'acquisition, agents logistique, agents transport, etc.

D'autres travaux proposent des modèles orientés objet. Bechini et al. [9] ont élaboré un modèle générique de données pour la gestion de la traçabilité dans un contexte d'industrie agroalimentaire. Le modèle répond à la fois aux besoins de la traçabilité et à l'évaluation de la qualité. Le modèle est centré sur une classe abstraite d'objets appelée "entité tracée" qui peut être un lot ou une activité. L'entité tracée est associée à deux autres classes : "acteur responsable" et "site" pour imposer qu'une "entité tracée" soit toujours liée à un acteur responsable et localisée dans un site. Quant à Woo et al. [10], leur modèle permet le suivi des produits aussi bien dans un lot que sur une palette ou dans un conteneur en utilisant les technologies des capteurs comme moyen de collecter l'information fiable et en ligne. Le modèle contient des associations temporelles qui expriment des relations limitées dans le temps entre des objets (entre camion et conteneur, entre conteneur et palette, etc.). L'« objet logistique » du modèle a un plan de mouvement et des attributs (température, humidité,...) auxquels on peut appliquer des contraintes. L'objectif est de tracer les emplacements, suivre l'évolution des attributs et déclencher des actions correctives quand ces contraintes sont violées.

À travers cet état de l'art, sont apparues deux approches de la traçabilité. La première est caractérisée, d'une part, par une vision théorique, et d'autre part, par le fait qu'elle n'est pas spécialement dédiée à la traçabilité et encore moins validée sur le terrain. Les modèles proposés sont très orientés système d'information et il y a très peu d'éléments sur les aspects fonctionnels, c'est-à-dire les activités réalisées par le système de traçabilité. La seconde approche concerne le traitement d'une problématique réelle. Par ailleurs, les deux approches sont plus ou moins axées sur la gestion des risques : un système de traçabilité doit assurer la qualité et la fiabilité de l'information de l'entité à tracer afin de mieux gérer les risques.

2.2 La gestion des risques

Pour accompagner les organisations dans les différentes étapes du processus transverse de management de risque, une grande variété d'outils et de méthodes a été développée. Certains outils de management de risque sont spécifiques à tel ou tel domaine d'activité, tandis que d'autres voient leur application de plus en plus étendue dans divers secteurs. Une méthode d'analyse de risque peut être assez simple et seulement orientée vers une des phases du processus de management de risque (identification, évaluation, traitement du risque). Elle peut aussi être plus complexe, résultant d'une combinaison de plusieurs méthodes simples. Enfin, il existe des méthodes de management de risque qui reposent sur la qualité de l'expérience accumulée, alors que d'autres exploitent un grand nombre de données disponibles.

Plus généralement, Tixier et al. [11] classent les méthodes de management de risque selon quatre critères : le critère quantitatif, le critère qualitatif, le critère déterministe, le critère probabiliste :

- Le critère quantitatif : il identifie des méthodes qui sont utilisées lorsque l'estimation de risque doit faire l'objet d'une mesure quantitative telle que la valeur des ressources ou la fréquence de l'occurrence de menace. Elles présentent des résultats sous forme d'indicateurs. L'objectif primordial des méthodes d'analyse quantitative de risque, qui présentent leurs résultats sous forme d'indicateurs, est d'obtenir des résultats numériques qui expriment la probabilité de chaque facteur de risque et de ses conséquences. Si le terme « analyse quantitative de risque » implique donc généralement la dépendance à des probabilités et statistiques, il y a certaines méthodologies décisionnelles quantitatives qui ne nécessitent pas une connaissance en probabilité ; c'est le cas par exemple de la maximisation du gain minimum (maximin), minimisation de pertes maximales (minimax), maximisation du gain maximum (maximax).
- Le critère qualitatif : il isole des méthodes qui emploient des index subjectifs, telle qu'une hiérarchie ordinale, pour caractériser les facteurs de risque identifiés et

fournissent des résultats sous forme de descriptions. Elles sont utilisées lorsque l'évaluation de risque doit être reliée à une mesure qualitative de fréquence de menaces et de conséquences. La fréquence et les conséquences de chaque scénario à risque sont estimées sur des échelles assez simples, telles qu'élevé, moyen, faible. L'analyse qualitative a pour finalité principale d'évaluer l'impact des facteurs de risque identifiés. A partir de cette évaluation, les priorités sont déterminées pour résoudre les facteurs de risque potentiels, sur la base de l'impact qu'ils peuvent avoir. Une évaluation de risque purement qualitative peut être vue de façon basique comme une analyse de tâche et/ou d'aléa avec des jugements relatifs, afin de catégoriser les aléas. Lorsqu'il s'agit d'une analyse de tâche, chaque tâche est étudiée afin d'identifier les aléas potentiels et les initiateurs potentiels d'accidents causés par les aléas.

- Le critère probabiliste : il caractérise des méthodes, généralement appliquées pour étudier une partie restreinte d'une organisation, qui exploitent des nombres probabilistes comme données d'entrée au processus de gestion des risques. Ces probabilités représentent un guide pour prévoir des événements pouvant perturber le fonctionnement de systèmes impossibles à décrire avec des règles et équations déterministes. Pendant que l'analyse de conséquences utilise des outils déterministes classiques pour produire des résultats numériques, la probabilité d'occurrence d'événement doit être quantifiée sur la base de méthodes conceptuellement différentes de probabilité et des statistiques. La principale hypothèse est qu'il s'agisse de processus aléatoire. Les variables aléatoires utilisées pour bien décrire un processus de défaillance sont quantifiées sur la base d'observations antérieures.
- Le critère déterministe : il décrit des méthodes de management de risque qui sont basées sur la quantification des conséquences sur des éléments tels que les personnes, l'environnement, les équipements. Sous une approche déterministe, des situations descriptives et des nombres non probabilistes sont généralement utilisés comme données d'entrée pour analyser des risques.

Des catégories de sévérité sont très souvent définies pour évaluer les probabilités d'occurrence, et les conséquences des risques identifiés. La définition qualitative de ces catégories est souvent complétée d'une définition quantitative ; celle-ci permet de spécifier un nombre de catégories de sévérité aussi bien pour les probabilités d'occurrence (fréquences) que pour les conséquences, ainsi que d'assurer la cohérence au cours de l'analyse et de fournir des repères.

Partant de ces quatre critères, les méthodes de gestion de risque peuvent être rangées en quatre classes : les méthodes quantitatives probabilistes, les méthodes quantitatives

déterministes, les méthodes qualitatives probabilistes et les méthodes qualitatives déterministes [11].

- Les méthodes quantitatives probabilistes : dans cette catégorie, la méthode Fault Tree Analysis (FTA), ou analyse de l'arbre de défaillance, est une approche logique et schématique pour évaluer la possibilité qu'un accident survienne de séquences et/ou de combinaisons d'événements défaillants. Originellement conçu en 1962 par Bell Labs pour accompagner l'étude des modes de défaillance dans les systèmes de contrôle de lancement de missiles, l'outil est désormais largement utilisé dans de nombreuses applications, allant de l'investigation d'accident à la conception de prototype, mais aussi dans des applications de protection et de contrôle. C'est la technique la plus populaire pour analyser la sécurité dans tous les systèmes [12], et pour prédire la fiabilité des systèmes complexes dans plusieurs domaines tels que l'aérospatial, l'industrie pétrochimique ou encore les oléoducs ; elle peut être appliquée aussi bien aux équipements qu'aux logiciels.
- Les méthodes quantitatives déterministes : elles trouvent une illustration dans la méthode Domino Effect Analysis (DEA) : depuis longtemps, l'effet de domino est reconnu dans le domaine de la gestion des risques potentiels et des catastrophes. Trois éléments caractérisent un événement domino [13] :
 - Un événement accidentel primaire, qui déclenche l'effet domino ;
 - Un effet de propagation, qui vient après l'événement primaire, et qui résulte de l'effet des vecteurs de propagation causé par l'événement primaire sur les cibles secondaires ;
 - Un ou plusieurs événements accidentels secondaires impliquant la même ou une autre partie du système.A noter que l'accident est considéré comme événement domino seulement si la séquence de propagation résulte en une aggravation de l'événement primaire.
- Les méthodes qualitatives probabilistes : l'une des méthodes de ce type dont l'utilisation est la plus répandue, est la méthode Delphi, qui peut être définie comme une procédure permettant d'obtenir le consensus le plus fiable possible des opinions d'un groupe d'experts, par une série de questionnaires intensifs distribuée et étudiée par la suite, avec un feedback d'opinion contrôlé [14].

Plus généralement, elle est vue comme une méthode de structuration de la communication entre un grand nombre de participants pouvant constituer un groupe, ainsi que d'autres membres géographiquement dispersés ; ces personnes peuvent fournir des contributions valables permettant de résoudre un problème complexe dans des situations de jugement et de

prévision où les méthodes statistiques ne sont pas praticables ou inadéquates du fait d'un manque de données historiques/économiques/techniques appropriées.

- Les méthodes qualitatives déterministes : en matière de gestion de risques, l'identification des aléas susceptibles d'entraîner des situations accidentelles est une tâche fondamentale. Pour cela, plusieurs techniques sont disponibles dont le succès tient tout particulièrement à une analyse rigoureuse des scénarios générés par ces aléas et pouvant causer des accidents à différents degrés de sévérité. Parmi ces techniques, la méthode Hazard Operability (HAZOP) est reconnue comme étant le meilleur outil d'identification d'aléas dans une analyse qualitative [15].

Une étude HAZOP a pour objectif d'identifier comment un système pourrait dévier de son état normal, en découpant ce système en sections gérables avec des limites définies appelées nœuds, et en assurant l'analyse de chaque composant. Khan et Abassi [16] ont ainsi divisé la procédure HAZOP en trois principales étapes, répétées pour chaque composant du système à étudier : l'identification du comportement anormal de l'unité sous des conditions normales, l'évaluation qualitative du comportement anormal au cas où il se propage sur d'autres unités, et les recommandations basiques pour atténuer cette anormalité.

L'analyse de ces quatre catégories de méthodes au travers d'instances qui en sont typiques, laisse apparaître que toutes peuvent présenter des forces et des faiblesses. Toutefois, leur conception et leur application font souvent appel à l'expérience des acteurs impliqués. L'acquisition de cette expertise semble donc pouvoir constituer une base favorable à l'élaboration d'un outil performant en matière de gestion des risques logistiques.

3. Modélisation de l'expertise pour la gestion des risques de transport

Dans un contexte où l'optimisation du compromis entre sécurité opérationnelle et fluidité des échanges peut être source d'avantage concurrentiel substantiel pour un port maritime, un système d'aide à la gestion des risques liés au transit de conteneurs a deux objectifs : l'un est d'aider les opérateurs portuaires à empêcher tout ce qui constitue une source de risque potentiel, d'entrer, et a fortiori de quitter, l'enceinte du port ; l'autre est de conforter, plutôt que de dégrader, les résultats d'autres programmes d'amélioration de la performance, cette fois en matière de coût et/ou de délai.

L'outil d'aide à la décision proposé ci-après a été conçu pour répondre à cette double ambition. Son élaboration procède d'une méthodologie structurée en trois étapes : d'abord le choix de la méthode de gestion des risques à laquelle adosser l'outil ; ensuite la formalisation des

- Les caractéristiques du conteneur : type, numéro, équipements de sûreté ;
- Les caractéristiques du voyage : direct, transbordement, durée, pays d'origine et de destination ;
- Les caractéristiques de la marchandise : type, code ;
- Le niveau de sûreté des sites : conditions d'accès ;
- La durée des trajets entre zones ;
- La disponibilité des informations pendant le déroulement des opérations.

Les experts ont alors structuré ces variables en scénarios pour chacune des zones à risque évoquées ci-avant.

L'évaluation des scénarios à risque : dans cette deuxième étape, les experts ont travaillé en groupe pour évaluer qualitativement chaque scénario à risque, en s'appuyant sur leur expérience. HACCP intègre la notion de contrôle d'aléas en termes de probabilité d'occurrence, de gravité de conséquences et de moyens de détection. Mais dans son application au secteur agroalimentaire, la méthode n'explore pas la probabilité que les aléas soient détectés. En matière de gestion des risques sécuritaires liés aux conteneurs, disposer d'une mesure de la probabilité de détection des risques liés à la sûreté des conteneurs est toutefois un important critère de décision. Ceci conduit donc à ajouter cette probabilité aux critères d'évaluation des risques.

Les experts ont ainsi évalué les scénarios à risque identifiés en fonction de leur probabilité d'occurrence, de leur probabilité de détection et de la gravité de leurs conséquences, à l'aide des échelles qualitatives suivantes :

- Très Elevée, Elevée, Moyenne, Faible et Très faible, pour les probabilités d'occurrence et de détection ;
- Très Grave, Grave, Moyenne, Faible et Très faible, pour la gravité des conséquences.

Le traitement des scénarios à risque : A ce dernier stade, il s'agit pour les experts de définir les comportements à adopter, selon les résultats de l'évaluation combinée des probabilités d'occurrence et de détection, ainsi que de la gravité potentielle des divers scénarios reconstitués. Si, dès qu'il y a risque avéré, ceux-ci s'accompagnent d'une même mesure corrective consistant à prévenir les services des Douanes pour exercer un contrôle physique sur le conteneur, d'autres recommandations sont également susceptibles d'être formulées, en particulier en termes de

vérification des statuts (connu ou non, opérateur économique agréé ou non) des acteurs impliqués.

3.3 Construction et validation du système-expert :

Parce que les processus décisionnels en matière de gestion de risques sont de nature plutôt mal structurée, leur modélisation fait appel à un ensemble de méthodes spécifiques, à la fois différentes et non-exclusives. Dans cet ensemble, en même temps que des méthodes purement quantitatives telles que les algorithmes génétiques, se trouve la modélisation de l'expertise, dont l'une des instanciations consiste en l'élaboration d'un système-expert.

L'intérêt de l'utilisation d'un système-expert réside dans le fait qu'il permet une représentation déclarative de la connaissance sous forme de règles déterministes de type « SI <conditions> ALORS < actions> » : cette nature déclarative se retrouve en effet dans le langage employé par les experts du port du Havre consultés, pour la formulation de leurs connaissances. En outre, la base de connaissances est de ce fait facilement manipulable et modifiable pour un non-informaticien dans la mesure où elle est indépendante des mécanismes de son exploitation ; l'approche système-expert permet alors de réserver aux experts les opérations de mise à jour de la connaissance mobilisée.

Le principe d'un tel outil étant de reproduire le processus par lequel un expert humain met en œuvre sa connaissance pour apporter une solution à un problème donné dans son domaine de spécialité, l'architecture d'un système-expert comporte trois éléments : une base de connaissances, qui héberge la connaissance acquise auprès du ou des experts consultés ; une base de faits, qui reçoit les informations caractéristiques du problème à résoudre ; un moteur d'inférences qui recherche dans la base de connaissances, puis mobilise, les éléments d'expertise susceptibles d'aider à résoudre le problème décrit dans la base de faits. L'utilisateur d'un système-expert peut ainsi solliciter cet outil de la même façon qu'il s'adresserait à un expert humain ; à la manière de celui-ci, le système-expert s'informe sur la situation décisionnelle rencontrée, y compris en posant des questions à l'utilisateur, fait en conséquences ses commentaires et recommandations, et, à la demande éventuelle de l'utilisateur, détaille les étapes successives de son raisonnement.

En tant qu'outils d'aide à la décision, les systèmes experts ont ainsi été largement utilisés pour la gestion des risques, plus particulièrement la gestion des risques de projet [25]. À partir d'une analogie entre gestion de projet et gestion de la chaîne logistique (toutes les deux font face à un environnement complexe, dynamique et incertain), Putu et al. [26] ont d'ailleurs proposé un cadre complet (Figure 2) pour développer un tel outil.

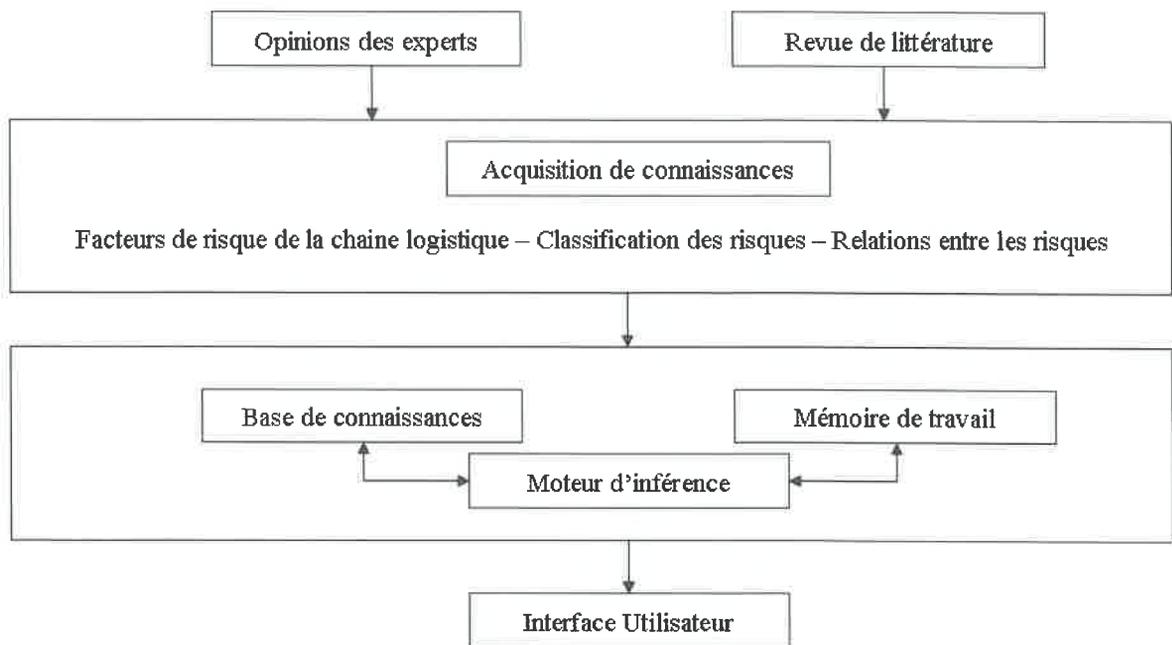


Figure 2 : Cadre pour le développement d'un système-expert pour la gestion des risques d'une supply chain [26].

En la matière ici traitée de gestion des risques liés au transport de conteneurs maritimes, c'est également cette forme d'aide à la décision qui a été choisie. Afin d'optimiser la sécurité et la fluidité du transit d'un conteneur, le système-expert doit 1) évaluer les risques, par la collecte de données sur tous les mouvements de conteneurs à destination du port maritime, et 2) aider au traitement des risques, par la fourniture en temps utile aux opérateurs concernés de recommandations leur permettant de prévenir / atténuer le risque généré par l'un quelconque de ces mouvements. Le système expert élaboré TRIMEX (Transportation Risk Management Expert-system) présente ainsi une base de données pour l'enregistrement des informations sur les opérations à sécuriser, une base de connaissances pour le stockage de l'expertise en gestion de risques et un moteur d'inférence qui combine le contenu des deux bases pour identifier les risques, les évaluer et spécifier la manière de les traiter.

Comme pour tout modèle d'aide à la décision, l'élaboration d'un système-expert passe par deux phases successives de construction puis de validation.

La phase de construction du système-expert : La constitution de la base de connaissances inclut une première tâche d'acquisition de la connaissance, suivie d'une seconde tâche de représentation de celle-ci. L'extraction de la connaissance constitue l'étape la plus difficile du processus d'ingénierie de la connaissance [27], et le choix d'une méthode appropriée à cet effet est un facteur-clé de succès de la conception et du développement d'un système expert.

Au cas présent, la méthode qui a été employée est celle qui est la plus communément utilisée pour extraire la connaissance, c'est-à-dire l'entretien ; plus spécifiquement ce sont des entretiens de groupe qui ont été menés, structurés à partir d'une question initiale « Quels sont les indicateurs que vous utilisez pour cibler des conteneurs lorsque vous vous rendez à telle zone de la chaîne logistique ? ».

Le protocole standard recueilli est de la forme « Sur chaque zone nous nous focalisons sur les acteurs intervenant sur le conteneur, sur les lieux et sur les flux ; s'il y a un risque, nous demandons à inspecter ce conteneur », avec une formulation particulière selon la zone de la chaîne logistique étudiée, comme ci-après dans le cas du trajet entre centre d'emportage et port d'exportation :

« L'acteur principal étant le transporteur routier, il est important de connaître son statut, OEA ou pas, connu ou nouveau, car s'il est nouveau, il y a un risque ; le temps écoulé depuis le centre d'emportage, car s'il y a eu un arrêt long dans un endroit non sécurisé, il y a un risque ; le type de marchandise transportée, spéciale ou dangereuse ; les conditions de transport du conteneur plein, équipé ou non d'un détecteur d'ouverture ; s'il s'agit d'un scellé, quel est l'état du scellé, car s'il est mal apposé, il y a un risque. »

À l'issue des entretiens, les protocoles fournis par les experts ont été analysés en distinguant :

- Des indicateurs (tels que « transporteur », « marchandise », « conteneur ») ;
- Des opérateurs (tels que « est », « n'est pas ») ;
- Des valeurs (telles que « connu », « dangereuse », « équipé ») ;
- Des actions (telles que « scanner », « inspecter »).

Cette transcription des protocoles a permis de reconstituer les scénarios à risque avant la tâche de représentation des connaissances. Celle-ci fait appel à plusieurs types de formalismes qui peuvent être organisés en trois grandes classes [28] : les représentations procédurales, les représentations déclaratives et les représentations structurées. Les représentations procédurales incluent les automates finis et les programmes ; les représentations déclaratives comprennent le calcul des prédicats et les règles de production ; les représentations structurées regroupent les réseaux sémantiques, les frames, les schémas, les scripts, et les objets. Eu égard à la nature de la connaissance acquise, et à son mode d'exploitation naturellement déductif, le formalisme de représentation choisi est celui des règles de production ; les scénarios identifiés par les experts sont donc décrits sous forme d'enchaînements de type « SI <conditions> ALORS <actions> », à titre d'exemple : « SI le nombre de transbordements du conteneur plein est égal à 1 et le chargeur est non OEA et le conteneur est déjà contrôlé au port de départ, ALORS le conteneur

doit être scanné » ; quand l'ensemble des prémisses d'une telle règle se trouve validé par les données caractéristiques de l'opération à sécuriser, la conclusion de la règle s'exécute, faisant ainsi avancer d'une nouvelle inférence le processus de gestion de risques.

La phase de validation du système-expert : cette phase porte sur la qualité du système-expert, essentiellement sur son degré d'exactitude et sur sa robustesse [29] ; outre le contrôle des erreurs de programmation, elle consiste ainsi en une triple évaluation : évaluation en laboratoire, évaluation de performance et évaluation du champ : l'évaluation en laboratoire cherche à identifier toute différence entre la connaissance acquise et celle représentée ; l'évaluation de performance concerne l'interaction avec l'utilisateur (ergonomie, temps de réponse, aptitude du système à expliquer son raisonnement) ; l'évaluation du champ a pour principal objectif d'estimer la qualité des solutions fournies au regard de situations réelles. La méthode retenue pour la validation du système-expert TRIMEX s'inscrit globalement dans cette approche. Pour détecter les règles incorrectes de la base de connaissances, l'univers de discours du modèle est en effet repris pour décrire une série de cas réels ayant fait l'objet d'un diagnostic de risque ou d'absence de risque par les experts consultés ; l'ensemble des cas est soumis au raisonnement du système-expert qui fournit en conséquence ses conclusions ; celles-ci sont alors rapprochées de celles apportées par les experts pour déterminer un taux d'exactitude utilisé comme critère de validation.

C'est ainsi que 50 cas réels ont été formalisés puis enregistrés dans la base de faits du système-expert. Sur ces 50 situations, certaines à risque et d'autres pas, soumises au raisonnement du système-expert, 40 (80%) ont abouti à des conclusions identiques à celles formulées par les experts ; les 10 autres n'ont pas conduit à une erreur de diagnostic qui aurait été due à l'incorrection des connaissances stockées, mais en fait à une absence de diagnostic liée donc à l'incomplétude de la base de connaissances à ce stade de sa construction. Outre qu'ils ont permis d'en mesurer la validité, les tests réalisés avec TRIMEX ont fait ressortir divers intérêts de ce type de système d'aide à la décision : le ciblage automatisé des conteneurs exportés, sur la base d'un grand nombre d'indicateurs, et l'examen préalable de ces conteneurs à risque depuis le port d'embarquement, contribuent à la mission de sûreté de la douane en matière de lutte contre les grands trafics, mais aussi aux programmes internationaux destinés à améliorer la sûreté des navires et des installations portuaires.

Un tel outil favorise l'implication des acteurs non experts du transport international de marchandises dans la sécurisation de la chaîne de transport conteneurisé, et les accompagne dans le ciblage des conteneurs à risque.

De par sa conception, le système-expert se prête à une amélioration continue de la qualité de son processus de gestion des risques, via la possibilité qu'il donne d'une mise à jour permanente de sa base de connaissances, y compris les bases de données externes utilisées en

référence, telles que la liste noire des sociétés, la liste des pays à risques, ou encore la liste des codes de marchandises.

Les informations sur le niveau de risque des conteneurs (probabilité d'occurrence, probabilité de détection et gravité des conséquences), susceptibles d'être fournies en temps réel via le système GOST, contribuent à une meilleure réactivité des acteurs concernés. Ceux-ci peuvent par ailleurs entrer en contact avec les experts à chaque fois qu'ils sont confrontés à une nouvelle situation, ou qu'un niveau de risque leur semble surestimé ou sous-estimé.

4. Le projet GOST

Le projet GOST est mené au sein d'un consortium regroupant institutions académiques et sociétés de services technologiques. L'objectif de ce projet, ancré sur le territoire et impliquant des acteurs du port du Havre, est de mettre en œuvre et de tester par une série d'expériences pilotes le concept d'une plateforme de services axée sur le suivi et la surveillance temps réel du transport, en particulier des marchandises dangereuses. Cette plateforme est envisagée dans un environnement multimodal et transfrontalier, dans un contexte de gestion des risques et des incidents. L'ambition d'un tel outil est de pouvoir répondre 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.

Cette transmission d'informations fiables doit se faire depuis la prise de commande jusqu'à la facturation du service effectué en assurant la traçabilité du transport et en permettant la confirmation et/ou l'anticipation des actions logistiques.

4.1 Les acteurs

Différentes catégories d'utilisateurs potentiels ont été identifiées. Pour chaque catégorie a été déterminé l'intérêt des fonctionnalités offertes par la plateforme en termes de suivi de la marchandise et sécurisation des flux (voir tableau 2 ci-dessous).

Opérateurs et prestataires de service	Utilisateurs commerciaux	Utilisateurs Gouvernementaux
Chargeurs Transporteurs Sociétés de logistique Opérateurs portuaires Opérateurs de réseau Sociétés d'autoroutes Centres de contrôle H24	Expéditeurs / Donneurs d'ordre Clients finals Organisateurs de transport	Préfectures Collectivités locales Gestionnaires d'infrastructures Douanes Ministères (transport, environnement, ...) Sociétés d'assurance

Tableau 2 : Acteurs potentiels.

Chaque acteur est classé en fonction des différents niveaux d'information à lui transmettre :

- Acteurs de premier niveau : besoin d'une information à n'importe quel moment pour connaître la position de la marchandise ;
- Acteurs de second niveau : besoin d'une information ponctuelle sur l'état de la marchandise (livraison effectuée, retard dans la livraison, fuite, ...) ;
- Acteurs du troisième niveau : à contacter uniquement en cas de crise.

À partir de cette classification, le tableau précédent a été modifié, afin de prendre en compte les échanges d'informations entre la plateforme GOST et les différents acteurs (tableau 3).

	Groupe Fonctionnel 1	Groupe Fonctionnel 2		Groupe Fonctionnel 3
	Utilisateurs finals	Acteurs de 1 ^{er} Niveau ¹ (organisateur)	Acteurs de 2 nd Niveau ² (fournisseurs d'info)	Acteurs de 3 ^e Niveau (collecteurs d'info)
	Expéditeurs / chargeurs	Logisticiens / transporteurs	Transporteurs Opérateurs de réseau Opérateurs portuaires Gestionnaires d'infrastructures	Collectivités Sécurité civile, Préfecture, Services de l'Etat Assurances
Rôle vers la plateforme GOST	Renseigner / consulter	Renseigner / consulter	Renseigner / consulter	Consulter
Analyse des besoins				
Quoi (nature, origine info)	Nom, Quantité Conditionnement Nature marchandises	Accès à réglementation Affectation des modes de transport	Id. acteurs Niv 1 + filtres selon besoins	Nature marchandise conditionnement Modes de transport Classes, Quantités
Quand (périodicité, temps réel ou pas)	Temps réel sur aléas Statut à chaque rupture de charge	Temps réel pour vérifier évolution des expéditions Historique	Temps réel pour vérifier l'évolution des expéditions Historique	Usages statistiques et cartographiques
Comment (type, format, modes d'accès, de diffusion)	Consultation volontaire Alerte (mail, SMS)	Consultation volontaire Alerte (mail, SMS)	Consultation volontaire Alerte (mail, SMS)	Collecte information mensuelle et/ou en fin d'année (tableaux)
Protection des données	Données cryptées et accès restreint aux informations selon login/password			

Tableau 3 : Groupes d'acteurs et les niveaux d'information nécessaires.

4.2 Le Système d'information GOST

GOST vise à interfacier des solutions existantes afin de proposer un service global à destination des acteurs du transport de conteneurs. La mise en place d'une telle plateforme permet d'avoir accès à tous les services disponibles environnants (tableau 4). Typiquement, il

¹ Acteurs du premier niveau : organisateur de la chaîne globale de transport.

² Acteurs du second niveau : transporte sur un maillon de la chaîne.

s'agit de développer des interfaces entre systèmes d'information (SI) des différents partenaires (AP+, ORCA, HAGIS), et éventuellement avec d'autres SI (TIMAD, SI opérateur de transport, TMS, WMS, ...) et d'intégrer des informations complémentaires issues de technologies mobiles (positionnement satellite, RFID,...).

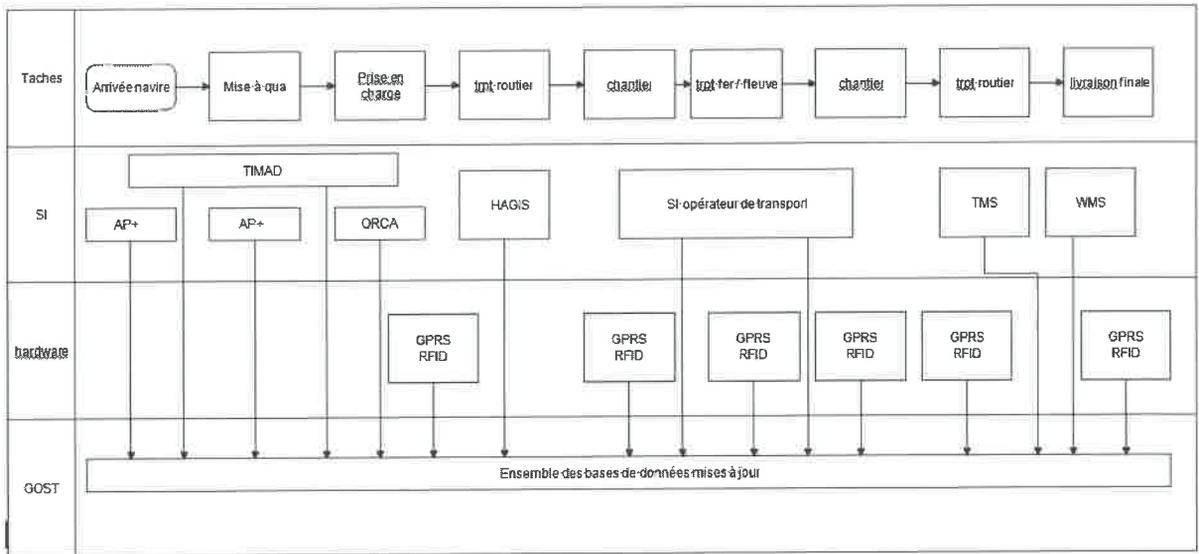


Tableau 4 : Echanges d'informations.

TIMAD qui est interfacé avec le SI du port du Havre (AP+), permet également de suivre via des statistiques, le trafic des matières dangereuses. Aujourd'hui, cette application ne permet pas de tracer les matières dangereuses hors du périmètre portuaire, il y a donc ici un intérêt à faire cohabiter les deux systèmes afin qu'ils soient complémentaires. En récupérant les données de ces systèmes (AP+, ORCA, TIMAD...), GOST peut les enrichir et continuer la traçabilité des marchandises. Inversement, GOST peut fournir des informations de traçabilité en pré et post-acheminement. Outre la traçabilité et le suivi des matières dangereuses, la plateforme GOST peut être exploitée pour la gestion des risques sécuritaires liés au transport des conteneurs.

Certes, des initiatives ont déjà été prises pour assurer le maximum de protection dans les différents modes de transport, comme suite aux attaques terroristes des dernières années qui ont montré la faiblesse des systèmes de transport en matière de sécurité. Cependant ces efforts se sont concentrés sur chaque mode de transport pris séparément, plutôt que de considérer le réseau multimodal dans sa globalité. La sûreté de cette supply chain intermodale n'est ainsi pas toujours garantie, du fait de la multitude de nœuds, d'acteurs impliqués et de SI moins performants et la violation de la sûreté d'un des maillons compromet alors la sûreté de toute la chaîne. Il n'existe à ce jour aucune interface commune interactive entre l'ensemble des intervenants de cette chaîne. En revanche, le système d'aide à la gestion des risques proposé ci-

avant peut bénéficier de remontées d'alertes sur des événements survenus en cours d'acheminement des conteneurs ; ces alertes sont issues du suivi et de la surveillance en temps réel effectués par GOST.

4.3 Modèle de données

La traçabilité nécessite l'adoption d'un modèle de données approprié assez général pour représenter n'importe quel type de produit, identifier de manière univoque les produits et les activités, et enregistrer les informations concernant les produits, les activités et leurs relations. À cet effet, le modèle UML proposé par Bechini et al. [10] a été étendu pour intégrer les entités unité de chargement, conteneur, lot, palette et marchandise dangereuse.

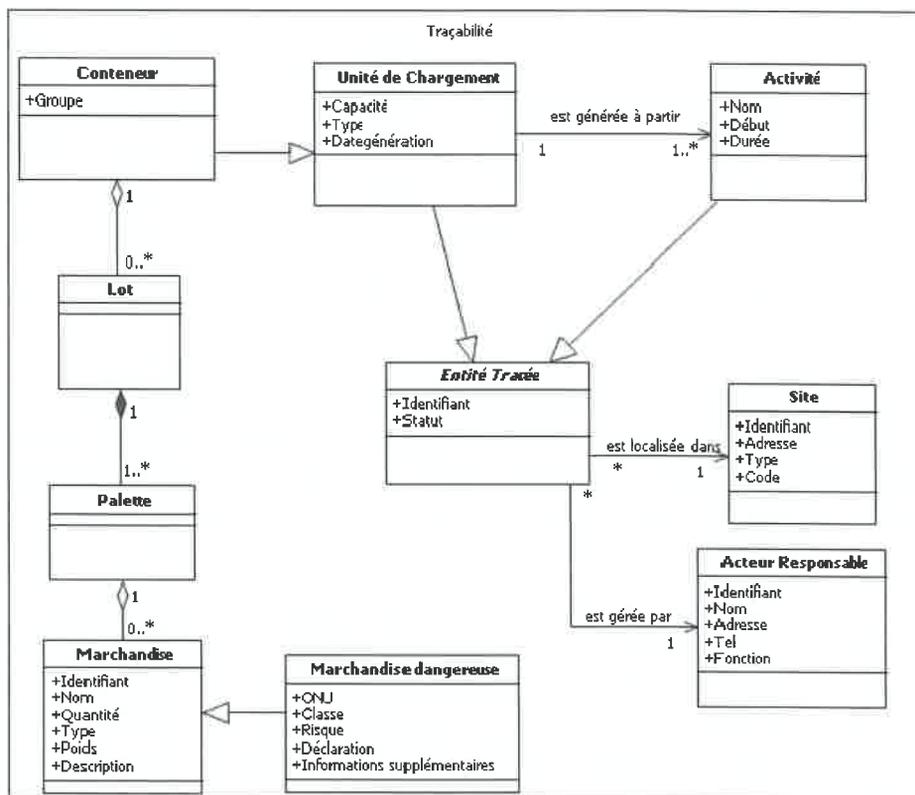


Figure 3 : Modélisation UML de la traçabilité.

Le cœur du modèle est « l'entité tracée » qui est soit une « unité de chargement » soit une « activité ». La traçabilité concerne aussi bien les moyens de chargement que les activités qu'ils subissent (transport, empotage, dépotage, transbordement,...). Elle doit permettre de savoir, à tout moment et très précisément, où se trouve une « entité tracée » et quel acteur en est le responsable.

Cette modélisation permet d'assurer la traçabilité du contenant et du contenu. Un conteneur peut contenir plusieurs lots de palettes. Une palette contient des marchandises qui peuvent être dangereuses.

4.4 La pose des tags

Une étude récente a montré que sur le port du Havre, seuls 12 à 15% des conteneurs déchargés sont dégroupés sur la zone portuaire. Le dégroupage du conteneur en différents lots nécessite éventuellement des nouvelles déclarations en entrepôt. L'expérimentation mise en œuvre est consacrée plutôt aux 85% de conteneurs qui transitent en transport complet. On entend par transport complet, un conteneur non ouvert pour récupérer la marchandise pendant le transport jusqu'au client final.

A l'import, le tag RFID est posé sur le conteneur au déchargement du conteneur sur quai par un manutentionnaire ou bien par le commis lors de sa visite sur le terminal portuaire. Le mode de fixation est à tester pendant l'expérimentation (aimantation, velcro, avec une attache type plomb de conteneur,...). Une procédure doit être définie pour la reprise du tag. Pour un conteneur de groupage, le tag est a priori considéré comme perdu, sauf à ce qu'une logistique de retour soit mise en place ; une gestion des stocks des tags permettrait alors de réutiliser les tags récupérés chez les clients finals.

Le flux export est similaire à l'import sur les grandes lignes en termes d'acteurs impliqués, de flux physiques et d'information. Le tag est posé au départ de la marchandise chez le chargeur. L'expédition est connue du système dès la première source d'information (déclaration, interrogation,...) ; tout comme pour l'import, c'est au minimum 24 heures avant l'embarquement.

Les remontées d'information terrain (balise GPS/GPRS, informatique embarquée, RFID,...) combinées aux informations issues des autres SI permettent d'améliorer le suivi et le contrôle des conteneurs, pour une meilleure gestion des risques associés à leurs déplacements. Des « points de comptage », déjà identifiés pour l'expérimentation, doivent être équipés avec des lecteurs RFID pour collecter des informations en temps réel (alertes) et statistiques sur la détection de stationnement de longue durée et la ségrégation des marchandises. L'expérimentation concerne également le transport fluvial sur l'axe Seine, avec suivi de barges et lecture des mouvements de conteneurs sur terminaux et dans les barges. Il est également prévu d'utiliser un module GPS/GPRS/RFID pour une lecture embarquée des tags RFID permettant la restitution des itinéraires et le suivi des tags en présence.

GOST peut ainsi fournir des données d'aide à la gestion de risques liés au type et à la provenance des marchandises conteneurisées, au fait que les conteneurs en transbordement ou

de groupage soient manipulés par des opérateurs non OEA (Opérateur Economique Agréé), ou encore que ces conteneurs soient destinés à des pays à risques. Il peut s'agir aussi des risques liés aux vols des conteneurs, au stationnement anormal des conteneurs et à l'utilisation de parcs à conteneurs non sécurisés.

Des alertes peuvent être envoyées comme suite à tout événement ou prévision pouvant avoir un impact par rapport au plan d'expédition ou susceptible de perturber la suite des opérations ; il appartient aux acteurs concernés et habilités de prendre les dispositions appropriées, en particulier sur la base des recommandations de l'outil d'aide à la décision connecté à GOST.

5. Conclusion

Sécuriser les réseaux de transport maritime est un impératif pour les managers des chaînes logistiques globales qui cherchent à rester performants dans un environnement très concurrentiel. Ce domaine émergent de recherche qu'est la gestion des risques sécuritaires dans le transport maritime, attire, comme nous l'avons vu, l'attention de beaucoup de chercheurs et de praticiens. Mais il mérite beaucoup plus d'attention, au regard de l'augmentation continue de la taille des conteneurs, et du volume de marchandises transporté par voie maritime : une perturbation des réseaux de transport maritime entraînerait une rupture des chaînes logistiques globales et des pertes énormes dans le monde du commerce international.

Le système-expert TRIMEX de gestion de risques sécuritaire dans le transport de marchandises conteneurisées, d'une part offre la possibilité d'un ciblage automatique des conteneurs à risque selon de multiples indicateurs, et d'autre part contribue à l'optimisation de la prise de décision en cas de risque avéré. Toutefois, l'une des conditions nécessaires au plein exercice de ces fonctionnalités est d'alimenter la base de données du modèle, pour partie en temps réel. Les outils de traçabilité et de communication élaborés dans le cadre du projet GOST répondent à cette exigence et permettent une gestion dynamique de l'ensemble des situations à risque couvertes par le système-expert.

Remerciements

Nous tenons à remercier spécialement tous les partenaires du projet GOST pour leurs contributions inestimables à l'élaboration de ce travail, ainsi que celles et ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation du prototype du système-expert.

6. Bibliographie

- [1] Gencod-Ean, La traçabilité dans les chaînes d'approvisionnement, de la théorie à la pratique, Issy-les-Moulineaux : GENCOD, 2001
- [2] 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
- [3] Terzi S., Elements of Product Lifecycle Management: Definitions, Open Issues and Reference Models, Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, 2005
- [4] Terzi S., Cassina J., Chiari G., Panetto H., Traçabilité des produits : une approche holonique, 5ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Nantes, France, 2004
- [5] Baina S., Panetto H., Morel G., New paradigms for a product oriented modelling: Case study for traceability, *Computers in Industry*, 60, 2009, pp. 172-183
- [6] <http://zachmaninternational.com/index.php>
- [7] McFarlane D., Sarma S., Chirn J., Wong C., Ashton, K., Auto id systems and intelligent manufacturing control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 2003, Pp. 365-376
- [8] Meyer G.G., Framling K., Holmstrom J., Intelligent Products: A survey. *Computers in Industry*, 60, 2009, pp. 137-148
- [9] Bechini A., Cimino M.G.C.A., Marcelloni F., & Tomasi A., Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business. *Information and Software Technology*, 50 (4), 2007, pp. 342-359
- [10] Woo S. H., Choi J. Y., kwak C., Kim C.O., An active product state tracking architecture in logistics sensor networks, *Computers in Industry*, 60, 2009, pp. 149-160
- [11] Tixier, J., Dusserre, G., et al., « Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.15, 2002, pp. 291-303
- [12] Villemeur, A., Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment , in Liu, S.H., McDermid, J.A., A Model-Oriented Approach to Safety Analysis Using Fault Trees and a Support System, *Journal of Systems Software*, Vol.35, n°2, 1992, pp. 151-164
- [13] Cozzani, V., Gubinelli, G., et al., The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.127, n°1-3, 2005, pp. 14-30
- [14] Dalkey, N., Helmer, O., An experimental application of the Delphi method to the use of experts, in Landeta, J., Current validity of the Delphi method in social sciences, *Technological Forecasting and Social Change*, Vol.73, n°5, 1963, pp. 467-482
- [15] Suokas, J., The role of safety analysis in accident prevention , *Accident Analysis and Prevention*, Vol.20, n°1, 1988, pp. 67-85
- [16] Khan, F.I., Abbasi, S.A., OptHAZOP-an effective and optimum approach for HAZOP study , *Journal of Loss Prevention in Process Industries*, Vol.10, n°3, 1997, pp. 191-204
- [17] Kocher, M.G., Sutter, M., The decision maker matters: Individual versus group behaviour in experimental beauty contest games , *The Economical Journal*, Vol.115, n°500, 2005, pp. 200-223

- [18] Carpenter, S.R., Bennett, E.M., Peterson, G.D., Scenarios for ecosystem services: an overview , in Duinker, P.N., Greig, L.A., Scenario analysis in environmental impact assessment: Improving explorations of the future, Environmental Impact Assessment Review, Vol.27, n°3, 2006, pp.206-219
- [19] Wang, J., Current status and future aspects of formal safety assessment of ships , Safety Science, Vol.38, n°1, 2001, pp.19-30
- [20] Wilcox, R., Risk -Informed Regulation of Marine Systems Using FMEA, U.S. Coast Guard Marine Safety Center Washington, D.C., 1998
- [21] Sperber, W.H., HACCP does not work from Farm to Table , Food Control, Vol.16, n°, 2005, pp.511-514
- [22] Zuurbier, P.J.P., Trienekens, J.H., Ziggers, G.W.N Verticale Samenwerking , in APAIAH, R.K., HENDRIX, E.M.T., Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods, Journal of Food Engineering, Vol.70, n° 3, 1996, pp.83-391
- [23] Apaiah, R.K., Hendrix, E.M.T., Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods , Journal of Food Engineering, Vol.70, n° 3, 2005, pp.83-391
- [24] Gningue, M., Gestion du risque sécuritaire dans la chaîne logistique globale : le cas du transport international de marchandises, thèse de doctorat en sciences de gestion, Université du Havre, 2011
- [25] Tah, J.H.M, Carr, V., A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis - Construction project risk management system , Advances in Engineering Software, Vol.32, 2001,pp.847-857
- [26] Putu, D.K., Berman, K., Sami, K., Development of Knowledge Based Systems for Supply Chain Risk Identification in multi-site and multi-partners Global Manufacturing Supply Chain , Proceedings of the 13th Asia Pacific Management Conference, Melbourne, 2007, pp.466-471
- [27] Smith, P., An introduction to knowledge engineering , in Hoffman, R.R., (1987), The Problem of Extracting the Knowledge of Experts from the Perspective of Experimental Psychology , Artificial Intelligence Magazine, Vol.8, 1996, n°2
- [28] Hoffman, R.R., The Problem of Extracting the Knowledge of Experts from the Perspective of Experimental Psychology , Artificial Intelligence Magazine, Vol.8, n°2, 1987
- [29] O'Keefe, R.M., Preece, A.D., The development, validation and implementation of knowledge-based systems , European Journal of Operational Research, Vol. 92, 1996, pp.458-473