



**HAL**  
open science

# Conception d'un système de détection des risques piloté par les données de suivi temps-réel des flux logistiques

Cheik Ouedraogo

## ► To cite this version:

Cheik Ouedraogo. Conception d'un système de détection des risques piloté par les données de suivi temps-réel des flux logistiques. Autre [cs.OH]. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2023. Français. NNT : 2023EMAC0001 . tel-04318938

**HAL Id: tel-04318938**

**<https://theses.hal.science/tel-04318938v1>**

Submitted on 2 Dec 2023

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

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

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

# THÈSE

en vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

délivré par

IMT – École Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux

présentée et soutenue par

Cheik Aboubakar OUEDRAOGO

le 28 Février 2023

Conception d'un système de détection des risques  
piloté par les données de suivi temps-réel des flux  
logistiques

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

EDSYS : Informatique et Génie Industriel

**Unité de recherche :**

Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi

**Directeurs de thèse :**

Didier Gourc, Professeur, IMT Mines Albi

Aurélie Montarnal, Maître Assistante, IMT Mines Albi

**Autres membres du jury :**

Myriam LAMOLLE, Professeure, Université de Paris 8 Montreuil, (*Rapporteure*)

Christophe MERLO, Professeur, ESTIA Bidart, (*Rapporteur*)

Aline CAUVIN, Maîtresse de conférences, Polytech Marseille, (*Examinatrice*)

Bruno VALLESPER, Professeur, Université de Bordeaux, (*Président*)

Cédric ROSEMONT, Directeur général, Traxens, (*Invité*)



# Sommaire

Sommaire .....	iii
Remerciements .....	v
<hr/>	
Introduction générale .....	1
Énoncé du problème et intérêt pratique .....	1
Intérêt scientifique .....	2
Contexte de la thèse .....	2
Questions de recherche et structure du mémoire .....	3
1 Transport intermodal : Contexte et problématique .....	7
Introduction .....	7
1.1 Le transport intermodal des conteneurs: généralités et concepts .....	9
1.2 Les difficultés dans le transport intermodal .....	17
1.3 La nécessaire maîtrise des aléas pour une optimisation du transport intermodal .....	20
1.4 Problématique générale .....	23
Conclusion .....	25
2 État de l’art .....	27
Introduction .....	27
2.1 État de l’art sur le risque et la gestion des risques .....	28
2.2 Analyse des risques dans la chaîne de transport intermodal .....	32
2.3 Traitement du risque dans la chaîne de transport intermodal .....	46
2.4 Modélisation et exploitation des connaissances du risque .....	53
2.5 Détection des risques à travers l’extraction d’évènements .....	57
2.6 Bilan de l’état de l’art et positionnement de nos travaux .....	66
3 Modélisation des risques dans le transport intermodal .....	69
Introduction .....	69
3.1 Les principes pour la mise en place d’une ontologie .....	70
3.2 Acquisition des connaissances .....	76
3.3 Spécification et conceptualisation des connaissances dans le transport intermodal .....	89
3.4 Formalisation des connaissances dans le transport intermodal .....	97
3.5 Implémentation et population de l’ontologie .....	98
Conclusion .....	108
4 Système de détection des risques temps réel .....	111
Introduction .....	111

4.1	Description du système de détection temps réel des risques . . . . .	112
4.2	Module de collecte des données . . . . .	114
4.3	Traitement de l'information . . . . .	116
4.4	Module d'exploitation de la connaissance . . . . .	132
	Conclusion . . . . .	134
5	Mise en œuvre du système de détection temps réel des risques : Cas d'application . . . . .	137
	Introduction . . . . .	137
5.1	Description du cas d'application pour la détection d'un climat extrême . . . . .	138
5.2	Détection des évènements et prévision du retard . . . . .	139
5.3	Discussion et évaluation du système de détection temps réel des risques . . . . .	144
	Conclusion et généralisation du système de détection temps réel des risques . . . . .	145
	Conclusion et perspectives . . . . .	147
	Synthèse des travaux et bilan des contributions . . . . .	147
	Les limites et perspectives de nos travaux . . . . .	148
—————		
A	Grille d'entretien . . . . .	153
B	Rapport d'entretien . . . . .	157
C	Structure du questionnaire . . . . .	161
D	Implémentation et population de la base de connaissances . . . . .	163
	Liste des publications . . . . .	171
—————		
	Table des figures . . . . .	173
	Liste des tableaux . . . . .	177
	Acronymes . . . . .	179
	Bibliographie . . . . .	183
	Table des matières . . . . .	199

# Remerciements

Au moment d'écrire les remerciements, je réalise la chance que j'ai eu d'effectuer ces travaux de recherches avec le soutien inestimable de nombreuses personnes. Pour m'avoir accompagné et soutenu tout au long de ce parcours, je tiens à leur adresser mes remerciements les plus sincères. Ce fut de moments agréables de travail au cours desquels, j'ai vécu une expérience de vie à part entière.

Les premiers vont à mes directeurs de thèse. Je voudrais traduire ma profonde gratitude à Didier et à Aurélie qui à travers leur ouverture d'esprit, leur réactivité et leur disponibilité m'ont beaucoup aidé à déterminer les différents axes de recherche à suivre. Merci de m'avoir permis de développer librement mes idées tout en plaçant des «rambards». C'est aussi humainement que ce fut un privilège de travailler sous votre encadrement. Ces quelques lignes ne sauraient traduire ma reconnaissance à votre égard.

Je voudrais également traduire ma reconnaissance à Madame Myriam Lamolle et à Monsieur Christophe Merlo pour m'avoir fait l'immense honneur de rapporter mes travaux. Je tiens aussi à remercier Madame Aline Cauvin pour avoir accepté d'évaluer mes travaux et à Monsieur Bruno Valespir pour avoir présidé ma soutenance. Je suis heureux d'avoir pu leur présenter mes travaux et j'espère leur avoir apporté un point de vue intéressant sur la problématique. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Mes remerciements vont également à l'égard de Rodolphe<sup>1</sup>, pas seulement pour son apport technique conséquent tout au long de mes travaux. Je tiens surtout à le remercier pour son implication et son souci de la cohérence. Merci d'avoir accepté d'explorer ce sujet de recherche avec moi.

Je remercie l'ensemble de l'équipe Traxens à Toulouse pour leur accompagnement sur le sujet. Merci particulièrement à Cédric et à Nicolas qui malgré un emploi du temps chargé n'ont ménagé aucun effort pour me faire découvrir l'univers du transport intermodal.

Merci à l'ensemble du personnel du centre génie industriel de l'IMT Mines Albi qui durant ces trois années ont grandement contribué à agrémente ma vie de doctorant. Merci pour cette ambiance sympathique au sein du centre et pour ces nombreuses discussions qui m'ont permis d'observer ma problématique sous divers angles. Sans être exhaustif, je remercie particulièrement Sina, Thibault, Audrey, Yohann, Guillaume, Robin, Aurélie, Paul, Marlène, Moustapha.

À ma famille je tiens à adresser un éternel remerciement pour leur présence et leur réconfort tout au long de cette thèse. Une pensée toute particulière pour mes parents qui ne cessent de m'encourager, merci.

---

1. Le R c'est le S

## Remerciements

---

Je ne saurai terminer sans dire un grand merci à Tuhora <sup>2</sup> qui me supporte et qui m'a soutenu depuis mon inscription en thèse. Merci pour ces soirées de brainstorming sur le sujet et pour les commentaires et les nombreuses relectures lors de la rédaction. Tu es une perle rare.

---

2. Hamlet (1599 - 1602), acte 2, scène 2

# Introduction générale

Dans ce mémoire de thèse, nous présentons un système de détection en temps réel des risques pour le transport intermodal des marchandises conteneurisées. Ce système permet de détecter les aléas (événements aléatoires) perturbant le flux de marchandises dans la chaîne de transport intermodal grâce aux données de traçabilité/ visibilité des conteneurs et des données textuelles relayant de l'information sur les aléas à travers les articles de presse et des réseaux sociaux. L'énoncé du problème, les intérêts pratiques et scientifiques, les questions de recherche et la structure du mémoire sont présentés ci-dessous.

## Énoncé du problème et intérêt pratique

Nous sommes le 23 mars 2021 à 7h 40min, le navire porte-conteneur Ever Given en provenance d'Asie et qui se dirigeait vers le port de Rotterdam aux Pays-Bas, s'est échoué dans le canal de Suez. Cet événement a créé une congestion dans le trafic maritime avec de nombreux impacts sur le commerce mondial :

- Manques d'équipements dans les grands ports ;
- Baisse mondiale des capacités maritimes ;
- Ports et terminaux rapidement submergés par les marchandises et les navires amarrés ;
- Augmentation du coût des hydrocarbures et des transports.

Ces conséquences révèlent l'importance du transport de marchandises pour la chaîne d'approvisionnement mondiale. Les marchandises transitent par plusieurs endroits du monde avant d'être livrées aux clients finaux. Le transport intermodal conteneurisé qui consiste à transporter un conteneur d'un point A à un point B en utilisant plusieurs moyens de transport (camions, navires, trains, etc.) représente 80% des marchandises transportées dans la chaîne d'approvisionnement mondiale (WENDLER-BOSCO *et al.*, 2019). Cela s'explique par l'intermodalité qu'elle offre. En effet, le transport conteneurisé permet d'assurer la continuité des expéditions lors des changements de moyen de transport sans avoir besoin de recourir à nouveau au déchargement et au chargement des marchandises. L'unité de manutention est alors le conteneur. Elle assure également la sécurité des marchandises en évitant leur surexposition. En effet les marchandises n'étant plus visibles, il y'a moins de risques de vols.

La congestion du canal de Suez n'est pas un cas isolé dans la chaîne de transport intermodal des conteneurs. La chaîne de transport est fréquemment perturbée par des événements aléatoires tels que les congestions, les grèves, les accidents, les tempêtes, etc. Ces perturbations qui motivent nos travaux de recherche, impactent négativement la chaîne d'approvisionnement de l'ensemble des acteurs impliqués dans le processus de transport intermodal. Elles modifient les délais de livraison des marchandises ainsi que la qualité des produits transportés.



Nos travaux de recherche axés sur les perturbations de la chaîne d’approvisionnement causées par les aléas rencontrés durant le transport intermodal des conteneurs ont trois motivations :

1. Offrir de la visibilité sur l’occurrence des évènements aléatoires aux acteurs impliqués dans la chaîne de transport intermodal des conteneurs.
2. Accroître la réactivité des acteurs de la chaîne d’approvisionnement en détectant les causes des perturbations et en prédisant les délais d’acheminement des marchandises.
3. Accroître la proactivité des acteurs de la chaîne d’approvisionnement, en leur permettant d’adapter leurs flux de transport en fonction des aléas potentiels pour minimiser les impacts.

## Intérêt scientifique

Bien que la gestion des risques dans le transport des marchandises soit un domaine très étudié depuis des années, peu de travaux se sont focalisés sur l’ensemble des phases de la chaîne de transport intermodal (pré-acheminement, manutention du conteneur, transport maritime et post-acheminement). En effet, de nombreux auteurs tels que (FAN *et al.*, 2020 ; Gudelj *et al.*, 2008 ; HOSSAIN *et al.*, 2019 ; T. WU *et al.*, 2006) ont proposé des solutions de gestion des risques sur certaines phases du processus de transport intermodal. Cependant, à notre connaissance seulement J. VILKO *et al.* (2019), J. P. P. VILKO *et al.* (2012) et WATTANAKUL *et al.* (2018) ont proposé des solutions pour gérer les risques sur toutes les phases de la chaîne de transport intermodal, nous présentons ces travaux dans le chapitre 2 de ce mémoire. En particulier, WATTANAKUL *et al.* (2018) se sont intéressés à la gestion des risques dans le transport intermodal conteneurisé grâce aux données de traçabilité et de visibilité.

Dans l’optique de combler ce manque dans la littérature et d’augmenter la résilience de la chaîne d’approvisionnement, il est nécessaire de proposer une solution pour gérer les risques sur toutes les phases de transport intermodal des marchandises conteneurisées.

La gestion des risques dans le flux de transport conteneurisé, nécessite l’acquisition et la modélisation des connaissances expertes sur les risques dans les différentes phases du processus de transport intermodal. En effet les évènements aléatoires perturbant le flux de transport intermodal sont interdépendants et il n’est pas aisé d’établir les relations de cause à conséquence qui les relient. Cette problématique pratique a besoin d’une solution.

## Contexte de la thèse

Ce projet de thèse est mené dans le cadre du projet « Data driven Supply Chain management » (DISC) mise en place entre la startup Toulousaine NEXT4<sup>3</sup> et le Centre Génie Industriel de l’IMT Mines d’Albi<sup>4</sup>. NEXT4 développe une solution de tracking temps réel des conteneurs. Cette solution s’adresse principalement aux chargeurs de marchandises qui utilisent des conteneurs dans le cadre de leurs chaînes d’approvisionnement (via des prestataires de services logistiques). Les dispositifs NEXT4 permettent de disposer de nombreuses données

---

3. <https://next4.io/>

4. <https://www.imt-mines-albi.fr/fr/genie-industriel>

liées aux transports des marchandises qui doivent permettre aux chargeurs de mieux piloter leurs chaînes d'approvisionnement.

L'objectif de ce projet est de proposer des méthodes permettant d'exploiter les données générées par les capteurs de NEXT4 afin de supporter les chargeurs dans leur processus de décision. En particulier, il s'agira de leur donner des clés permettant de mieux gérer les perturbations et aléas auxquels leur transport est soumis afin d'améliorer l'agilité et la résilience de leurs chaînes d'approvisionnement.

## Questions de recherche et structure du mémoire

Les différents constats établis dans les sections précédentes et nos objectifs nous amènent à la problématique suivante : **Comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur les délais d'acheminement des marchandises en transport conteneurisé dans un contexte intermodal ?**

Cette problématique englobe deux questions de recherche. La première concerne la modélisation des risques dans la chaîne de transport intermodal. Nous nous sommes intéressés aux événements aléatoires susceptibles de perturber le flux de marchandises conteneurisées. A cause de la complexité du processus de transport intermodal et de la dépendance des risques, il n'est pas aisé d'identifier et d'évaluer les risques dans la chaîne de transport intermodal. Cela nous permet de formuler notre première question de recherche.

1. «Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ?»

Nous proposons de répondre à cette question à travers la mise en place d'une ontologie de référence qui modélise les concepts du risque et du transport intermodal ainsi que les différentes relations entre eux. Un graphe de connaissances traduisant les dépendances entre les événements aléatoires est également proposé.

Le deuxième axe de recherche porte sur l'aide à la décision. Il s'agit d'offrir aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement un outil leur permettant de gérer les aléas lors du transport intermodal des marchandises. La disponibilité des données de traçabilité/ visibilité et l'abondance des sources d'informations nous conduisent à notre deuxième question de recherche.

2. «Comment détecter les événements aléatoires (aléas) qui surviennent sur la chaîne de transport grâce aux données de traçabilité et de visibilité recueillies en temps réel ?»

En nous appuyant sur les connaissances du risque dans le transport intermodal, nous proposons de répondre à la deuxième question de recherche à partir d'un système qui permet de détecter en temps réel les aléas lors du transit des conteneurs et de déterminer les phases de transport impactées par ces aléas. Pour ce faire, nous allons à partir des données de traçabilité/ visibilité des conteneurs et des données provenant de sources d'informations textuelles, extraire les événements aléatoires.

Les réponses à ces deux questions de recherche ont vocation à soutenir la quantification de l'impact temporel des événements aléatoires sur les délais d'acheminement des conteneurs lors de leur transport intermodal.

La figure 1 présente la structure du mémoire. Après l'introduction générale, le mémoire est composé de cinq chapitres.

Nous détaillons dans le chapitre 1, le contexte et la problématique de nos travaux de recherche. Ce chapitre présente les généralités sur le transport intermodal des conteneurs, les besoins des acteurs de la chaîne d'approvisionnement, les difficultés rencontrées lors du transit des marchandises conteneurisées ainsi que les outils utilisés pour la gestion des aléas. Le constat entre l'écart des solutions de gestion des aléas et les besoins des acteurs du processus de transport intermodal conteneurisé nous conduisent à notre problématique de recherche : *Comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur le délais des transports conteneurisés dans un contexte intermodal ?*

Le chapitre 2 présente un état de l'art autour de notre problématique de recherche sur trois axes. Le premier axe concerne la gestion des risques. Il permet de recenser les solutions et les méthodes permettant d'analyser et de traiter le risque dans le transport intermodal. Le second axe concerne la modélisation des connaissances. Il permet d'identifier les étapes nécessaires pour la modélisation des connaissances du risque dans le transport intermodal. Le troisième axe porte sur la détection des risques à travers l'extraction des événements. Il présente les différentes approches utilisées dans la littérature pour l'extraction des événements dans les données textuelles. Ce chapitre nous permet d'identifier les manques dans la littérature et de positionner nos travaux.

Dans le chapitre 3 , nous présentons notre première contribution en détaillant les différentes connaissances sur les risques dans le transport intermodal conteneurisé. Nous proposons une ontologie de référence permettant de définir les relations entre les différents concepts du risque dans le processus de transport intermodal.

Ensuite, le chapitre 4 présente le système de détection en temps réel des risques pour la détection et la prévision des retards dans le transport intermodal qui est notre deuxième contribution. Ce chapitre détaille les différents modules du système de détection des risques permettant de traiter les données de traçabilité/ visibilité et des données textuelles pour aboutir à la détection et à la prévision des retards lors des flux de marchandises conteneurisées.

Le chapitre 5 présente un cas d'application réel du système de détection en temps réel des risques. Ce chapitre permet d'illustrer nos contributions et de généraliser notre système pour la détection en temps réel des risques dans les différentes phases du transport intermodal.

Nous terminons par un bilan des travaux et une conclusion.

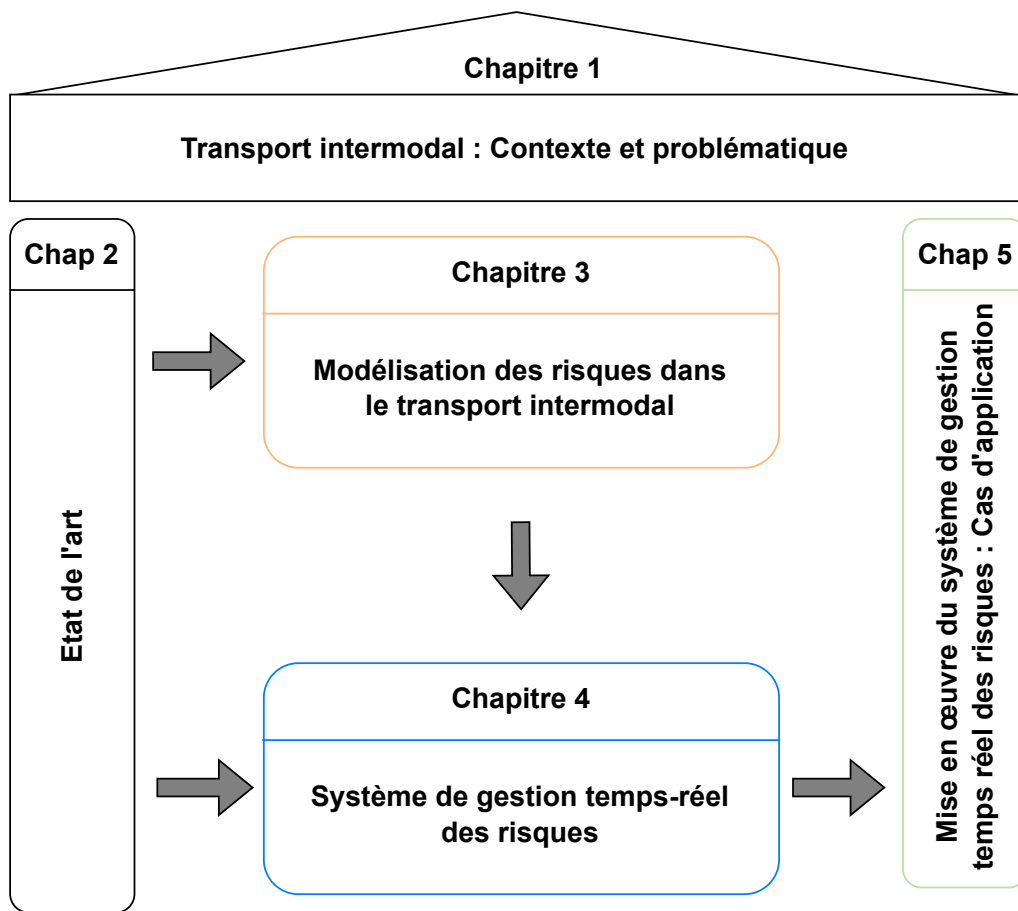


Figure 1 – Structure du mémoire.



# 1

## Transport intermodal : Contexte et problématique

"Le conteneur est une boîte magique qui peut être chargée, déchargée, transportée, stockée, manipulée, montée, descendue, retournée, renversée, transportée de nouveau et manipulée de nouveau, sans que le contenu soit jamais déballé".

Malcom McLean

Introduction . . . . .	7
1.1 Le transport intermodal des conteneurs: généralités et concepts . . . . .	9
1.1.1 Les modes de transport . . . . .	9
1.1.2 Le transport multimodal . . . . .	13
1.1.3 Le processus de transport intermodal . . . . .	15
1.1.4 Les acteurs du transport intermodal . . . . .	16
1.2 Les difficultés dans le transport intermodal . . . . .	17
1.2.1 Définition de la traçabilité dans le transport intermodal . . . . .	19
1.2.2 Définition de la visibilité dans le transport intermodal . . . . .	19
1.2.3 Les difficultés rencontrées durant le transport intermodal des marchandises	19
1.3 La nécessaire maîtrise des aléas pour une optimisation du transport intermodal	20
1.3.1 Les besoins des acteurs du transport intermodal . . . . .	20
1.3.2 Les outils de gestion des aléas dans le transport intermodal . . . . .	21
1.4 Problématique générale . . . . .	23
1.4.1 Les opportunités engendrées par les outils de gestion des aléas . . . . .	23
1.4.2 La problématique et les questions de recherche . . . . .	23
Conclusion . . . . .	25

### Introduction

Le transport de marchandises ou fret désigne l'activité qui consiste à acheminer des produits d'un point A à un point B. Lorsque ces points sont dans le même pays, on parlera de transport national et de transport international lorsque le transport s'effectuera sur au moins deux pays.

Le conteneur est devenu le moyen standard le plus utilisé pour le transport de marchandises dans le monde. Il a révolutionné le secteur de transport des marchandises (OUDANI, 2016).

Cette caisse métallique et hermétique, telle qu'illustrée par la figure 1.1a<sup>1</sup>, a été introduite dans le fret au milieu des années soixante et a permis de résoudre un certain nombre de problèmes dont souffrait le transport des marchandises. Avant l'utilisation des conteneurs dans le fret, les marchandises étaient chargées directement sous forme de palettes (Figure 1.1b<sup>2</sup>) dans les moyens de transport. Cela engendrait régulièrement des aléas (piraterie, vols, dégradations de la qualité des marchandises) à cause de leur surexposition que ce soit au moment des manutentions ou du transport en lui-même. L'utilisation des conteneurs a permis de réduire ces aléas. En plus d'accroître la sécurité des marchandises, le transport conteneurisé permet un gain de temps lors des manutentions grâce à l'intermodalité qu'il offre. En effet, la conteneurisation des marchandises permet d'assurer la continuité des expéditions lors des changements de moyen de transport sans avoir besoin de recourir à nouveau au déchargement et au chargement des marchandises. Le temps de déchargement d'une cargaison a été réduit par l'utilisation des conteneurs car la marchandise stockée en vrac nécessitait beaucoup de main d'œuvre et jusqu'à une semaine pour la décharger (ABDOLI, 2014).

Dans le contexte de mondialisation des marchés où les produits n'ont plus de frontières, le transport joue un rôle important. Cette affirmation est illustrée par la figure 1.2<sup>3</sup> qui est une capture d'écran de Marine traffic<sup>4</sup> à la date du 03/01/2023. Les icônes en vertes représentent les navires assurant le transit des marchandises conteneurisées. Les multinationales, dans un souci de maximisation des profits, ont délocalisé leurs centres de production dans les pays où la main d'œuvre est peu onéreuse. Les matières premières sont collectées dans les pays fournisseurs pour rejoindre les centres de production un peu partout dans le monde. Ajoutons à cela, les exigences de plus en plus fortes émises par les clients finaux sur la qualité des produits et sur les délais de livraison. Le transport de marchandises est un élément clé de la chaîne d'approvisionnement. Il assure le mouvement efficace et la disponibilité en temps opportun des matières premières et des produits finis (CRAINIC, 2003). Tout cela amène à considérer le transport comme un maillon crucial de la chaîne d'approvisionnement (OUDANI, 2016). Ce constat nous permet d'avancer que l'augmentation de la qualité des produits, de service et la réduction de l'empreinte carbone des entreprises passe par une amélioration de la performance de la chaîne d'approvisionnement et donc par une meilleure gestion des flux de transport et en particulier des transports conteneurisés. La fluidité des flux de transport et leur rentabilité sont étroitement liées. Cette fluidité dépend fortement de l'efficacité des opérations (chargement, déchargement et transbordement) réalisées dans les terminaux, de la fiabilité des modes de transport, du nombre d'arrêts dans l'itinéraire choisi, etc. La moindre interruption du flux de transport ou un allongement de sa durée ajoute des coûts supplémentaires et a des répercussions négatives sur la chaîne d'approvisionnement. À l'inverse, tout ce qui le fluidifie tend à réduire les coûts et à améliorer sa performance. Cela explique le fait que le respect des délais de livraison soit l'indicateur retenu par la majorité des acteurs impliqués dans la gestion de la chaîne de transport pour mesurer la performance de cette dernière.

Nos travaux s'intéressent à l'amélioration des performances des flux logistiques à travers une gestion des risques en temps réel et la prise en compte des facteurs de risques dans l'estimation du temps d'arrivée des conteneurs. La gestion des flux logistiques étant un domaine très vaste, ce premier chapitre a pour vocation de cadrer nos travaux et de poser notre problématique de recherche. Il est composé de 4 sections. La section 1.1 présente le transport intermodal conteneurisé, sa relation avec l'amélioration des performances de la chaîne d'approvisionnement ainsi que les différents modes de transport utilisés. Dans la section 1.2 nous présentons les difficultés et les aléas rencontrés durant le transport intermodal. La section 1.3 présente les besoins des acteurs impliqués dans le processus de

---

1. Image de conteneur provenant de Pixabay : <https://pixabay.com/fr>

2. Image de palettes provenant de Pixabay : <https://pixabay.com/fr>

3. Marine traffic : <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:-37.6/centery:21.0/zoom:2>

4. Marine traffic est une application web permettant de suivre en temps quasi réel l'évolution du trafic maritime.

transport intermodal ainsi que la nécessité de maîtriser les aléas. Nous terminons ce chapitre en présentant dans la section 1.4 la problématique générale et les questions de recherche que nous traitons dans cette thèse.

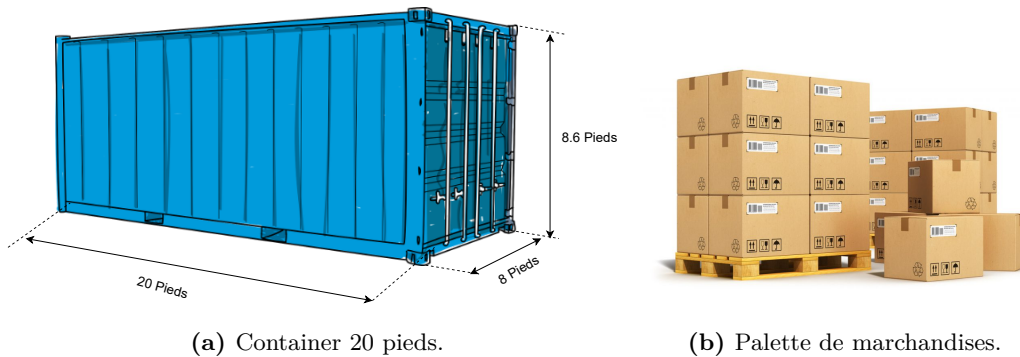


Figure 1.1 – Illustration d'un conteneur et d'une palette de marchandises.

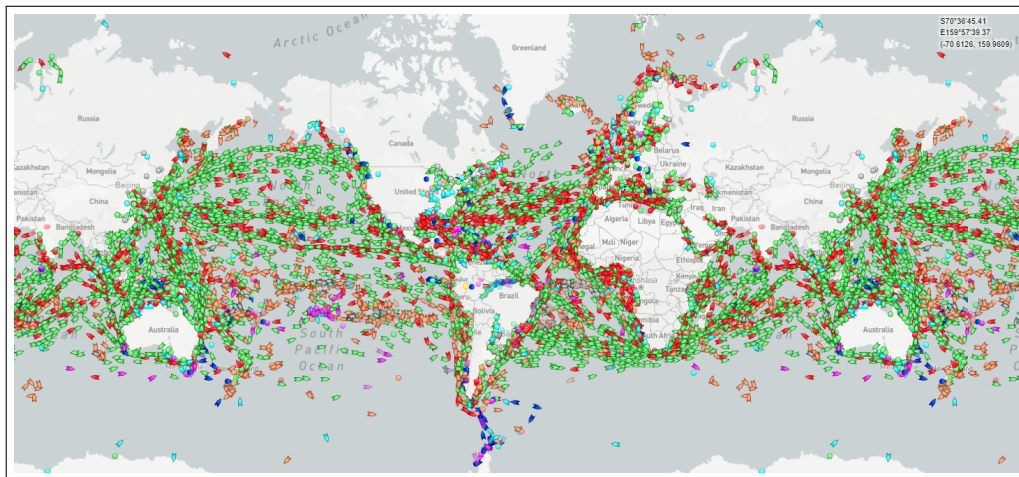


Figure 1.2 – Trafic maritime mondial.

## 1.1 Le transport intermodal des conteneurs : généralités et concepts

Cette première section a pour objectif de présenter la définition et les notions associées au transport intermodal des conteneurs. Pour cela, nous présentons d'abord les différents modes de transport de marchandises (transport Oversea, transport terrestre) pour ensuite définir le transport intermodal.

### 1.1.1 Les modes de transport

Le transport de marchandises permet l'acheminement des matières premières, des produits semi-finis et finis dans le monde. Le transport de marchandises a une origine très ancienne (ABDOLI, 2014). Les premiers moyens de transport de marchandises ont exploité l'homme à travers sa force physique (ses muscles). Puis est venue la domestication de certains animaux tels que le cheval, la mule, le dromadaire, etc, et enfin l'invention d'outils en vue d'exploiter la force de la nature (navire à voile).



Le transport de marchandises a énormément bénéficié des innovations scientifiques telles que l'invention de la boussole qui permet de s'orienter en haute mer et de tracer des routes régulières pour le commerce international. A cela s'ajoute l'invention de la machine à vapeur puis l'invention du moteur thermique qui a subi de nombreuses évolutions dans l'objectif d'améliorer sans cesse son niveau de performance. Aujourd'hui, le moteur thermique équipe la majorité des moyens de transport, même si d'autres sources d'énergie se développent à grande vitesse comme le moteur électrique et le moteur à hydrogène. Ces inventions et innovations scientifiques ont donné naissance à plusieurs modes de transport que nous utilisons quotidiennement.

Les modes de transport sont nombreux et présentent chacun des avantages et des inconvénients. Dans un souci de cadrage des travaux, il nous paraît nécessaire de présenter les modes de transport qui sont considérés dans nos travaux de recherche. Dans la continuité des travaux de CLÉMENT (2019) et VENTURELLI *et al.* (2007), nous distinguons deux modes de transport : (1) le transport « Oversea » et (2) le transport terrestre.

### **Le transport « Oversea »**

Le transport « Oversea » caractérise l'acheminement des marchandises outre les océans. Dans le transport « Oversea », les deux modes de transport considérés sont le transport aérien et le transport maritime (CLÉMENT, 2019). Dans nos travaux de recherche nous nous intéresserons tout particulièrement au transport maritime comme mode de transport « Oversea ».

Le transport maritime fait référence au transit des marchandises sur un réseau connecté par les eaux navigables. Il existe deux types de transport maritime de marchandises : (1) le transport de marchandises en vrac, (2) le transport de marchandises conteneurisés.

1. Le transport maritime en vrac, comme son nom l'indique, consiste à transporter et à manutentionner directement les marchandises sur le navire. Il s'agit essentiellement des matières premières (minerais, céréales, engrais, sable, etc.), de l'industrie lourde (blocs de métal, voitures, bobines, etc).
2. Le transport maritime conteneurisé (figure 1.3<sup>5</sup>), opposé au transport maritime en vrac, désigne l'activité de transport des marchandises empotées<sup>6</sup> dans des conteneurs conçus à cet effet. Ce mode de transport maritime facilite les opérations de manutention au port.

Le transport conteneurisé par voie maritime est le mode de transport le plus utilisé (OUEDRAOGO *et al.*, 2022). Il représente 80% des expéditions par voie maritime et il ne cesse de croître (WENDLER-BOSCO *et al.*, 2019). La figure 1.4 montre l'évolution en millions de UTI<sup>7</sup> transports sur les vingt dernières années. Il doit son adoption aux différentes innovations scientifiques qui lui permettent de transporter toutes sortes de marchandises tout en facilitant les opérations de manutention. Le transport maritime conteneurisé a révolutionné le transport des marchandises grâce à la sécurité qu'il offre aux marchandises et au faible coût de transit qu'il propose. Cependant, ce mode de transport est lent et impose des infrastructures particulières pour rester compétitif, telles que des navires porte-conteneurs de grande capacité pouvant accueillir jusqu'à 23 964 EVP<sup>8</sup> comme l'Ever Arm propriété de l'armateur Evergreen Maritime Corporation. Il mesure 399,99 mètres de long sur 61,50 mètres de large. Il nécessite également des infrastructures portuaires équipées pour faciliter les opérations de manutention.

---

5. Pixabay : <https://pixabay.com/fr>

6. Empoter désigne le fait de charger des marchandises dans un conteneur dans le domaine du transport

7. UTI : Unité de transport international

8. Equivalent Vingt Pieds : unité de mesure des navires porte-conteneurs basée sur le volume d'un conteneur 20 pieds (6,1 mètre)



Figure 1.3 – Transport maritime conteneurisé.

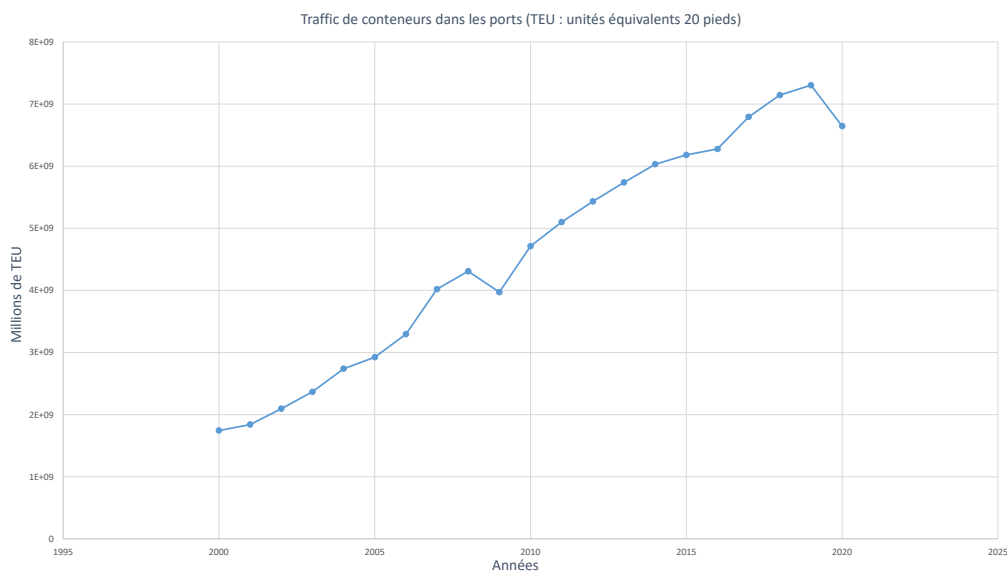


Figure 1.4 – Évolution du nombre de conteneurs transportés dans le monde.

## Le transport terrestre

Le transport terrestre caractérise l'acheminement des marchandises sur un même continent ou sur de courtes distances. Les trois principaux modes de transport terrestre sont : (1) le mode fluvial, (2) le mode ferroviaire et (3) le mode routier.

1. **Le transport fluvial** : selon le ministère de la transition écologique<sup>9</sup>, le transport fluvial de marchandises désigne l'activité de transport de marchandises par voie d'eau de

9. Ministère de la transition écologique <https://www.ecologie.gouv.fr/generalites-sur-transport-et-reseau-fluvial-en-france>

navigation intérieure (canaux, voies navigables, fleuves). Le transport fluvial peut être lié au transport maritime car il possède les mêmes avantages. Il permet de transporter de grandes quantités de marchandises à des coûts compétitifs. Cependant, ce mode de transport est très dépendant des voies navigables du pays ou du type de marchandises transportées. La figure 1.5 présente un transport fluvial de marchandises conteneurisées. Il peut être un des leviers de la transition énergétique pour réduire la pollution générée par le transport des marchandises.



Figure 1.5 – Le transport fluvial conteneurisé.

- 2. Le transport ferroviaire** : le transport ferroviaire de marchandises consiste à acheminer les marchandises par voie ferrée à l'aide de train à wagons. Tout comme le transport maritime, le transport ferroviaire offre les deux types de transport de marchandises (transport en vrac et transport conteneurisé). Ce mode de transport est peu onéreux et très compétitif. Cependant il dispose de moins de parts de marché avec seulement 9% des marchandises transportées en France<sup>10</sup>. Cela s'explique par le fait que ce mode de transport est dépendant du réseau ferroviaire disponible. En effet, la vitesse de transport dépend de la qualité du réseau ferroviaire et les destinations possibles dépendent de la densité de ce réseau (CLÉMENT, 2019). La figure 1.6 illustre un transport ferroviaire de conteneurs.
- 3. Le transport routier** : le transport routier fait référence au déplacement des marchandises par voie routière, généralement à l'aide de camions. La figure 1.7 présente un camion effectuant un transport routier de conteneur. Le transport routier est le mode de transport privilégié pour le transport de marchandises sur de courtes distances grâce à sa capacité à s'adapter à l'évolution logistique. Il est le mode de transport dominant en France avec 80% de part de marché du transport terrestre (MERLIN, 1991). La figure 1.8 présente l'évolution du nombre de marchandises transportées par voie terrestre en France en milliards de tonnes-kilomètres. Cette figure permet d'illustrer la prédominance du transport routier sur les autres modes de transport terrestre. Contrairement aux autres modes de transport qui nécessitent des infrastructures particulières pour le transit de marchandises, le transport routier utilise le même réseau de circulation que les voyageurs. Cependant, bien qu'il ait de nombreux avantages, le transport routier est pointé du doigt d'un point de vue environnemental. En effet, parmi les modes de transport présentés dans ce chapitre, il est celui qui contribue le plus aux émissions de polluants atmosphériques (particules fines et gaz à effets de serre) et aux nuisances

---

10. Ministère de la transition écologique <https://www.ecologie.gouv.fr/fret-ferroviaire>

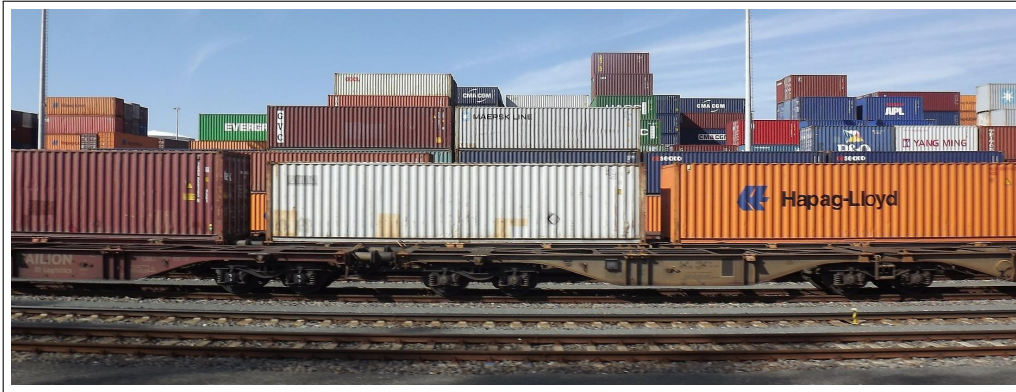


Figure 1.6 – Le transport ferroviaire conteneurisé.

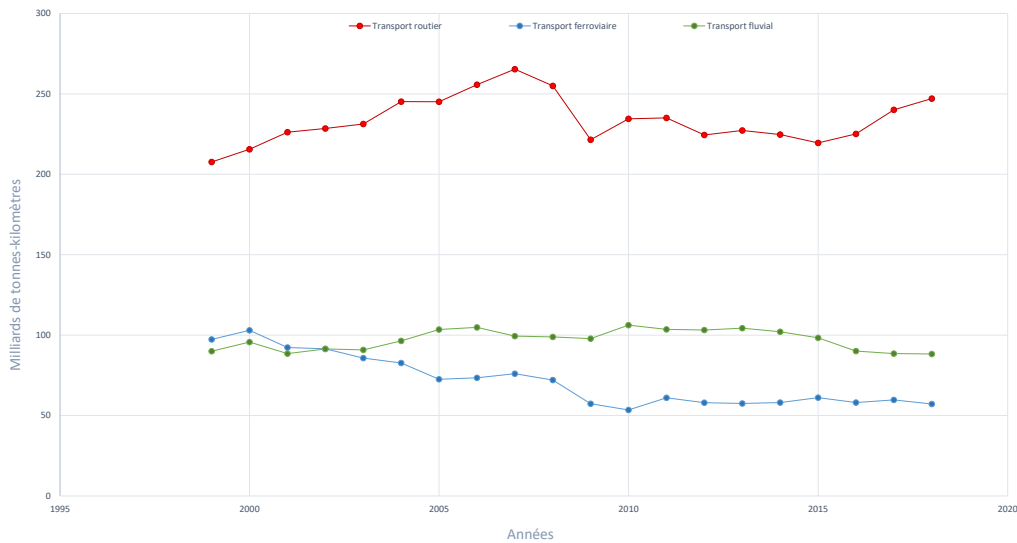
sonores (OUDANI, 2016). Plusieurs organismes gouvernementaux et environnementaux luttent de plus en plus pour réduire les parts du transport routier au profit de modes de transport moins polluants (fluvial et ferroviaire) (OUDANI, 2016).



Figure 1.7 – Le transport routier conteneurisé.

### 1.1.2 Le transport multimodal

Dans la littérature, les termes transport multimodal et transport intermodal sont utilisés pour caractériser un transport combinant plusieurs modes de transport. Cette sous-section a pour but de clarifier les deux expressions et de donner précisément le sens donné aux termes «transport multimodal» et «transport intermodal» que nous utilisons dans la suite de ce mémoire.



**Figure 1.8** – Évolution du transport de marchandises par mode en France de 1999 à 2018.

### Les unités de transport multimodal

Selon OUDANI (2016) les unités de transport multimodal (UTI) permettent de protéger les marchandises et de faciliter leurs manutentions lors du transport. Ils font également office d’unité métrique dans le transport multimodal et international des marchandises. Ces unités qui sont des normes de mesure dans l’organisation des chaînes de transport ont favorisé la baisse des coûts et ont rendu possible l’échange entre les différents modes de transport (OUDANI, 2016). Deux formes d’UTI sont généralement utilisées dans le transport des conteneurs. Il s’agit du conteneur 20 pieds et du conteneur 40 pieds.

### Le transport multimodal

Selon le dictionnaire le LAROUSSE (2020) le transport multimodal est défini comme l’utilisation combinée de plusieurs modes de transport au cours du même trajet. Les auteurs dans (STEADIESEIFI *et al.*, 2014) définissent le transport multimodal comme le transport de marchandises par une séquence d’au moins deux modes de transport différents. Ces auteurs précisent que l’unité de transport peut être une boîte, un conteneur, une caisse mobile, un véhicule routier/ferroviaire ou un navire. Selon l’UNECE<sup>11</sup> le transport multimodal désigne l’acheminement d’une marchandise empruntant deux modes de transport différents ou plus.

### Le transport intermodal

Le LAROUSSE (2020) définit le transport intermodal comme étant «le transport de marchandises dans le même contenant, associant au moins deux modes de transport». Dans un rapport d’évaluation comparative diffusé en 2002 l’OCDE définit l’intermodalité dans le transport des marchandises comme «l’utilisation d’au moins deux modes de transport différents de manière intégrée dans une chaîne de transport de porte à porte». STEADIESEIFI *et al.* (2014) restent sur la même définition que les deux précédentes mais insistent sur le fait que l’unité de transport est un conteneur.

Par extension, le transport intermodal est un type de transport multimodal dont l’unité de transport utilisée reste la même depuis l’origine jusqu’à la destination finale sans manutention de la marchandise.

11. UNECE : <https://unece.org/>

Dans la suite de ce mémoire nous utiliserons le terme *transport intermodal* pour signifier l'utilisation de plusieurs modes de transport pour l'acheminement des marchandises conteneurisées sans manutention de la marchandise elle-même.

### 1.1.3 Le processus de transport intermodal

Le transport intermodal comme explicité précédemment implique au moins deux modes de transport et est composé de plusieurs phases en fonction de la longueur du trajet et des contraintes spécifiques qui s'appliquent à chaque trajet. La figure 1.9 illustre un processus de transport intermodal de conteneur. Le conteneur est situé sur un entrepôt de départ et l'objectif de ce processus est d'assurer le transit du conteneur jusqu'à la destination finale. Le processus de transport intermodal comporte quatre principales opérations que nous nommons phases du processus de transport : (i) la phase de pré-acheminement du conteneur, (ii) la phase de manutention du conteneur, (iii) La phase de transport maritime du conteneur et enfin (iv) la phase de post-acheminement du conteneur. Ainsi qu'une opération de contrôle du conteneur.

Ce processus ne prend pas en compte les opérations d'empotage des marchandises dans le conteneur. Nous détaillons ci-dessous les opérations du processus de transport intermodal qui correspondent à la numérotation de la figure 1.9.

1. La phase de pré-acheminement : le pré-acheminement consiste à convoier les marchandises jusqu'au port de départ pour être chargées sur le moyen principal de transport. Cette phase du transport s'effectue la majorité du temps par trajet routier mais elle peut occasionnellement impliquer le mode transport ferroviaire ou fluvial comme explicité sur la figure 1.9. Dans le cas d'un changement de mode de transport durant la phase de pré-acheminement, le conteneur passe par des zones intermédiaires que nous nommerons zones de transit. La phase de pré-acheminement s'achève lorsque le conteneur atteint le terminal portuaire de départ.
2. La phase de manutention du conteneur : la manutention du conteneur au port inclut les manutentions bord et terre, l'entreposage, le transfert aux quais et le gerbage du conteneur. Les opérations de manutention bord et terre sont des opérations de chargement et de déchargement des moyens de transport au moyen d'équipements propre à la manutention des conteneurs (grues et portiques). L'entreposage du conteneur consiste à placer le conteneur dans la zone de stockage du terminal prévue à cet effet avant son transfert vers le quai d'embarquement. La zone de stockage du terminal permet d'absorber temporairement les flux de conteneurs en provenance et à destination des navires et des autres modes de transport (DUBREUIL, 2007). Le transfert aux quais dans un terminal portuaire consiste à acheminer les conteneurs depuis la zone d'entreposage jusqu'au quai de chargement qui lui est assigné. Il s'agit du flux interne du terminal portuaire. L'opération de gerbage du conteneur désigne l'activité de superposition du conteneur sur le navire. Il est également effectué à l'aide d'outils spécifiques au transport des conteneurs. La phase de manutention s'effectue également dans le cas d'un transport intermodal avec changement de navire et au port d'arrivée. Les phases de manutention de conteneur représentent le principal goulot d'étranglement du processus de transport intermodal.
3. La phase de transport maritime : la phase de transport maritime prend le relais à la suite du pré-acheminement et consiste à transporter les marchandises depuis le port de départ jusqu'au port d'arrivée. Comme les porte-conteneurs naviguent en suivant des routes maritimes régulières, il arrive très souvent que les conteneurs passent par des ports intermédiaires et subissent des changements de navires avant d'atteindre le port d'arrivée.

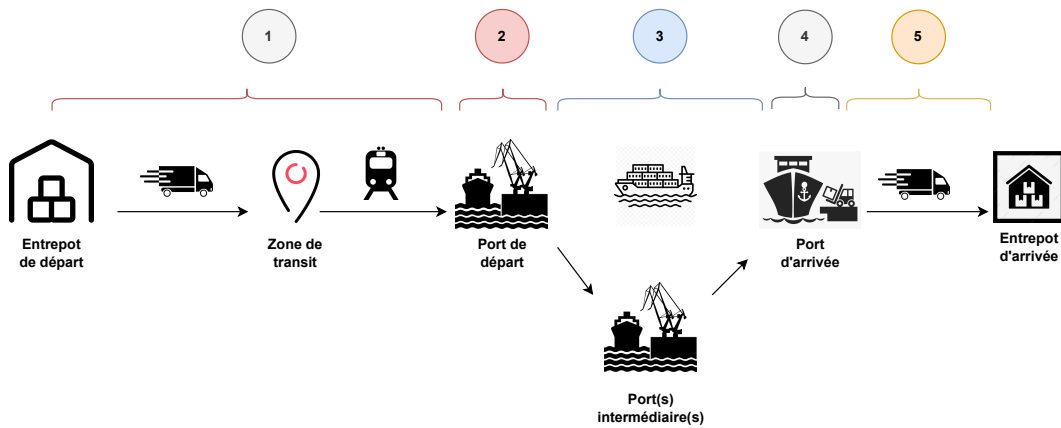


Figure 1.9 – La chaîne de transport intermodal.

4. Les opérations de contrôle du conteneur : bien que la majorité des conteneurs transportent des produits respectant les normes de circulation internationales, certains d'entre eux sont utilisés pour acheminer des produits illicites (armes, drogues, contrebandes, etc). Les opérations de contrôle des conteneurs dans les terminaux consistent à assurer que les conteneurs acheminent des produits licites et respectent les règles d'entrées et de circulation de marchandises de l'espace économique de destination.
5. La phase de post-acheminement : également appelé «le dernier kilomètre» (CLÉMENT, 2019), le post-acheminement est la dernière opération de transport que subit le conteneur avant l'arrivée dans l'entrepôt final. Tout comme le pré-acheminement, le dernier kilomètre est effectué par voie routière la majorité du temps mais il arrive qu'il soit assuré par voie ferroviaire ou fluviale.

### 1.1.4 Les acteurs du transport intermodal

Le processus de transport intermodal est complexe et nécessite l'intervention de plus d'une vingtaine d'acteurs (DUA *et al.*, 2019) pour assurer le bon transit des marchandises depuis son entrepôt de départ jusqu'à l'entrepôt d'arrivée. Les acteurs de la chaîne de transport interviennent sur une ou plusieurs phases de ce processus et ils assurent pour la plupart des missions de transport et des services connexes (contrôle de la marchandise, inspection, choix du mode de transport, etc). Cette sous-section a pour objectif de décrire les acteurs que nous considérons dans nos travaux de recherche.

- **L'expéditeur** : dans le processus de transport intermodal, l'expéditeur désigne la compagnie ou la personne morale qui expédie la marchandise. Il va faire appel à une compagnie logistique pour l'acheminement des marchandises.
- **La compagnie logistique** : la compagnie logistique encore appelée fournisseur de service logistique (FSL) se charge d'organiser les activités de transport des marchandises. Le travail d'organisation est effectué par un commissionnaire de transport ou un transitaire employé de la compagnie logistique. Ce dernier va se charger d'effectuer les bons choix de compagnie de transport en fonction des critères qui sont définis en commun accord avec l'expéditeur.
- **La compagnie de transport** : la compagnie de transport ou le transporteur va s'occuper du pré-acheminement et du post-acheminement du conteneur. Il arrive parfois que la compagnie logistique joue le rôle du transporteur lorsque celle-ci dispose des ressources nécessaires.

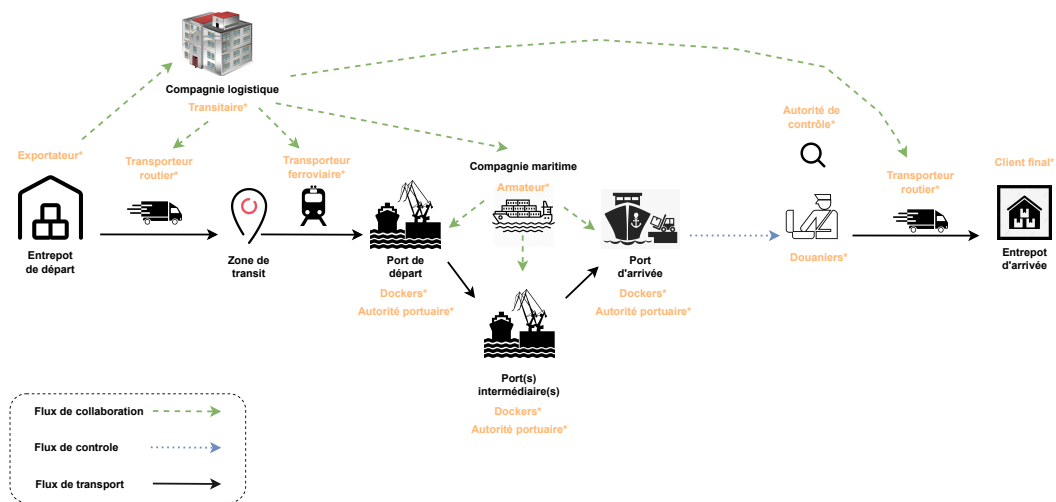


Figure 1.10 – Les acteurs dans le transport intermodal de conteneurs.

- **Les autorités portuaires** : elles sont généralement investies du pouvoir de police portuaire. Elles s'occupent de l'organisation des entrées, sorties, mouvements des navires, bateaux ou autres engins, des attributions de quais au port et de la diffusion de l'information nautique.
- **Les dockers** : le mot docker désigne le personnel qui se charge du chargement et du déchargement des marchandises à l'arrivée en quai des navires. Ils sont chargés des opérations de manutention des conteneurs.
- **La compagnie maritime** : également appelée armateur, elle s'occupe du convoi maritime des conteneurs à travers des routes régulières. Les armateurs possèdent des gros navires à cales standardisées qui permettent le transport de plusieurs milliers de conteneurs à la fois. Le plus grand armateur français est la CMA-CGM<sup>12</sup>.
- **Les autorités administratives** : elles s'occupent des activités connexes dans le processus de transport. Elles sont composées des autorités douanières et des autorités de contrôles. Elles sont chargées des inspections des marchandises transportées et de la vérification du respect des normes de transit.
- **Le consignataire** : encore appelé le client final il s'occupe de la réception du conteneur auprès du transporteur qui effectue la livraison du dernier kilomètre. Il confirme ou infirme que les marchandises ont bien été transportées conformément aux conditions de transport prédéfinies. Lorsqu'il s'agit d'une chaîne d'approvisionnement interne le consignataire est également l'expéditeur.

L'ensemble des acteurs impliqués dans le processus de transport intermodal œuvre de concert pour respecter les délais de livraison et assurer la sécurité et la qualité des marchandises durant le transport. Le figure 1.10 illustre l'intervention des différents acteurs dans la chaîne de transport intermodal des conteneurs.

## 1.2 Les difficultés dans le transport intermodal

Avant d'aborder les difficultés rencontrées pendant le transport des marchandises conteneurisées, il est important de définir les concepts de traçabilité et de visibilité dans le transport intermodal illustrés par la figure 1.11.

12. Armateur français CMA-CGM : <https://www.cma-cgm.fr>



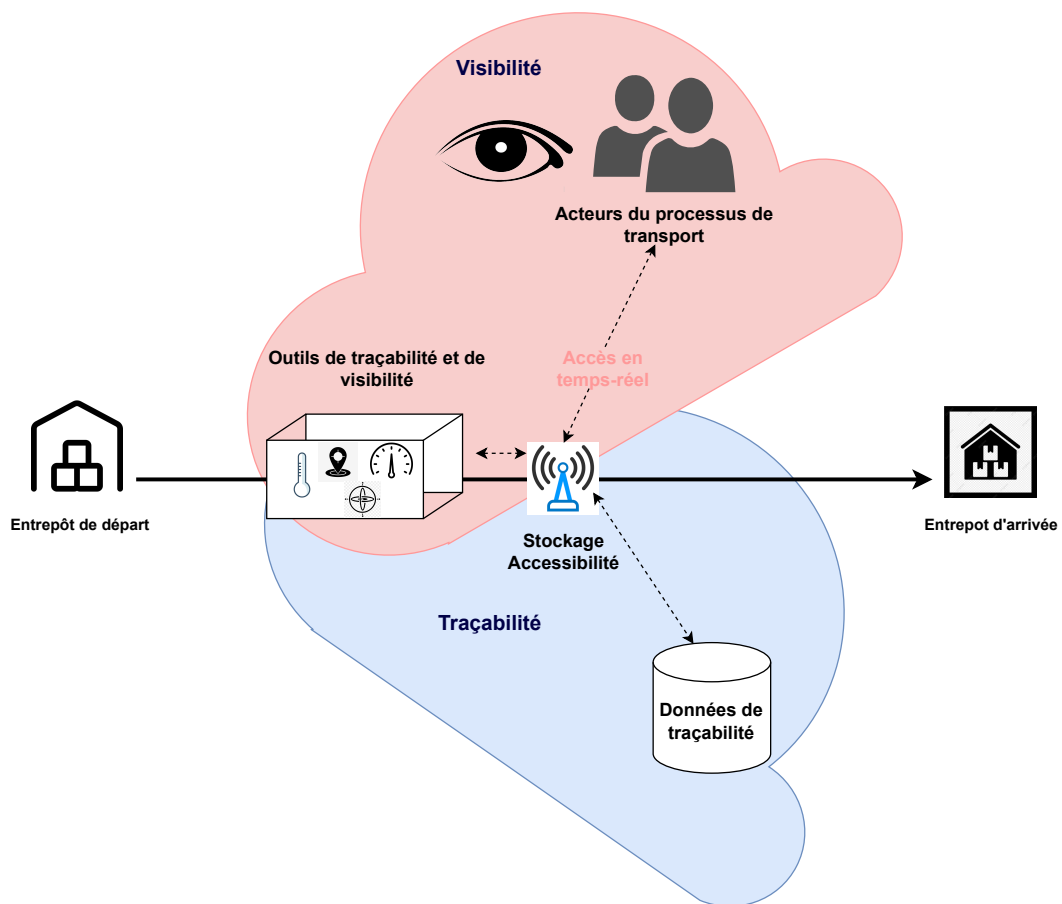


Figure 1.11 – Illustration de la traçabilité et de la visibilité dans la transport intermodal

### 1.2.1 Définition de la traçabilité dans le transport intermodal

Selon la norme ISO 9000 (2005), la traçabilité peut être définie comme «l'aptitude à déterminer l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité spécifique». La traçabilité est essentielle dans le transport intermodal et en particulier pour le transport et la distribution des marchandises dangereuses, fragiles (les vaccins) et sensibles à la température (l'alimentaire). Dans l'industrie pharmaceutique et celle de la chaîne du froid par exemple, la traçabilité du transport est obligatoire. Elle garantit la qualité des marchandises transportées en gardant la trace des points de passage. La définition de la traçabilité dépend du contexte de l'étude.

Dans le contexte de nos travaux, nous définirons la traçabilité dans le transport intermodal comme la capacité à suivre (localisation) le conteneur, à surveiller ses mouvements et ses variations de conditions de transport ; puis à remonter, stocker et rendre accessible a posteriori ces données aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement.

### 1.2.2 Définition de la visibilité dans le transport intermodal

La visibilité de la chaîne d'approvisionnement peut être définie comme l'accès ou le partage *en temps quasi-réel* des informations que les acteurs de la chaîne d'approvisionnement considèrent comme essentielles ou utiles à leur organisation et dont ils estiment qu'elles seront mutuellement bénéfiques (PAPERT *et al.*, 2016). La visibilité permet aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement de suivre les flux de marchandises en temps réel.

Dans la suite de ce mémoire, nous définirons la visibilité dans la chaîne de transport intermodal comme l'accès en temps réel ou en temps quasi-réel aux informations de localisation et de variation des conditions de transport des marchandises (la température, la pression, l'humidité, etc.) durant tout le transit du conteneur.

### 1.2.3 Les difficultés rencontrées durant le transport intermodal des marchandises

Le processus de transport intermodal est long et complexe à cause du grand nombre d'acteurs qui y sont impliqués. Cette multitude d'acteurs entraîne une perte de visibilité et rend difficile et quasi impossible une collaboration générale. Par exemple, la phase de transport maritime peut prendre plusieurs dizaines de jours en fonction des ports de départ et d'arrivée et cela prive, les acteurs non impliqués dans cette phase, d'informations pertinentes pour mieux gérer leur chaîne d'approvisionnement. Le transport intermodal fait face principalement à trois obstacles durant le transit des marchandises : (1) des événements aléatoires (aléas) (J. P. P. VILKO *et al.*, 2012), (2) le manque de visibilité (OUEDRAOGO *et al.*, 2022 ; J. VILKO *et al.*, 2019), (3) et le manque de traçabilité (OUEDRAOGO *et al.*, 2022).

1. Les éléments aléatoires (aléas) : le transport de conteneur est très fréquemment soumis à des aléas (congestion des ports, accidents de circulation, collision des porte-conteneurs, grèves, chocs, etc.) qui sont susceptibles de dégrader la qualité des marchandises transportées ou de créer des retards de livraison. Ces aléas perturbent la totalité de la chaîne d'approvisionnement et entraînent de fortes pertes financières pour l'ensemble des acteurs. Elles complexifient le transport des marchandises sensibles qui nécessitent des conditions spéciales de transport sous peine de dégrader leur qualité (la chaîne du froid, les produits chimiques, etc.). La difficulté à trouver des itinéraires assurant la sécurité et l'efficacité des transports tout en réduisant l'empreinte carbone des expéditions est également liée à ces aléas.

2. Le manque de traçabilité : pour rappel, la traçabilité assure la qualité des marchandises transportées en gardant une trace des points de passage. Le manque de traçabilité dans le transport intermodal rend difficile l'optimisation des itinéraires, des opérations et la gestion des aléas (OUEDRAOGO *et al.*, 2020). En effet le manque de données de traçabilité rend difficile la mise en place d'un modèle expert pour soutenir les prises de décisions (WATTANAKUL *et al.*, 2018). Nous entendons par modèle expert, un modèle capable de prédire et de planifier une solution robuste.
3. Le manque de visibilité : le transport intermodal souffre d'un manque de visibilité à cause de sa complexité. Pourtant, selon J. VILKO *et al.* (2019), la visibilité est l'une des clés de la gestion des aléas dans le transport intermodal. Elle offre une transparence lors de l'expédition des conteneurs, c'est également un levier pour une productivité et une planification efficace (J. P. P. VILKO *et al.*, 2012). En somme, la visibilité est cruciale durant le transport intermodal des conteneurs. En effet, connaître la position et les conditions exactes dans lesquelles les marchandises sont transportées permet de réagir face à certains aléas (le vol, les chocs) qui pourraient détériorer la qualité des marchandises transportées et entraîner des retards de livraisons.

Ces difficultés perturbent grandement la chaîne de transport intermodal et entraînent des retards dans l'acheminement des marchandises. Ces différents retards sont à l'origine de la baisse de performance de la chaîne d'approvisionnement et suscitent un grand intérêt industriel.

## 1.3 La nécessaire maîtrise des aléas pour une optimisation du transport intermodal

Le transport de marchandises est un élément clé de la chaîne d'approvisionnement. Il est un des leviers pour améliorer la résilience de la chaîne d'approvisionnement face aux aléas. Une meilleure gestion des événements aléatoires lors du transport intermodal réduirait les retards de livraison et contribuerait à améliorer la performance de la chaîne d'approvisionnement.

### 1.3.1 Les besoins des acteurs du transport intermodal

Pour améliorer la fluidité et la sécurité des flux de marchandises, les acteurs de chaîne de transport s'accordent sur certains besoins principaux :

1. Maîtriser les flux de transport : les responsables de la chaîne d'approvisionnement souhaitent maîtriser les flux de transport tout en favorisant la collecte automatique des données de suivi et de surveillance (OUEDRAOGO *et al.*, 2020). En d'autres termes, un besoin de visibilité de bout en bout sur l'ensemble de la chaîne de transport est souhaitée.
2. Être alerté en cas de perturbations : les acteurs de la chaîne d'approvisionnement ont manifesté le souhait d'être alerté en cas d'événements pouvant impacter négativement la chaîne d'approvisionnement (OUEDRAOGO *et al.*, 2020 ; WATTANAKUL *et al.*, 2018). Effectivement, être alerté sur les événements aléatoires impactant négativement les flux de transport permet d'être proactif dans la prise de décisions et d'anticiper sur les perturbations à venir.
3. Anticiper sur les décisions à prendre : les responsables de chaîne d'approvisionnement désirent des outils pour améliorer leur prise de décision (WATTANAKUL *et al.*, 2018). Ils veulent être capables d'estimer les impacts des aléas sur la chaîne d'approvisionnement afin de choisir la meilleure stratégie pour les minimiser.

4. Être réactif par le diagnostic des causes de la perturbation (WATTANAKUL *et al.*, 2018) : sur la base des données historiques de la chaîne de transport (la traçabilité), les causes sources des aléas doivent être identifiées pour appuyer la décision de réactivité (OUEDRAOGO *et al.*, 2020).

### 1.3.2 Les outils de gestion des aléas dans le transport intermodal

Les outils de gestion des aléas ont pour objectif de répondre aux besoins des acteurs de la chaîne de transport en réduisant les perturbations lors du transit des conteneurs. L'état de l'art exhaustif des outils de gestion n'étant pas un objectif de cette section, les principaux outils sont présentés succinctement.

Le transport intermodal a su tirer parti des innovations scientifiques pour améliorer ses performances et assurer la sécurité des marchandises. Grâce aux objets connectés et à la transformation digitale des entreprises les «conteneurs intelligents» ont vu le jour. Le conteneur intelligent ou communément appelé «smart conteneur» désigne un conteneur capable d'assurer la surveillance des conditions internes et/ou externes des marchandises conteneurisées (NEAL *et al.*, 2019 ; WATTANAKUL *et al.*, 2018). Grâce à un ensemble de capteurs embarqués et à des protocoles de communication propre aux objets connectés, le smart conteneur assure la traçabilité et la visibilité de la chaîne de transport intermodal durant tout le transit des marchandises. Les appareils et les capteurs installés sur les conteneurs pour les rendre intelligent assurent principalement 4 fonctions :

- l'identification du conteneur : le smart conteneur attribue un numéro unique qui permet de distinguer le conteneur cible, des millions de conteneurs en circulation dans le monde ;
- la localisation du conteneur : elle permet de connaître la position exacte du conteneur dans le monde ;
- la récupération et le stockage des données (température, pression, humidité, etc.) : grâce aux capteurs qu'il embarque, le smart conteneur récupère les informations sensibles sur les conditions de transport de la marchandise ;
- la transmission des données : les informations captées et stockées par le smart conteneur doivent être transmises aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement grâce à des protocoles de communication spécifiques.

En résumé, construire un conteneur intelligent revient à utiliser les avancées technologiques et scientifiques pour assurer la traçabilité et la sécurité du conteneur.

Nous distinguons deux types de solutions industrielles et commerciales qui permettent d'assurer la visibilité et la traçabilité des transports conteneurisés : (1) les solutions proposées par les compagnies fournisseurs de services de transport et (2) les solutions proposées par les compagnies fournisseurs de services logistiques.

#### Les outils des compagnies fournisseurs de services de transport (FST)

Nous caractérisons de FST toute compagnie faisant office de compagnie maritime et/ou de compagnie de transport. Grâce à l'échange de données informatisées (EDI) et au système d'identification automatique (AIS), la compagnie maritime est en mesure de déterminer avec une certaine précision l'emplacement exact d'un conteneur. L'AIS est un système automatique de suivi utilisé pour augmenter la sécurité de la navigation ainsi que la gestion du trafic des navires porte-conteneurs (SH *et al.*, 2001). Il fournit des informations statiques des navires et des mises à jour des informations dynamiques concernant ce dernier à différents intervalles de temps. Les informations fournies par l'AIS sont les suivantes :

1. Informations statiques :
  - numéro d'identification du navire (MMSI<sup>13</sup>);
  - le type de navire (porte-conteneur, plaisance, pêche, etc.);
  - les dimension du navire;
  - emplacement de l'antenne fournissant la position du navire telle que le GPS<sup>14</sup>/DGPS<sup>15</sup>.
2. Informations dynamiques :
  - la position du navire;
  - la vitesse du navire;
  - statut de navigation (pas sous commandement, limité par le tirant d'eau, etc.);
  - Manœuvres du navire (si disponible).

L'EDI permet d'améliorer la communication entre les acteurs de l'espace maritime en donnant un standard de transfert de données en temps réel. Cela a permis la mise en place de web-EDI qui renseignent sur l'emplacement des conteneurs en utilisant les numéros d'identification de ces derniers (CONCA *et al.*, 2018).

Les transporteurs terrestres utilisent le système de gestion des transports (TMS) pour améliorer les performances de transport. Cet outil permet de gérer et d'améliorer l'organisation des flux de transport en répondant principalement aux besoins de traçabilité des livraisons et d'optimisation du transport (schémas et affectation des transporteurs). Ces améliorations se traduisent par une réduction du budget transport (SCHOEN *et al.*, 2018). Les principales fonctionnalités d'un TMS sont (CLÉMENT, 2019) :

- l'optimisation et conception des schémas de transport;
- la construction et analyse des budgets de transport;
- la planification des tournées de livraison et/ou collecte;
- l'optimisation des tournées;
- l'optimisation des chargements (taux de remplissage);
- la traçabilité en temps réel des expéditions;
- le suivi des anomalies et des réserves de transports;
- la pré-facturation du transport;
- le reporting, par la présence d'indicateurs comme : respect des délais de livraison, taux de remplissage des camions, taux d'occupation des moyens de transport, émissions de CO<sub>2</sub>.

## Les outils des compagnies de services logistiques (FSL)

La compagnie logistique sélectionne les transporteurs et les compagnies maritimes tout en optimisant le coût du transport. Afin d'améliorer la qualité de service fournie à leurs clients et de garantir la sécurité des marchandises, les compagnies logistiques proposent, en collaboration avec des sociétés de tracking, des outils de suivi en temps réel de la chaîne de transport. Ces solutions sont composées soit d'une plateforme web qui agrège des données AIS pour suivre le navire sur lequel se trouve le conteneur, soit d'un système cyber-physique composé d'un conteneur intelligent et d'une plateforme web qui permet de visualiser en temps quasi-réel la position du conteneur et de suivre la variation de son environnement interne. Durant le transport des marchandises, les outils de gestion des aléas proposés par les FSL assurent principalement les fonctionnalités suivantes :

---

13. MMSI : Maritime Mobile Service Identity

14. GPS : Global Positioning System

15. GPS : Differential Global Positioning System

- la localisation du conteneur ;
- la détection des ouverture de porte du conteneur ;
- la surveillance de variation de température à l'intérieur du conteneur ;
- la surveillance de la variation d'humidité à l'intérieur du conteneur ;
- la détection des chocs que subissent le conteneur.

Le figure 1.1 présente quelques-unes des solutions disponibles sur le marché pour rendre les conteneurs intelligents. Elle est issue d'une analyse comparative des fiches techniques des différentes solutions.

## 1.4 Problématique générale

La mondialisation des chaînes d'approvisionnement ne fait qu'ajouter de l'importance à l'intégration de technologies de l'information et de communication. Le smart conteneur a révolutionné la chaîne de transport intermodal à travers l'intégration des technologies d'information et de communication telles que l'internet des objets dans le but d'améliorer la visibilité et la traçabilité des flux de marchandises. Malgré les efforts et les progrès qui sont réalisés pour rendre la chaîne de transport plus sécurisée, transparente et résiliente, nous assistons toujours à des perturbations de la chaîne d'approvisionnement à cause des événements aléatoires.

### 1.4.1 Les opportunités engendrées par les outils de gestion des aléas

Les outils de gestion des aléas de la chaîne de transport apportent plus de visibilité aux acteurs impliqués dans le processus de transport multimodal et une meilleure traçabilité des marchandises sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement.

Cependant l'amélioration de la visibilité et de la traçabilité des flux de transport apportée par ces outils ne répondent pas entièrement aux besoins des acteurs de la chaîne d'approvisionnement que nous avons présenté dans la section 1.3. En effet, la chaîne de transport fait toujours face à des aléas qui perturbent grandement la chaîne d'approvisionnement. Prenons l'exemple de la congestion du Canal de Suez qui a occasionné un manque d'équipements dans les grands ports et des gros retards de livraison des marchandises.

Même si l'utilisation des outils de traçabilité et de visibilité ne permettent pas l'entière gestion des aléas, force est de constater qu'elles offrent de nouvelles possibilités. D'un côté, nous avons la disponibilité des données de traçabilité et de visibilité de la chaîne de transport et par ailleurs, nous avons de plus en plus l'utilisation des algorithmes d'analyse et d'interprétation des données pour améliorer la chaîne d'approvisionnement. Une utilisation non concomitante de ces technologies pour la gestion des aléas lors du transport intermodal n'est plus envisageable. L'utilisation conjointe des données de traçabilité/visibilité et des algorithmes d'intelligence artificielle ouvre de nouvelles perspectives dans la gestion des aléas lors du transport intermodal.

### 1.4.2 La problématique et les questions de recherche

Les travaux que nous menons ont pour finalité de proposer un système facilitant la gestion des événements aléatoires qui surviennent durant le transport intermodal. Ce système a pour objectif de permettre aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement de se projeter en adaptant ou en changeant tout ou une étape de leur processus de transport en fonction des conséquences des événements aléatoires qui surviennent durant le transit des conteneurs.

Table 1.1 – Les solutions industrielles pour la traçabilité et la visibilité du transport intermodal

IOT	Communication protocol										Communication rules					Location							Sensors										
	2G	GSM (Type)	Satellite	LoRa	SigFox	Bluetooth (version)	WiFi	LiFi	Others :	Bidirectional ?	Buffering for next connection	Buffering for end of travel	Alert during wake-up mode	Alert during sleep mode	Upadte frequency smart adaptation	GPS	Glonass	Galileo (Ga)	LoRa	SigFox	Bluetooth	GSM	wifi	Temperature	Humidity	Pressure	Accelerometer	Light	Door sensor	Detachment	Geofencing	Others :	
Next 4	2G										X				X								X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Emerson Go Real-Time XL	2G/3G			X							X	X	X	?	X	X					BLE	2G	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Syckr	2G			X							X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Zillion ZT-25	2G/3G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Zenastek	2G										X	60d	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Most	2G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Contrilant	2G/3G										X	60d	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Hanbaa	2G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Safecube	2G/3G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sensitech	2G/3G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Tive	LTEM 4G/5G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Sensolus	?										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Trackster	?										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Roambee	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Traxens	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Schenker	2G/3G										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Avilem	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
StarCom	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
JoinTech	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Configuard	X										X	X	X	?	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X		

A cause de la complexité de la chaîne de transport intermodal et des aléas rencontrés lors du transport des conteneurs, la problématique de nos travaux englobe plusieurs niveaux : d'une part il s'agira d'acquérir et de modéliser les connaissances expertes sur les aléas dans les différentes phases du processus de transport intermodal. D'autre part, réutiliser ces connaissances pour détecter les aléas et prédire le retard qu'ils engendrent.

Au regard des besoins des acteurs de la chaîne d'approvisionnement et des opportunités qu'offrent les outils actuels de gestion des aléas, notre problématique de recherche est la suivante :

**Comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur les délais d'acheminement des marchandises en transport conteneurisé dans un contexte intermodal ?**

Pour résoudre cette problématique, nous adressons deux questions de recherche :

1. Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ?
2. Comment détecter les événements aléatoires (aléas) qui surviennent sur la chaîne de transport grâce aux données de traçabilité et de visibilité recueillies en temps réel ?

## Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les notions essentielles pour caractériser le transport intermodal.

La section 1.1 de ce chapitre présente les différents modes de transport que nous considérons dans nos travaux, ensuite nous avons présenté les différentes phases du processus de transport intermodal et les principaux acteurs qui y sont impliqués.

Dans la section 1.2, nous avons présenté les aléas auxquels sont soumis les conteneurs durant transport intermodal.

La section 1.3 présente les attentes des acteurs de la chaîne de transport intermodal et les outils de gestion des aléas proposés pour y remédier.

Enfin dans la section 1.4, après avoir présenté les opportunités qu'offrent les outils de gestion des aléas et au regard de l'écart qu'il existe entre les attentes des acteurs de la chaîne de transport et les solutions actuelles, nous avons présenté notre problématique de recherche.





# 2

## État de l'art

Lorsque tu ne sais pas où tu vas, regarde d'où tu viens.

Proverbe africain

Introduction . . . . .	27
2.1 État de l'art sur le risque et la gestion des risques . . . . .	28
2.1.1 Généralités sur les notions du risque : concept de danger, risque et évènements . . . . .	28
2.1.2 Le processus de gestion des risques . . . . .	30
2.2 Analyse des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	32
2.2.1 Méthodologie de recherche . . . . .	33
2.2.2 Identification des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	33
2.2.3 Évaluation des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	39
2.2.4 Bilan des méthodes d'analyse des risques dans le transport intermodal . . . . .	46
2.3 Traitement du risque dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	46
2.3.1 Méthodologie de la recherche . . . . .	47
2.3.2 Les fonctionnalités pour le traitement des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	48
2.4 Modélisation et exploitation des connaissances du risque . . . . .	53
2.4.1 Définition de la connaissance . . . . .	54
2.4.2 Les systèmes à base de connaissances pour le traitement des risques . . . . .	54
2.4.3 Modélisation de la connaissance du risque . . . . .	55
2.4.4 Base de connaissance et exploitation de la connaissance du risque . . . . .	57
2.5 Détection des risques à travers l'extraction d'évènements . . . . .	57
2.5.1 L'apprentissage automatique et le traitement automatique du langage naturel . . . . .	58
2.5.2 Extraction d'évènements à partir des données textuelles . . . . .	59
2.6 Bilan de l'état de l'art et positionnement de nos travaux . . . . .	66

### Introduction

Les constats établis dans le chapitre 1 ont permis de montrer à travers notre problématique de recherche que nous nous intéressons à la représentation et à la réutilisation des connaissances sur les risques lors du transport intermodal des marchandises conteneurisées.

Par conséquent, nous présentons dans ce chapitre, un état de l'art sur la gestion des risques et la modélisation des connaissances sur le risque dans le transport intermodal. L'objectif de ce

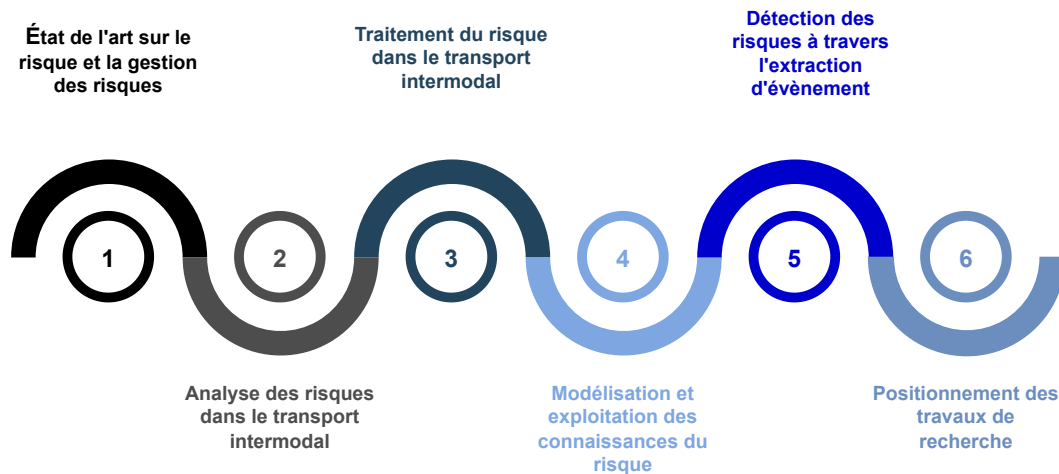


Figure 2.1 – Structure du chapitre 2

Le chapitre est (i) d'identifier et d'analyser les méthodes qui sont utilisées pour gérer les risques qui perturbent la chaîne de transport intermodal, et (ii) d'analyser les travaux concernant la modélisation et l'exploitation des connaissances du risque. La figure 2.1 présente la structure de ce chapitre.

La section 2.1 de ce chapitre est dédiée à la présentation de la notion du risque ainsi que le processus de management des risques.

Un des objectifs de nos travaux étant d'identifier les événements aléatoires perturbant la chaîne de transport, la section 2.2 développe l'état de l'art sur les typologies de risques et les méthodes utilisées pour identifier et évaluer les événements aléatoires perturbant le transport intermodal. Nous présentons ensuite dans la section 2.3 de ce chapitre, les solutions proposées dans la littérature pour le traitement des risques.

La section 2.4 est dédiée à la modélisation des connaissances. Nous introduisons dans cette section les systèmes à base de connaissances et les étapes de modélisation des connaissances.

Dans la section 2.5 de ce chapitre, nous présentons la détection des risques à travers l'extraction d'évènements. Cette section introduit les différentes approches d'extraction des événements à partir de données textuelles.

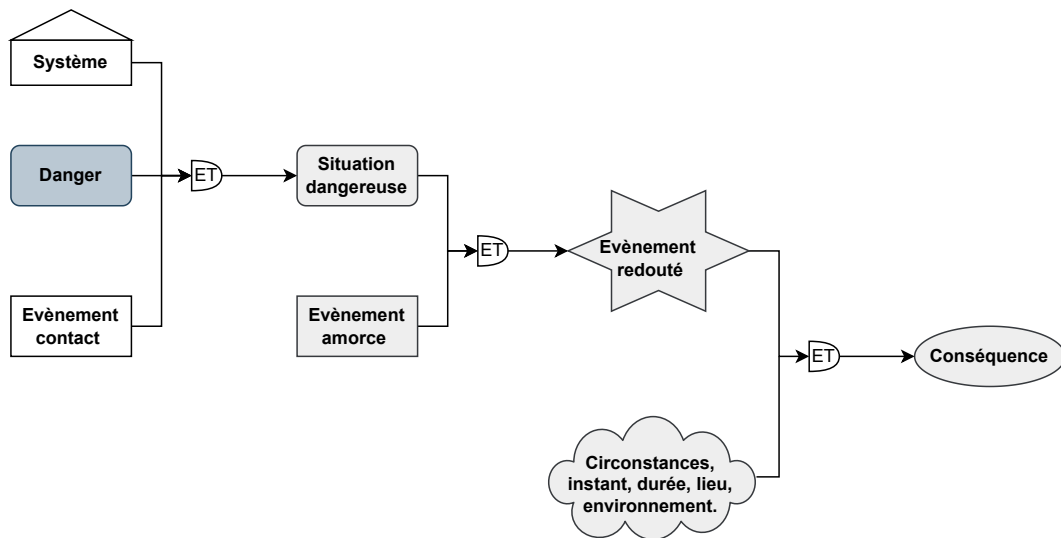
Enfin, la section 2.6 permet de positionner nos travaux de recherche en fonction des besoins des acteurs de la chaîne de transport intermodal non couverts dans la littérature.

## 2.1 État de l'art sur le risque et la gestion des risques

Pour introduire le risque dans le transport intermodal, il est important de revenir sur les concepts de danger et d'évènement aléatoire.

### 2.1.1 Généralités sur les notions du risque : concept de danger, risque et évènements

Le terme risque était communément utilisé en Europe au cours du XIIe siècle dans le domaine de l'assurance maritime pour définir un danger contre lequel on veut se prémunir. Le risque



**Figure 2.2** – Scénario d'accident (DELMOTTE *et al.*, 2014)

est un concept ancien provenant de la théorie des probabilités, elle-même dérivée de la théorie des jeux. A cause de la complexité du monde dans lequel nous vivons et parce qu'il est une construction sociale fondée sur la dimension culturelle, le concept du risque est complexe, polymorphe<sup>1</sup> et multidimensionnel (GOURC, 2006). Le risque est omniprésent et inévitable dans beaucoup de secteurs de la société et est le centre d'intérêt de nombreuses disciplines, activités professionnelles et actions pratiques.

De nombreux auteurs dans des disciplines diverses ont tenté de donner une définition au terme risque tout en spécifiant des notions qui y sont associées (SAKLI *et al.*, 2014).

L'auteur dans (DESROCHES *et al.*, 2016), définit le risque d'un système comme la mesure de l'instabilité de la situation dangereuse et la potentialité d'accident qui en résulte. Un système étant défini par LUGAN (2009) comme «un ensemble d'interactions privilégiées entre des éléments, des acteurs ou des groupes d'acteurs et leurs produits : effets, actions, processus». Cette définition du risque d'un système s'appuie sur le scénario d'accident (figure 2.2) décrit par l'enchaînement ou la combinaison de quatre événements séquentiels : (1) la présence d'un danger, (2) l'existence d'une situation dangereuse (3) l'accident ou l'évènement redouté (risque) et (4) les conséquences qui en résultent.

1. Selon DESROCHES *et al.* (2016) le danger est un potentiel de nuisance sur un composant du système (personnes, environnement, bien, etc).
2. La situation dangereuse indique un état du système dans lequel il est exposé à un danger. Le système se trouve dans une situation dangereuse lorsqu'il est exposé à un danger et à l'occurrence d'un évènement contact (DESROCHES *et al.*, 2016).
3. L'accident ou l'évènement redouté est la résultante de l'augmentation de la sensibilité des éléments du système face à la situation dangereuse et à l'évènement amorce (DESROCHES *et al.*, 2016).
4. Les conséquences ou les impacts sont les résultantes de la réalisation de l'accident en terme de pertes ou de dommages sur les composants du système (DESROCHES *et al.*, 2016).

1. polymorphe : qui se présente sous différentes formes

Selon Jiayao LI *et al.* (2018), le risque dans un réseau collaboratif (par exemple une chaîne d'approvisionnement) peut être considéré comme la combinaison de la probabilité d'un événement et de sa conséquence. Un événement est défini comme le changement ou le résultat qui déclenche le risque et la conséquence désigne un ensemble d'impacts négatifs de l'occurrence du risque. Les auteurs dans cet article soutiennent également que les concepts de danger et d'enjeu sont étroitement liés au risque, à l'exception des concepts d'événement et de conséquence. Le danger est défini comme toute caractéristique dangereuse spécifique de l'environnement. L'enjeu quant à lui est considéré comme une chose ou une entité ayant une valeur potentielle ou réelle pour l'organisation et une susceptibilité potentielle au danger.

GOURC (2006) définit le risque projet comme «la possibilité que survienne un événement dont l'occurrence entraînerait des conséquences (positives ou négatives) sur le déroulement de l'activité du projet». Un projet étant défini par la norme ISO 10006<sup>2</sup>, comme un processus unique, qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques. Une activité est définie comme une partie identifiée du travail qu'il est nécessaire d'entreprendre pour mener à bien un projet. Il est important de noter que GOURC (2006) définit deux types de conséquences aux risques : des conséquences positives ou des conséquences négatives au regard des objectifs du système ou du projet. Dans la même logique, les auteurs dans (LAURAS *et al.*, 2015) définissent le risque dans une situation de crise comme la possibilité de l'occurrence d'un événement ayant des conséquences positives ou négatives sur un système.

J. VILKO *et al.* (2019) caractérisent le risque comme purement négatif et conduisant à des résultats ou conséquences non désirés. Les auteurs dans SAKLI *et al.* (2014) définissent, également, le terme risque dans la chaîne d'approvisionnement comme la combinaison de probabilités d'événements non désirés (accidents) et de ses conséquences.

Avec pour objectif de standardiser la définition du terme «risque», la norme ISO 31000<sup>3</sup> le définit comme «l'effet de l'incertitude sur les objectifs». Cette définition du risque est reprise par CLÉMENT (2019) dans ses travaux de gestion des risques lors du transport routier des marchandises. L'auteur considère comme primordiale la possibilité de caractériser l'événement ainsi que ses conséquences.

Bien qu'il n'existe pas de définition standard du risque, force est de constater que les auteurs dans la littérature convergent majoritairement vers deux dimensions pour caractériser le concept du risque : (i) la probabilité (**P**) d'occurrence de l'événement non désiré et (ii) l'impact (**I**) de l'événement non désiré sur le système. Ainsi, une définition commune pour la mesure du risque est le produit de la probabilité de l'événement et de l'importance de son impact sur le système (équation 2.1). Cette formule est la plus utilisée dans la littérature pour l'analyse du risque (J. P. P. VILKO *et al.*, 2012).

Dans la suite de ce manuscrit, nous définirons le risque (équation 2.1) dans la chaîne de transport intermodal de façon purement négative et nous utiliserons la probabilité d'occurrence (P) de l'événement et l'importance de l'impact (I) de cet événement non désiré pour le caractériser.

$$R = P * I \quad (2.1)$$

## 2.1.2 Le processus de gestion des risques

La gestion des risques permet de se prémunir des effets négatifs du risque et de rendre le système qui y est exposé plus résilient. Tout comme le risque, la culture de gestion des risques

2. Norme ISO 10006 : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10006>

3. Norme ISO 31000 : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en>

est présente dans de nombreux secteurs de la société. Il existe de nombreuses définitions du processus de gestion des risques associées à divers secteurs d'activités. Parmi ces définitions, nous distinguons celle proposées par les milieux académiques (DESROCHES *et al.*, 2016; GOURC, 2006; HECKMANN *et al.*, 2015; J. P. P. VILKO *et al.*, 2012) et celles proposées par des organisations professionnelles ou sectorielles (AFNOR<sup>4</sup>, ISO<sup>5</sup>, etc).

(GOURC, 2006) définit le processus de gestion des risques projet, comme un ensemble d'activités qui ont pour objectif de répondre à un besoin de pilotage efficace et robuste des projets par l'adoption d'une vision anticipative des aléas et leur prise en compte.

ISO 31000 (2018), toujours dans un souci de normalisation, propose de définir le processus de gestion des risques comme «des activités coordonnées dans le but de diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque».

MARQUÈS (2010), reformule la définition de la gestion des risques dans le modèle SCOR<sup>6</sup> comme « la systématique identification, évaluation et mitigation des perturbations potentielles de la performance de la chaîne ». Le modèle SCOR est une référence pour l'optimisation de la chaîne d'approvisionnement.

Les auteurs dans (MOSLEMI, 2016) définissent la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement comme l'identification des sources potentielles de risque et la mise en œuvre de stratégies appropriées par une approche coordonnée entre les membres de la chaîne d'approvisionnement pour réduire la vulnérabilité de cette dernière. Elle comporte quatre étapes (identification des risques, évaluation des risques, traitement des risques et surveillance des risques).

A partir de ces définitions, le processus de gestion des risques d'un système peut être défini comme l'identification des sources potentielles de risque et la mise en œuvre de stratégies appropriées par une approche coordonnée afin de réduire la vulnérabilité du système et d'augmenter sa résilience face aux risques.

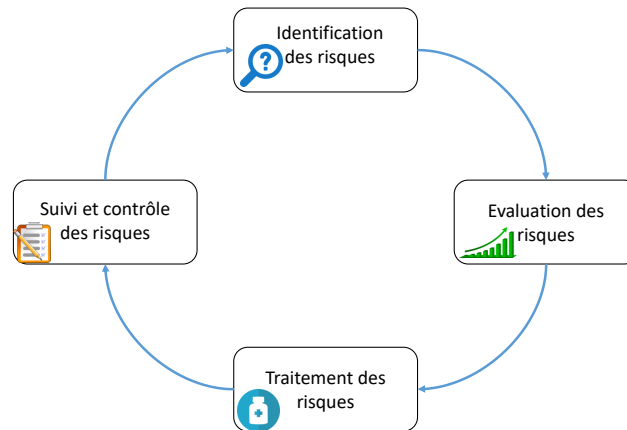
La figure 2.3 présente le processus de gestion des risques dérivé de celui proposé par l'ISO, il est composé de quatre étapes : (1) identification des risques, (2) évaluation des risques, (3) traitement des risques et (4) suivi et contrôle des risques.

1. Identification des risques : l'objectif de l'identification des risques est de dresser une liste des risques potentiels avec leurs sources et leur zone d'impact. Elle peut utiliser des outils classiques tels que : les données historiques, les analyses théoriques, les avis d'experts et de personnes compétentes, le brainstorming (ISO 31000, 2018; MARQUÈS, 2010).
2. Évaluation des risques : elle permet d'exprimer quantitativement ou qualitativement la probabilité d'occurrence et les conséquences de chacun des risques identifiés lors de l'étape précédente. Conventionnellement, cette étape consiste à établir le niveau de risque, en d'autres termes l'importance du risque. L'objectif est de fournir un cadre permettant de comparer les risques et de distinguer ceux qui doivent être traités de ceux pour lesquels il n'est pas nécessaire d'engager des actions, en fonction de critères de décision (ISO 31000, 2018; MARQUÈS, 2010). On distinguera les risques acceptables des risques critiques, pour lesquels il devra être engagé des actions de traitement.

4. Association Française de Normalisation : <https://competences.afnor.org/gammes/management-du-risque>

5. ISO (International Organization of Standardization) : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:fr>

6. Supply Chain Operations Reference model (SCOR) : <https://www.ionos.fr/digitalguide/web-marketing/vendre-sur-internet/modele-scor/>



**Figure 2.3** – Le processus de gestion des risques

3. Traitement des risques : le traitement du risque consiste à choisir et à mettre en œuvre une solution pour faire face au risque (MARQUÈS, 2010). Le traitement du risque peut être décomposé en plusieurs stratégies possibles : (a) anticiper le risque, (b) éviter le risque, (c) gérer ses conséquences ou (d) partager le risque.
  - a) L'anticipation du risque consiste à mettre en place une stratégie qui permet de prévoir son apparition.
  - b) Éviter le risque consiste à mettre en œuvre une stratégie pour contourner la zone où l'événement à risque se produit. Par exemple, dans la chaîne d'approvisionnement des conteneurs, il s'agira de choisir un itinéraire pour contourner une route où opèrent des pirates.
  - c) Traiter les conséquences des risques consiste à mettre en place des mesures qui empêchent le risque d'avoir un impact négatif sur les activités. Par exemple, pour une entreprise qui travaille en flux tendu, il s'agit d'avoir un stock suffisant pour continuer à approvisionner ses clients même en cas de retard de transport.
  - d) Le partage du risque consiste à partager les conséquences du risque avec un autre acteur, par exemple en contractant une police d'assurance pour les produits sensibles afin de minimiser les pertes financières dans la chaîne d'approvisionnement.
4. Suivi et contrôle des risques : le suivi et le contrôle du risque consiste à contrôler le niveau de risque pour s'assurer qu'il reste à un niveau acceptable.

## 2.2 Analyse des risques dans la chaîne de transport intermodal

La gestion des risques a fait l'objet de recherches intensives dans l'optique de minimiser la perturbation de la chaîne d'approvisionnement. Certaines de ces recherches se sont intéressées à l'analyse (identification et évaluation) des risques dans les différentes phases composant le processus transport intermodal (phase de transport maritime, phase de manutention du conteneur, etc). Les sous-sections suivantes présentent les méthodes utilisées dans l'étape d'identification et d'évaluation des risques dans les phases du transport intermodal.

## 2.2.1 Méthodologie de recherche

Dans l'optique de présenter les différentes solutions et méthodes utilisées pour l'analyse des risques dans les phases du transport intermodal, nous avons effectué une revue systématique de littérature. La figure 2.4 présente les trois étapes de la méthodologie de recherche qui a été déployée.

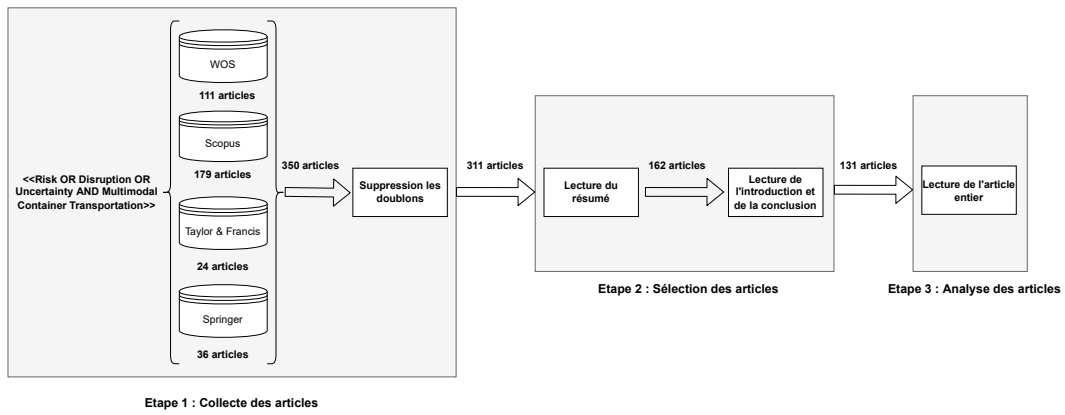
1. La collecte des articles : c'est la première étape de la méthodologie de recherche. Trois mots clés «risk», «disruption», «uncertainty» et une expression « Multimodal Container Transportation » ont été identifiés pour façonner la requête à exécuter sur les bases de données bibliographiques afin de sélectionner les articles les plus pertinents. Ainsi, la requête «Risk OR Disruption OR Uncertainty AND Multimodal Container Transportation» a été utilisée pour interroger les bases de données bibliographiques (*Scopus*, *Web of Science*, *Taylor & Francis* et *Springer*). Afin de capturer les travaux les plus récents sur l'analyse des risques dans le transport intermodal, nous avons limité les années de publication entre 2005 et 2020. En outre, pour s'assurer que tous les travaux collectés grâce à la première requête traitent du transport de conteneur, les résultats de la requête ont été affinés avec le mot-clé «container». En considérant uniquement les articles rédigés en anglais et en supprimant les doublons, c'est au total 311 articles qui ont été collectés.
2. La sélection des articles : l'étape de sélection des travaux nous a permis, sur la base du contenu et du résumé de l'article, de sélectionner les articles les plus pertinents pour l'étape d'analyse. Ainsi, un article est considéré comme pertinent si son résumé contient la combinaison d'au moins l'un des mots-clés «Risk, Disruption, Uncertainty» et «Multimodal Container Transportation». Cela a permis d'exclure les travaux traitant exclusivement du transport aérien et ceux qui ne traitent pas les risques dans le transport intermodal. Finalement, 149 articles ont été retirés de la collection précédente. Après lecture des sections introduction et conclusion des travaux restants, 131 articles ont été retenus pour une lecture complète.
3. L'analyse des articles : l'étape d'analyse des articles a consisté en la lecture intégrale de chacun des articles sélectionnés. Cette phase a permis d'identifier les différentes typologies de risques et les méthodes utilisées pour leur identification dans le transport intermodal. La répartition des travaux sur l'analyse des risques en fonction de l'année de publication présentée par la figure 2.5, montre l'intérêt que portent les chercheurs à cet axe de recherche depuis plusieurs années. En effet, le nombre de travaux publiés sur la gestion des risques dans le transport intermodal a augmenté significativement depuis 2017, le nombre d'articles publiés en 2019 est le double de celui publié en 2018.

## 2.2.2 Identification des risques dans la chaîne de transport intermodal

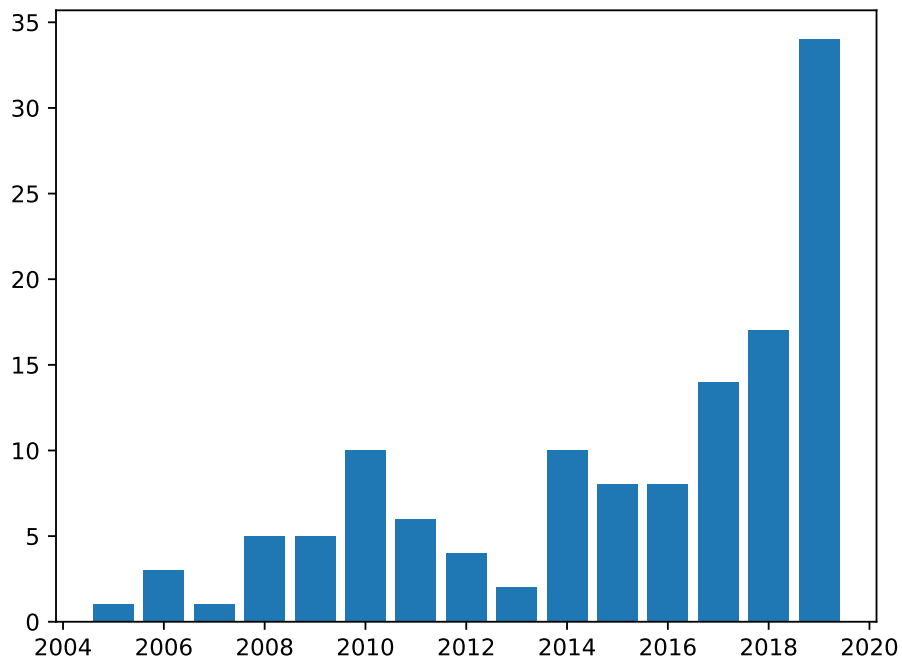
### La typologie des risques

Dans l'optique d'atténuer les effets des risques sur la chaîne d'approvisionnement, les chercheurs se sont intéressés à l'identification des risques et à l'étude de leurs causes et conséquences. L'identification des risques dans le transport intermodal consiste à établir une liste des facteurs de risques (événements aléatoires) à considérer sur chaque phase du processus de transport (phase de pré-acheminement, phase de manutention du conteneur, phase de transport maritime et phase de post-acheminement).





**Figure 2.4** – Méthodologie de recherche pour l'analyse des risques dans le transport intermodal



**Figure 2.5** – Distribution des travaux sur l'analyse des risques dans le transport intermodal

Nous adoptons tout au long de ce mémoire la définition proposée par HO *et al.* (2015) du facteur de risque : «Les facteurs de risque sont divers événements et situations qui déterminent un type de risque spécifique».

Généralement les risques sont classés suivant leurs types. Le type de risque fait référence à sa source. Par exemple, dans l'optique de recenser les événements aléatoires perturbant les flux de marchandises dans le golfe de Finlande, J. P. P. VILKO *et al.* (2012) ont réalisé une série d'interviews semi-structurées avec quarante praticiens de la chaîne de transport intermodal. Grâce à cette série d'interviews, une cartographie de 107 facteurs de risques perturbant la chaîne de transport a été proposée. Les facteurs de risques ont été regroupés suivant deux types de risques :

- Risque endogène : les risques endogènes dans le transport intermodal sont directement liés à l'activité de transport des marchandises. Parmi les facteurs de risques endogènes nous retrouvons les accidents de la route, les chocs lors de la manutention des conteneurs, les changements de planning, le manque de ressources (équipements de manutention, personnels qualifiés), etc.
- Risque exogène : contrairement aux facteurs de risques endogènes, les facteurs de risques exogènes regroupent l'ensemble des événements aléatoires liés à l'environnement dans lequel le transport des marchandises est effectué. Les événements de types tempêtes, les catastrophes naturelles, les conflits politiques, les crises économiques, etc., sont caractérisés de facteurs de risques exogènes car ils sont dissociables du processus opérationnel de transport des marchandises.

Selon (HO *et al.*, 2015), les risques dans la chaîne de transport intermodal peuvent également être regroupés sous deux types de risques, les risques micro et les risques macro. Les facteurs de risques micro font référence aux événements aléatoires qui surviennent durant les activités de transport ; comme le manque d'équipement de transbordement, la congestion des ports, les grèves, etc. Les facteurs de risques macro désignent quant à eux les événements aléatoires ou les situations conduisant à une catastrophe naturelle ; comme un tremblement de terre, une tempête, un tsunami, etc. Cette classification des facteurs de risques rejoint celle proposée par J. P. P. VILKO *et al.* (2012).

TANG *et al.* (2011) proposent une classification des risques sous trois types (les risques suivant les flux physiques, les risques suivant le flux d'information et les risques suivant les flux financiers). Cette cartographie a été proposée après avoir établi un état de l'art sur 138 articles publiés entre 1995 et 2009 dans le domaine de la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement. Suivant la même logique, CHANG *et al.* (2016) proposent une classification des risques suivant les flux de la chaîne d'approvisionnement en utilisant un questionnaire adressé aux employés des compagnies maritimes.

Avec pour vocation l'amélioration des performances des opérations dans la phase de transport maritime par la mise en place d'une gestion des risques, les auteurs dans (MOSLEMI, 2016) proposent une cartographie des risques de la chaîne de transport suivant cinq types de risques : les risques environnementaux, les risques industriels, les risques se rapportant à des problèmes spécifiques, les risques organisationnels et les risques liés au décisionnaire. Cette cartographie s'appuie sur un état de l'art des risques dans le transport intermodal complétée par une série d'interviews et de questionnaires adressés aux responsables des chaînes d'approvisionnement. Dans la même logique, CHU *et al.* (2020) identifient sept types de risques : les risques politiques, les risques environnementaux, les risques financiers, les risques liés à l'approvisionnement et à la demande, les risques logistiques, les risques liés aux systèmes et les risques opérationnels.

- Les risques liés à l'approvisionnement sont déclenchés par les facteurs de risques d'approvisionnement. Encore appelés facteurs de risques logistiques, ils augmentent la

probabilité de perturber la circulation des produits dans la chaîne d'approvisionnement. Ces facteurs incluent le manque d'équipement ou les goulots d'étranglement dans la chaîne de transport, les grèves du travail, etc. Par exemple, HOSSAIN *et al.* (2019) identifient les facteurs de risques d'approvisionnement comme les facteurs de base à traiter pour améliorer la résilience de la chaîne d'approvisionnement.

- Les facteurs de risques opérationnels surviennent au cours du processus opérationnel de transport. Ils comprennent la congestion, l'incendie, le terrorisme, la piraterie, les longs délais d'attente, la manutention, l'arrimage des navires, etc. C'est le type de risques le plus traité dans la littérature (NGUYEN, 2020).
- Les facteurs de risques organisationnels sont liés à une estimation et/ou une planification inappropriée dans la gestion du processus du transport intermodal. HOSSAIN *et al.* (2019) et WAN *et al.* (2019) identifient le risque organisationnel dans la typologie des risques de la chaîne d'approvisionnement qu'ils proposent. Les auteurs dans (FABIANO *et al.*, 2010) soutiennent que l'organisation du travail et les conditions environnementales peuvent affecter la fréquence des accidents du travail dans les points d'intérêts lors du transport des conteneurs.
- Les facteurs de risques environnementaux désignent les événements aléatoires environnementaux qui affectent la chaîne de transport intermodal. Ces facteurs sont les incertitudes météorologiques et les catastrophes naturelles tels que les tremblements de terre, les cyclones, les inondations, les sécheresses, les éruptions volcaniques, les séismes, les ouragans, les conflits politiques ou les crises d'origine humaine (troubles civils, guerres, troubles politiques ou tribaux (FAN *et al.*, 2020 ; GUDELJ *et al.*, 2008 ; HOSSAIN *et al.*, 2019).
- Les fournisseurs de services logistiques sont confrontés à deux types de demandes de la part de leurs clients : la demande à long terme et la demande du marché à court terme ou ponctuel (ZHENG *et al.*, 2017). L'incertitude de la demande du marché à court terme entraîne une attitude d'aversion au risque dans les stratégies de tarification des compagnies fournisseurs de services logistiques (XING *et al.*, 2017). Les risques liés à la demande sont associés à la demande inattendue et variée des clients. Par exemple, la variation du prix du carburant et la variation de la demande client, sont des facteurs de risques liés à la demande.
- Les facteurs de risques liés aux infrastructures caractérisent les défaillances des infrastructures portuaires ou les dégradations des ressources entraînant de graves perturbations dans la chaîne de transport intermodal. Les facteurs de risques liés aux infrastructures englobent les facteurs de risques liés à l'information (manque de visibilité ou retard dans la transmission) (FAN *et al.*, 2020), la capacité d'accueil portuaire (HOSSAIN *et al.*, 2019), etc.

La figure 2.6 donne un aperçu de la typologie des risques proposée par CHU *et al.* (2020) dans la chaîne d'approvisionnement.

L'analyse des travaux sélectionnés, portant sur l'identification des risques dans le transport intermodal, nous montre que plusieurs auteurs (CHANG *et al.*, 2016 ; CHU *et al.*, 2020 ; HO *et al.*, 2015 ; MOSLEMI, 2016 ; J. P. P. VILKO *et al.*, 2012) ont proposé différentes approches pour classer les risques selon leur type. L'approche la plus utilisée est l'approche classique d'identification des risques d'un système qui consiste à distinguer les risques intrinsèques (internes) et les risques externes au processus opérationnel de transport intermodal (B. JIANG *et al.*, 2018 ; MARQUÈS, 2010). D'autres auteurs, tels que MOSLEMI (2016) se basent sur les flux dans la chaîne d'approvisionnement pour classer les risques. Enfin, dans un souci de précision, CHU *et al.* (2020) et MOSLEMI (2016) ont scindé les risques suivant la nature des facteurs de risques de la chaîne d'approvisionnement : les risques liés à l'approvisionnement,

les risques opérationnels, les risques organisationnels, les risques environnementaux, les risques liés à la demande et les risques liés aux infrastructures.

## Les impacts du risque sur la chaîne d'approvisionnement

Les événements aléatoires qui perturbent la chaîne de transport entraînent logiquement des conséquences sur la chaîne d'approvisionnement globale. Ces conséquences impactent l'organisation de l'ensemble des acteurs impliqués dans le processus de transport intermodal. L'état de l'art sur l'identification des risques dans le transport intermodal nous a permis de recenser quatre catégories d'impacts des risques sur la chaîne d'approvisionnement : (1) impact de délai, (2) impact sur la qualité des marchandises ou des services, (3) impact financier et enfin (4) impact environnemental.

1. L'impact de délai caractérise l'augmentation du temps d'arrivée des marchandises au point d'arrivée final. Par exemple, les congestions aux ports entraînent un impact de délai sur l'estimation du temps d'arrivée fourni par les fournisseurs de services logistiques à leurs clients.
2. L'impact sur la qualité de la marchandise fait référence à la détérioration ou à la baisse de qualité des marchandises due à des événements aléatoires durant le transit. Par exemple, des chocs trop prononcés lors de la manutention d'un conteneur transportant des marchandises fragiles peuvent entraîner une détérioration de la marchandise. L'impact sur la qualité de service concerne la satisfaction clientèle qui va baisser suite aux perturbations engendrées par les risques sur sa chaîne d'approvisionnement.
3. L'impact financier caractérise le manque à gagner causé par les perturbations de la chaîne de transport. Comme exemple, les coûts de détention et de démurrage des conteneurs augmentent grandement lorsque des congestions surviennent dans les ports. Les coûts de détention et de démurrage sont des frais versés aux compagnies maritimes par les compagnies ou personnes morales qui conservent les conteneurs après avoir dépassé le délai de détention autorisé.
4. L'impact environnemental est lié à l'augmentation de l'empreinte carbone de la chaîne de transport et à la pollution que peuvent engendrer les événements aléatoires. Une déviation de route d'un navire porte conteneurs à cause d'une congestion par exemple augmente l'empreinte carbone de l'ensemble des conteneurs qu'il transporte.

La figure 2.7 présente les types d'impacts engendrés par la survenue des événements aléatoires sur la chaîne d'approvisionnement.

## Les méthodes d'identification des risques

Dans l'objectif d'élaborer une liste des risques susceptibles de perturber le processus de transport intermodal des marchandises, de nombreux chercheurs ont proposé des méthodes diverses et variées. La majorité des auteurs (HO *et al.*, 2015 ; TANG *et al.*, 2011 ; J. VILKO *et al.*, 2019 ; J. P. P. VILKO *et al.*, 2012) utilisent des méthodes de retour d'expériences (revue de la littérature, interviews, questionnaires, brainstorming, etc.) pour l'identification des risques dans des phases du processus du transport intermodal.

Par exemple, J. P. P. VILKO *et al.* (2012) ont utilisé des interviews avec les acteurs de la chaîne de transport pour recenser les événements aléatoires qui perturbent la chaîne de distribution. Ces interviews ont permis aux auteurs d'établir une liste exhaustive des risques rencontrés durant le transit des marchandises entre le golfe de Finlande et la Finlande intérieure.

D'autres auteurs tels que (HO *et al.*, 2015) utilisent une revue systématique de la littérature sur le thème de la gestion des risques pour établir une liste des risques impactant les performances de la chaîne d'approvisionnement. HO *et al.* (2015) ont effectué une revue de 224 articles publiés entre 2003 et 2013 sur la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement avec

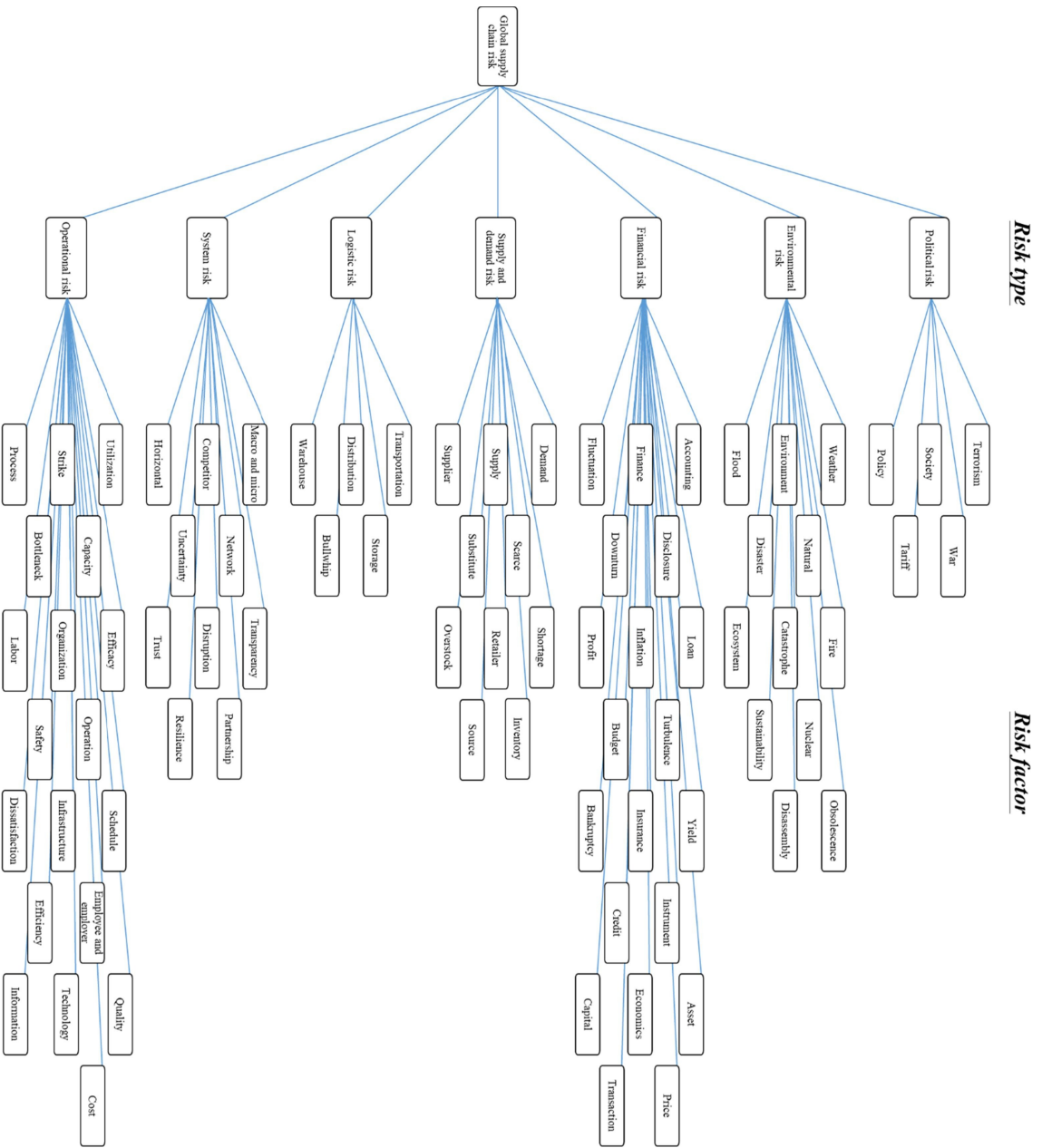


Figure 2.6 – Les facteurs de risques dans la chaîne d'approvisionnement (CHU *et al.*, 2020)

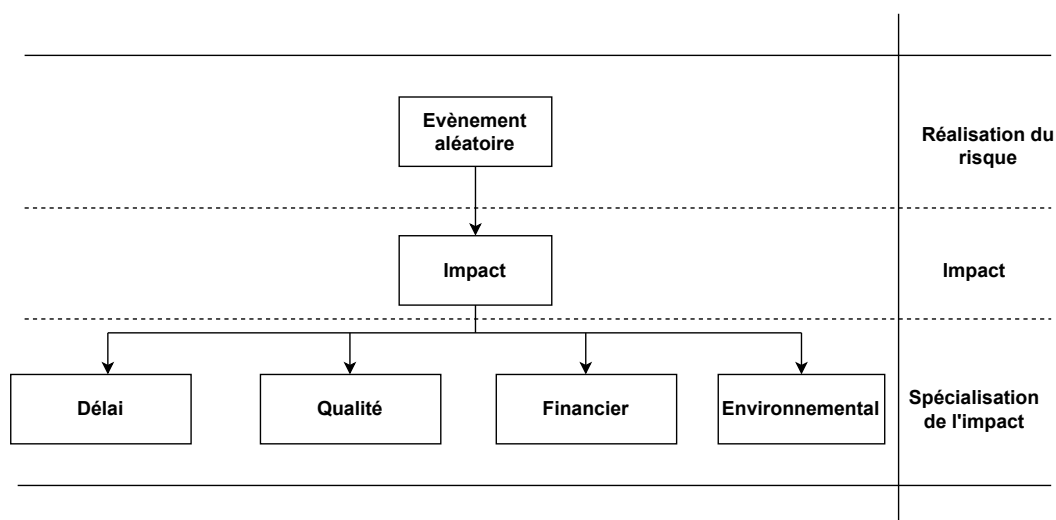


Figure 2.7 – Les types d’impacts dans le transport intermodal.

pour objectif de recenser les évènements aléatoires. Les auteurs dans (TANG *et al.*, 2011) ont exploré les travaux de recherches sur la gestion des risques dans la chaîne d’approvisionnement en examinant 138 articles publiés entre 1995 et 2008 et ont dressé une liste de facteurs de risques.

D’autres auteurs, tels que DESROCHES *et al.* (2016), ont identifié des méthodes basées sur l’analyse des processus (l’analyse préliminaire des risques (APR), l’analyse globale des risques (AGR), «hazard identification» (Hazid)) pour établir une cartographie des facteurs de risques pour n’importe quel système et processus.

L’APR est une méthode prévisionnelle d’identification des risques développée en 1960 pour l’identification et l’évaluation des risques dans le domaine aéronautique. Ensuite, son utilisation s’est généralisée dans d’autres domaines industriels.

La méthode d’identification des risques AGR prolonge l’analyse préliminaire des risques. Cette méthode structurée permet d’identifier et d’évaluer les conséquences des situations dangereuses d’un système. En plus de la cartographie des dangers du système, l’AGR permet de réaliser une analyse sur les scénarios d’accident. C’est-à-dire que pour chaque danger identifié, une analyse des risques ou des scénarios associés est réalisée (SGHAIER *et al.*, 2015).

L’Hazid est une méthode d’identification des risques par analyse de processus réalisée par des spécialistes du domaine. Elle permet d’établir une liste structurée des facteurs de risques et tout comme l’AGR elle offre une analyse des scénarios.

### 2.2.3 Évaluation des risques dans la chaîne de transport intermodal

L’évaluation des risques permet de hiérarchiser les risques précédemment identifiés. C’est-à-dire qu’elle permet de déterminer les risques les plus susceptibles de perturber le processus de transport intermodal. C’est une étape clé pour pouvoir éclairer la prise de décision et mettre en place des actions pour minimiser l’impact des évènements aléatoires sur la chaîne d’approvisionnement (ROUSSEL *et al.*, 2008). De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour la hiérarchisation des risques dans le transport intermodal. Ces méthodes communément regroupées sous deux approches :

1. L'approche d'évaluation qualitative utilise le raisonnement par induction et par déduction pour retrouver les causes possibles partant d'une conséquence non désirée sur la chaîne d'approvisionnement. Certaines des méthodes qualitatives permettent de chercher les combinaisons de causes conduisant à des événements redoutés. Parmi les méthodes qualitatives utilisées nous pouvons citer la matrice de risques, l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), le processus d'analyse hiérarchique (PAH), l'analyse par arbre des causes (ADC), etc.
2. L'approche d'évaluation quantitative permet d'évaluer les risques grâce aux outils mathématiques. Cette évaluation peut se faire à partir de lois de probabilités (l'estimation de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) ou par l'utilisation de modèles différentiels probabilistes (les chaînes de Markov, les réseaux de pétri, etc) (DESROCHES *et al.*, 2016 ; MAZOUNI, 2008).

Nous détaillons ci-dessous les méthodes d'évaluation utilisées dans la littérature pour hiérarchiser les risques dans au moins une des phases du processus de transport intermodal :

- La matrice de risque : selon DUIJM (2015), la matrice de risque est un outil «simple permettant de classer et de hiérarchiser les risques puis de décider si certains d'entre eux peuvent être tolérés». Elle présente sur un graphique la probabilité d'occurrence et l'impact des événements aléatoires. Elle utilise ensuite des catégories discrètes de probabilité et d'impact se déclinent très souvent selon quatre niveaux pour la hiérarchisation. Pour la probabilité d'occurrence, nous avons dans l'ordre décroissant les événements (i) fréquent, (ii) probable, (iii) improbable et (iv) très improbable. Il en est de même pour l'impact du risque, nous distinguons les impacts (a) majeurs, (b) sérieux, (c) significants et (d) insignifiants. Les dénominations apportées à ces niveaux de catégories varient selon les auteurs mais l'idée générale reste la même. Partant de la définition du risque (section 2.1.1), la criticité de chaque événement aléatoire est calculée en utilisant l'équation 2.1 et placée sur la matrice. Les risques sont ensuite hiérarchisés en fonction du seuil de criticité défini. La figure 2.8 illustre l'utilisation d'une matrice de risque pour hiérarchiser des risques ( $R_1, \dots, R_7$ ).

Bien qu'elle soit facile d'utilisation, la matrice de risque ne prend pas en compte les dépendances entre les risques. Le principe de base de la matrice de risque est de considérer implicitement les risques comme indépendants, ce qui n'est pas toujours le cas dans la chaîne de transport intermodal.

- L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) : l'AMDEC est un outil d'évaluation des risques qui permet d'atténuer les défaillances potentielles des systèmes, processus, projets ou services (LONGARAY *et al.*, 2019). Il consiste à décomposer le système en sous-ensembles, à identifier les modes de défaillance pour chacun des sous-ensembles puis à déterminer la probabilité d'occurrence et l'intensité de l'impact de chaque mode de défaillance sur le système global. Il est très utilisé pour l'analyse des risques en raison de sa facilité de mise en œuvre.

Dans le transport intermodal, l'AMDEC permet d'identifier pour chaque événement aléatoire ses conséquences et ses effets sur chacune des phases de transport ainsi que sur la chaîne de transport globale. Par exemple, les auteurs dans (LONGARAY *et al.*, 2019) ont utilisé l'AMDEC dans l'optique d'améliorer le processus de déplacement des conteneurs vides aux entrepôts de stockage. J. P. P. VILKO *et al.* (2012) ont également déployé l'AMDEC dans le but d'évaluer les risques dans la chaîne de transport des marchandises. Les auteurs ont dans un premier temps cartographié l'ensemble des facteurs de risques perturbant la chaîne de transport multimodal. Ils ont ensuite mené des interviews avec les acteurs de la chaîne de transport pour déterminer la probabilité d'occurrences, les types d'impacts et la sévérité des impacts des facteurs de risques. La probabilité et l'impact du risque ont été évalués sur une échelle de 0, 1, 3 et 9, où 0 signifie une probabilité nulle et 9 une probabilité ou un impact très élevé. Le

		Catégories des impacts			
		Insignifiant	Signifiant	Sérieux	Majeur
Catégories des probabilité	Fréquent	R4			R2
	Probable		R5		
	Improbable	R1	R7		
	Très improbable	R6		R3	

Figure 2.8 – Matrice des risques

tableau 2.1 présente un exemple d'application de l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité à la chaîne de transport multimodal. La première colonne du tableau liste les facteurs de risques, la deuxième présente la probabilité d'occurrence pour chacun des facteurs de risques et le reste des colonnes donne la sévérité des impacts sur la chaîne de transport multimodal.

- Le processus d'analyse hiérarchique (PAH) : la figure 2.9 présente une structure hiérarchique des facteurs de risques d'une chaîne d'approvisionnement obtenue en appliquant le processus d'analyse hiérarchique (SHARMA *et al.*, 2021). Le PAH permet de construire des hiérarchies avec des rétroactions sur des paires d'éléments pour organiser et analyser la prise de décision. Elle est particulièrement utilisée lors de l'expression des préférences qualitatives pour la résolution des problèmes de prise de décision multicritère dans une hiérarchie d'attributs. Par exemple, T. WU *et al.* (2006) s'appuient sur le processus d'analyse hiérarchique pour évaluer l'impact de chaque facteur de risque dans l'optique de réduire les retards dans la chaîne d'approvisionnement. Les auteurs dans cet article utilisent le PAH pour prendre en compte une mesure subjective de la probabilité d'occurrence de chaque événement aléatoire et son importance dans la typologie des risques.

Même si le PAH est particulièrement utilisé pour l'analyse des risques, il présente un inconvénient majeur. Les comparaisons entre les paires d'éléments deviennent impossibles si le nombre d'éléments d'un niveau est supérieur à 7 (R. W. SAATY, 1987).

- Le Réseau Bayésien : il s'agit d'un outil probabiliste qui tient compte de l'incertitude pour prédire les résultats d'un modèle. Il est habituellement représenté sous forme d'un graphe orienté acyclique (HOSSAIN *et al.*, 2019). La figure 2.10 présente le modèle graphique d'un réseau bayésien avec trois événements aléatoires indépendants ( $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ ). Les équations 2.2 et 2.3 sont utilisées pour déterminer la probabilité associée à l'évènement  $E_3$ .

$$P(E_3|E_2, E_1) = P(E_3|E_2) \quad (2.2)$$



**Table 2.1** – Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité sur de la chaîne de transport intermodal (J. P. P. VILKO *et al.*, 2012)

Risk likelihood and effects	Likelihood	Time		Financial Quality		
		Delay	Disruption	Cost	Damage	Risk
<b>Supply risks</b>						
Hazardous materials	1	3	1	3	1	8
Stoppage with cargo on board	3	1	0	1	1	9
Lack of intermodal/multimodal equipment	0	1	0	1	0	0
Bottlenecks in the transportation routes	3	3	0	1	0	12
Capacity problems in railroad traffic	0	3	0	0	0	0
Problems with customs clearance	0	3	1	0	1	0
Employee strikes in ports	3	9	1	9	1	60
The permits of the transportation company	0	0	0	1	0	0
Oil spills	0	1	1	3	0	0
Bottlenecks in the Ro-Ro	0	1	0	0	0	0
<b>Operational Risk</b>						
Ship collision or sinking in the approach lane	0	1	0	1	0	0
Lack of skilled workers	1	3	0	0	0	3
The condition of cargo-handling equipment	1	1	0	0	3	4
Carelessness and a lack of motivation among the workforce	1	1	0	1	3	5
Interpretation problems with documents, contracts and permits	0	1	0	1	0	0
<b>Security Risks</b>						
Organized Crime	1	0	3	3	1	7
People-smuggling	1	1	0	1	0	2
Information systems	3	3	1	3	0	21
Drunken drivers	0	1	0	0	1	0
Infringement of traffic regulation	0	1	0	0	0	0
Outside interference	1	3	1	3	1	8
Spying and espionage	0	0	0	3	0	0
The application of the transported good	1	1	0	3	0	4
Invoice inspection in transit traffic	0	0	0	0	0	0
Terrorism	0	9	3	9	1	0
Energy supply	0	9	3	3	1	0
<b>Macro Risks</b>						
Financial Crisis	3	0	0	3	0	9
Finland's small and unattractive markets	3	1	0	1	0	6
Fierce competition in transportation sector	9	0	0	1	0	9
<b>Policy Risks</b>						
Russian customs	3	3	0	1	0	12
Railway operators' attitude towards free markets	1	0	0	0	0	0
<b>Environment Risks</b>						
Nuclear disaster in nearby plants	0	9	1	1	1	0
Oil catastrophe	0	1	0	1	0	0
Ice conditions in winter	9	3	0	1	0	36
Fire	3	3	3	3	9	54
Regional infectious diseases	1	3	1	1	0	5
Climate change	1	1	0	1	3	5
Natural forces (storm, floods,etc)	1	1	0	0	1	2
Long distances	1	1	0	3	0	4

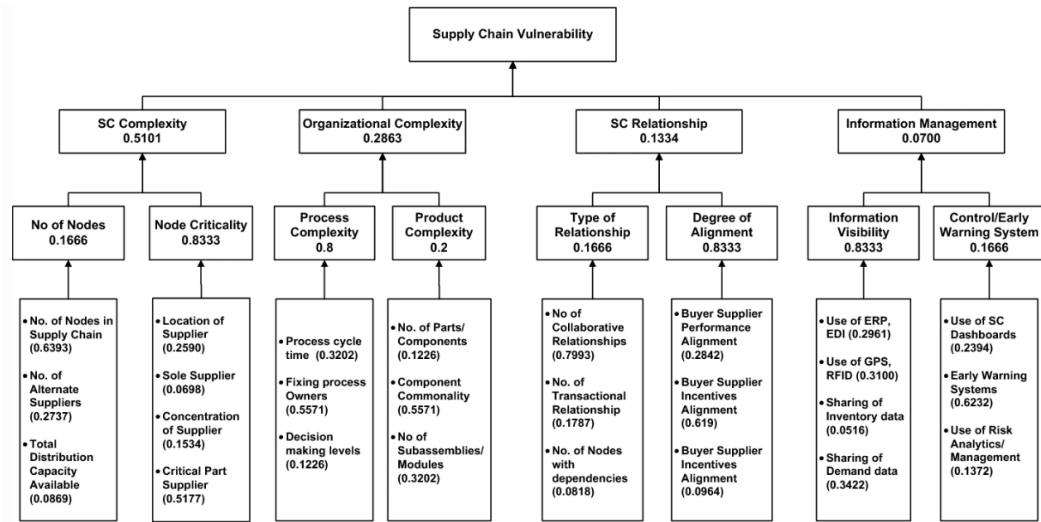


Figure 2.9 – Structure hiérarchique des facteurs de risques de la chaîne d’approvisionnement (SHARMA *et al.*, 2021)

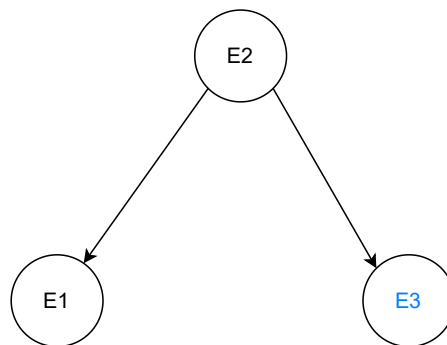


Figure 2.10 – Illustration graphique d’un réseau bayésien avec 3 variables

et

$$P(E_3|\bar{E}_2, E_1) = P(E_3|\bar{E}_2) \quad (2.3)$$

$P(E_1)$  : Probabilité l'évènement  $E_1$  se réalise

$P(E_2)$  : Probabilité associée à l'évènement  $E_2$  se réalise

$P(E_3)$  : Probabilité associée à l'évènement  $E_3$  se réalise

$P(E_3|E_2, E_1)$  : Probabilité que l'évènement  $E_3$  se réalise sachant que les évènements  $E_1$  et  $E_2$  se sont réalisés

$P(E_3|\bar{E}_2)$  : Probabilité que l'évènement  $E_3$  se réalise sachant l'évènement  $E_2$  ne s'est pas réalisé

Par exemple, BAKSH *et al.* (2018) utilisent les réseaux bayésiens pour établir les probabilités conditionnelles associées à chaque évènement redouté (collision, naufrage, échouage d'un porte-conteneur, etc) dans le transport maritime des marchandises.

- La simulation de Monte-Carlo : elle utilise des échantillons aléatoires répétés et une analyse statistique pour fournir des résultats (RAYCHAUDHURI, 2008). Elle permet d'estimer les résultats possibles d'un évènement incertain. Elles ont permis d'évaluer l'impact des risques dans de nombreux secteurs d'activité<sup>7</sup>. Grâce à sa simplicité d'utilisation et la possibilité de l'appliquer sur un grand éventail de problèmes<sup>8</sup> la simulation de Monte-Carlo est très adaptée pour l'évaluation des risques. Elle permet également de prédire un ensemble de résultats sur la base d'une plage de valeurs estimées par rapport à un ensemble de valeurs d'entrées fixes. Par exemple, SURYAWANSHI *et al.* (2021) utilisent la simulation de Monte-Carlo pour faire varier les paramètres de la chaîne d'approvisionnement (densité de la population, distribution des distances parcourues, nature du transport (standard, express), perte de qualité des produits transportés, etc) dans le but de quantifier leurs impacts sur la chaîne de transport.

Bien que la simulation de Monte-Carlo soit une méthode intéressante pour l'évaluation des risques, elle est purement quantitative et suppose donc la disponibilité des données quantitatives d'entrées et la capacité à formuler un modèle mathématique reliant des variables incertaines.

- L'inférence floue : l'inférence floue est un mécanisme de déduction mis en place à partir de la logique floue. La logique floue a été introduite par ZADEH (1965) pour s'extraire de la logique classique dite binaire dans laquelle toute déclaration est soit vraie soit fausse. La logique floue crée des degrés de véracité qui mesurent dans quel optique un objet donné est inclus dans un ensemble flou, les ensembles flous étant des variables linguistiques utilisées dans un langage humain (CHERKASSKY, 1998). Les méthodes basées sur de la logique floue sont intéressantes pour coder les connaissances expertes dans diverses applications.

Dans l'évaluation des risques dans la chaîne d'approvisionnement, l'inférence floue est généralement combinée avec d'autres méthodes d'évaluation des risques telle que l'AMDEC afin d'améliorer les performances de ces dernières (WAN *et al.*, 2019). Par exemple, pour évaluer la criticité des facteurs de risques dans la phase de manutention des conteneurs, ALYAMI *et al.* (2019) incorporent des réseaux bayésiens à l'AMDEC. Selon les auteurs, l'incorporation des réseaux bayésiens dans l'AMDEC permet d'améliorer la précision et la visibilité de cette dernière en simplifiant la description des informations sur les modes de défaillances.

- L'arbre des causes (ADC) : la méthode d'analyse par arbre des causes a été développée par les laboratoires de téléphonie Bell pour améliorer la fiabilité du système de lancement du missile « Minuteman » en 1962 (MATMAT, 2010). Un arbre des causes est composé d'un ensemble de nœuds et de liens hiérarchisés, probabilisés ou non. Les nœuds sont

7. IBM : <https://www.ibm.com/fr-fr/cloud/learn/monte-carlo-simulation>

8. Interstices : <https://interstices.info/la-simulation-de-monte-carlo>

les défaillances potentielles du système et les liens expriment les relations entre les différents modes de défaillances. Selon SHERWIN *et al.* (2016), les arbres de causes sont utiles pour analyser les différentes manières dont une défaillance particulière peut se produire.

Grâce à sa facilité de mise en œuvre l'ADC a été utilisé par plusieurs auteurs (LEI *et al.*, 2019 ; SHERWIN *et al.*, 2016) pour évaluer l'impact des événements aléatoires sur la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, SHERWIN *et al.* (2016) dans l'optique de réduire la probabilité de retards des flux de produits dans la chaîne d'approvisionnement proposent une méthode basée sur l'utilisation des arbres de causes. L'événement supérieur de l'arbre des causes représente la probabilité qu'un produit ne soit pas livré à temps en raison de défaillances des fournisseurs de biens et/ou de services au sein de la chaîne d'approvisionnement. Cet événement supérieur a été décomposé en événements intermédiaires sur la base de l'ensemble des événements précédemment identifiés. Avec pour objectif de modéliser et de quantifier les risques dans la chaîne d'approvisionnement, les auteurs dans (LEI *et al.*, 2019) utilisent un arbre des causes pour déterminer l'influence des interactions des acteurs de la chaîne d'approvisionnement sur les risques. La figure 2.11 présente un arbre des causes pour le risque d'accident lors d'un transport routier. Cet arbre des causes nous montre que les risques d'incendie dans le train ou d'explosion ou de terrorisme sont causés par une association d'un ensemble de défaillances de sous-systèmes (défaillance du système du train, défaillance du système d'alimentation, etc.) nommé catégorie de source du risque. Dans le niveau suivant, chaque défaillance appartenant au source de risque est également déclinable en facteurs de risques ( $y_i$ ).

Mis à part sa facilité d'utilisation et sa capacité à mettre en scénario les différents modes de défaillance, l'arbre des causes présente deux principales limites. C'est une méthode d'évaluation binaire, c'est-à-dire que les événements se produisent ou ne se produisent pas, il n'y a pas de stade intermédiaire et ADC ne permet pas une représentation chronologique des événements.

**Remarque :** l'arbre d'événements (YOU *et al.*, 2012) et le nœud de papillon (LABIB, 2021) sont des méthodes d'analyses de risques basées sur les mêmes principes que l'arbre des causes à quelques exceptions près. Plus de précisions sur ces méthodes sont disponibles dans les travaux de MAZOUNI (2008).

A cause de la complexité du processus de transport intermodal, les méthodes classiques ci-dessus ont très souvent du mal à elles seules à évaluer l'ensemble des risques. Dans l'optique d'améliorer leur efficacité, de nombreux auteurs tels que ALYAMI *et al.* (2019), LONGARAY *et al.* (2019), QAZI *et al.* (2020) et WAN *et al.* (2019) ont proposé des solutions d'évaluation des risques qui s'appuient sur plusieurs d'entre elles.

Par exemple, X. WANG *et al.* (2012) avec pour objectif de créer un indicateur agrégé du risque dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire proposent une méthode d'évaluation des risques utilisant à la fois le PAH et l'inférence floue. Les auteurs utilisent le PAH pour transformer les données qualitatives en données quantitatives et pour hiérarchiser les facteurs de risques en prenant en compte les risques de types biologiques, chimiques et physiques dans le calcul de leur indicateur agrégé. L'inférence floue est ensuite utilisée pour calculer la probabilité d'occurrence et la sévérité de l'impact de chaque risque.

QAZI *et al.* (2020), intègrent des «courbes d'indifférence d'utilité» dans la matrice de risque pour la prise en compte des dépendances entre les risques lors de l'évaluation. Le concept de matrice de risque basée sur des courbes d'indifférence permet de capturer l'attitude du risque et donc de déterminer ses dépendances. Des détails sur les courbes d'indifférence d'utilité sont disponibles dans les travaux de RUAN *et al.* (2015).

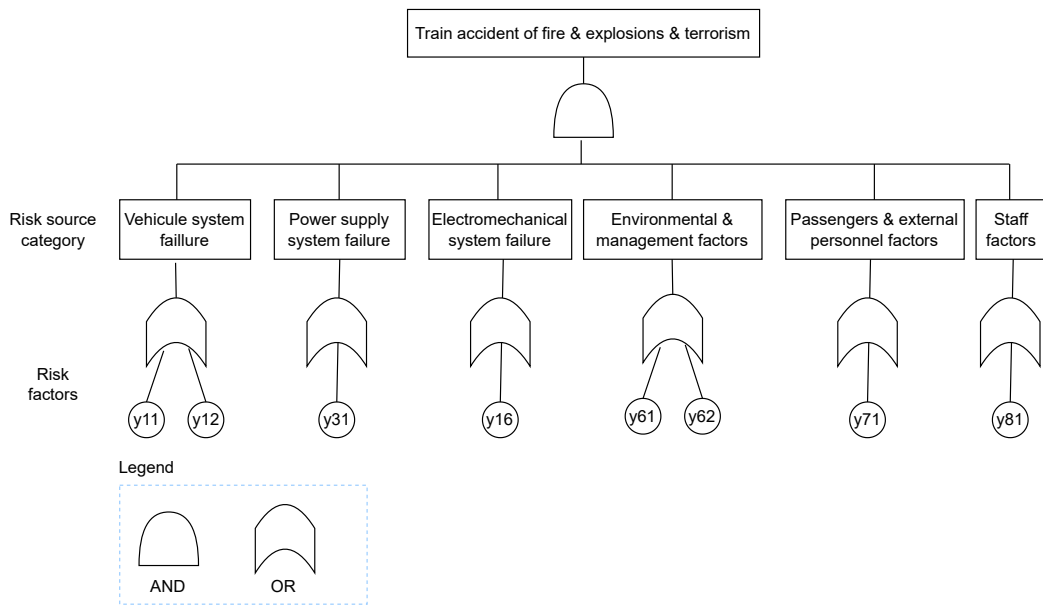


Figure 2.11 – Arbre des causes pour un risque d'accident (HE *et al.*, 2022).

Pour analyser les risques dans la phase maritime du transport intermodal, WAN *et al.* (2019), proposent une méthode d'évaluation des risques basée sur la fusion de l'AMDEC, de réseaux bayésiens et des règles d'inférence floue. L'ajout de ces méthodes à l'AMDEC permet à cette dernière de prendre en considération les relations de dépendance entre les facteurs de risques lors de la hiérarchisation.

### 2.2.4 Bilan des méthodes d'analyse des risques dans le transport intermodal

La revue de la littérature sur l'analyse des risques dans le transport intermodal montre que le sujet a suscité beaucoup d'intérêt au sein de la communauté des chercheurs. Effectivement de nombreuses méthodes ont été proposées pour l'identification et l'évaluation des risques dans les phases du processus de transport intermodal. Le tableau 2.2 présente un résumé des méthodes utilisées pour l'analyse des risques dans le transport intermodal. Certaines de ces méthodes telles que l'APR, l'AGR et le Hazid n'ont pas été appliquées aux phases du transport intermodal mais leur déploiement est tout à fait envisageable.

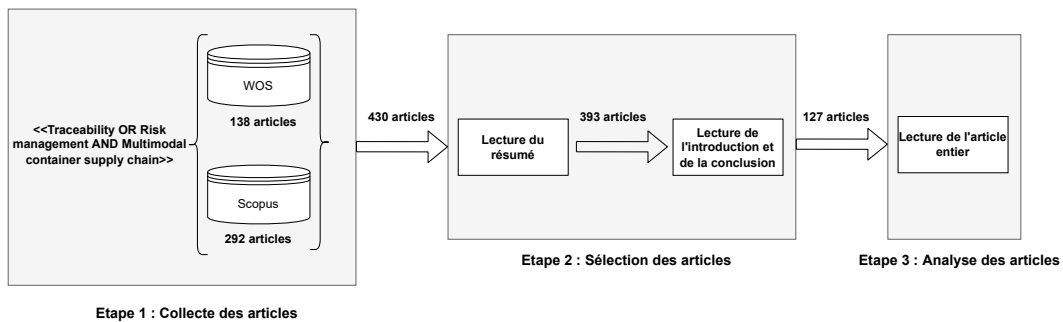
Cependant très peu d'auteurs se sont intéressés à l'analyse des risques sur l'ensemble de la chaîne de transport intermodal. Les travaux que nous avons analysés montrent que les approches utilisées se limitent à une des phases du processus de transport intermodal. A notre connaissance seuls J. P. P. VILKO *et al.* (2012) et J. VILKO *et al.* (2019) se sont intéressés à l'identification et l'évaluation des risques sur l'ensemble de la chaîne de transport intermodal.

## 2.3 Traitement du risque dans la chaîne de transport intermodal

Cette section présente les fonctionnalités, et les méthodes qui ont été proposées dans la littérature pour traiter les risques dans le transport intermodal. Elle provient en grande partie de l'article de revue que nous avons publié sous la référence suivante :

**Table 2.2** – Méthodes d'analyse des risques

Méthodes	Identification	Évaluation	Références
Interviews	✓		(J. VILKO <i>et al.</i> , 2019; J. P. P. VILKO <i>et al.</i> , 2012)
Revue de la littérature	✓		(HO <i>et al.</i> , 2015; TANG <i>et al.</i> , 2011)
Opinion d'expert	✓		(ALYAMI <i>et al.</i> , 2019)
APR	✓	✓	(DESROCHES <i>et al.</i> , 2016; SGHAIER <i>et al.</i> , 2015)
AGR	✓	✓	(DESROCHES <i>et al.</i> , 2016; SGHAIER <i>et al.</i> , 2015)
Hazid	✓		(DESROCHES <i>et al.</i> , 2016; SGHAIER <i>et al.</i> , 2015)
AMDEC	✓	✓	(LONGARAY <i>et al.</i> , 2019; WAN <i>et al.</i> , 2019)
Matrice des risques		✓	(DUIJM, 2015; QAZI <i>et al.</i> , 2020)
ADC		✓	(LEI <i>et al.</i> , 2019; SHERWIN <i>et al.</i> , 2016)
PAH	✓	✓	(T. SAATY <i>et al.</i> , 2011; SHARMA <i>et al.</i> , 2021)


**Figure 2.12** – Méthodologie de recherche.

Ouedraogo, C., Montarnal, A., Gourc, D. (2022). 'Multimodal Container Transportation Traceability and Supply Chain Risk Management : A Review of Methods and Solutions', *International Journal of Supply and Operations Management*, 9(2), pp. 212-234. doi : 10.22034/ijssom.2022.109139.2201.

### 2.3.1 Méthodologie de la recherche

De manière semblable à la méthodologie de recherche utilisée dans la sous-section 2.2, une revue systématique de la littérature sur le traitement des risques dans le transport intermodal a été réalisée dans cette sous-section pour recenser les fonctionnalités et les méthodes utilisées pour traiter les risques dans le transport intermodal. La méthodologie de recherche est présentée par la figure 2.12, elle est composée de trois étapes :

1. L'étape de collecte des articles nous a permis de collecter des articles significatifs pour notre analyse. Les mots-clés importants *traçabilité*, *gestion des risques*, *conteneur* et *chaîne d'approvisionnement multimodal* ont été identifiés pour façonner la requête

utilisée pour la collection des articles pertinents sur les bases de données scientifiques. La requête «Treacability OR Risk management AND multimodal container supply chain» a été appliquée sur deux bases de données bibliographiques (Web of Science et Scopus). Ensuite, la requête a été affinée avec «maritime» comme mot-clé pour exclure tous les travaux traitant du transport aérien. Cette requête a été effectuée le 28 octobre 2021 et a permis de récupérer 430 références bibliographiques

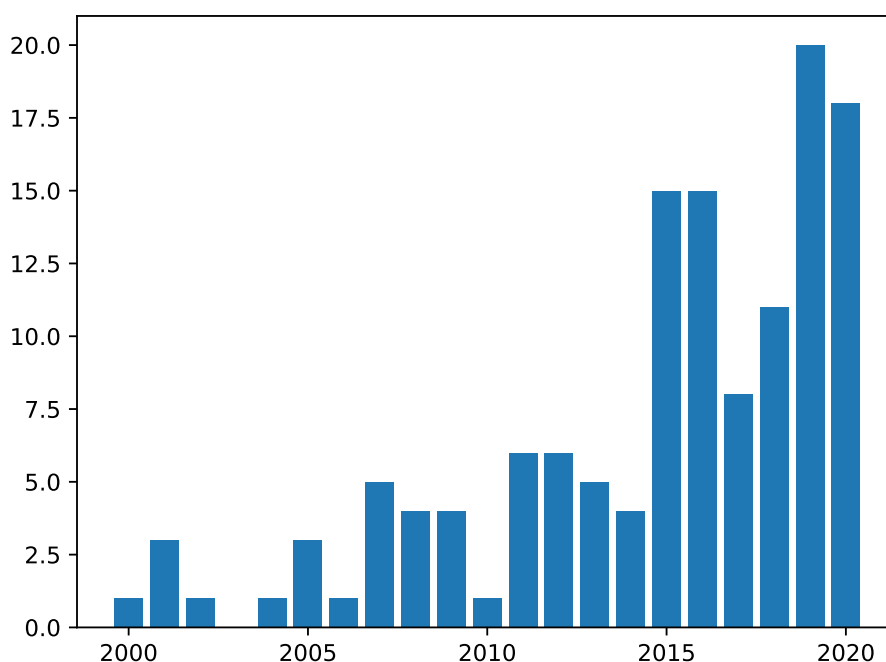
2. L'étape de sélection des articles a permis d'identifier les articles pertinents pour notre sujet de recherche. Un article est considéré comme pertinent lorsque le sujet qui y est adressé traite soit de la traçabilité des conteneurs, soit de la gestion des risques dans le transport intermodal. Tout d'abord, les articles en double ont été supprimés, de même que les chapitres de livres et les articles qui n'étaient pas rédigés en anglais. Par conséquent, seuls les articles de journaux et de conférences rédigés en anglais ont été considérés. Pour être certain de ne garder que les travaux pertinents pour l'analyse du texte intégral, le résumé, l'introduction et la conclusion de chaque article sélectionné ont été lus. Ce qui nous a permis d'exclure les travaux ne proposant pas de méthodes ou de solutions pour traiter les risques perturbant le transport intermodal. Lors de l'examen rapide (résumé, introduction et conclusion) des articles, nous sommes revenus sur certaines références bibliographiques intéressantes que nous avons décidé d'ajouter à notre collection. Au final, 127 articles ont été sélectionnés pour une analyse complète.
3. Dans l'étape de l'analyse des articles, une lecture du texte intégral de chaque article sélectionné a été effectuée. L'objectif de cette étape était d'identifier et de rassembler sous forme de fonctionnalités les solutions proposées par les auteurs pour traiter les risques dans le transport intermodal. La chaîne de transport intermodal peut être analysée à travers plusieurs thématiques (optimisation des routes, gestion des risques, résilience, etc). Notre analyse porte sur l'amélioration des performances de la chaîne de transport intermodal au travers d'une meilleure gestion des risques.  
L'analyse de la distribution des articles publiés entre 2000 et 2020, montre qu'il y a une croissance continue du nombre de travaux consacrés à la traçabilité et au traitement des risques dans la chaîne de transport intermodal, comme nous pouvons le constater sur la figure 2.13. Cette figure montre une évolution du nombre d'articles publiés à partir de 2011 avec l'utilisation intensive de la technologie **RFID** pour assurer la traçabilité et le suivi dans le transport des marchandises sensibles.

### **2.3.2 Les fonctionnalités pour le traitement des risques dans la chaîne de transport intermodal**

L'analyse des articles nous a permis d'identifier et de regrouper sous cinq fonctionnalités les solutions de traitement de risques proposées dans littérature. Le tableau 2.3 présente les fonctionnalités identifiées, les facteurs de risques qu'elles traitent, le nombre de travaux qui y sont associés ainsi que quelques références significatives. Les fonctionnalités recensées sont développées dans les sous-sections suivantes.

#### **La prédiction de la trajectoire du navire**

Contrairement au trafic routier et ferroviaire, il n'existe pas de topographie ou de base de données représentant le réseau sur lequel se déplacent les navires (URCIUOLI, 2018). Un trajet de navire peut être assimilé à un graphe où les nœuds représentent les ports et les liens sont les routes possibles entre un port A et un port F (figure 2.14). Heureusement, dans la phase maritime du transport intermodal, la majorité des compagnies maritimes utilisent des routes régulières. Cela facilite l'identification des routes grâce aux données de traçabilité. Il est possible de trouver tous les points de passage du navire depuis son port



**Figure 2.13** – Distribution des articles.

de départ jusqu'à son port d'arrivée. Les systèmes de prédiction de trajectoire des navires utilisent les données historiques (données de traçabilité) AIS des navires pour découvrir le comportement du navire, puis sa localisation (données de visibilité) est utilisée pour détecter la route optimale entre son origine et sa destination finale. A notre connaissance, le système le plus utilisé pour prédire le trajet des navires est le modèle de trafic et de découverte de connaissances proposé par PAROLAS (2016). Ce système entraîne automatiquement un modèle statistique à partir des données AIS afin d'extraire les trajectoires. La prédiction de la trajectoire des navires est une condition nécessaire pour la mise en œuvre d'une fonction de prédiction de l'ETA et permet également d'améliorer l'évaluation des risques en temps réel pendant le transport de conteneurs. En effet, la majorité des auteurs qui ont proposé des méthodes pour la prédiction de l'ETA des navires ont également proposé ou utilisé des méthodes pour prédire ou connaître la trajectoire des navires. De plus, la connaissance de la trajectoire du navire permet de prédire plus facilement les facteurs de risques qui perturbent le transport intermodal. ZHANG *et al.* (2020) soutiennent que la recherche sur la prédiction des destinations mondiales des navires serait d'une grande valeur pour l'industrie afin de prendre des décisions opportunes et de garantir un environnement de trafic maritime sûr et efficace. La connaissance du trajet d'un navire par un expéditeur peut lui permettre d'opter pour une police d'assurance plus élevée afin de partager le risque de dommages si le navire emprunte une trajectoire congestionnée (DORRI *et al.*, 2018) ou très fréquentée par des pirates. De nombreux auteurs (SAHIN *et al.*, 2020; TU *et al.*, 2020; WATTANAKUL *et al.*, 2018) dans le domaine de la gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement ont proposé des solutions pour prédire les trajectoires des navires sur la base des données de suivi des navires afin d'optimiser le coût et le temps de transport. Nous prenons pour exemple, TU *et al.* (2020) qui ont testé différentes approches d'apprentissage automatique afin de trouver le meilleur modèle pour une bonne prédiction de trajectoire du navire. Les auteurs dans



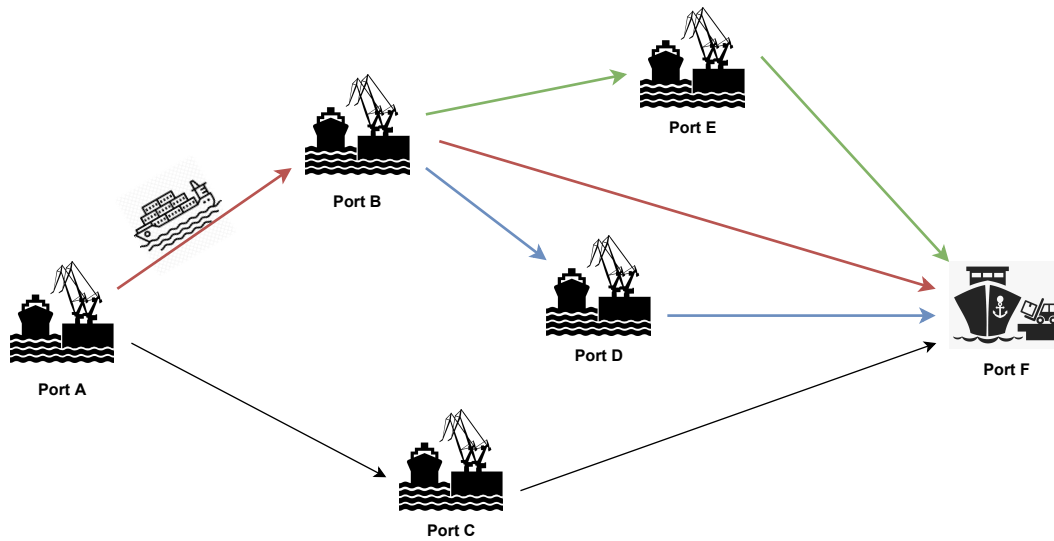


Figure 2.14 – Illustration de routes maritimes.

(ALESSANDRINI *et al.*, 2019) proposent un algorithme de recherche de chemin afin de trouver la route optimale entre deux emplacements géographiques tout en minimisant le coût du voyage.

### L'estimation de l'heure d'arrivée du navire

La prédiction de l'heure d'arrivée consiste à estimer l'heure d'arrivée du navire au port de destination en fonction de la trajectoire du navire, de sa vitesse, de la distance restant à parcourir et d'autres paramètres tels que la météo, etc.

La prédiction de l'ETA des navires est un sujet qui présente un grand intérêt pour la majorité des acteurs de la chaîne de transport. Une meilleure estimation de l'heure d'arrivée permet aux transporteurs et aux compagnies maritimes de garantir un niveau de service élevé à leurs clients. Elle permet aux autorités portuaires d'améliorer l'organisation dans les terminaux portuaires et ainsi de minimiser les temps de traitement au port et les coûts qui y sont associés. En outre, une meilleure estimation de l'ETA permet aux autorités douanières, aux transitaires et aux clients de mieux s'organiser pour le contrôle et la réception des conteneurs. Les enjeux sont importants autour de la prédiction de l'ETA. Cependant, l'ETA communiquée par les compagnies maritimes lors des expéditions est estimée par l'équipage du navire et saisie manuellement dans le système d'auto-identification (AIS). Cette ETA n'est pas toujours fiable en raison des erreurs humaines potentielles (erreurs de saisie, omissions...) et elle ne tient pas compte des facteurs de risques. Or, de nombreuses industries de transformation travaillent en flux tendu afin de limiter les coûts de stockage. Dans l'objectif de permettre au transport conteneurisé de suivre la cadence de ces entreprises, des auteurs dans la littérature ont proposé des méthodes qui sont principalement basées sur les données de traçabilité et l'intelligence artificielle pour une meilleure estimation de l'ETA des navires.

Plusieurs de ces travaux ont été identifiés lors de cette revue systématique de la littérature. Par exemple, ALESSANDRINI *et al.* (2019) ont utilisé les données de traçabilité et de visibilité des navires (données AIS et Long Range Identification and Tracking) pour proposer un algorithme d'optimisation permettant de trouver la trajectoire et la vitesse du navire afin de prédire son ETA. Ces auteurs ont utilisé les données de traçabilité des navires (données historiques AIS), le comportement des navires et les modèles de mouvement. Ils ont ensuite utilisé un algorithme d'optimisation pour trouver la trajectoire du navire en fonction du comportement extrait du navire, de son emplacement et de sa destination finale. La localisation du navire

est déterminée grâce aux données de visibilité (données AIS en temps réel). Pour calculer l'ETA, les auteurs ont utilisé la vitesse du navire et la distance jusqu'au prochain point de la trajectoire du navire. Par exemple MEIJER (2017) et PAROLAS (2016) analysent différentes techniques d'IA qui peuvent être utilisées dans la prédiction de l'ETA. Ces techniques prennent en entrée la traçabilité et la visibilité du navire, comme les données AIS, l'état de l'environnement de navigation et la trajectoire du navire. MEIJER (2017) testent différentes techniques d'IA (régression, réseau neuronal, machines à vecteurs de support...) pour la prédiction de l'ETA et choisissent la régression des K-plus proches voisins parce qu'elle était facile à utiliser et à comprendre dans leurs cas d'utilisation. Les auteurs dans ZHANG *et al.* (2020) proposent un modèle de prédiction d'ETA basé sur des données de traçabilité (141 millions d'enregistrements AIS) et un algorithme de forêt aléatoire. URUIOLI (2018) proposent un modèle conceptuel composé de six modules pour une meilleure prédiction de l'ETA :

- Identification de la trajectoire de navigation ;
- Collecte d'informations historiques : les données de traçabilité ;
- Collecte d'informations en temps réel : les données de visibilité, c'est-à-dire emplacement du navire, vitesse du navire, vitesse et direction du vent ;
- Fusionner avec les informations historiques : corrélérer les informations collectées sur les risques, les conditions météorologiques avec les performances du navire grâce aux données de visibilité ;
- Estimation des temps de retard : estimer le retard entre deux points d'intérêt et le temps d'attente au port ;
- Calculer l'ETA.

La fonctionnalité de prédiction de l'ETA a été adressée dans la littérature par plusieurs travaux. Les auteurs proposent des méthodes qui se basent sur les techniques d'IA et les données de traçabilité et de visibilité pour prédire l'heure d'arrivée des navires. Cependant les résultats de ces méthodes dépendent de l'estimation de la vitesse du navire, de la performance des algorithmes pour trouver ou prédire le chemin du navire et ne concerne que la phase maritime de la chaîne de transport.

### **La surveillance du transport et des facteurs de risques**

Afin de permettre aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement d'être plus réactifs face aux risques, les chercheurs et les professionnels du transport ont conçu des systèmes de surveillance basés sur différentes technologies et méthodes. Ces systèmes offrent une visibilité de bout en bout de la chaîne de transport intermodal.

Par exemple, AMADOR *et al.* (2009) proposent un système intégrant la technologie RFID pour la surveillance de la température dans une chaîne d'approvisionnement alimentaire. Ce système permet d'augmenter la performance des systèmes de surveillance de la température. Les auteurs dans (BUKKAPATNAM *et al.*, 2007) proposent un système intégrant un capteur de vibrations pour surveiller les conditions de fonctionnement d'un conteneur pendant le transbordement.

Les avancées technologiques ont rendu possible la mise en place de conteneurs intelligents. Plus de détails sur les outils de surveillance de la chaîne de transport sont disponibles dans la sous-section 1.3.2.

### **La réduction de l'empreinte carbone**

La pollution a des effets importants sur la santé et l'environnement. L'industrie du transport est en grande partie responsable de cette pollution. Il faut souligner que les porte-conteneurs sont les catégories de navires qui consomment le plus de carburant et sont donc les plus

grands pollueurs à cause de leur tonnage important et leur vitesse de voyage relativement élevée par rapport aux autres types de navires (KONTOVAS *et al.*, 2020; MATSUKURA *et al.*, 2010). De nombreux auteurs se sont intéressés à l'estimation du  $CO_2$  produit par le navire pendant le transport des conteneurs. Deux approches sont souvent utilisées pour estimer les émissions de  $CO_2$  pendant le transport (TAO *et al.*, 2021) : (1) la méthode basée sur l'énergie et (2) la méthode basée sur l'activité.

1. Dans la méthode basée sur l'énergie, les émissions de  $CO_2$  sont calculées en multipliant la consommation d'énergie par les facteurs d'émission de  $CO_2$  spécifiques au type énergie. Les émissions de  $CO_2$  spécifiques à l'énergie sont fournies par l'IMO<sup>9</sup>.
2. La méthode basée sur l'activité calcule les émissions de  $CO_2$  en additionnant le chiffre d'affaires multiplié au fret par type d'énergie, la consommation d'énergie par type d'énergie par le chiffre d'affaires et le facteur d'émission de  $CO_2$  spécifique à l'énergie.

Par exemple, COMINELLI *et al.* (2020), CULLINANE *et al.* (2016), DO *et al.* (2016), PINAKPANI *et al.* (2020), WONG *et al.* (2015) et Y. ZHAO *et al.* (2020) proposent des modèles mathématiques pour estimer l'impact de l'empreinte carbone des navires. Ces modèles se basent sur la distance à parcourir par le navire, sa vitesse et ses temps d'attente aux ports. Certains groupes d'auteurs ont également étudié la réduction de l'empreinte carbone lors du transport intermodal. Les auteurs dans (KONTOVAS *et al.*, 2020; LACK *et al.*, 2011) ont étudié l'impact de la réduction de la vitesse des navires et de la qualité du carburant sur l'empreinte carbone. HEINOLD *et al.* (2020) et MATSUKURA *et al.* (2010) ont conçu un modèle d'optimisation pour sélectionner les itinéraires qui minimisent les émissions du navire pendant le transport. DO *et al.* (2016) proposent un modèle basé sur la simulation d'événements discrets et d'un algorithme génétique afin de minimiser les émissions ( $CO_2$  et  $NO_x$ ) des moyens de transport (navire, camion) et des engins de manutention (chariot-élévateur, grue, etc.) dans les terminaux portuaires.

L'estimation et la réduction des émissions le long du transport intermodal est l'un des sujets abordés dans la littérature sur le traitement des risques de la chaîne d'approvisionnement afin de construire un système de transport durable (BEŠKOVNIK *et al.*, 2020). Une meilleure estimation des émissions permettrait aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement de consolider leur impact carbone et de déterminer quelle méthode ils peuvent choisir pour réduire leur empreinte carbone.

## L'organisation des terminaux portuaires

Les terminaux portuaires sont des points stratégiques pour le transport intermodal. En effet, la performance dans le transport dépend directement de l'efficacité des opérations effectuées sur les terminaux. L'optimisation des opérations sur les terminaux permettent de réduire le temps d'attente des navires lors du chargement et du déchargement des conteneurs. Elle permet également d'être plus précis sur l'estimation des ETA et donc d'augmenter la performance de l'ensemble de la chaîne de transport intermodal. La visibilité de bout en bout de la chaîne d'approvisionnement permet d'améliorer l'organisation des terminaux portuaires. MUNUZURI *et al.* (2020) soulignent trois avantages opérationnels que les données de traçabilité et de visibilité peuvent apporter aux terminaux :

- un système de traçabilité représente un avantage concurrentiel pour le terminal. Cela lui permet de gagner du trafic supplémentaire par rapport à ses concurrents ;
- le système de traçabilité permet également de réduire les coûts. A titre d'exemples, la gestion et le guidage des trains, la planification de la navigation, la programmation des grues et de la main d'œuvre ou la gestion des clients sont des tâches essentielles qui verront une réduction de la quantité de ressources à leur consacrer ;

---

9. IMO : International maritime organization

**Table 2.3** – Fonctionnalités pour la gestion des risques.

Fonctionnalités	Nb	Références	Facteurs de risques
Prédiction de la trajectoire du navire	13	(ALESSANDRINI <i>et al.</i> , 2019; DORRI <i>et al.</i> , 2018; GUO <i>et al.</i> , 2015; ONUT <i>et al.</i> , 2011; PALLOTTA <i>et al.</i> , 2013; SAHIN <i>et al.</i> , 2020; TU <i>et al.</i> , 2020; ZHANG <i>et al.</i> , 2020)	Mauvaise planification, temps d'attente long, etc.
Estimation de l'heure d'arrivée estimée du navire	6	(ALESSANDRINI <i>et al.</i> , 2019; MEIJER, 2017; PALLOTTA <i>et al.</i> , 2013; QIAO <i>et al.</i> , 2013; URCIUOLI, 2018)	Mauvaise planification, temps d'attente long, Piraterie, etc.
Surveillance du transport et des facteurs de risques	56	(AMADOR <i>et al.</i> , 2009; BOLLEN <i>et al.</i> , 2006; BREWER <i>et al.</i> , 1999; BUKKAPATNAM <i>et al.</i> , 2007; CARN, 2011; DRINKWATER <i>et al.</i> , 2018; LANIEL <i>et al.</i> , 2011; LIU <i>et al.</i> , 2016; MAHMOOD <i>et al.</i> , 2019)	Dégradation de la qualité de la marchandises, variation des conditions de transport (température, vibration, choc...), incendie, déviation de route, vols, etc.
Réduction de l'empreinte carbone	20	(BEŠKOVNIK <i>et al.</i> , 2020; HAASS <i>et al.</i> , 2015; HERVAS-PERALTA <i>et al.</i> , 2019; KONTOVAS <i>et al.</i> , 2020; YUAN <i>et al.</i> , 2016; ZHEN <i>et al.</i> , 2019)	Temps d'attente à quai, planification dans les terminaux portuaires.
Organisation des terminaux portuaires	32	(ANWAR, 2019; CHARGUI <i>et al.</i> , 2020; CHARLAMPOWICZ <i>et al.</i> , 2020; CHOU <i>et al.</i> , 2013; W. LI <i>et al.</i> , 2015; MUNUZURI <i>et al.</i> , 2020; SAHIN <i>et al.</i> , 2020)	Temps d'attente, manque d'équipement de transbordement, manque de mains d'œuvre qualifié.

— pour terminer, le système de traçabilité permet d'augmenter l'efficacité des systèmes de gestion au port. Plus précisément dans tous les aspects liés au séquençage des navires, à la programmation des moyens de transport terrestre et de manutention.

CHARGUI *et al.* (2020) et HERVAS-PERALTA *et al.* (2019) proposent des méthodes d'organisation des terminaux portuaires afin de réduire la congestion et l'empreinte carbone lors du transport intermodal. Par exemple, CHARGUI *et al.* (2020) proposent un modèle prédictif basé sur un réseau de neurones artificiels pour prédire le taux d'occupation de grue et de quai dans les opérations logistiques aux ports.

## 2.4 Modélisation et exploitation des connaissances du risque

Avec le développement des systèmes d'information et des réseaux sociaux, de plus en plus de données sont disponibles et la majorité d'entre elles sont porteuses de connaissances. La modélisation des connaissances permet de structurer, d'analyser et d'utiliser les connaissances contenues dans ces données pour améliorer la prise de décision (YUN *et al.*, 2021). La figure 2.15 présente le processus d'extraction des connaissances à partir de la donnée.

Sans pour autant prétendre à une exhaustivité, cette section détaille les éléments nécessaires pour la modélisation et l'exploitation des connaissances.



Figure 2.15 – Extraction de la connaissance.  
(MONTARNAL, 2015)

## 2.4.1 Définition de la connaissance

Le dictionnaire le Larousse<sup>10</sup> définit la connaissance comme «l'opération par laquelle l'esprit humain procède à l'analyse d'un objet, d'une réalité et en définit la nature». Elle est également définie par MONTARNAL (2015) comme la compréhension sur un sujet que l'on obtient par l'expérience ou l'étude, connue par une personne ou par les gens en général. La figure 2.16, présente les définitions de la connaissance proposées par MILTON (2008).

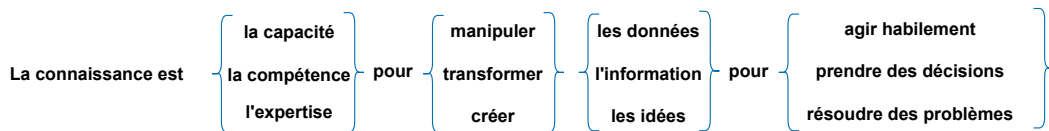


Figure 2.16 – Définition de la connaissance.  
(MILTON, 2008)

Dans la suite de ce manuscrit, nous considérons que la connaissance correspond à l'expertise requise pour gérer les risques dans le transport intermodal.

## 2.4.2 Les systèmes à base de connaissances pour le traitement des risques

Les systèmes à base de connaissances de manière générale visent à résoudre les problèmes complexes d'un domaine en s'appuyant sur une base de connaissances et sur un moteur d'inférence (mécanisme de raisonnement) (AYACHI, 2020). La base de connaissances est généralement divisée en deux ensembles : un ensemble de faits qui regroupent les connaissances relatives au domaine et un ensemble de règles à suivre pour résoudre le problème. Le moteur d'inférence va appliquer un enchaînement de déduction à partir de règles pour solutionner le problème. La figure 2.17 schématise un système à base de connaissances en présentant le lien entre ces deux composantes.

Les systèmes à base de connaissances pour le traitement des risques dans la chaîne de transport utilisent la connaissance du risque comme par exemple les dépendances entre les facteurs de risques, pour détecter et résoudre les perturbations qu'elles occasionnent sur la chaîne d'approvisionnement. Ces systèmes s'appuient sur un formalisme de représentation de connaissances et de raisonnements qui prennent en compte les relations entre les différentes connaissances relatives aux risques (BER *et al.*, 2006).

10. Dictionnaire le Larousse : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/connaissance/18273>

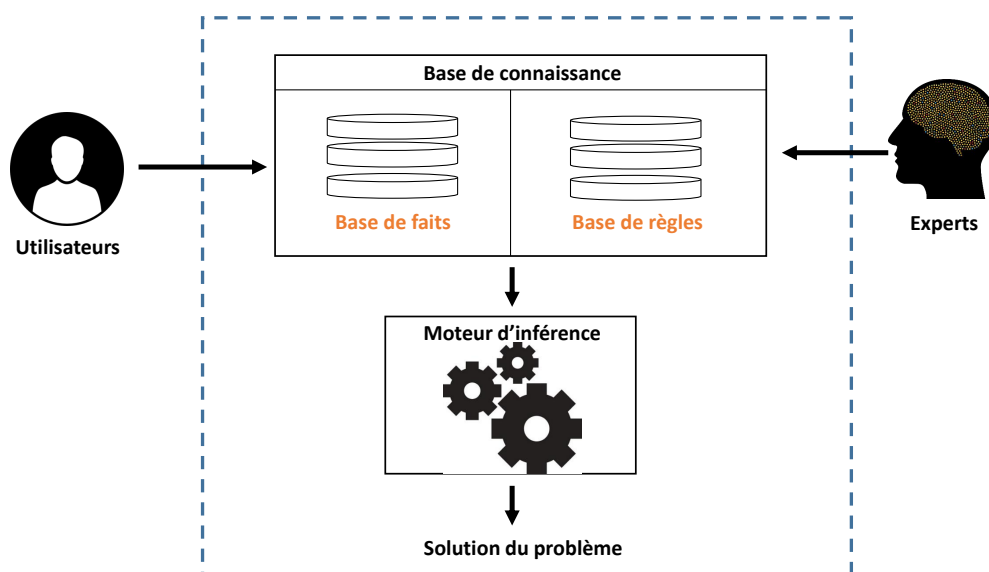


Figure 2.17 – Système à la base de connaissances.

### 2.4.3 Modélisation de la connaissance du risque

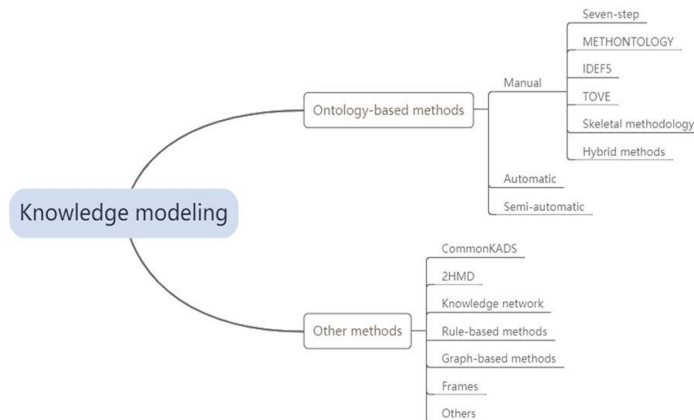
La modélisation des connaissances est une partie très importante de la construction des systèmes à base de connaissances pour l'aide à la décision. Cette représentation sert de référence pour la maîtrise des données et des différentes connaissances relatives à la résolution du problème. Le processus de modélisation des connaissances comprend principalement deux étapes : (1) la représentation des connaissances et (2) l'acquisition des connaissances (YUN *et al.*, 2021).

#### La représentation des connaissances

La recherche autour de la modélisation des connaissances a donné lieu à plusieurs propositions de méthodes et l'une des plus célèbres dans la littérature est l'ontologie (YUN *et al.*, 2021). Par exemple, les auteurs dans (GAYATHRI *et al.*, 2018) proposent une ontologie pour la représentation des connaissances dans la mise en place de leur système de planification de la trajectoire pour les robots autonomes. Les auteurs affirment que l'ontologie aide à présenter les connaissances sur l'environnement, les événements et les actions du robot. Selon GRUBER (1993), une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation. Récemment, AYACHI (2020) définit une ontologie comme une représentation abstraite et formalisée d'un domaine, faisant consensus sur la sémantique associée qui permet son partage, et qui peut être manipulée par des moteurs d'inférence appropriés.

Selon GUARINO (1998), il existe quatre principaux types d'ontologies, en fonction de leur application et de leurs domaines : (1) une ontologie de niveau supérieur, (2) une ontologie de domaine, (3) une ontologie de tâche, (4) une ontologie d'application.

1. L'ontologie de niveau supérieur décrit des concepts génériques non liés à une application ou à un domaine.
2. L'ontologie de domaine spécialise les concepts de l'ontologie supérieure pour obtenir un vocabulaire spécifique à un domaine.
3. L'ontologie de tâche spécialise les concepts de l'ontologie de niveau supérieur pour décrire les tâches ou les activités d'un domaine.



**Figure 2.18** – Méthodes de modélisation des connaissances d’après YUN *et al.* (2021).

4. L’ontologie d’application spécialise à la fois les niveaux de domaine et de tâche de l’ontologie supérieure.

Outre l’utilisation des ontologies pour la représentation des connaissances, nous retrouvons également d’autres méthodes de représentation de connaissances tels que les graphes de connaissances, les règles logiques, etc. Par exemple, PHAM *et al.* (2022) utilisent un graphe de connaissances pour spécifier la connexion entre différentes maladies. En reprenant les travaux de JOUVE (1992) et YUN *et al.* (2021) qui ont passé en revue la majorité des méthodes de modélisation des connaissances, nous classons les méthodes de modélisation des connaissances suivant deux grands groupes : les méthodes basées sur les ontologies et les autres méthodes qui incluent les graphes de connaissances, les méthodes basées sur les règles, CommonKADS<sup>11</sup>, etc. Le figure 2.18 présente les méthodes utilisées pour la modélisation des connaissances.

### L’acquisition des connaissances

En paraphrasant la problématique soulevée par MONTARNAL (2015) sur la gestion des connaissances dans les collaborations inter-organisationnelles, l’acquisition des connaissances consiste à répondre à la question suivante : *quelles sont les connaissances minimales et suffisantes à acquérir pour déduire les processus de gestion des risques ?* Pour répondre à cette question, il est nécessaire d’utiliser des méthodes afin de collecter la connaissance des experts du domaine. Comme le soutiennent O’HARA *et al.* (1997) l’acquisition de connaissances est un domaine de recherche majeur dans l’ingénierie des connaissances. L’objectif de ce domaine est de développer des méthodes et des outils pour rendre efficace le transfert des connaissances expertes vers une machine. C’est une étape complexe mais déterminante dans la mise en place d’un système à base de connaissances. Plusieurs points sont soulevés dans l’acquisition des connaissances (KHELFI, 2010) :

- il n’est pas aisé d’accéder à la connaissance experte et de la vulgariser parce qu’avec les années d’expériences, la compétence, la performance et la connaissance du domaine d’un expert s’installe et opère dans son inconscient ;

11. CommonKADS est une méthode de représentation des connaissances fondée sur une distinction entre les connaissances du domaine et les connaissances de raisonnement (CAULIER, 1999).

- l'expertise humaine s'exprime sous forme du «savoir comment» plus que la forme du «savoir quoi» ;
- l'expertise varie selon les conventions, les politiques et les procédés sociaux adoptés ;
- l'expertise évolue selon les nouvelles connaissances extraites, l'expert interrogé et selon aussi la méthode d'extraction utilisée.

Pour résumer, l'acquisition des connaissances dans la gestion des risques du transport intermodal consiste à recueillir et à traduire l'ensemble des connaissances suffisantes pour la compréhension du risque sous un formalisme adapté (celui choisi pour la représentation des connaissances). Les méthodes communément utilisées pour l'acquisition des connaissances sont les suivantes :

- les entretiens experts : ce sont des entretiens avec les experts d'un domaine dans l'optique de les interroger sur leurs idées et leurs ressenties afin d'extraire leurs connaissances et les réutiliser pour concevoir un système capable de résoudre les problèmes dudit domaine ;
- l'exploration de texte : c'est une méthode d'analyse de données permettant d'extraire de l'information et des connaissances dans des données textuelles non structurées. L'un des domaines de recherche qui s'intéresse à l'exploration de texte est le traitement automatique du langage naturel (NLP) que nous définissons dans la sous-section 2.5.1.

#### 2.4.4 Base de connaissance et exploitation de la connaissance du risque

Selon Q. JIANG *et al.* (2019), une base de connaissances consiste en un « ensemble de modèles de connaissances ». Le modèle de connaissances comprend la couche de représentation du problème et la couche des connaissances acquises pour la résolution du problème. Les bases de connaissances sont très utilisées pour la mise en place des systèmes experts pour l'aide à la décision pour la gestion des risques.

Par exemple dans l'objectif d'aider les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement, WATRÓBSKI (2019) propose un système à base de connaissances pour la sélection de fournisseurs moins polluants. L'auteur dans cet article propose une solution qui permet de capturer les connaissances en un seul endroit sous forme d'ontologie pour soutenir la sélection et l'évaluation des critères des fournisseurs.

(PALMER *et al.*, 2018) proposent un système à base de connaissances pour améliorer la gestion des risques dans la chaîne d'approvisionnement. Les auteurs ont démontré que l'utilisation d'une ontologie de référence (base de connaissances commune) permet d'améliorer la collaboration pour la gestion des risques.

Pour déterminer la propagation et les dépendances entre les différents facteurs de risques dans la chaîne d'approvisionnement, CAO *et al.* (2019) ont mis en place un système basé sur l'utilisation d'une base de connaissances et des réseaux bayésiens.

## 2.5 Détection des risques à travers l'extraction d'évènements

Le déploiement des systèmes de suivi des flux de transport ont rendu les données de traçabilité et de visibilité plus accessibles. En outre, avec l'utilisation intensive des systèmes d'information et des réseaux sociaux, de plus en plus de données porteuses de connaissances sur la chaîne d'approvisionnement sont à notre disposition. La disponibilité de ces données favorise la mise en place de systèmes utilisant des techniques d'apprentissage automatique pour gérer les risques dans le transport intermodal. Nous abordons dans cette section les travaux sur l'extraction d'évènements dans les données textuelles.



## 2.5.1 L'apprentissage automatique et le traitement automatique du langage naturel

### L'apprentissage automatique

Selon MITCHELL *et al.* (1986), l'apprentissage automatique peut être défini comme l'étude des algorithmes qui permettent aux programmes de s'améliorer automatiquement par l'expérience. Plus récemment USUGA CADAVID (2021) définit l'apprentissage automatique comme « un programme informatique capable d'apprendre de l'expérience pour effectuer une tâche spécifique ». Partant de ces définitions, nous retenons que l'apprentissage automatique est une composante de l'intelligence artificielle qui permet à un système d'apprendre et d'évoluer à partir des données.

Les approches d'apprentissage automatique comportent deux étapes (SAMUEL, 1960). La première étape qui est l'entraînement consiste à estimer un modèle statistique à partir de données. La seconde étape correspond à l'application du modèle précédemment déterminé sur de nouvelles données afin d'obtenir un résultat correspondant à la tâche souhaitée (classification, prédiction, etc). Suivant la nature des données d'entraînement, nous retrouvons principalement trois approches d'apprentissage : (i) apprentissage supervisé, (ii) l'apprentissage non supervisé et (iii) l'apprentissage par renforcement.

L'approche d'apprentissage par renforcement consiste à utiliser un agent interagissant avec l'environnement afin d'apprendre les actions à entreprendre à partir de ses expériences. L'agent d'apprentissage reçoit un signal de récompense en fonction de ses actions, ce qui modifie également l'état de l'environnement (MATSUO *et al.*, 2022). Les deux autres approches d'apprentissage automatique seront développées dans la sous-sections 2.5.2.

### L'apprentissage profond et le traitement automatique du langage naturel

L'apprentissage profond est un sous-domaine de l'apprentissage automatique qui utilise des modèles statistiques appelés réseaux de neurones artificiels (RNA) pour traiter les données de manière similaire au cerveau humain. Les RNA sont constitués de nœuds connectés entre eux, chaque nœud représentant une fonction d'activation spécifique. Les connexions entre les nœuds sont associées à des poids pour les signaux qui passent à travers elles (Y.-c. WU *et al.*, 2018). Chaque couche du RNA a une compréhension plus complexe des informations qu'elle reçoit que la couche précédente (BINI, 2018). Grâce à l'augmentation de la puissance de calcul des machines, il est maintenant possible de construire des RNA avec des profondeurs allant jusqu'à 100 couches, ce qui favorise l'utilisation de l'apprentissage profond pour résoudre des problèmes complexes (BINI, 2018).

Selon MOHAN (2015) le traitement automatique du langage naturel (NLP) est « un domaine de recherche et d'application qui explore la manière dont les ordinateurs peuvent être utilisés pour comprendre et manipuler des textes en langage naturel ». Les recherches menées dans le domaine du NLP visent à rassembler des connaissances sur la manière dont les êtres humains comprennent et utilisent le langage, pour développer *in fine* des outils et des techniques permettant aux systèmes informatisés de comprendre et de manipuler les langues naturelles. LIDDY (2001) définit le NLP comme « un ensemble de techniques informatiques, permettant d'analyser et de représenter des textes naturels à un ou plusieurs niveaux d'analyse linguistique, dans le but d'obtenir un traitement du langage semblable à celui d'un être humain pour accomplir une série de tâches ou d'applications ».

En nous inspirant de ces définitions, nous pouvons conclure que le traitement automatique du langage regroupe l'ensemble des techniques qui permettent aux programmes informatiques de comprendre et d'interpréter les données textuelles.

## 2.5.2 Extraction d'évènements à partir des données textuelles

L'augmentation des sources d'information fait que de nombreuses informations sur les évènements perturbant le flux de transport intermodal sont disponibles sous la forme de données textuelles non structurées et hétérogènes. Nous prenons pour exemple la congestion du Canal de Suez<sup>12</sup> dont l'information a grandement été diffusée dans les articles de presse et sur les réseaux sociaux. La figure 2.19 présente un exemple de données textuelles sur la congestion du canal de Suez lorsqu'elle s'est produite.

L'abondance des sources d'information et la disponibilité des données font que l'extraction d'information est un des axes de recherche du NLP les plus actifs actuellement (SAHNOUN *et al.*, 2020). L'extraction d'évènements qui a pour objectif de détecter les instances d'évènements dans les textes est une des tâches principales effectuées dans l'extraction d'information. Elle peut par exemple être utilisée pour peupler une base de connaissance automatiquement à partir de données textuelles (PISKORSKI *et al.*, 2007) ou pour détecter des évènements en temps réel dans des données textuelles (SAHNOUN *et al.*, 2020).

### Domaines connexes à l'extraction d'évènements

L'extraction d'évènements est étroitement liée à d'autres tâches du NLP telles que l'étiquetage morpho-syntaxique (POS tagging<sup>13</sup>), la reconnaissance d'entité nommée **NER**<sup>14</sup>, la mesure de la similarité sémantique, etc (WADDEN *et al.*, 2019).

L'étiquetage morpho-syntaxique ou encore **POS tagging** est un des outils du NLP pour améliorer la compréhension du langage naturel par les machines. Il permet de marquer une phrase ou des mots particuliers dans un paragraphe en examinant le contexte de la phrase ou des mots dans ce paragraphe (CHICHE *et al.*, 2022). En pratique, il consiste à étiqueter les mots d'un texte en indiquant sa nature (sujet, verbe, adjectif, etc). Le **POS tagging** est une tâche très souvent utilisée pour pré-traiter les textes dans l'optique d'améliorer les algorithmes d'extraction d'évènements. Par exemple, les auteurs dans (QUARESMA *et al.*, 2019) proposent un système d'extraction d'évènements incluant l'étiquetage morpho-syntaxique.

Le terme entité nommée (**NE**<sup>15</sup>) désigne «un nom propre servant de nom à quelque chose ou à quelqu'un» (PETASIS *et al.*, 2000). Par exemple dans MUC-6 (KRUPKA, 1995), les **NE** ont été classées en trois types d'étiquettes, chacune d'entre elles utilisant des attributs spécifiques pour un type particulier d'entité (GRISHMAN *et al.*, 1996) :

- **ENAMEX** : personne, organisation, lieu
- **TIMEX** : date, heure
- **NUMEX** : argent, pourcentage, quantité

La **NER** consiste à rechercher et à identifier des objets à partir de textes appartenant à des types sémantiques prédéfinis tels que personnes, lieux, organisation, etc (Jing Li *et al.*, 2022). Elle permet d'extraire des entités spécifiques à un domaine à partir d'un contenu textuel non structuré. Par exemple, la phrase suivante a été étiquetée par un système de reconnaissance d'entités nommées avec le standard **ENAMEX** «there is a huge congestion in <ENAMEX TYPE="LOCATION">Suez canal</ENAMEX>».

Quant à la mesure de similarité sémantique, elle est utilisée pour comparer les mots et les termes dans les textes en langage naturel (MIKOLOV *et al.*, 2013). Elle consiste à déterminer

12. Le 23 mars 2021, le navire porte-conteneur Ever Given en provenance d'Asie et qui se dirigeait vers le port de Rotterdam aux Pays-Bas, s'est échoué dans le Canal de Suez à cause l'étroitesse de ce dernier et de violents vents. Cet évènement a créé une congestion dans le trafic maritime mondial avec de nombreux impacts sur le commerce mondial.

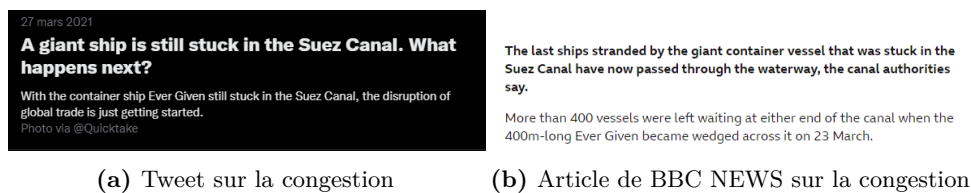
13. **POS tagging** : Part-of-speech tagging

14. **NER** : Named Entities Recognition

15. **NE** : Named Entity

automatiquement un score indiquant la similarité entre deux entités ou deux textes au niveau sémantique. La mesure de la similarité sémantique est souvent utilisée dans les systèmes de classification des textes. A titre d'exemple, nous citons les travaux de MIHALCEA *et al.* (2006). Les auteurs dans cet article proposent une méthode basée sur la mesure de la similarité sémantique dans l'objectif de classer des textes.

Après avoir présenté brièvement des domaines connexes à l'extraction d'évènements, nous allons développer dans les sous-sections suivantes les différentes approches pour la mise en place de l'activité d'extraction d'évènements. Ces sous-sections n'ont pas la prétention de présenter une revue de la littérature exhaustive sur l'extraction d'évènements mais plutôt de présenter les approches connues dans la littérature pour extraire les évènements à partir de données textuelles qui sont au nombre de trois : (1) l'approche basée sur le traitement des données, (2) l'approche basée sur la connaissance et (3) l'approche hybride.



**Figure 2.19** – Données textuelles (tweet<sup>16</sup> et article d'actualité<sup>17</sup>) sur la congestion du canal de Suez

## L'approche basée sur le traitement des données

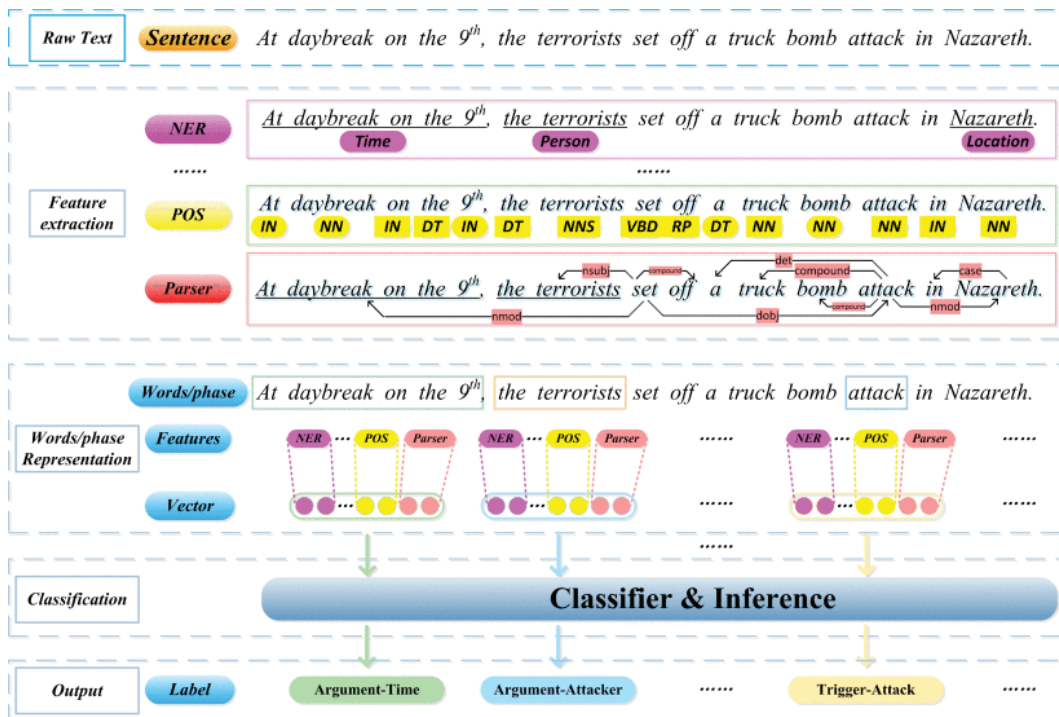
L'extraction d'évènements basée sur le traitement de données consiste à développer des modèles statistiques qui s'approchent des modèles linguistiques à l'aide d'un grand corpus de texte. Selon HOGENBOOM *et al.* (2016), les techniques d'extraction d'évènements basées sur le traitement des données ne se limitent pas seulement au raisonnement statistique de base (théorie de probabilité). Elles englobent également les approches quantitatives du traitement automatique des langues, telles que la modélisation probabiliste, la théorie de l'information et l'algèbre linéaire.

Cependant ces techniques qui visent à découvrir des faits étayés par des preuves statistiques peinent très souvent à prendre en compte la sémantique des données. Il est important de noter que les approches d'extraction d'évènements basées sur le traitement de données requièrent un grand nombre de données et reposent dans la majorité des cas sur des techniques d'apprentissage automatique. Les sous-sections ci-dessous développent les différentes techniques utilisées pour l'extraction d'évènements dans l'approche basée sur le traitement de données.

## L'approche d'extraction d'évènements basée sur l'apprentissage automatique

Dans l'approche d'extraction d'évènements basée sur l'apprentissage automatique, nous distinguons deux sous-approches : (1) l'approche apprentissage automatique supervisé et (2) l'approche d'apprentissage automatique non supervisé.

1. Approche apprentissage automatique supervisé : cette approche utilise des données d'entraînement annotées par des experts du domaine cible pour entraîner des modèles statistiques à reconnaître les évènements dans de nouvelles données textuelles. La figure 2.20 présente l'architecture pour l'extraction d'évènements en utilisant des techniques d'apprentissage automatique supervisé. Elle est composée de deux phases : (a) la phase de représentation vectorielle des données et (b) la phase de classification.



**Figure 2.20** – Architecture pour l'extraction d'évènements basée sur les techniques d'apprentissage automatique (XIANG *et al.*, 2019).

- La phase de représentation vectorielle des données : elle permet de transformer les textes d'entrée bruts en vecteur de données tout en conservant la sémantique de ce dernier. Elle correspond à «Words/phase representation» dans la figure 2.20.
- La phase de classification («Classification» dans la figure 2.20) consiste à utiliser un classifieur de type SVM<sup>18</sup> par exemple pour déterminer le type d'évènement qu'on cherche à identifier.

Ces deux phases dépendent de l'étape d'ingénierie des caractéristiques qui consiste à l'extraction des caractéristiques lexicales, syntaxiques et sémantiques du contenu d'entrée («Feature extraction» dans la figure 2.20). L'extraction des caractéristiques est obtenue via des outils de NLP (NER, POS tagging, etc). Chaque caractéristique obtenue grâce aux outils de NLP est représentée comme un vecteur binaire basé sur l'occurrence des mots dans un document (bag of words, ou "sac de mots"). L'ingénierie des caractéristiques consiste à «sélectionner les caractéristiques les plus importantes et à les intégrer dans un vecteur de haute dimension pour représenter chaque mot d'une phrase. Ensuite, les caractéristiques du texte ainsi que les étiquettes correspondantes des ensembles de données d'entraînement (données annotées par les experts) sont utilisées pour entraîner les classifieurs d'extraction d'évènements» (XIANG *et al.*, 2019). Des auteurs tels que (AHN, 2006 ; MIWA *et al.*, 2010) ont proposé des systèmes d'extraction d'évènements basés sur de l'apprentissage automatique supervisé. MIWA *et al.* (2010) proposent un système d'extraction d'évènements basé sur une ingénierie de caractéristique et une classification multi-classe en utilisant un SVM comme classifieur. Les auteurs dans (AHN, 2006) proposent une chaîne d'extraction d'évènements basée sur l'utilisation de NER pour identifier des types d'évènements et un classifieur nommé MegaM pour détecter les entités et leurs arguments.

18. SVM : Support Vector Machine

2. Approche d'apprentissage automatique non supervisé : contrairement aux approches d'apprentissage automatique supervisé, l'approche d'extraction d'évènements basée sur l'apprentissage automatique non supervisé n'utilise pas de données annotées. Au lieu de cela, cette approche se base sur la distribution des mots et le «clustering»<sup>19</sup> des instances d'évènements en fonction de leurs similarités (XIANG *et al.*, 2019).

Par exemple, les auteurs dans (CHOUIGUI *et al.*, 2018) proposent un système d'extraction d'évènements basé sur une approche non supervisée. Les auteurs utilisent la mesure TF-IDF pour extraire les mots clés dans le titre des articles de presse. La mesure TF-IDF permet d'évaluer statistiquement l'importance d'un terme contenu dans un document.

## L'approche basée sur l'apprentissage profond

L'ingénierie des caractéristiques est une étape déterminante pour la mise en place de classifieur pour l'extraction d'évènements. En effet, il assure l'extraction des caractéristiques textuelles permettant aux classifieurs de mieux interpréter les données. Il constitue le principal défi dans l'extraction d'évènements basée sur les techniques d'apprentissage automatique (XIANG *et al.*, 2019). Pour relever ce défi de nombreux auteurs tels que BJÖRNE *et al.* (2018), VIANI *et al.* (2017) et WADDEN *et al.* (2019) ont proposé des solutions basées sur l'apprentissage profond. L'apprentissage profond pour l'extraction d'évènements consiste à mettre en réseaux plusieurs couches de neurones artificiels qui prennent en entrée des *word embeddings* et déterminent si chaque *word embedding* est un évènement, il s'agit d'un problème de «multi-classification»<sup>20</sup>. Le *word embedding* est une représentation vectorielle d'un mot ou d'une phrase qui a été obtenue à partir d'un entraînement avec un grand corpus de données textuelles.

De nombreuses solutions basées sur l'apprentissage profond ont été proposées pour l'extraction d'évènements :

- CNN<sup>21</sup> : le réseau de neurone convolutif comme un réseau de neurone classique, se compose de neurones multicouches entièrement connectées. A la différence du réseau neuronal classique, les CNN à partir d'une intégration continue et généralisée des mots, sont capables d'apprendre les caractéristiques cachées du texte. Ils ont été proposés à l'origine pour traiter les problèmes dans le domaine de la vision par ordinateur, puis sont devenus populaires dans les tâches du NLP (Z. ZHAO *et al.*, 2016). Le principe d'utilisation des CNN pour l'extraction d'évènements est basé sur (i) le «*word embedding*» pour transformer le texte d'entrée en vecteurs et (ii) l'utilisation des CNN pour classer chaque vecteur qui correspond à un mot du texte d'entrée. Les CNN reçoivent en entrée une concaténation des *word embeddings* et la classification consiste à détecter les évènements et à identifier leur argument. A titre d'exemple, nous citons les travaux de BJÖRNE *et al.* (2018) qui proposent un CNN pour l'extraction d'évènements dans le domaine du biomédical.
- RNN<sup>22</sup> : l'extraction d'évènements basée sur CNN a du mal à capturer les relations contextuelles entre les différents mots voisins et donc peine à exploiter les phrases entières pour identifier les évènements et leur argument. Pour pallier ce problème, les réseaux de neurones récurrents ont été proposés. Le RNN est une série de neurones connectés qui admet l'entrée séquentielle des *word embeddings* en lieu et place d'une concaténation comme dans le cas du CNN. La structure du RNN permet de capturer la dépendance entre deux mots voisins (XIANG *et al.*, 2019). Par exemple, les auteurs dans (VIANI *et al.*, 2017) ont exploré l'utilisation des RNN pour l'extraction d'évènements à

---

19. Clustering : Regroupement

20. La multi-classification est une tâche d'apprentissage automatique qui consiste à prédire plusieurs classes pour une observation donnée

21. CNN : Convolutional Neural Network

22. RNN : Recurrent Neural Network

partir de rapports médicaux. L'architecture de l'approche proposée par ces auteurs est composée de deux phases : (i) une couche d'incorporation des mots, qui transforme chaque mot grâce au *word embedding* en un vecteur à valeur réelle, et (ii) une couche RNN, qui produit une classe prédite pour chaque mot.

- Le transformer : les transformers sont conçus pour traiter des données d'entrées séquentielles, telles que le langage naturel, en s'appuyant sur l'idée centrale du mécanisme d'attention qui imite l'attention humaine et fournit un contexte pour toute position dans la séquence d'entrée. Le transformer a deux composants clés : (i) l'encodeur et (ii) le décodeur comme présenté sur la figure 2.21.
  - Encodeur : l'encodeur prend des mots simultanément et génère un *word embedding* pour chacun des mots. Ces *word embeddings* sont des vecteurs qui encapsulent le sens des mots. Les mots similaires ont des nombres plus proches dans leurs vecteurs.
  - Décodeur : Comme son nom l'indique, le décodeur effectue une tâche inverse à celle de l'encodeur. Il prend les vecteurs d'*embeddings* provenant de l'encodeur et génère les mots correspondants.

Plus d'informations sur les transformers et le mécanisme d'attention sont disponibles dans (VASWANI *et al.*, 2017). De nombreux transformers ont été proposés pour les tâches de NLP dont le plus connu est celui proposé par Google en 2018, BERT<sup>23</sup>.

BERT est une pile de plusieurs encodeurs. La version la plus courante est composée de 12 encodeurs. Il existe une version plus grande dite «Large» qui est constituée de 24 encodeurs plus performante mais qui nécessite plus de ressources machine. Le modèle classique de BERT a 512 entrées qui correspondent chacune à un token. Un token étant tout simplement un mot du texte.

Techopedia<sup>24</sup> définit BERT comme «une stratégie d'apprentissage profond pour le NLP qui aide les programmes d'intelligence artificielle à comprendre le contexte des mots ambigus dans le texte». Il permet de créer des représentations bidirectionnelles profondes à partir de textes non étiquetés en conditionnant conjointement les contextes gauche et droit dans toutes les couches (DEVLIN *et al.*, 2019).

L'utilisation de BERT permet de prédire correctement la signification d'un mot en traitant le texte simultanément dans les directions gauche-droite et droite-gauche. Il est largement utilisé pour la classification des textes. Par exemple, WADDEN *et al.* (2019) proposent dans leurs travaux, une comparaison des approches d'extraction d'information (reconnaissance d'entités nommées, extraction de relations et extraction d'évènements) basées sur de l'apprentissage profond sur quatre ensembles de données textuelles provenant de divers domaines. Les auteurs montrent que BERT est le plus performant pour capturer les relations entre les entités dans la même phrase ou dans des phrases adjacentes.

## L'approche basée sur la connaissance

Selon HOGENBOOM *et al.* (2016), l'approche basée sur la connaissance pour l'extraction d'évènements utilise très souvent des modèles qui expriment des règles représentant les connaissances expertes sur un domaine. Le modèle peut être construit sur des textes bruts ou des textes annotés grâce à des techniques comme le POS tagging. Elle est intrinsèquement basée sur des connaissances linguistiques et lexicographiques, ainsi que sur l'expertise humaine concernant les évènements à extraire et le contenu du texte à traiter. Cette approche consiste à construire dans un premier temps des modèles d'évènements spécifiques à un domaine, puis à effectuer la correspondance entre les modèles et d'autres contenus textuels pour extraire les évènements (XIANG *et al.*, 2019). Selon SAHNOUN *et al.* (2020), l'intervention des experts

23. BERT : Bidirectional Encoder Representations from Transformers

24. Techopedia : <https://www.techopedia.com/definition>

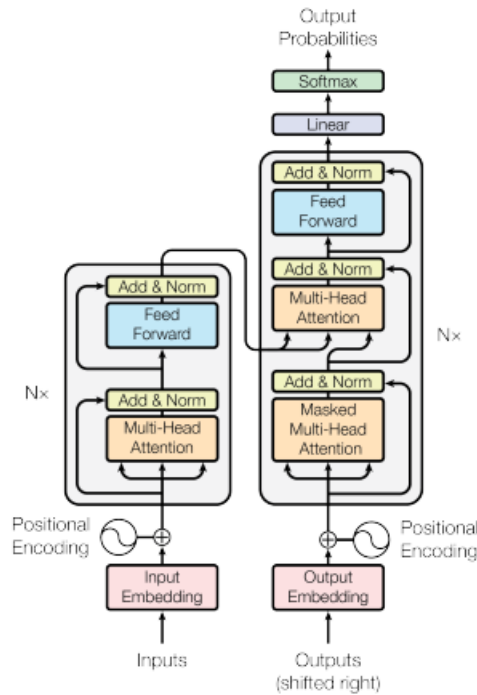


Figure 2.21 – Architecture des Transformers (VASWANI *et al.*, 2017).

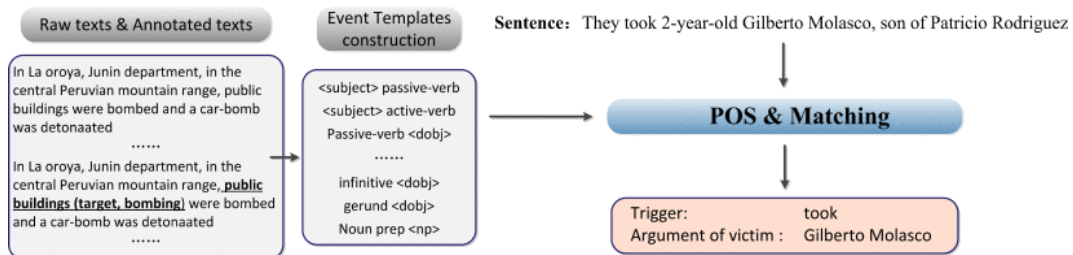


Figure 2.22 – Modèle d'extraction d'événements basé sur l'utilisation de la connaissance (XIANG *et al.*, 2019).

permet de remédier aux problèmes des méthodes statistiques concernant le sens du texte (ingénierie des caractéristiques).

Par exemple, RILOFF (1993) propose un système appelé AutoSlog basé sur de la connaissance experte pour l'extraction des événements. Ce système s'appuie sur un dictionnaire de concepts spécifique à un domaine et un cadre d'analyse avec des emplacements prédéfinis pour chaque élément d'information à extraire.

L'approche d'extraction d'événements basée sur la connaissance est très efficace pour saisir le sens lexical et syntaxique des données textuelles, cependant elle nécessite une bonne connaissance du domaine pour la mise en place des modèles d'extraction. La figure 2.22 présente un modèle d'extraction d'événements basé sur de la connaissance.

## L'approche hybride

Pour remédier aux problèmes relevés dans les deux précédentes approches, des auteurs tels que PISKORSKI *et al.* (2007) et SAHNOUN *et al.* (2020) ont proposé une approche hybride pour l'extraction d'évènements. Cette approche concilie l'approche basée sur le traitement des données et l'approche basée sur la connaissance.

Dans l'approche hybride d'extraction d'évènements, la quantité de données requises augmente par rapport à l'approche basée sur la connaissance mais reste moindre comparée à celle axée purement sur le traitement des données. Cependant la complexité de mise en place de l'approche hybride est généralement élevée par rapport à l'approche basée purement sur la connaissance, en raison de la combinaison de plusieurs techniques (HOGENBOOM *et al.*, 2016).

Par exemple SAHNOUN *et al.* (2020) avec pour objectif de réduire l'intervention humaine dans l'extraction d'évènements, proposent un système d'extraction hybride sur deux phases. La première phase modélise les évènements par une ontologie puis propose des règles métiers et la deuxième phase utilise une NER et un raisonnement automatique avec les règles métiers pour la détection des évènements.

PISKORSKI *et al.* (2007) avec pour objectif d'alimenter une base de connaissances sur les incidents violents, proposent un système d'extraction d'évènements automatique «Nexus» basé sur un mélange de techniques d'apprentissage automatique et de techniques basées sur la connaissance. «Nexus» extrait les faits liés à la sécurité à partir d'articles de presse. Ce système est composé de trois modules : (i) le module EMM qui récupère les articles de presse, (ii) ensuite un deuxième module qui pré-traite des textes pour les rendre plus abstraits. Il implique l'utilisation d'un NER et d'un algorithme de clustering pour regrouper les entités en cluster. (iii) Enfin le dernier module applique un ensemble de règles métiers pour extraire les évènements et identifier les arguments.

## Bilan des approches d'extraction d'évènements

L'analyse des solutions utilisées pour l'extraction des évènements fait ressortir trois approches :

1. Approche basée sur la donnée : elle consiste à entraîner un modèle statistique sur un ensemble de données annotées ou non pour reconnaître la distribution des mots et les retrouver dans de nouvelles données. Cette approche nécessite l'utilisation d'un grand corpus de données d'entraînement pour être performante.
2. Approche basée sur la connaissance : elle consiste à mettre en place des règles spécifiques pour reconnaître des mots et des phrases. Contrairement à la première approche, cette approche ne nécessite pas un grand corpus de données mais requiert une expertise pointilleuse sur le domaine.
3. Approche Hybride : cette approche utilise conjointement les deux précédentes approches pour l'extraction d'évènements. Cette approche est intéressante parce qu'elle permet d'obtenir de bonnes performances lors de l'extraction tout en utilisant moins de données que dans l'approche basée sur la donnée et moins d'expertise que l'approche purement basée sur de la connaissance.

Lorsqu'on dispose de connaissances déjà formées, l'extraction d'évènements basée sur une approche hybride peut être une solution intéressante pour s'appuyer sur ces connaissances et les enrichir avec une approche basée sur les données.



## 2.6 Bilan de l'état de l'art et positionnement de nos travaux

Nous avons exploré dans ce chapitre la revue de littérature autour de notre problématique de recherche : *Comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur les délais d'acheminement des marchandises en transport conteneurisé dans un contexte intermodal ?*. Pour ce faire nous avons décliné notre état de l'art suivant trois axes :

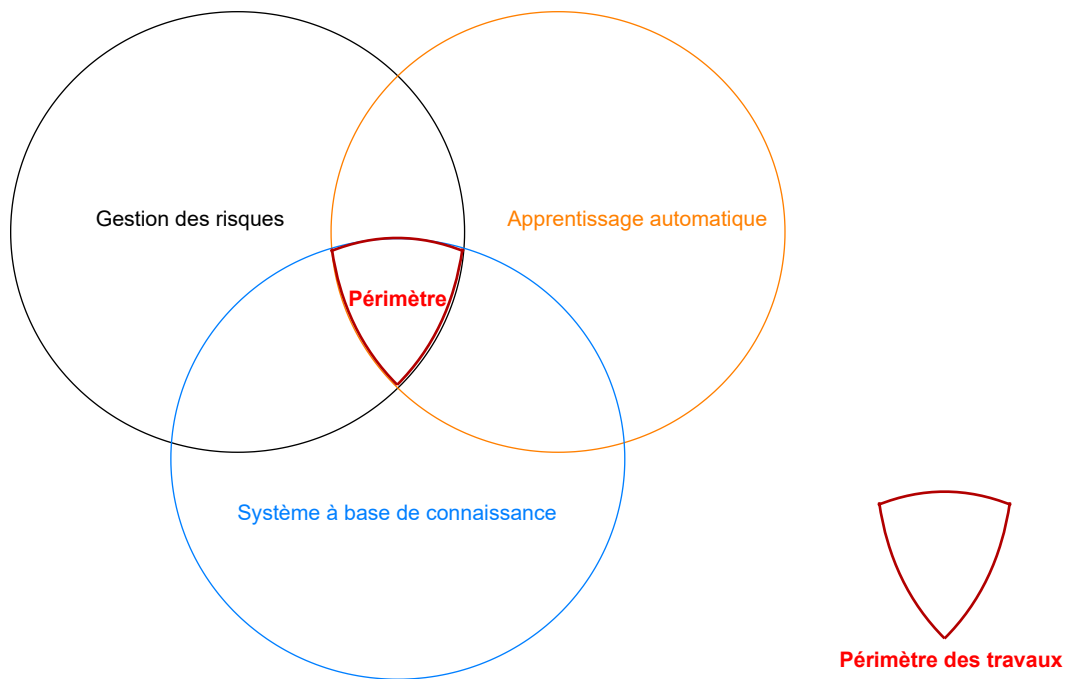
1. L'état de l'art sur l'analyse et le traitement des risques montre que de nombreuses solutions et méthodes ont été utilisées pour identifier et évaluer les risques impactant le processus de transport intermodal (table 2.2). Les techniques pour analyser les risques n'ont cessé d'évoluer au fil des années en incorporant des techniques telles que la logique floue ou les réseaux bayésiens pour améliorer les techniques d'analyse traditionnelles (AMDEC, ADC, etc). L'analyse des travaux sur le traitement des risques dans le transport intermodal montre que de nombreuses solutions ont été proposées pour traiter les risques lors du transit des marchandises. Nous avons présenté ces solutions sous forme de fonctionnalités qu'elles offrent aux acteurs de la chaîne de transport : (i) *prédiction de la trajectoire des navires*, (ii) *Estimation de l'heure d'arrivée du navire*, (iii) *Surveillance du transport et détection des facteurs de risques*, (iv) *Réduction de l'empreinte carbone* et (v) *organisation des terminaux portuaires*. Malgré la disponibilité des informations de traçabilité et de visibilité temps réel peu de travaux intègrent ces données dans les solutions qu'ils proposent. Seulement quelques travaux proposent l'intégration des données de traçabilité des bateaux pour la prédiction de l'ETA des navires (table 2.3) et celle sur la visibilité pour la détection des événements aléatoires dans la chaîne du froid<sup>25</sup>.

Nous constatons à travers l'analyse des travaux sur ce premier axe que les systèmes de gestion des risques dans la chaîne de transport intermodal présentent des limites. Il faut souligner qu'à notre connaissance il n'existe pas de solution de détection des risques qui utilise simultanément les données de traçabilité et de visibilité internes et externes des conteneurs pour traiter en temps réel les risques qui perturbent la chaîne de transport intermodal.

2. L'état de l'art sur la modélisation et l'exploitation des connaissances nous a permis d'identifier les étapes nécessaires pour la modélisation des connaissances du risque dans le transport intermodal. Il introduit également le système à base de connaissances pour la gestion des risques, qui modélise les connaissances d'un domaine et les réutilise pour gérer les risques.
3. L'état de l'art sur la détection des risques à travers l'extraction d'événements nous a permis de recenser les différentes approches utilisées dans la littérature pour l'extraction des événements dans les données textuelles. Les systèmes basés sur l'utilisation conjointe des algorithmes d'apprentissage automatique et du NLP sont utilisés pour l'extraction de connaissances, l'identification et la détection des risques en temps réel dans la chaîne d'approvisionnement.

Cet état de l'art nous a permis d'identifier les concepts que nous devons modéliser et acquérir pour pouvoir répondre à notre première question de recherche : *Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ?* Cette représentation doit servir de référentiel afin de maîtriser les données et les différentes connaissances portant sur la gestion des risques dans le transport intermodal. Pour ce faire nous allons proposer dans le chapitre

25. La chaîne du froid : la chaîne d'approvisionnement des produits sensibles à la variation de température



**Figure 2.23** – Positionnement des travaux de recherche

3 une représentation des connaissances dans le transport intermodal. Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée pour la modélisation des connaissances ainsi que les méthodes d'acquisition de connaissances. Il se trouve à l'intersection de la gestion des risques et des systèmes à base de connaissances

A partir de l'analyse des travaux et des approches recensées dans le troisième axe de ce chapitre, nous présentons ensuite dans le chapitre 4 un système de détection temps réel des risques dans le transport intermodal reposant sur une approche hybride d'extraction d'évènements. Ce chapitre apporte une réponse à notre deuxième question de recherche : *Comment détecter les évènements aléatoires (aléas) qui surviennent sur la chaîne de transport grâce aux données de traçabilité et de visibilité recueillies en temps réel?* Enfin, le chapitre 5 présente un cas d'application du système de détection temps réel des risques.

Au vu du constat qui a été établi dans les paragraphes ci-dessus, nos travaux de recherche se trouvent à l'intersection de la gestion des risques dans le transport intermodal, des systèmes à base de connaissances et des systèmes basés sur l'apprentissage automatique. La figure 2.23 illustre notre positionnement et présente le périmètre de nos travaux de recherche.



# 3

## Modélisation des risques dans le transport intermodal

Introduction . . . . .	69
3.1 Les principes pour la mise en place d'une ontologie . . . . .	70
3.1.1 Les composants d'une ontologie . . . . .	71
3.1.2 Méthodologie pour la mise en place d'une ontologie . . . . .	71
3.2 Acquisition des connaissances . . . . .	76
3.2.1 La revue de la littérature . . . . .	77
3.2.2 Les interviews . . . . .	79
3.2.3 Le questionnaire . . . . .	85
3.2.4 Bilan et limites des méthodes d'acquisition de la connaissance . . . . .	87
3.3 Spécification et conceptualisation des connaissances dans le transport intermodal . . . . .	89
3.3.1 Spécification de l'ontologie . . . . .	89
3.3.2 Conceptualisation de l'ontologie . . . . .	90
3.4 Formalisation des connaissances dans le transport intermodal . . . . .	97
3.4.1 Formalisation des connaissances sur le processus de transport intermodal . . . . .	97
3.4.2 Formalisation des connaissances sur les risques dans le transport intermodal . . . . .	97
3.4.3 Modèle de connaissances global . . . . .	97
3.5 Implémentation et population de l'ontologie . . . . .	98
3.5.1 Implémentation de l'ontologie . . . . .	99
3.5.2 Population de l'ontologie . . . . .	101
3.5.3 Cas d'illustration . . . . .	102
Conclusion . . . . .	108

### Introduction

Ce chapitre a pour objectif de répondre à notre première question de recherche : Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ? Nous rappelons que nous avons défini la connaissance du risque dans le transport intermodal dans le chapitre 2 comme l'expertise nécessaire pour identifier, évaluer et traiter les risques. Elle est représentée sous forme d'une ontologie de domaine et présentée sous le formalisme graphique UML. Une ontologie étant définie comme une spécification explicite d'une conceptualisation, l'ontologie de domaine s'attache à décrire le vocabulaire relatif à un domaine particulier. La structure de ce chapitre est présentée par la figure 3.1.

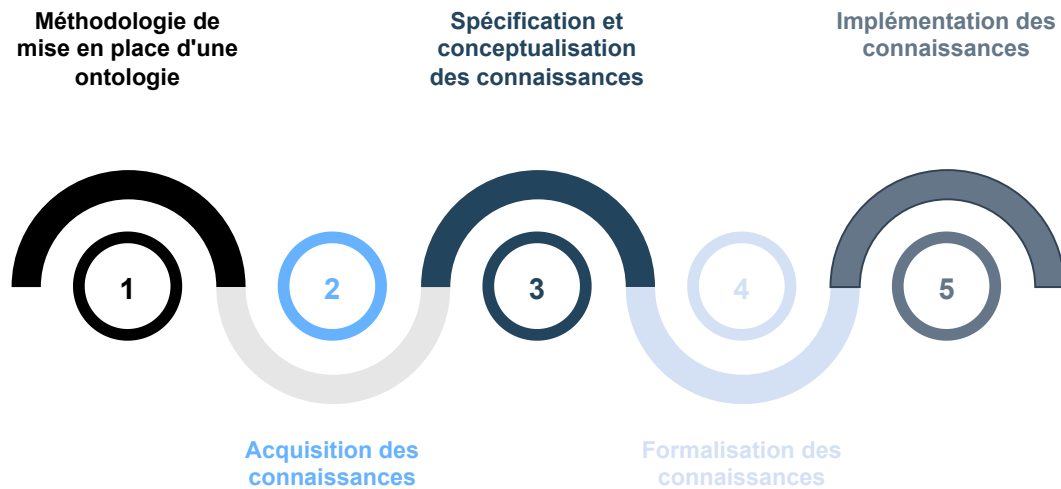


Figure 3.1 – Structure du chapitre.

La section 3.1 présente la méthodologie pour la mise en place d'une ontologie de domaine.

Dans la section 3.2 de ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes utilisées pour acquérir la connaissance nécessaire afin de spécifier et de conceptualiser notre ontologie de domaine.

Les sections 3.3 et 3.4 présentent la première contribution de nos travaux de recherche. Nous proposons dans cette partie une ontologie de domaine sous la forme d'un diagramme de classes UML permettant de modéliser et de réutiliser la connaissance experte sur les risques dans le transport intermodal. La section 3.3 présente la spécification et la conceptualisation de l'ontologie. Dans cette section, nous nous inspirons de travaux issus de la littérature pour cartographier l'ensemble des facteurs de risques qui peuvent impacter négativement la chaîne de transport intermodal. En partant des cartographies des risques identifiées dans la littérature, nous ajoutons et adaptons certains éléments et termes pour qu'ils coïncident avec notre définition du risque. En nous inspirant des travaux de J. P. P. VILKO *et al.* (2012) sur l'identification des risques dans le transport intermodal, nous enrichissons notre cartographie des risques à partir d'interviews experts et à l'aide d'un questionnaire adressé aux acteurs de la chaîne de transport intermodal. La section 3.4 présente l'ontologie sous le formalisme de représentation UML et y associe des scénarios de génération de risques.

La section 3.5 est dédiée à l'implémentation de la connaissance sur les risques dans le transport intermodal sous forme d'un graphe. Nous décrivons dans cette section l'implémentation dans Neo4j de l'ontologie établie dans les sections précédentes.

## 3.1 Les principes pour la mise en place d'une ontologie

Cette section a pour objectif de présenter les composants et les phases nécessaires à la représentation des connaissances dans un domaine. La représentation des connaissances consiste à organiser et à présenter le savoir humain dans l'optique de le réutiliser et le partager.

Comme présenté dans la sous-section 2.4.3, les ontologies sont reconnues pour leur capacité à formaliser la connaissance d'un domaine en fournissant les concepts pertinents et les différentes relations entre ces concepts (CAO *et al.*, 2019). Par conséquent, l'élaboration d'une ontologie de domaine nous semble pertinente pour présenter la connaissance sur les risques dans le transport intermodal ainsi que les dépendances entre les différents facteurs de risques.

### 3.1.1 Les composants d'une ontologie

GRUBER (1993), en définissant ce qu'est une ontologie, a également précisé cinq types de composants pour formaliser les connaissances dans le cadre de sa mise en place.

- **Le concept** : encore appelé classe dans le langage de représentation graphique UML, le concept est un ensemble, une entité, une collection, ou un type d'objet partageant des caractéristiques communes. VANDECASTEELE (2012) le définit comme «une abstraction pertinente d'un fragment du monde réel en fonction d'un domaine d'application». Un exemple d'un ensemble de concepts sous le formalisme UML est présenté par la figure 3.2.
- **La relation** : les relations sont les liens entre les différents concepts d'un domaine. Une relation peut elle-même avoir des attributs. La figure 3.2 présente une relation («Extends») entre 3 concepts d'un domaine. Cette relation indique que le concept UTI<sup>1</sup> est étendu par les sous-concepts conteneur et caisse mobile.
- **La fonction** : une fonction est une relation particulière dans laquelle un élément est défini en fonction des éléments précédents. Par exemple dans la déclaration suivante : «un nœud est une partie du réseau de transport». La relation «une partie du» est une fonction binaire.
- **L'instance** : également appelé individu, les instances sont des objets réels et concrets de la classe à laquelle elles appartiennent. Selon VANDECASTEELE (2012) lorsqu'une ontologie contient des instances, elle devient alors une base de connaissances.
- **L'axiome** : les axiomes sont des expressions logiques qui sont toujours vraies. Ils sont généralement utilisés pour spécifier des contraintes dans l'ontologie (CORCHO *et al.*, 2005). Les axiomes peuvent être utilisés dans une ontologie pour définir la signification des composants ou pour restreindre la valeur des attributs (HERNANDEZ, 2005). A titre d'exemple un axiome est utilisé pour restreindre la valeur de la probabilité d'occurrence d'un risque entre 0 et 1.

### 3.1.2 Méthodologie pour la mise en place d'une ontologie

De nombreuses méthodologies existent pour la mise en place des ontologies. L'objectif de cette sous-section n'étant pas de cartographier l'ensemble des méthodologies proposées pour la mise en place des ontologies, nous allons nous intéresser à la méthode METHONTOLOGY. Nous nous sommes inspirés de cette méthodologie pour présenter les connaissances dans le transport intermodal. Néanmoins le tableau 3.1 présente quelques-unes des méthodologies utilisées dans la littérature pour la mise en place des ontologies. Ce choix a été motivé par l'analyse des différentes méthodologies menée par CORCHO *et al.* (2005). Les auteurs de cet article montrent que METHONTOLOGY est la méthode la plus avancée pour représenter les connaissances. Elle a été formalisée par le groupe d'ingénierie ontologique de l'université de Madrid (FERNÁNDEZ-LÓPEZ *et al.*, 1997) qui s'est inspiré des activités principales du processus de développement logiciel et d'autres méthodes d'ingénierie de connaissance (CORCHO *et al.*, 2005).

1. UTI : Unité de Transport Intermodal

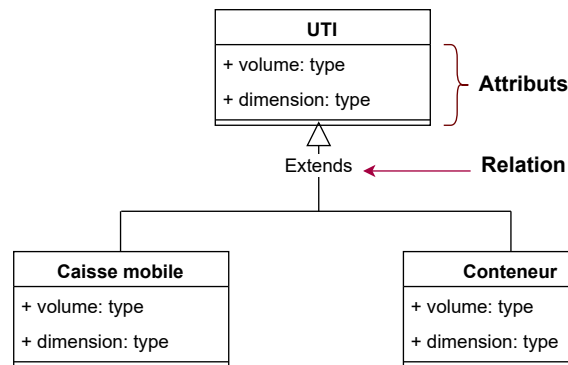


Figure 3.2 – Illustration de concepts sous le formalisme UML.

Comme le révèle le tableau 3.1 l'ensemble des méthodologies pour la mise en place des ontologies s'accorde sur un processus de mise en place sur quatre phases de déploiement : (1) la spécification, (2) la conceptualisation, (3) la formalisation des connaissances. En plus de ces phases nous intégrons la phase (4) implémentation des connaissances présentée dans la méthode METHONTOLOGY. Cette dernière a également défini un ensemble d'activités de support pour soutenir les phases de déploiement : (5) acquisition, (6) intégration.

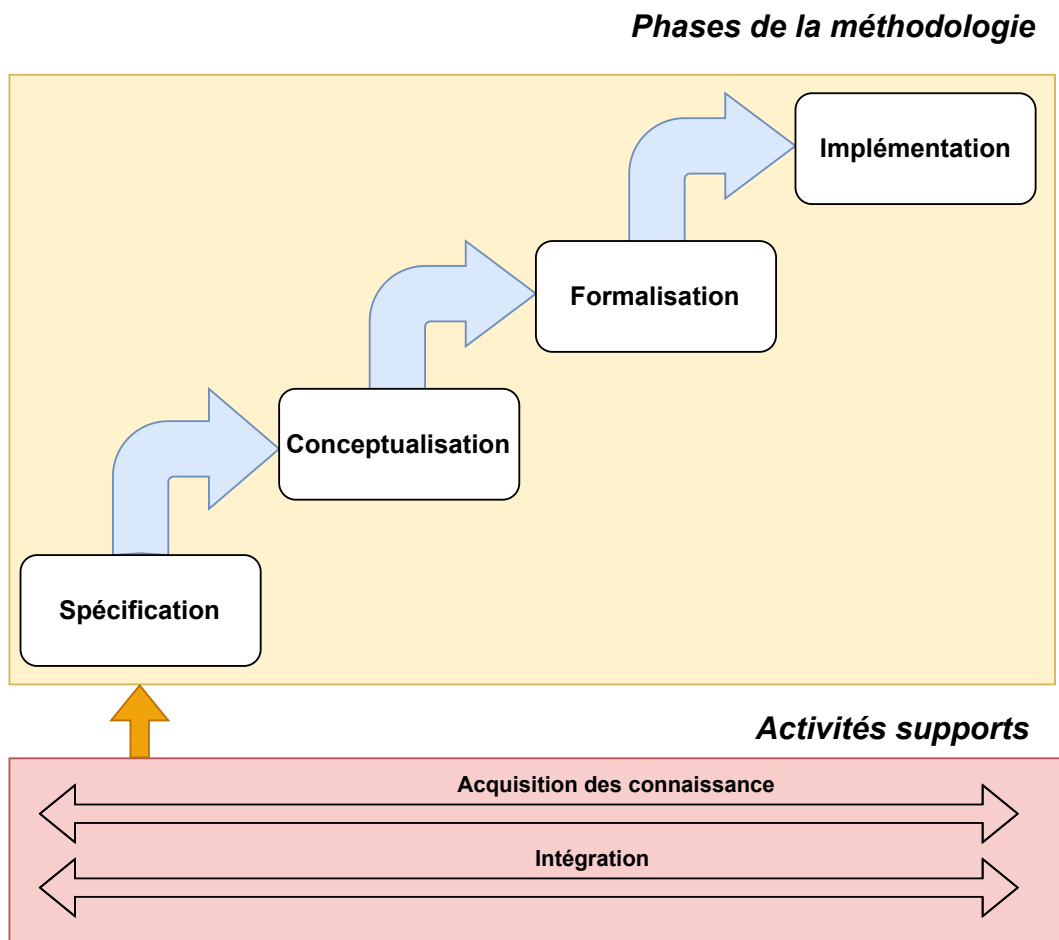
La figure 3.3 présente la méthodologie qui est déployée pour la mise en place de notre ontologie sur le transport intermodal. Elle est composée de quatre phases (*spécification, conceptualisation, formalisation, implémentation*) qui s'appuient sur deux activités supports (*acquisition de la connaissance, intégration de la connaissance*).

1. La spécification consiste à définir les objectifs de mise en place de l'ontologie, ses utilisateurs finaux ainsi que son dimensionnement.
2. La conceptualisation est la phase de l'organisation des connaissances. Il s'agit dans cette phase d'identifier les entités ontologiques du domaine (concepts, relations, etc.) (MAHFOUDH, 2015). Pour ce faire, un ensemble de recommandations a été défini allant de la définition des termes jusqu'à la description des instances et des règles. C'est l'une des phases les plus importantes dans la mise en place d'une ontologie. Les recommandations pour la conceptualisation d'une ontologie sont les suivantes :
  - a) Clarté : toute ontologie doit fournir des définitions claires et objectives des termes qui la composent afin d'éviter toute ambiguïté. D'où la nécessité d'associer aux entités ontologiques des définitions en langage naturel, une documentation et des exemples (GRUBER, 1995).
  - b) Complétude : les axiomes logiques doivent être exprimés en listant toutes les conditions nécessaires et suffisantes (GRUBER, 1995 ; VANDECASTEELE, 2012).
  - c) Cohérence : une ontologie se doit d'être cohérente. C'est-à-dire que ses composants (les axiomes, les concepts et les inférences) doivent être logiquement consistants (GRUBER, 1995).
  - d) Extensibilité : la structure proposée pour la modélisation de l'ontologie doit anticiper les ajouts futurs de composants. Cela signifie que l'ajout de nouveaux concepts qu'ils soient généraux ou spécialisés ne doit pas entraîner la révision des concepts déjà existants (GRUBER, 1995).
  - e) Engagement ontologique minimal : la mise en place d'une ontologie requiert des affirmations minimales au sujet du monde réel pour permettre sa réutilisation pour le partage de la connaissance. La phase de construction sera destinée à la spécialisation (GRUBER, 1995).

**Table 3.1** – Méthodologies de mise en place d'ontologies d'après VANDECASTELE (2012).

Méthodologies	Auteurs	Etapes du processus			Niveau de détail
		Spécification	Conceptualisation	Formalisation	
METHONTOLOGY	(FERNÁNDEZ-LÓPEZ <i>et al.</i> , 1997)	Très bonne description	Très bonne description	Très bonne description	Beaucoup
NeOn	(SUÁREZ-FIGUEROA <i>et al.</i> , 2012)	Très bonne description	Très bonne description	Très bonne description	Beaucoup
On-to Knowledge	(SURE <i>et al.</i> , 2004)	Très bonne description	Description parcellaire	Très bonne description	Moyen
SENSUS	(SWARTOUT <i>et al.</i> , 1996)	Description parcellaire	Pas de prise en compte	Pas de prise en compte	Moyen
KACTUS	(BERNARAS <i>et al.</i> , 1996)	Description parcellaire	Description parcellaire	Très bonne description	Très peu
TOVE	(GRÜNINGER <i>et al.</i> , 1995)	Très bonne description	Très bonne description	Très bonne description	Peu
USCHOLD & KING	(USCHOLD <i>et al.</i> , 1995)	Description parcellaire	Pas de prise en compte	Pas de prise en compte	Très peu





**Figure 3.3** – Méthodologie pour le développement de l'ontologie.

- f) Distinction ontologique : les classes n'ayant pas les mêmes critères d'identité doivent être disjointes. «La notion d'identité étant définie comme les propriétés invariables pour une classe donnée» (VANDECASTEELE, 2012).
  - g) Subdivision des taxinomies : la mise en place d'une ontologie nécessite la subdivision des taxinomies pour gagner en précision sémantique et augmenter la capacité d'inférence (VANDECASTEELE, 2012).
  - h) Distance sémantique minimale : il est important de limiter la distance sémantique en regroupant et en présentant sous la forme d'une sous-classe les concepts descendant d'un même parent lors de la mise en place d'une ontologie (VANDECASTEELE, 2012).
  - i) Normalisation des termes : pour gagner en homogénéité les termes de l'ontologie doivent être normalisés tant que cela est possible (VANDECASTEELE, 2012).
3. La formalisation : la phase de formalisation vise à structurer la connaissance du domaine en un modèle conceptuel. Elle requiert le choix d'un langage de représentation. USCHOLD *et al.* (1995) ont défini les critères à considérer pour le choix du langage de modélisation ontologique.
- a) La perspicacité du langage : le langage permet-il de saisir entièrement la sémantique des connaissances ?
  - b) La distance conceptuelle : le langage est-il direct et naturel ou faudra-t-il beaucoup de travail pour traduire la représentation mentale dans la langue ?
  - c) Le pouvoir expressif : le langage doit permettre de représenter les concepts dont nous avons besoin.
  - d) Le langage est-il aligné sur les normes actuelles ou à venir, par exemple la norme ISO ?
  - e) Traduisibilité et transportabilité : le langage permet-il de représenter les connaissances sans les amputer de certaines charges sémantiques ?
  - f) Le langage est-il soutenu par des méthodes ou des directives d'utilisation ?
  - g) Le langage facilite-t-il le contrôle de la cohérence ?
  - h) Flexibilité du langage : est-il obligatoire de représenter les choses de certaines manières dans le langage ?

Différents langages sont utilisés dans l'état de l'art pour la représentation conceptuelle des ontologies. Selon MAHFOUDH (2015), la plus part d'entre eux trouvent leur fondement dans les logiques de description (BORGIDA, 1996 ; CALVANESE *et al.*, 2001) et les Frames (MINSKY, 2019). Parmi les langages de représentation les plus utilisés, nous retrouvons : (1) Resource Description Framework (RDF), (2) Resource Description Framework Schema (RDFS), (3) Ontology Web Language (OWL) et (4) Unified Modeling Language (UML).

- RDF est un langage du web sémantique ayant une sémantique simplifiée. Il permet de représenter formellement des ressources publiées sur le web et les relations entre elles (MAHFOUDH, 2015).
- RDFS est un langage formel qui a été principalement proposé pour étendre la sémantique insuffisante du langage RDF. «Il permet de déclarer des classes de ressources (rdfs:class) et des liens de hiérarchies entre elles (rdfs:subClassOf). Il a également la capacité de définir des propriétés entre les classes (rdfs:property), préciser leurs membres (rdfs:domain et rdfs:range) et décrire leurs hiérarchies (rdfs:subPropertyOf)» (MAHFOUDH, 2015).
- OWL est une famille de langages de représentation des connaissances pour la création d'ontologies (SEFFI, 2020). Les langages OWL sont caractérisés par

une sémantique formelle qui est l'étude de la sémantique ou l'interprétation des langages formels et naturels. Il est basé sur RDFS et les logiques de description. La figure 3.4 présente la Pyramide du Web Sémantique<sup>2</sup> qui est une façon d'illustrer la hiérarchie des langages informatiques utilisés pour la formalisation des ontologies (« *Semantic Web Stack* » 2022).

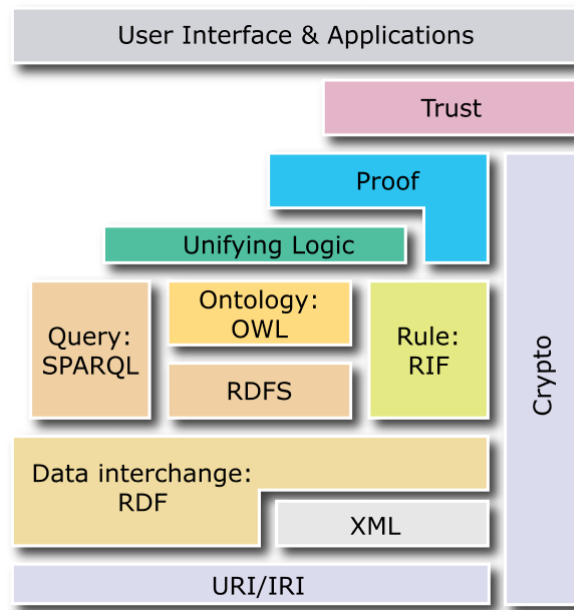
- UML est un langage référence dans la modélisation graphique. Il consiste à traduire les éléments du monde réel en entité informatique appelé objet. Selon FAUCHER *et al.* (2008) UML est une alternative confortable au vu de sa simplicité pour la représentation des ontologies. En effet, une observation rapide des langages de description d'ontologies listés précédemment et d'UML nous permet de constater l'existence d'un certain nombre de notions communes telles que les classes, les relations, les propriétés, les héritages, etc.
4. Implémentation : l'implémentation des connaissances consiste à traduire les modèles conceptuels obtenus grâce à la phase de formalisation en modèles ontologiques physiques (MAHFOUDH, 2015). Il s'agit de la base de connaissances. Dans la littérature, il existe de nombreux outils pour éditer et implémenter les ontologies. Le plus connu d'entre eux est Protégé<sup>3</sup>. Initié en 1995 par l'Université de Stanford, Protégé est une référence dans l'implémentation des ontologies. Grâce à son architecture flexible et modulaire il permet l'intégration de nombreux langages (RDFS, OWL, etc.) (VANDECASTEELE, 2012).
- Dans l'optique de permettre aux machines d'exploiter les connaissances d'un domaine, de nombreux auteurs tels que KURBATOVA *et al.* (2021), LAN *et al.* (2021), LIN *et al.* (2021), PHAM *et al.* (2022) et Z. WANG *et al.* (2021) utilisent un graphe pour l'implémentation des ontologies. On parle communément de graphe de connaissances<sup>4</sup>. Le graphe de connaissances se présente sous la forme de nœuds reliés entre eux par des liens. Les nœuds sont des instances d'entités et les liens sont les relations entre ces instances. Selon JEAN DELAHOUSSE (2020), le graphe de connaissances est formé de trois composants :
- Une ontologie : il s'agit du modèle de données.
  - Des ressources couvertes par le graphe : Il s'agit de la spécification de l'ontologie.
  - Un vocabulaire contrôlé : il permet d'identifier les concepts utilisés pour décrire les ressources.
5. Acquisition : l'acquisition des connaissances est une activité importante et indépendante dans le processus de mise en place d'une ontologie. Elle vient en support aux phases de spécification, de conceptualisation, de formalisation et d'implémentation de l'ontologie. L'activité d'acquisition des connaissances conditionne la pertinence et le niveau de précision de l'ontologie. Elle est généralement réalisée en parallèle de la phase de spécification et diminue au fur et à mesure que le processus de mise en place de l'ontologie avance (FERNÁNDEZ-LÓPEZ *et al.*, 1997).
6. Intégration : l'intégration consiste à intégrer dans la mise en place de l'ontologie d'autres ontologies pour éviter de partir de zéro. Cela consiste à réutiliser des composants et des définitions proposés dans d'autres ontologies en les adaptant pour répondre aux objectifs recensés lors de la phase de spécification.

## 3.2 Acquisition des connaissances

Pour acquérir l'ensemble des connaissances nécessaires et suffisantes pour la mise en place de l'ontologie sur les risques dans le transport intermodal, des méthodes complémentaires ont

---

2. Pyramide du Web Sémantique : «*Semantic Web Stack*»  
 3. Protégé : <https://protege.stanford.edu/>  
 4. Knowledge Graph



**Figure 3.4** – Pyramide du Web Sémantique (*Semantic Web - W3C 2023*)

été utilisées : (1) une revue de la littérature sur les risques dans la chaîne de transport, (2) des interviews avec les acteurs du processus de transport intermodal et (3) un questionnaire adressé aux acteurs familiers des risques perturbant le flux de marchandises. La figure 3.5 présente les méthodes d'acquisition de connaissances.

1. La revue de la littérature : une revue systématique de la littérature a été effectuée sur l'identification des risques dans les phases du transport intermodal avec pour objectif de cartographier les risques perturbant le flux de transport.
2. Les interviews experts : l'entretien est un excellent moyen pour capturer la connaissance experte pour ensuite la traduire sous forme d'ontologie. Dans nos travaux, nous utilisons des entretiens *semi-directifs* avec des acteurs de la chaîne de transport intermodal dans l'objectif de confirmer ou infirmer la cartographie des risques et d'identifier les usages et limites des outils de traçabilité et de visibilité. Ils sont également utilisés pour cartographier le processus de transport intermodal et les risques rencontrés sur chacune de ses phases.
3. Le questionnaire : au même titre que les interviews d'experts, un questionnaire a été diffusé auprès des acteurs qui traitent les risques dans le transport intermodal, dans l'objectif de définir l'occurrence des facteurs de risques sur les phases du processus de transport intermodal.

Le tableau 3.2 présente les apports de chacune des méthodes utilisées dans la spécification et la conceptualisation des connaissances sur le processus de transport intermodal et les événements aléatoires qui perturbent son fonctionnement. Chacune des méthodes d'acquisition des connaissances est développée dans les sous-sections suivantes.

### 3.2.1 La revue de la littérature

Pour rappel, comme précisé dans la section 2.2, la revue de la littérature nous a permis de recenser les facteurs de risques perturbant la chaîne de transport intermodal. La méthodologie

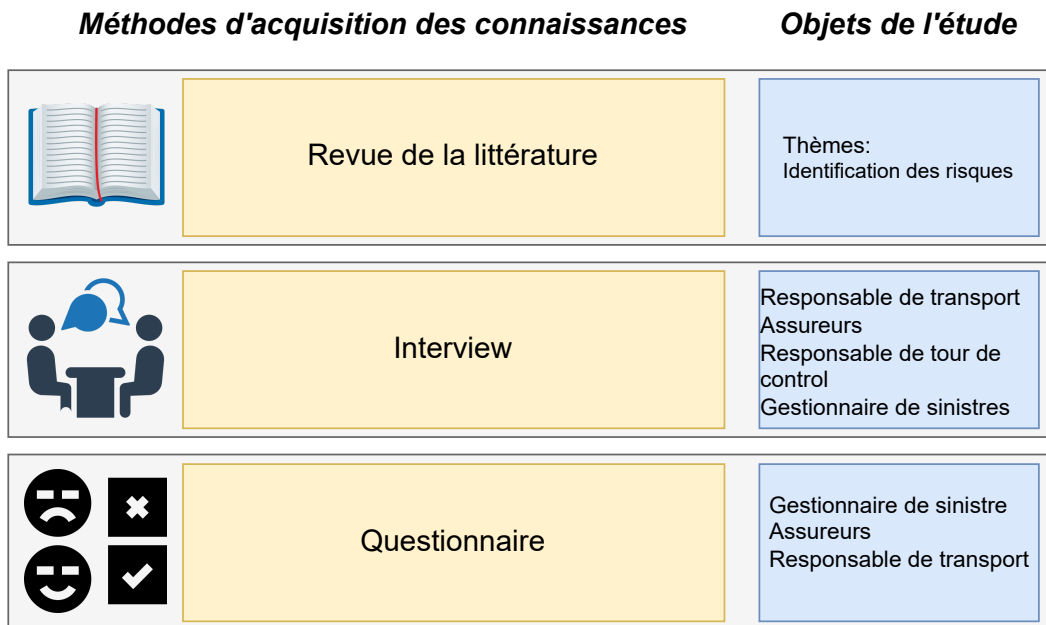


Figure 3.5 – Méthodes d'acquisition des connaissances

Table 3.2 – Matrice d'intersection entre les méthodes d'acquisition de connaissances et la méthodologie de mise en place de l'ontologie.

<b>Etapes de la méthodologie</b>	Revue de la littérature	Interviews	Questionnaire
Spécification	✓	✓	✓
Conceptualisation	✓	✓	✓
Formalisation		✓	

de recherche utilisée et les analyses effectuées sur les articles sélectionnés sont disponibles dans la sous-section 2.2.2.

Nous avons montré dans la section 2.2.2 que les risques sont généralement classés suivant trois typologies : (i) risque interne et externe, (ii) suivant les flux dans la chaîne d’approvisionnement et (iii) suivant la nature des opérations (risque environnemental, risque opérationnel, risque lié à l’approvisionnement, etc).

Le tableau 3.3 présente la cartographie des risques que nous avons établie qui est fortement inspirée des travaux de HO *et al.* (2015), TANG *et al.* (2011) et J. P. P. VILKO *et al.* (2012). Cette typologie présente les types de risques et les facteurs de risques perturbant le processus de transport intermodal. Nous distinguons deux types de risques (risque interne et risque externe). Cette approche a été utilisée car elle est classique dans l’identification des risques d’un système (B. JIANG *et al.*, 2018 ; MARQUÈS, 2010). Les risques internes sont les risques intrinsèques au processus opérationnel de transport intermodal et les risques externes sont engendrés par des facteurs externes à la chaîne de transport tels que les désastres naturels.

### 3.2.2 Les interviews

Au cours de nos travaux, nous avons effectué des interviews avec des professionnels du transport intermodal dans le but de spécifier avec eux :

- le processus de transport intermodal,
- les problèmes présents dans le chaîne de transport,
- les outils utilisés pour gérer ces problèmes,
- Ainsi que leurs besoins actuels et futurs que nous pourrions imaginer couvrir avec les approches que nous souhaitions développer dans le cadre de nos travaux.

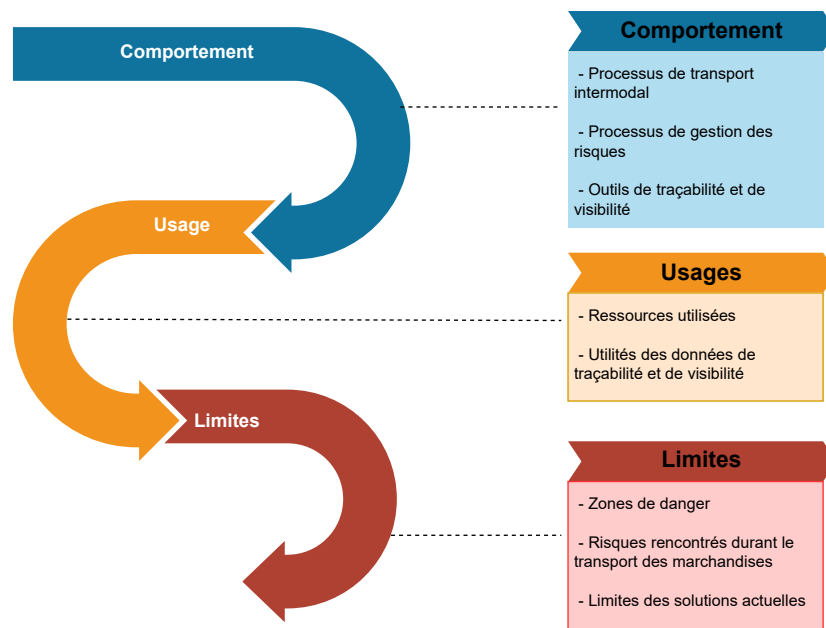
Les objectifs de ces interviews étaient les suivants :

- Cartographier l’ensemble des processus métiers et décisionnels liés à l’activité de transport dans l’entreprise. Identifier également les variables décisionnelles et les risques associés au processus de transport.
- Identifier les ressources utilisées pour assurer la traçabilité du transport intermodal, l’utilité et la fiabilité des informations remontées ainsi que les futurs usages que nous pourrions imaginer couvrir grâce à ces informations.
- Recenser les enjeux métiers que les entreprises veulent atteindre à travers la mise en place d’un système de traçabilité et de visibilité temps réel.
- Identifier les facteurs de risques rencontrés lors du transport intermodal ainsi que les zones de danger. La zone de danger étant définie comme une zone où nous risquons de rencontrer des dangers potentiels. Nous cherchons à cartographier les facteurs de risques dans les différentes phases du processus de transport.
- Quantifier l’impact des risques sur la chaîne d’approvisionnement et identifier les processus de gestion des risques mis en place par les entreprises.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons opté pour un entretien *semi-directif*. « L’entretien semi-directif s’organise dans un cadre strict (l’enquêteur connaît les points précis qu’il désire aborder) qui conserve un principe de liberté de parole (l’enquête se déroule dans un climat de confiance et de souplesse)» (LUGEN, 2017). Ce type d’entretien permet d’obtenir des réponses précises sur les thématiques abordées ; néanmoins, il peut être nécessaire de ré-orienter

**Table 3.3** – Typologie des risques dans le transport intermodal.

<b>Types de risque</b>	<b>Facteurs de risques</b>
Risque interne	Manque d'équipement Grève des travailleurs Manque de ressources humaines Réglementation <i>(Dé) Consolidation du conteneur</i> <i>Départ en vacances</i> Augmentation des taxes Prix du stockage Prix de l'énergie Prix du transport Problèmes avec les documents de transport Estimation inapproprié du planning Déviation de route Congestion Incendie Terrorisme <i>Ouverture de porte</i> <i>Variation de température</i> <i>Variation d'humidité</i> <i>Chocs</i> Vols Piraterie Temps d'attente Accident de transport Explosion Inspection Manutention Perte du conteneur Retard dans la transmission des données <i>Manque d'information pertinente</i> <i>Manque de traçabilité</i> Manque de standards Manque de visibilité Capacité des POI Cyberattaque Défaillance du système d'information
Risque externe	Conflit politique Épidémie Tremblement de terre Cyclone Éruption volcanique Tempête Tornade Inondation Vents violents



**Figure 3.6** – Structures des interviews.

l'interlocuteur ou de revenir sur une question afin d'approfondir la réponse apportée. La formulation des questions est fondamentale pour l'entretien semi-directif. En effet, le langage choisi doit être dans le champ lexical de la population visée et les questions doivent être claires et précises pour éviter toute ambiguïté. La grille de questionnaire utilisée pour les interviews est présentée en annexe A. Les questions de cette grille étaient légèrement modifiées en fonction du poste occupé par la personne que nous devions interroger.

### La structure des interviews

L'ensemble des interviews qui ont été menées suivent la structure présentée sur la figure 3.6. Nous avons opté pour des entretiens libres c'est-à-dire que nous laissons les interviewés s'exprimer librement dans la limite de nos deux thématiques : (1) le processus de transport intermodal et (2) les risques rencontrés durant le transport des conteneurs. Premièrement, nous avons abordé les questions relatives aux comportements de l'entreprise : le processus utilisé pour le transport des conteneurs, les outils utilisés pour assurer la traçabilité et la visibilité des transports. Ensuite, la question de l'usage des ressources et des informations de traçabilité et de visibilité ont été discutées et enfin, nous avons interrogé les acteurs de la chaîne de transport sur les limites de leurs systèmes et des processus en place.

### Les cibles

Pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons mené les interviews avec seize acteurs impliqués dans le processus de transport intermodal. Avant le début de chaque interview, nous avons garanti l'anonymat à chaque interlocuteur et l'avons averti sur le fait que notre entretien serait enregistré et retranscrit pour les besoins de l'étude. La durée de chaque entretien était comprise entre quarante-cinq minutes et une heure et demie. Le tableau 3.4 présente le profil des personnes qui ont pris part aux entretiens.

### Analyse des interviews

Selon BROOM (2005) il n'y a pas de bonne formule pour mener une analyse d'interviews qualitatifs. L'auteur de cet article soutient que «donner un sens aux données qualitatives est une combinaison d'une connaissance sophistiquée de la théorie des sciences sociales, d'un



**Table 3.4** – Liste de profils des personnes interviewées.

Fonction de l'interviewé	Secteur d'activité	Taille de l'entreprise	Date
Responsable de transport	Pharmaceutique et cosmétique	GE	31/01/2020
Responsable de transport	Commerce d'habillement et de chaussures	ETI	02/03/2020
Project manager	Affrètement et organisation des transports	GE	18/02/2020
Responsable de transport	Affrètement et organisation des transports	GE	15/07/2020
Responsable de transport	Commerce d'articles de sport	GE	02/03/2020
Responsable de transport	Affrètement et organisation des transports	GE	02/04/2020
Responsable d'assurance	Affrètement et organisation des transports	GE	17/11/2020
Responsable tour de contrôle	Affrètement et organisation des transports	GE	10/07/2020
Responsable de transport	Solution digital de traçabilité	PME	02/03/2020
Courtier d'assurance	Activités des agents et courtiers d'assurances	TPE	18/05/2020
Expert transport	Activités spécialisées	PME	06/06/2020
Gestionnaire de sinistre	Assurance transport	GE	09/05/2020
Gestionnaire de sinistre	Assurance transport	PME	14/05/2020
Courtier d'assurance	Assurance transport	GE	06/05/2020
Directeur	Transport maritime	ETI	01/07/2020
Gestionnaire de sinistre	Assurance transport	GE	01/07/2020

bon œil pour les processus et dynamiques importants de la vie réelle et d'une volonté de regarder au-delà de ce qui est évident ou de ce qui va de soi dans les comptes rendus qui sont réalisés à la suite des entretiens». C'est-à-dire que le chercheur se doit d'être complètement absorbé par le récit d'une personne sur une thématique particulière, tout en replaçant ce récit dans des relations sociales plus larges et des débats conceptuels pertinents. Pour ce faire, l'analyse qualitative basée sur des entretiens doit être un processus itératif et commence inévitablement pendant la collecte des données. Cela permet de façonner les thèmes initiaux, de développer les hypothèses, d'affiner les questions et de rechercher puis d'exclure les cas déviants (BROOM, 2005).

Pour éviter que le chercheur ne recoure à son propre cadre de pensée dans l'interprétation des résultats, les techniques d'analyse de contenus qualitatifs sont précises. Dans son guide pour les enquêtes, LUGEN (2017) a recensé trois techniques pour l'analyse des entretiens qualitatifs : (1) l'analyse thématique, (2) l'analyse formelle et (3) l'analyse structurale.

1. L'analyse thématique porte sur les éléments constitutifs du discours, afin de mettre en évidence les représentations sociales ou les jugements des interlocuteurs. L'analyse catégorielle est l'une des formes d'analyse thématique utilisée. Elle consiste à former des catégories à partir des fréquences des caractéristiques significatives du contenu analysé. Dans les entretiens qualitatifs, elle se base sur l'hypothèse que plus une caractéristique est citée par l'interviewé plus elle est importante dans la thématique étudiée (LUGEN, 2017).
2. L'analyse formelle se focalise sur les formes et l'enchaînement du discours et utilise généralement deux méthodes. (1) L'analyse de l'expression qui étudie le mode de communication de l'interviewé comme par exemple son état d'esprit. Dans cette méthode, le contenu est minutieusement analysé. Il s'agira de s'attarder sur le vocabulaire, la disposition des mots, la longueur du texte, etc. (2) La deuxième méthode qui est l'analyse de l'énonciation, étudie la dynamique du discours de l'interviewé (le développement du discours, l'ordre des séquences, le rythme de parole, etc). Cette deuxième méthode nécessite un enregistrement de l'entretien pour que les résultats de l'analyse a posteriori soient fiables (LUGEN, 2017).
3. L'analyse structurale porte sur la mise en exergue des aspects implicites du message de l'interviewé. En étudiant le discours de ce dernier, le chercheur tente de trouver des structures mentales et idéologiques qui le sous-tendent en prenant par exemple en considération les associations de thèmes dans le discours, etc. (LUGEN, 2017).

A l'instar des méthodes d'analyse de risques qui sont très souvent regroupées sous deux approches (section 2.2.3), les techniques d'analyses d'interviews peuvent également être regroupées sous deux approches : (1) l'approche quantitative et (2) l'approche qualitative. Dans la première approche l'analyse est basée sur des fréquences d'apparition de certaines caractéristiques le long du contenu et dans le second elle est basée sur la présence ou l'absence d'une caractéristique ou la manière dont les éléments du discours sont articulés.

L'objectif étant d'identifier les besoins des acteurs du processus de transport intermodal, de cartographier le processus utilisé pour le transport des marchandises et les risques rencontrés durant le transport, nous avons opté pour l'analyse thématique catégorielle. L'analyse catégorielle a été retenue parce qu'elle permet de former des catégories à partir des fréquences des caractéristiques significatives. Elle est utilisée dans notre cas pour cartographier les phases du processus de transport intermodal, identifier les risques et les limites des solutions actuelles en formant des catégories autour de ces objectifs en fonction des fréquences d'apparition lors de chaque entretien. Nous avons également pris en considération les préconisations de BROOM (2005). En effet, chaque entretien fut suivi dans la foulée d'un rapport d'entretien, ce qui nous a permis de faire évoluer nos questions.

La méthodologie de l'analyse des entretiens est présentée par la figure 3.7. Elle est composée de quatre étapes :

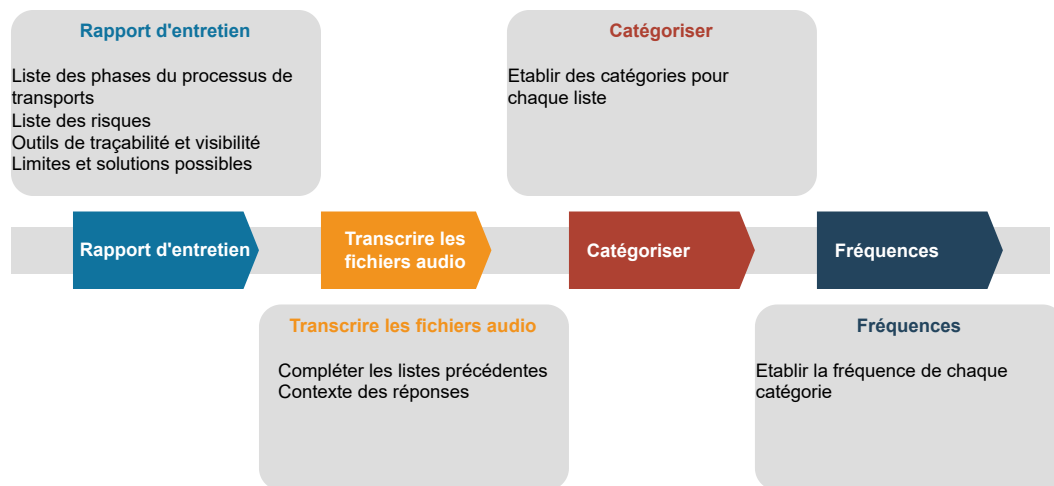


Figure 3.7 – Méthodologie d’analyse des interviews.

1. Le rapport d’entretien : il est la première étape de l’analyse qui a été effectuée sur les entretiens. C’est une synthèse des points importants qui sont ressortis pendant l’échange avec l’interviewé. Elle présente les phases du processus de transport, les ressources utilisées pour le transport, les risques, etc. Le rapport était réalisé systématiquement une fois l’interview terminée pour être certain de ne pas introduire de biais dans la retranscription des réponses. Un exemple de rapport d’entretien avec un responsable de transport est fourni en annexe B. Chaque rapport d’entretien présente une liste des phases du processus de transport, les outils de traçabilité utilisés, une liste des risques rencontrés durant le transport des marchandises, une liste des limites des solutions actuelles et enfin une liste des besoins en termes de gestion de risque de la chaîne de transport.
2. La transcription du fichier audio : elle consiste à écouter l’enregistrement de chaque interview dans l’optique de compléter les listes que nous avons constituées dans l’étape du rapport d’entretien. Pour rappel, la moyenne de la durée de chaque enregistrement est d’une heure.
3. La catégorisation : l’étape de catégorisation consiste à regrouper les caractéristiques qui sont proches dans les listes qui ont été créées dans les deux précédentes étapes. Étant donné que les personnes interrogées viennent d’entreprises et occupent des fonctions différentes, les expressions utilisées dans leur discours varient. Cette catégorisation nous a permis par exemple de rassembler dans un même groupe «ETA dynamiques» ces différentes expressions : «Prédire les temps d’attentes en fonction des contextes et des ports» et «remonter automatiquement les variations des dates de départ et d’arrivée au port».
4. La fréquence : cette étape consiste finalement à recenser le nombre de fois que la catégorie établie précédemment a été évoquée par un interviewé. Elle a permis de mettre en évidence les fonctionnalités, les besoins et les risques à adresser en priorité dans nos travaux de recherche.

### Résultat de l’analyse des interviews

L’analyse des entretiens menés avec les acteurs impliqués dans le processus de transport intermodal nous a permis de recenser leurs besoins sur les fonctionnalités à mettre en place pour faire face aux limites des solutions de gestions de risque utilisées. Les fonctionnalités visent à :

- Piloter le plan de transport en temps réel.
- Bénéficier d'une meilleure connaissance des flux grâce aux informations remontées, dans l'objectif de mieux challenger les prestataires de services logistiques.
- Disposer d'une estimation dynamique de l'ETA pour une meilleure planification.
- Bénéficier d'une liaison entre les outils de traçabilité et de visibilité des conteneurs avec les données exogènes (données AIS des bateaux, météo, etc.) pour assurer un suivi en toute période durant le transit des conteneurs.
- Disposer d'alertes réactives sur les déviations des moyens de transport et les variations des conditions de transport du conteneur.

En plus des fonctionnalités recensées, les interviews nous ont permis d'enrichir la cartographie des risques, et d'identifier les zones de danger. Les facteurs de risques en italiques dans le tableau 3.3 sont ceux rajoutés après l'étape d'analyse des interviews. Les zones de danger entraînant des retards sont localisées sur le réseau de transport (les terminaux portuaires, les zones de transit, les routes et les voies navigables).

Grâce à ces interviews, nous avons également identifié les facteurs de risques entraînant des retards sur chaque phase du processus de transport intermodal. La tableau 3.5 présente la matrice d'intersection entre l'occurrence des facteurs de risques et les phases de transport intermodal. Cette partie est développée dans la section 3.4 où nous présentons un arbre des causes des facteurs de risques menant au retard.

### 3.2.3 Le questionnaire

Pour compléter la cartographie des risques mise en place grâce à la revue de littérature et aux interviews, un questionnaire a été utilisé pour établir l'occurrence des facteurs de risques concrétisant les dangers.

Le questionnaire a été établi sur la base des facteurs de risques qui ont été recensés dans la littérature et confirmés par les interviews.

#### Cible et structure du questionnaire

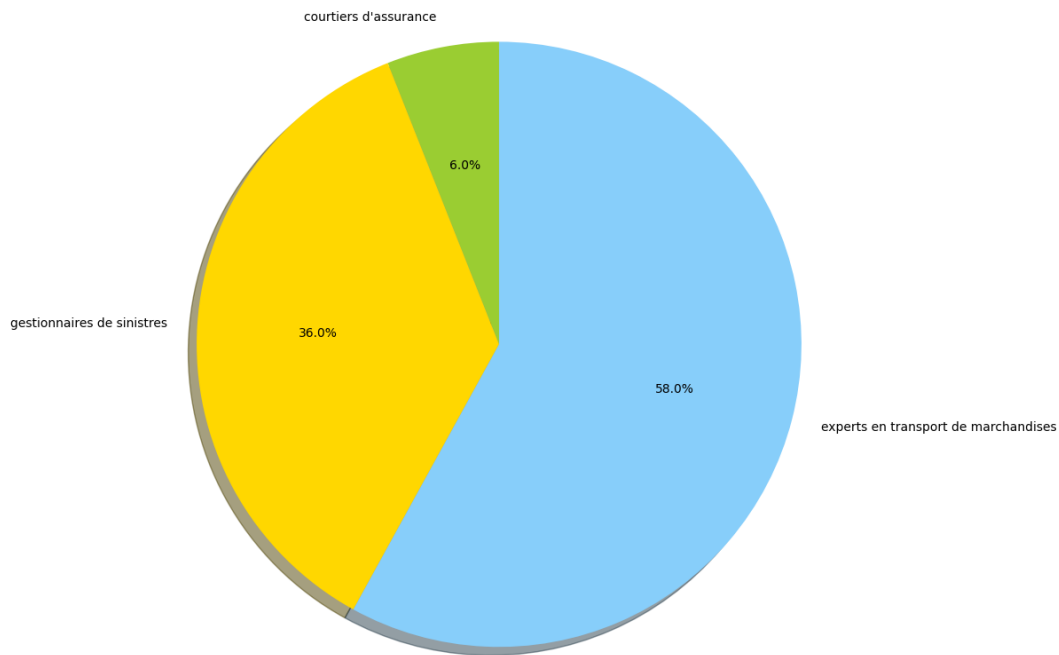
Dans l'optique d'obtenir des données statistiques sur l'occurrence des facteurs de risques, l'enquête par questionnaire doit être adressée à une population pertinente. Pour ce faire, le questionnaire a été envoyé en priorité aux gestionnaires de sinistres et aux courtiers assurance transport. Puis nous avons également sollicité les experts en transport de marchandises pour remplir le questionnaire. Un gestionnaire de sinistres est l'expert contacté lorsqu'un sinistre intervient sur la chaîne de transport (retards, baisse de qualité des marchandises, etc). Il s'occupe de constater le sinistre, de recueillir les informations nécessaires (scénario d'accident), d'évaluer les responsabilités et le coût du préjudice avant de transmettre le dossier aux assurances pour une éventuelle indemnisation. Le courtier en assurance transport (terrestre, ferroviaire, maritime, etc.) est celui sollicité pour établir une police d'assurance pour des marchandises qu'on souhaite transporter. Il a une connaissance des risques réguliers en fonction des destinations et des itinéraires de transport.

La formulation des questions dans une enquête par questionnaire est une phase très importante. En effet, elle permet de traduire les indicateurs pertinents pour les travaux de recherche et de les formuler correctement (LUGEN, 2017). Dans notre cas, il s'agit de formuler les questions de sorte à récupérer l'occurrence des facteurs de risques dans la chaîne d'approvisionnement. Nous avons opté pour des questions fermées avec un échantillon de possibilités.

Les questions ont été formulées de telle sorte à ce que les experts en gestion de risques dans le transport intermodal puissent noter les facteurs de risques en fonction de leurs occurrences dans la chaîne de transport et selon leurs expériences. Les notes étaient comprises entre

**Table 3.5** – Occurrence potentiel des facteurs de risques sur les phases du processus de transport intermodal.

	Pré-acheminement	Manutention du conteneur	Transport Maritime	Post-acheminement
<b>Facteurs de risques</b>				
Manque d'équipement	✓	✓	✓	✓
Grève des travailleurs	✓	✓		
Manque de ressources humaines	✓	✓		✓
Réglementation		✓		✓
<i>(Dé) Consolidation du conteneur</i>	✓			✓
<i>Départ en vacances</i>		✓		
Augmentation des taxes			✓	
Prix du stockage		✓		
Prix de l'énergie	✓	✓	✓	✓
Prix du transport				
Déviation de route	✓		✓	✓
Congestion	✓	✓		✓
Incendie	✓	✓	✓	✓
Terrorisme		✓		
<i>Ouverture de porte</i>	✓	✓		✓
<i>Variation de température</i>		✓	✓	
<i>Variation d'humidité</i>		✓	✓	
<i>Chocs</i>		✓		
Vols	✓	✓		✓
Piraterie			✓	
Temps d'attente	✓	✓	✓	✓
Accident de transport	✓		✓	✓
Explosion		✓	✓	
Inspection		✓		✓
Mauvais manutention		✓		
Perte du conteneur		✓	✓	
Conflit politique	✓			✓
Épidémie	✓	✓	✓	✓
Tempête	✓	✓	✓	✓
Cyclone	✓	✓	✓	✓
Tremblement de terre	✓	✓	✓	✓
Éruption volcanique	✓	✓	✓	✓
Tornade	✓	✓	✓	✓
Inondation	✓	✓	✓	✓
Vents violents	✓	✓	✓	✓
Problèmes avec les documents de transport	✓			✓
Estimation inapproprié du planning	✓			✓
Retard dans la transmission des données	✓	✓	✓	✓
<i>Manque d'information pertinente</i>		✓	✓	
<i>Manque de traçabilité</i>	✓	✓	✓	✓
Manque de standards				
Manque de visibilité	✓	✓	✓	✓
Capacité des POI		✓		
Cyberattaque		✓	✓	
Défaillance du système d'information		✓		



**Figure 3.8** – Répartition de la population.

**1** et **9. 1** équivaut à une occurrence très rare du facteur de risque et à l'inverse **9** signifie une très forte occurrence du facteur de risque sur la chaîne de transport. Pour solliciter les cibles, nous avons diffusé dans un premier temps le questionnaire par e-mail puis nous les avons contactés individuellement par téléphone pour remplir le questionnaire. Ces entretiens téléphoniques nous ont également permis de compléter la cartographie des risques et de recenser l'occurrence des facteurs de risques présents dans le questionnaire. La structure du questionnaire est présentée sur la figure C.1 en annexe C.

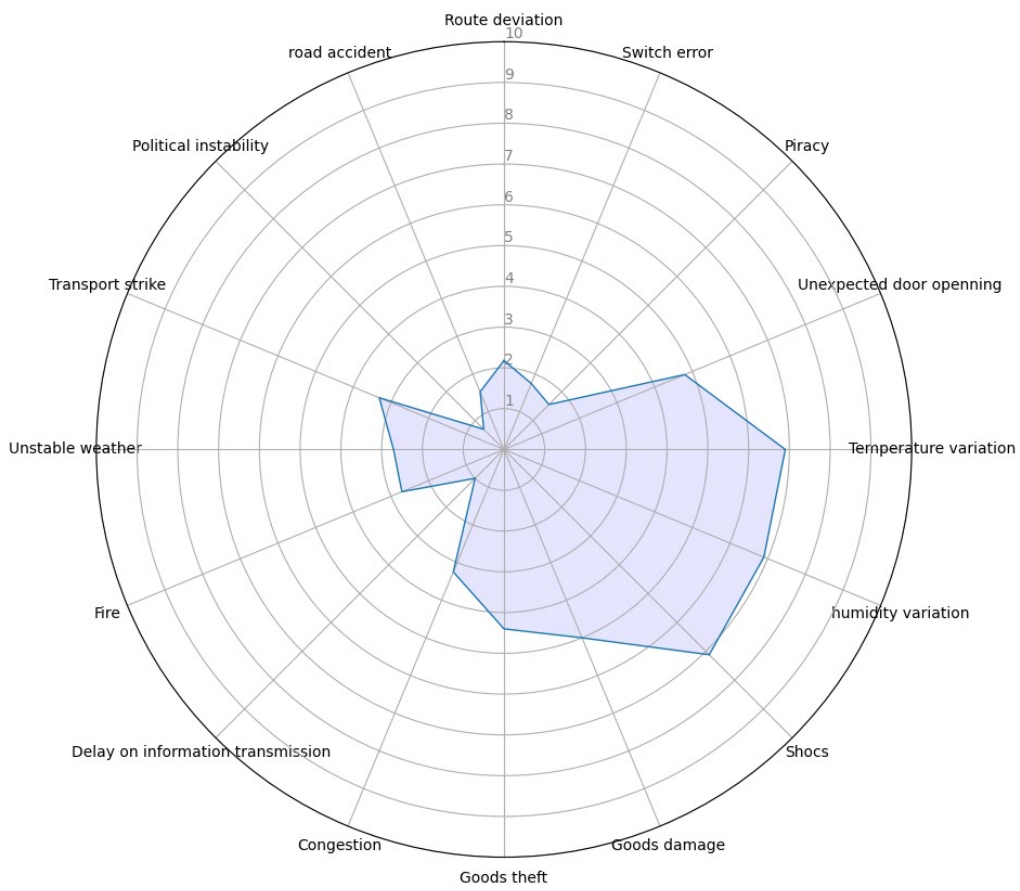
### Analyse du questionnaire

Une analyse statistique a été effectuée sur les réponses apportées aux questionnaires. Cette analyse a consisté à calculer la moyenne des notes affectées par l'ensemble de la population pour un facteur de risque. Nous avons recueilli au total trente-deux réponses au questionnaire sur l'occurrence des facteurs de risques dans la chaîne d'approvisionnement. La figure 3.8 montre la répartition de la population cible sur les 32 réponses enregistrées.

La figure 3.9 présente les résultats de cette enquête. Elle révèle que le transport intermodal souffre énormément des variations des conditions de transport (température, humidité, ouverture des portes du conteneur) et des chocs. A l'inverse, les facteurs de risques tels que l'instabilité politique et la piraterie ont une occurrence faible.

### 3.2.4 Bilan et limites des méthodes d'acquisition de la connaissance

L'ensemble de ces méthodes d'acquisition de connaissance nous ont permis de spécifier et de conceptualiser notre ontologie. La revue de la littérature nous a permis d'établir une cartographie des risques perturbant la chaîne de transport intermodal. Les interviews d'experts nous ont permis de cartographier le processus de transport intermodal, de raffiner et d'enrichir la cartographie des risques en distinguant les facteurs de risques qui surviennent



**Figure 3.9** – Occurrences des risques.

sur chacune des phases du processus de transport intermodal. Les limites des solutions de traçabilité et de visibilité actuelles, les besoins des acteurs de la chaîne de transport intermodal ainsi que les usages qui seront fait de l'ontologie ont également été identifiés à l'aide des interviews d'experts. Le questionnaire quant à lui nous a permis de déterminer l'occurrence des facteurs de risques sur chaque phase de la chaîne de transport.

Les méthodes d'acquisition des connaissances nous ont permis d'identifier les objectifs de l'ontologie à mettre en place. L'analyse des interviews a montré que les acteurs de la chaîne de transport s'intéressent principalement à :

- La détection en temps réel des événements aléatoires durant le transit des conteneurs.
- Une **ETA** dynamique. C'est-à-dire que l'**ETA** doit varier en fonction des aléas rencontrés durant le transport des conteneurs.

Quant au questionnaire transmis aux experts du risque dans le transport intermodal, il nous a permis de déterminer l'occurrence des facteurs de risques dans le processus de transport intermodal.

Au regard du constat qui a été établi à la sortie de l'acquisition des connaissances, nous allons proposer une ontologie qui permettra aux acteurs de la chaîne de transport intermodal de comprendre les risques entraînant du retard lors du transit des conteneurs.

Bien que les méthodes d'acquisition de connaissances nous aient permis de spécifier les besoins dans la chaîne de transport intermodal, elles présentent certaines limites. En effet, la majorité des personnes qui ont contribué à déterminer l'occurrence des risques sur les phases du processus de transport intermodal sont localisées en France. Seulement 25% de la population mène des activités hors de l'hexagone. Ce déséquilibre dans les données quantitatives rend difficilement généralisable le résultat des analyses.

Ensuite, malgré le fait que nous ayons utilisé une méthodologie éprouvée pour l'analyse qualitative des interviews, des erreurs d'interprétation ne sont pas à exclure totalement. Ce qui aurait pour conséquence de fausser les résultats sur la spécification des besoins des acteurs de la chaîne de transport.

## 3.3 Spécification et conceptualisation des connaissances dans le transport intermodal

### 3.3.1 Spécification de l'ontologie

Grâce à l'activité d'acquisition des connaissances sur le transport intermodal et ses risques, nous avons pu établir un document de spécification pour la mise en place de notre ontologie. Nous présentons ci-dessous les objectifs et les utilisateurs finaux de l'ontologie.

**Objectifs de l'ontologie** : au regard des attentes des acteurs de la chaîne de transport intermodal, nous allons mettre en place une ontologie de domaine causale et applicative pour diagnostiquer les retards lors du transport conteneurisé des marchandises. Cette ontologie permettra d'établir une relation de cause à conséquence entre les facteurs de risque aboutissant à un retard sur l'ensemble des quatre phases du processus de transport intermodal.



**Utilisateurs** : les utilisateurs de cette ontologie sont les acteurs de la chaîne de transport intermodal intéressés par la maîtrise du risque ayant un impact sur l'ETA des conteneurs. Ce sont principalement :

- Les exportateurs ;
- Les consignataires ;
- Les personnels des compagnies logistiques (transitaire, commissionnaire de transport, etc.) ;
- Les commissaires d'avaries ;
- Les compagnies d'assurances.

**Les sources d'informations** : les connaissances sur le transport intermodal et ses risques ont été acquises grâce à :

- La revue de la littérature sur l'identification des risques ;
- Des interviews experts ;
- Un questionnaire.

### 3.3.2 Conceptualisation de l'ontologie

#### Intégration

Pour éviter de bâtir notre ontologie en partant de zéro nous nous sommes inspirés des ontologies existantes sur le transport des marchandises et sur les risques.

Notre phase d'intégration consiste à l'identification des concepts et des relations pour le processus de transport intermodal à partir des ontologies proposées par BECKER *et al.* (1997), BENAÏSSA *et al.* (2014) et ROMANENKO *et al.* (2019). Pour l'identification des composants sur les risques, nous avons intégré les ontologies proposées par BÉNABEN *et al.* (2016), CAO *et al.* (2019) et LAURAS *et al.* (2015).

Grâce à l'acquisition des connaissances et à l'analyse de ces modèles de connaissances nous avons identifié les composants nécessaires à la mise en place de notre ontologie tout en gardant une cohérence avec les travaux existants, telles que les définitions associées aux différents concepts et la sémantique opérationnelle. Les composants de notre modèle de connaissances sont présentés dans la sous-section 3.3.2.

L'ensemble des travaux qui ont été intégrés dans la mise en place de notre ontologie sont présentés ci-dessous.

#### Intégration des ontologies sur le transport intermodal

BECKER *et al.* (1997) proposent une ontologie de domaine pour la planification et l'ordonnement du transport multimodal. Cette ontologie s'appuie sur l'ontologie d'ordonnement OZONE proposée par S. F. SMITH *et al.* (1996) qui est une référence pour formuler des modèles de domaine d'ordonnement. Dans la mise en place de leur ontologie de domaine, les auteurs définissent 5 principaux concepts et 6 relations : les *exigences de mouvement*, qui *représentent* les demandes d'entrée pour les *services de transport*, les *services de transport*, qui *définissent* l'ensemble des capacités que le système de transport fournit, les *activités de transport*, qui *utilisent* des *ressources* pour *exécuter* les *services de transport* et *satisfaire* aux *exigences de mouvement*, les *ressources*, telles que les *véhicules de transport*, les *équipements* et

des *installations portuaires*, et les *contraintes*, qui *déterminent* comment, quand, par qui et où les *activités de transport* peuvent être exécutées. Les concepts de cette ontologie visent à modéliser les caractéristiques et les exigences des processus de planification et d'ordonnancement dans le **transport multimodal**.

Dans l'optique de mieux gérer les flux dans la chaîne d'approvisionnement, les auteurs dans (BENAÏSSA *et al.*, 2014) proposent une ontologie de domaine pour formaliser les connaissances sur le transport multimodal des marchandises. L'ontologie proposée définit trois principales classes : les *acteurs* qui *interviennent* dans le processus de transport. Le concept *acteur* est composé d'*organisateur de transport*, d'*exportateur* et de *transporteur*. Le concept *opération de transport* qui *rassemble* les *activités de transport* telles que la *préparation du transport*, les *opérations douanières*, les *opérations au port*, le *transport de la marchandise* et la *livraison de la marchandise*. Pour finir, le concept *ressource matérielle* qui *regroupe* les *modes de transport* (fluvial, maritime, routier et ferroviaire), les *infrastructures* (station de train, port, ligne de transport, etc) et les *équipements* (porte-conteneur, train, camion).

Plus récemment ROMANENKO *et al.* (2019) proposent une ontologie pour modéliser le processus de transport multimodal dans le but de la réutiliser pour l'optimisation des opérations de transbordement. L'ontologie est composée de quatre concepts : le concept principal le *transport multimodal* est *étendu* par les sous-concepts *exportateur*, *consignataire* et *transporteur*, le concept *commissaire de transport* qui *organise* le transport de marchandises et est *associé* aux sous-concepts de exportateur, consignataire et transporteur, le concept *type de transport* qui est *étendu* par le *transport maritime*, le *transport routier* et le *transport ferroviaire* qui est *utilisé* par le commissionnaire de transport pour effectuer la livraison des marchandises. Le dernier concept de l'ontologie est la *zone de stockage temporaire*, où chaque type de transport à la possibilité de venir pour effectuer des opérations de manutention (transbordement ou déchargement de la marchandises). Les zones de stockage temporaires sont localisées dans différents points : les gares ferroviaires, les ports maritimes et les terminaux logistiques.

Pour rappel nous avons défini le transport intermodal dans le chapitre 1 comme le transport de marchandises par une séquence d'au moins deux modes de transport différents et dont l'unité de transport est obligatoirement un conteneur ; à la différence du transport multimodal où l'unité de transport peut être une caisse mobile, une boîte, un véhicule, etc.

Les auteurs des travaux sélectionnés proposent des ontologies sur le transport **multimodal** et non pour le transport **intermodal**. De plus, pour chacun des travaux, la méthodologie d'acquisition des connaissances n'est pas expliquée et ces ontologies ne sont pas représentées avec un langage formel (ex. UML).

Cependant, comme nous avons défini le transport intermodal dans le chapitre 1 comme le transport multimodal des conteneurs, nous pouvons adapter les composants de ces différentes ontologies et les intégrer dans la phase de conceptualisation de la notre.

### Intégration des ontologies sur le risque

CAO *et al.* (2019) proposent une ontologie dans l'objectif d'améliorer la visibilité des risques dans la chaîne d'approvisionnement. Les auteurs dans cet article proposent une ontologie sur les risques dans la chaîne d'approvisionnement en présentant quatre principaux concepts : les *acteurs* sont *impliqués* dans la *chaîne d'approvisionnement* qui est *exposée* au *risque*. Le concept du *risque* agrège d'autres concepts (*catégorie du risque*, *source du risque*, *événement du risque* et *conséquence du risque*). Le concept de *performance* est la sortie de la chaîne d'approvisionnement. Elle *généralise* les sous-concepts de la *performance stratégique* et la *performance opérationnelle*.

Les auteurs dans (BÉNABEN *et al.*, 2016 ; LAURAS *et al.*, 2015) proposent une ontologie sous la forme d'un diagramme UML pour caractériser les situations de crise. Une crise est définie

comme l'occurrence soudaine d'un risque majeur<sup>5</sup>. Le diagramme UML proposé par ces auteurs est composé de trois sous-diagramme : (i) le système étudié, (ii) le traitement du système et (iii) la description de la crise. Le sous-système qui nous intéresse est celui du système étudié, il est composé de quatre concepts : les *composants du système* qui sont définis comme la partie du monde qui est affecté par la crise et qui sont *étendus* par les sous-concepts *biens*, *site naturel*, *personnes* et la *société civile*. Les composants du systèmes contiennent des *risques* et des *dangers*. Le *danger* existe continuellement mais le *risque* n'apparaît que s'il est exposé à un *danger*. La concrétisation du risque est due à l'occurrence d'un *événement* et à la présence d'un *danger*. Un *risque* étant défini comme la possibilité de l'occurrence d'un *événement* ayant des conséquences positives ou négatives. Deux dimensions caractérisent le risque : sa probabilité et la mesure de ses effets potentiels. Cette description du concept du risque est celle qui sera considérée dans notre ontologie. L'*événement* quant à lui, est défini comme une occurrence observable de quelque chose (plus ou moins importante).

## Présentation des concepts

Dans un souci de respecter les prescriptions présentées dans la sous-section 3.1.2 pour la mise en place d'une ontologie, les concepts utilisés pour présenter les connaissances sur les risques dans le transport intermodal sont définis dans cette sous-section. Ils ont été définis à partir des activités d'acquisition et d'intégration des connaissances pour répondre aux objectifs qui ont été fixés dans la phase de spécification (section 3.3.1).

1. **Acteur** : les instances du concept *acteur* sont les personnes qui interviennent dans le processus de transport intermodal. Ce concept de notre ontologie peut être spécifié en sous-concepts. Ces sous-concepts sont les *exportateurs*, *consignataires*, *compagnies fournissant les services logistique (transporteurs, etc)*, *compagnies maritimes* et les *autorités portuaires*. La figure 3.10a présente une taxonomie des acteurs.
2. **Conteneur** : le concept *conteneur* désigne l'unité de transport (UTI) utilisée pour le transport intermodal des marchandises.
3. **Moyen de transport** : le concept *moyen de transport* comme son nom l'indique désigne l'ensemble des moyens de transport utilisés dans le transport intermodal. Les sous-concepts *camion*, *porte-conteneur* et *train* étendent ce concept.
4. **Ressource** : les instances du concept *ressource* sont les ressources utilisées pour effectuer le transport de marchandises. Dans notre cas les instances de ce concept agrègent les instances du concept *conteneur* et celui des *moyens de transport*. La figure 3.10b présente une taxonomie des ressources.
5. **Réseau** : les instances du concept *réseau* sont utilisées pour effectuer le processus opérationnel de transport. C'est sur ce réseau que transitent les marchandises. Il agrège les concepts *nœud* et *lien*. Une instance du concept réseau est par définition un graphe dont les nœuds peuvent être des ports, des zones de transit, des entrepôts et les liens un ensemble de routes, de réseau ferroviaire, et de voies navigables. La figure 3.10c présente une taxonomie du réseau.
6. **Lien** : les instances du concept *lien* sont les éléments sur lesquels transitent les instances du concept *ressources*. Les sous-concepts *rail*, *route*, *mer* et *fleuve* sont les extensions de ce concept.
7. **Nœud** : les instances du concept nœud sont les POI<sup>6</sup> dans le processus de transport intermodal. Il est étendu par les sous-concepts *entrepôt*, *port* et *zone de transit*.
8. **Activité** : les instances du concept *activité* sont les phases du processus de transport intermodal. Ce concept est étendu par les sous-concepts suivants : le *pré-acheminement*, *manutention du conteneur*, *transport maritime* et le *post-acheminement*. La taxonomie des activités de transport est présentée par la figure 3.10d.

---

5. Le terme majeur signifie que les conséquences du risques sont graves

6. POI : Point d'intérêt

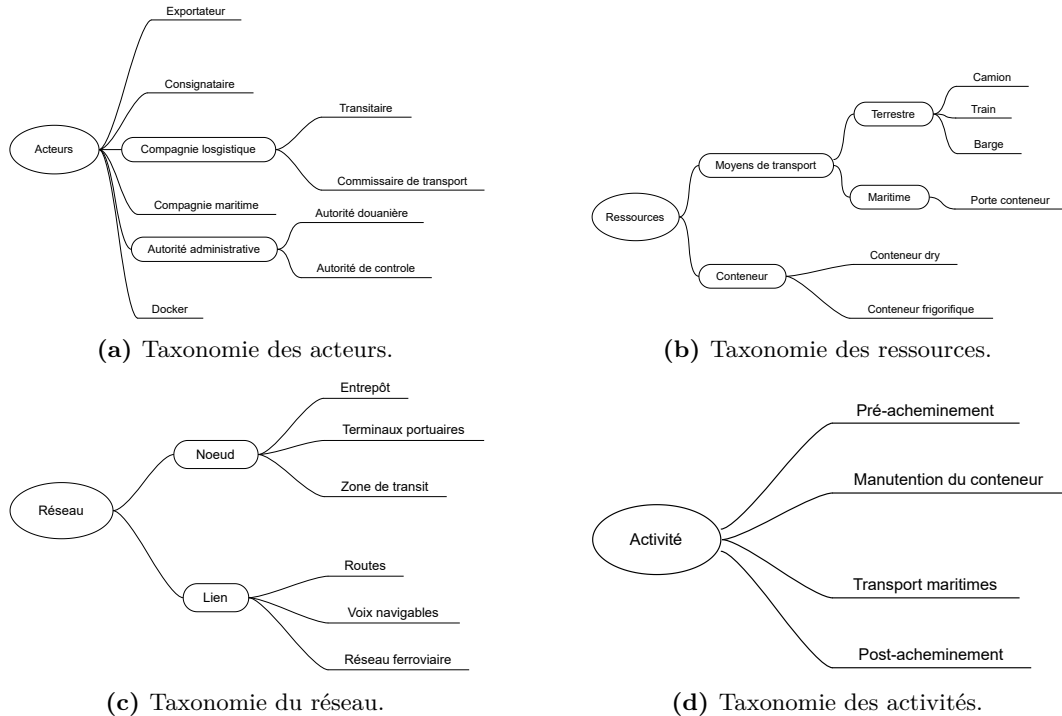
9. **Danger** : le concept de *danger* est défini comme un potentiel de nuisance sur une composante du processus de transport intermodal ayant pour conséquence la perturbation du flux de transport de marchandises. Nous faisons l'hypothèse que les dangers sont intrinsèques au réseau de transport. Cette hypothèse peut paraître minimale par rapport à la définition du concept danger. En effet, chaque concept du processus de transport intermodal peut être considéré comme source de dommages potentiels. Mais au vu de notre objectif qui pour rappel est la gestion des risques entraînant du retard durant le transport intermodal, les principales zones de danger sont localisées sur le réseau de transport. Le concept de danger présente un attribut de localisation correspondant à la situation géographique dudit danger. Par exemple, une instance de danger sera la congestion qui est associée à un port qui est lui-même une instance du concept nœud. Le danger est statique, c'est-à-dire qu'il est indépendant des activités de transport. Le figure 3.11c présente une taxonomie des dangers.
10. **Évènement** : les instances du concept *évènement* sont les événements aléatoires (aléas) qui sont susceptibles de survenir lors du transport intermodal des marchandises. Nous pouvons citer comme exemples d'instances les grèves, le manque d'équipement de transbordement, le feu, etc. Le concept *évènement* est étendu par deux sous-concepts les *causes* et les *conséquences* qui agrège le concept *impact*. La figure 3.11b présente une taxonomie des événements.
11. **Symptôme** : par analogie au domaine médical, le concept *symptôme* représente toute manifestation qui révèle de la survenue d'une instance du concept *évènement*. L'identification d'un symptôme permet de diagnostiquer un type d'évènement particulier. Dans le cadre du transport intermodal, un symptôme sera par exemple «un nombre important de tweets autour d'un POI».
12. **Impact** : le concept *impact* représente l'impact qu'un évènement a sur les activités. Dans nos travaux nous ne considérons que les impacts de délai. La taxonomie des impacts est présentée par la figure 3.11d.
13. **Risque** : nous définissons le concept du *risque* en nous inspirant du scénario d'accident de DESROCHES *et al.* (2016) (figure 2.2). Dans ce scénario, le risque est associé à la potentialité d'échec ou d'atteinte partielle d'un objectif. Dans nos travaux, le risque correspond à l'impossibilité de livrer les marchandises dans le délai imparti. Une instance du concept *risque* est générée par la concrétisation d'une instance du concept *danger* par une instance du concept *évènement*. Concrètement, prenons un port qui présente un danger de congestion. A l'apparition d'une grève de dockers sur ce même port, ce danger générera un risque de congestion avec une probabilité associée. La figure 3.11a présente une taxonomie des risques.

## Présentation des relations

Dans la représentation des diagrammes de classes UML, il existe plusieurs types de liens pour établir les relations entre les classes. Le tableau 3.6 présente quelques-unes des relations usuelles.

La relation d'association peut être spécifiée pour lui donner un sens métier lors de la modélisation. La figure 3.12 illustre une relation d'association entre les classes *ressource* et *réseau*. Cette relation stipule que les instances de la classe *ressource* **transitent** sur les instances de la classe *réseau*. Le direction de la relation est indiquée par le triangle plein (►) au bout de cette dernière. La cardinalité indique le nombre d'instances autorisées dans l'association entre les deux classes.

Les concepts utilisés pour présenter les connaissances sur le transport intermodal sont reliés entre eux par des relations bien définies et explicites. Nous listons ci-dessous l'ensemble des relations que nous utilisons pour relier les concepts dans la phase de formalisation de notre ontologie (section 3.4) :



**Figure 3.10** – Taxonomie des concepts pour la modélisation du processus de transport intermodal.

**Table 3.6** – Relations du diagramme de classes UML

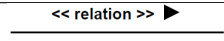
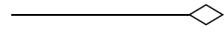
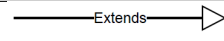
Relation	Notation	Signification
Association		Une association est un terme large qui englobe à peu près n'importe quelle connexion ou relation logique entre des classes.
Agrégation		Une agrégation désigne la formation d'une classe particulière à la suite de l'agrégation ou de la construction d'une classe en tant que collection.
Héritage		L'héritage fait référence à un type de relation dans lequel une classe associée est l'enfant d'une autre en vertu du fait qu'elle assume les mêmes fonctionnalités que la classe mère.



Figure 3.11 – Taxonomie des concepts pour la modélisation des risques.

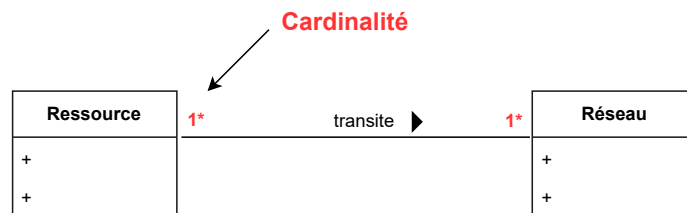


Figure 3.12 – Illustration de la relation entre deux concepts.

1. *utilise* : les relations typées *utilise* spécifient que l'un des concepts utilise l'autre.
2. *crée* : une relation *crée* entre deux concepts  $C_1$  et  $C_2$  spécifie que les instances du concept  $C_1$  créent des instances du concept  $C_2$ .
3. *transit* : la relation *transit* indique que les instances de l'un des concepts transitent sur les instances de l'autre concept.
4. *étend* : encore appelé relation d'héritage dans le langage de modélisation UML, la relation *étend* est une extension d'un concept. Elle indique que les concepts du niveau inférieur sont des cas particulier de celui du niveau supérieur.
5. *concerne* : la relation *concerne* entre deux concepts  $C_1$  et  $C_2$  indique le fait qu'une instance de  $C_1$  est du ressort d'une instance de  $C_2$ .
6. *génère* : une relation *génère* entre deux concepts  $C_1$  et  $C_2$  indique que les instances du concept  $C_1$  génèrent des instances du concept  $C_2$ .
7. *concrétise* : une relation *concrétise* entre deux concepts  $C_1$  et  $C_2$  souligne le fait que les instances du concept  $C_1$  permettent la réalisation des instances du concept  $C_2$ .
8. *affecte* : le type de relation *affecte* entre deux concepts  $C_1$  et  $C_2$ , énonce le fait que les instances du concept  $C_1$  affectent les instances du concept  $C_2$ .

## Présentation des fonctions et des axiomes

### Les fonctions

Les fonctions de l'ontologie sur les risques dans le transport intermodal sont listées ci-dessous :

1. Un risque se réalise si et seulement si un danger est concrétisé par un évènement.
2. Si un évènement  $E1$  est la cause de l'évènement  $E2$ , alors  $E2$  est la conséquence de  $E1$ .
3. Les ressources sont composées de conteneur et des moyens de transport.
4. Les évènements agrègent des symptômes.

### Les axiomes

Des restrictions sur certains concepts ont été mises en place sous forme d'axiomes.

1. La probabilité d'occurrence d'un risque est comprise entre 0 et 1.
2. Une description du risque peut être rajoutée en commentaire.
3. Une description d'un évènement peut être rajoutée en commentaire.
4. L'intensité de l'impact du risque peut être rajoutée en commentaire.

## 3.4 Formalisation des connaissances dans le transport intermodal

Pour une meilleure représentation des connaissances du risque dans le transport intermodal, deux ontologies ont été créées. Une ontologie sur le processus du transport intermodal des conteneurs qui contient les concepts nécessaires pour modéliser la chaîne de transport intermodal de bout en bout et une ontologie des risques qui surviennent pendant les activités de transport. Cette dernière présente les concepts spécifiques à la description des risques et les relations qui les lient.

### 3.4.1 Formalisation des connaissances sur le processus de transport intermodal

La figure 3.13 présente l'ontologie pour le processus de transport intermodal sous le formalisme UML. Le modèle est composé de quatre principales classes (*acteurs*, *ressources*, *réseau* et *activités*). Ces classes sont définies dans la sous-section 3.3.2.

La classe *acteur* désigne les acteurs du processus de transport intermodal. Elle est constituée des sous-classes *exportateur*, *compagnie logistique*, *compagnie maritime*, *autorité portuaire*, *consignataire*. Les instances de la classe *acteur* *utilisent* les instances de la classe *ressource* pour effectuer le transport des marchandises.

La classe **ressource** est *constituée* des classes *conteneur* et *moyens de transport*. Les instances de la classe **ressource** *transitent* sur les instances de la classe *réseau*.

Les classes *lien* et *nœud* composent la classe *réseau*. La classe *lien* est *étendue* par les sous-classes *rail*, *route mer fleuve* et la classe *nœud* est *étendue* par les sous-classes *entrepôt*, *port zone de transit*.

Les instances de la classe *activité* désignent les différentes phases du processus de transport intermodal (pré-acheminement, manutention au port, transport maritime, etc). Elles *utilisent* les instances de la classe *réseau* et sont *créées* par les instances de la classe *acteur*.

### 3.4.2 Formalisation des connaissances sur les risques dans le transport intermodal

L'ontologie sur les risques dans le transport intermodal est présentée sous le formalisme UML par la figure 3.14.

Pour rappel la classe *danger* désigne un potentiel de nuisance sur la classe *réseau* ayant pour conséquence la perturbation du flux de transport de marchandises. Une instance de la classe *danger* est *concrétisée* par une instance de la classe *événement* plus précisément de la sous-classe *cause*. L'instance de la classe *événement* en concrétisant le risque fait apparaître des instances de la classe *symptôme*.

Lorsque le danger se concrétise, il génère un risque qui concerne l'évènement qui a permis sa concrétisation. Ce risque crée à son tour une *conséquence* qui est également une instance de la classe *événement*. Cette conséquence entraîne un *impact* de délai sur le processus de transport intermodal. Le tableau 3.7 présente les relations entre les différents concepts.

### 3.4.3 Modèle de connaissances global

La figure 3.15 présente l'ontologie globale toujours sous le formalisme de représentation UML. Elle est composée du modèle du processus de transport intermodal et du modèle de risques.



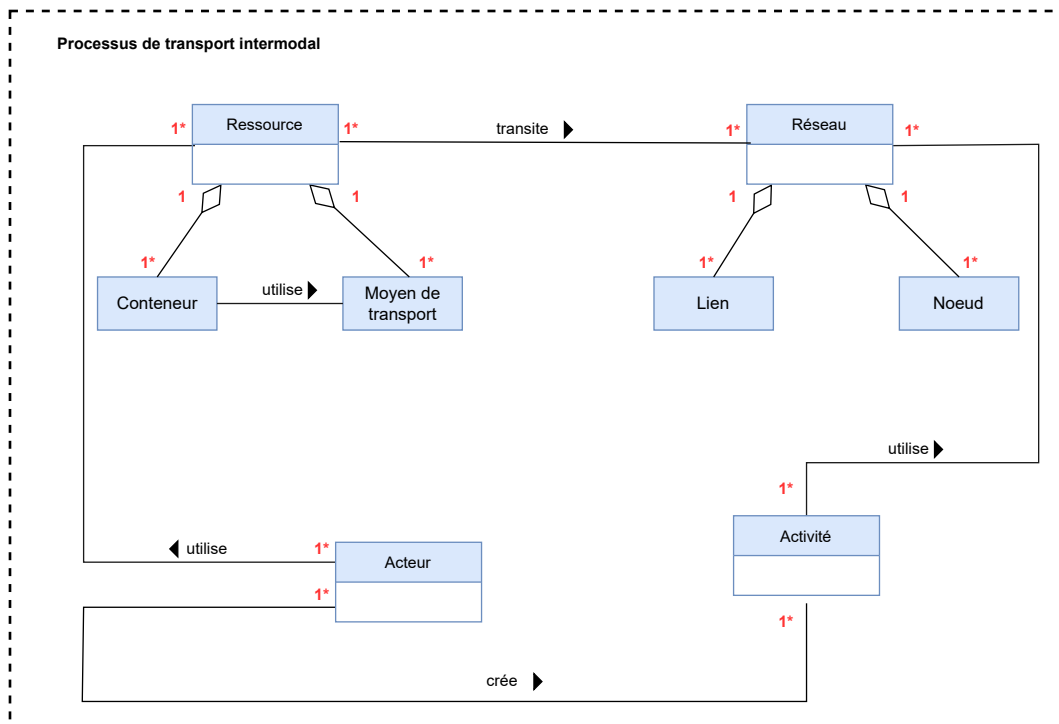


Figure 3.13 – Diagramme UML de l'ontologie du processus de transport intermodal.

Table 3.7 – Liens entre les concepts de l'ontologie.

Nb.	Concept(Source)	Relation (►)	Concept(Portée)
1	Réseau	génère	Danger
2	Évènement	concrétise	Danger
3	Évènement	agrège	Symptôme
4	Évènement	concerne	Risque
5	Danger	génère	Risque
6	Risque	affecte	Activité
7	Danger	crée	Évènement
8	Évènement	agrège	Impact

Lorsque le processus de transport intermodal est déclenché, les instances de la classe *réseau* génèrent des instances de *danger*. Ces dangers sont susceptibles de se *concrétiser* à l'apparition d'un évènement aléatoire et donc de *générer* des instances de la classe *risque* qui *affectent* les instances de la classe *activité* (pré-acheminement, opération de manutention, etc).

### 3.5 Implémentation et population de l'ontologie

Pour rappel l'implémentation des connaissances consiste à traduire le modèle conceptuel obtenu grâce à la phase de formalisation en modèle ontologique physique. Après avoir proposé avec l'aide des experts du transport intermodal dans la section précédente, une ontologie de domaine permettant de comprendre la génération des risques entraînant du retard dans le transport intermodal. Cette section a pour objectif de décrire l'implémentation et la population de cette ontologie dans le but de la réutiliser pour détecter les risques.

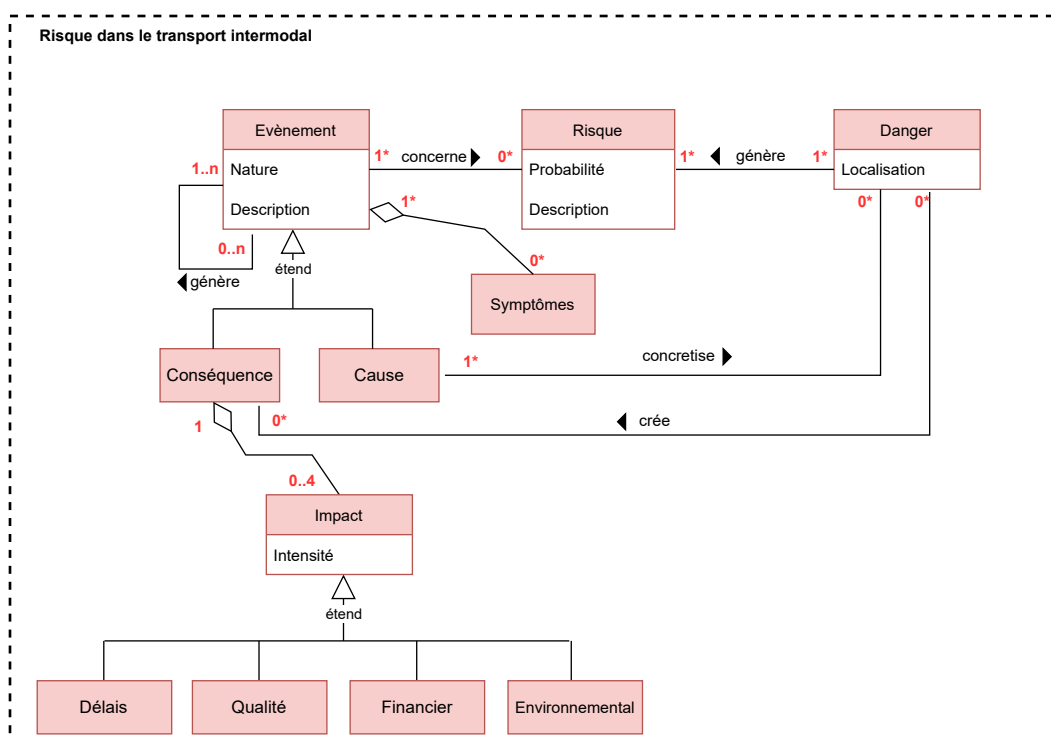


Figure 3.14 – Diagramme UML de l'ontologie des risques dans le transport intermodal.

### 3.5.1 Implémentation de l'ontologie

Il s'agit ici de l'implémentation physique des concepts et des relations. Tout comme de nombreux auteurs (KURBATOVA *et al.*, 2021 ; LAN *et al.*, 2021 ; LIN *et al.*, 2021 ; PHAM *et al.*, 2022 ; Z. WANG *et al.*, 2021), nous implémentons notre ontologie sous la forme d'un graphe de connaissances. L'ontologie sert de schéma de connaissance et est utilisée pour créer des instances, générer la base de connaissances et enfin construire le graphe de connaissances.

La mise en place du graphe de connaissances requiert le choix d'un système de gestion de base de connaissances. Nous avons fait le choix d'utiliser Neo4J pour l'implémentation de notre base de connaissances. Neo4J<sup>7</sup> est un système de gestion de base de données orientée graphe. Les connaissances sont stockées sous formes de nœuds et reliées entre elles par des liens sous formes d'arc. Ce choix a été motivé par la capacité de Neo4J à représenter, récupérer et naviguer plus facilement entre les données connectées. En plus, les commandes (cypher query language) de Neo4J sont des modèles déclaratifs et facilement lisible par l'homme et la machine (Z. WANG *et al.*, 2021). La figure 3.16 proposée par CHASSERAY (2021) présente la correspondance entre les composants d'un modèle de données UML et celui d'un graphe sous Neo4J.

L'objectif de notre ontologie étant d'établir une relation de cause à conséquence entre les facteurs de risques aboutissant à un retard sur l'ensemble des quatre phases du processus de transport intermodal, notre implémentation se focalise sur les nœuds évènement, risque, impact et leurs différents liens. Le tableau 3.8 présente les composants de la base de connaissances et la figure 3.17 présente l'implémentation physique des concepts de l'ontologie qui nous intéressent.

7. Neo4J : <https://neo4j.com/>

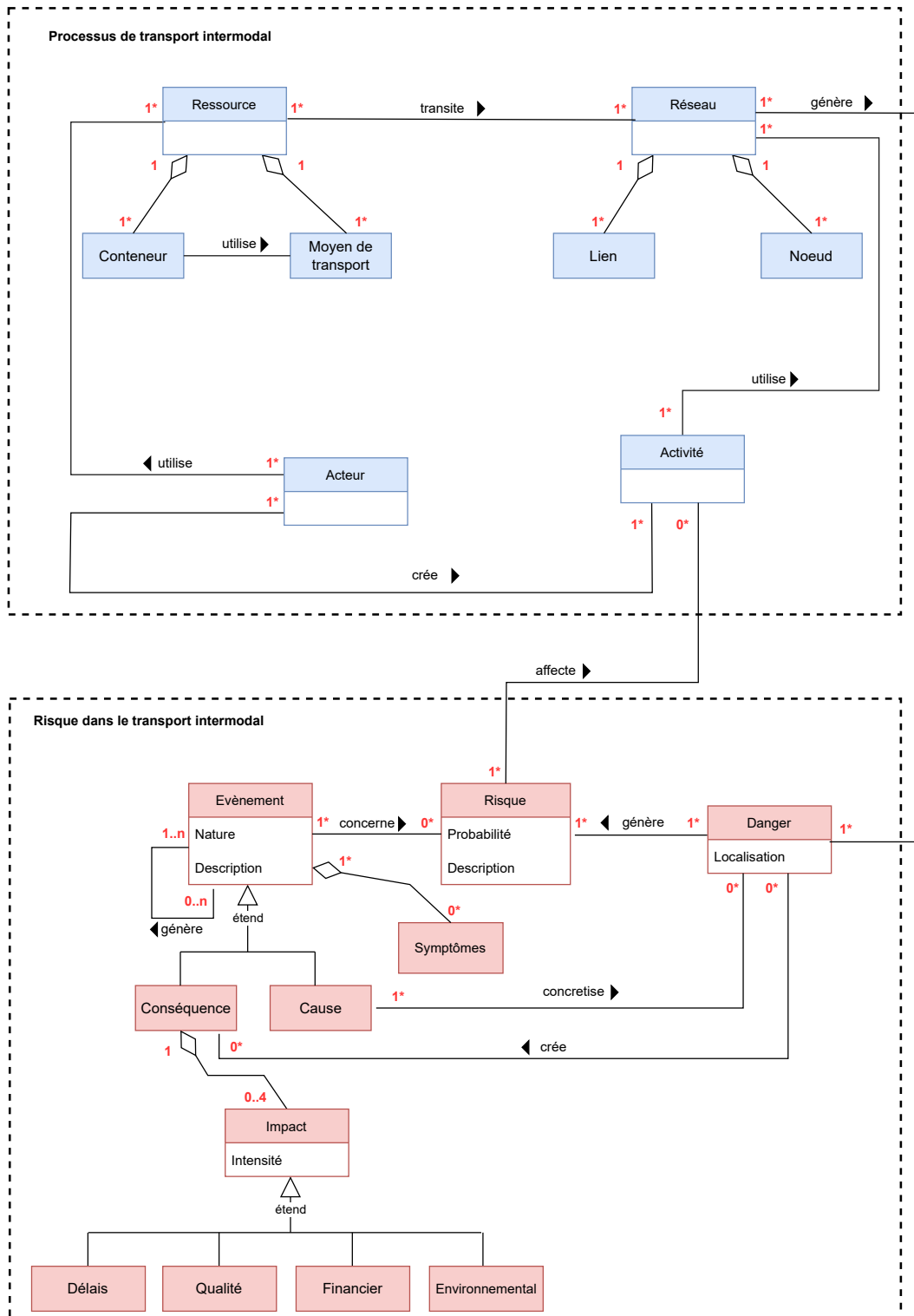
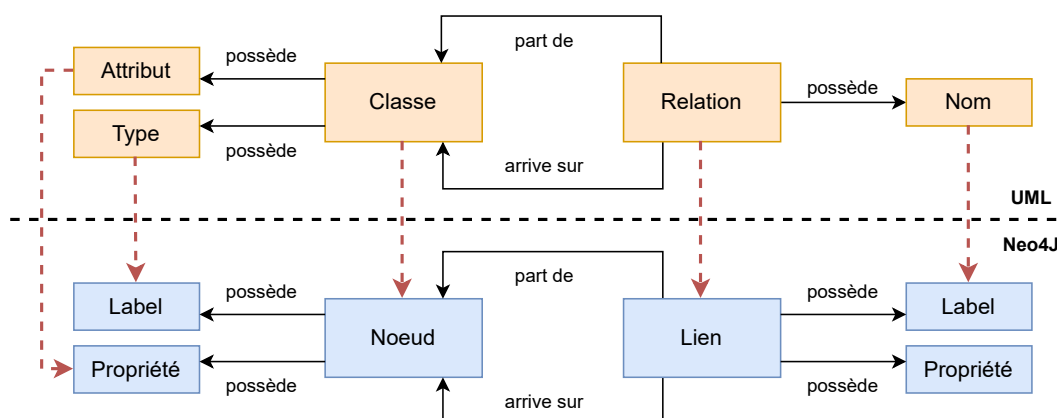


Figure 3.15 – Diagramme UML de l'ontologie globale.



**Figure 3.16** – Adaptation des entités du diagramme UML en entités du graphes de connaissances.

**Table 3.8** – Les entités de la base de connaissances.

Nœud(Source)	Liens(►)	Nœud(Portée)
Évènement	IsCause_step_i	Évènement
Évènement	Concerns	Risque
Évènement	Create	Impact

**Remarque :** Il est important de ne pas confondre la classe *nœud* qui est un concept de l'ontologie (voir la sous-section 3.3.2) et les entités nœuds du graphe de connaissances qui sont instances de concepts.

### 3.5.2 Population de l'ontologie

Conformément à notre objectif, la population de l'ontologie se focalise sur le concept *évènement*. Il est question de peupler la base de connaissances avec des instances génériques<sup>8</sup> du concept *évènement*.

Grâce à la phase d'acquisition des connaissances (voir section 3.3) nous avons mis en place un arbre des causes des évènements concrétisant les dangers et susceptibles d'engendrer du retard dans la chaîne de transport intermodal. L'arbre des causes ayant été défini dans le chapitre 2, comme un arbre composé d'un ensemble de nœuds et de liens hiérarchisés, probabilisés ou non. Les nœuds sont les défaillances potentielles du système et les liens expriment les relations entre les différents modes de défaillances. Nous utilisons l'arbre des causes pour reconstruire les scénarios conduisant au retard pour chaque phase du processus de transport intermodal tout en listant les facteurs de risques (évènements aléatoires) qui y sont associés.

La figure 3.18a présente la syntaxe utilisée pour la modélisation des causes de retards dans les différentes phases du processus de transport intermodal et la figure 3.18b présente les liaisons qui sont utilisées lors de mise en place de l'arbre des causes. La liaison **OU** stipule que son évènement de sortie est généré si une ou plusieurs entrées de la porte sont présentes. Dans le cas de la figure d'illustration, il suffit qu'un des évènements  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$ , soit présent pour

8. Instance générique : nous considérons une instance générique comme une instance identifiée lors de la phase d'acquisition des connaissances. Une congestion par exemple est une instance générique à la différence de la congestion du canal de Suez le 23 mars 2021 à 7h 40min qui est une instance.

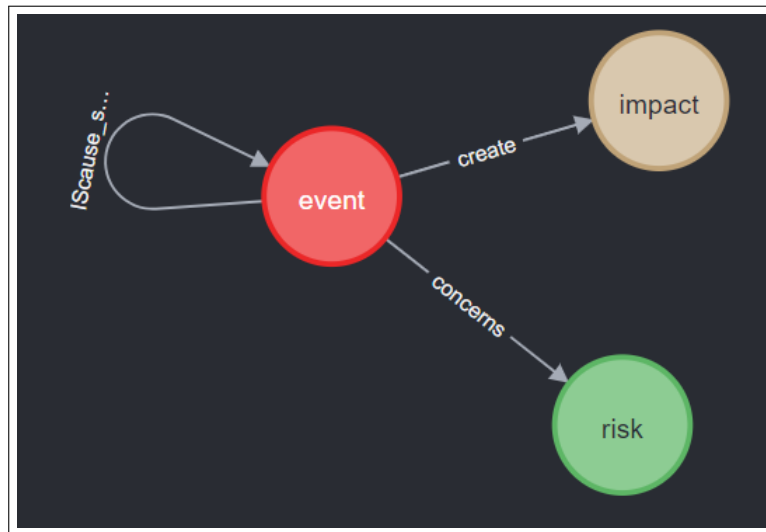


Figure 3.17 – Implémentation des connaissances.

que  $E_4$  soit généré. La liaison **Matricielle** désigne le fait son évènement de sortie est généré en fonction de certaines combinaisons des entrées, qui ne sont pas explicitées. Dans le cas de l'illustration l'évènement,  $E_4$  dépend de l'existence de  $E_1$ ,  $E_2$  et  $E_3$  sans que les combinaisons devant conduire à  $E_4$  ne soient explicitées.

Le premier niveau de l'arbre de causes est présenté par la figure 3.19 qui débute avec l'impact de retard dans le transport intermodal qui peut être occasionné par un retard dans la phase de pré-acheminement ou pendant la phase de manutention du conteneur ou durant la phase de transport maritime ou encore durant la phase de post-acheminement. Pour chacun des retards sur les phases du processus de transport, nous y associons les évènements aléatoires en prenant soins d'explicitier les relations de cause à conséquence. Ces relations sont probabilisées et les probabilités ont été obtenues grâce aux différents entretiens que nous avons menées avec les acteurs du processus de transport intermodal.

Nous peuplons le concept *évènement* dans Neo4J avec des instances génériques (grève<sup>9</sup>, congestion, déviation de route<sup>10</sup>, etc) et les arcs *IsCause\_step\_i* ( $i \in [1, 4]$ ) qui désignent les relations de cause à conséquence entre les évènements aléatoires sur les phases du processus de transport intermodal. La figure 3.20 illustre la population du concept *impact* dans Neo4J.

### 3.5.3 Cas d'illustration

Dans cette section nous utilisons des cas d'application pour présenter la base de connaissances. Le tableau 3.9, présente trois scénarios d'accidents réels que nous utilisons pour présenter les instances de l'ontologie.

#### Scénario de génération des risques dans la phase de pré/post-acheminement

Pour rappel, la phase de pré-acheminement dans le processus de transport intermodal consiste à convoier le conteneur de l'entrepôt de l'exportateur au port de départ. Cette activité de pré-acheminement lors de son exécution utilise le réseau de transport qui présente des dangers pouvant générer des risques et engendrer du retard. Ces dangers sont localisés sur les nœuds comme par exemple sur un port pour lequel un exemple de danger peut être sa capacité

9. strike

10. route deviation

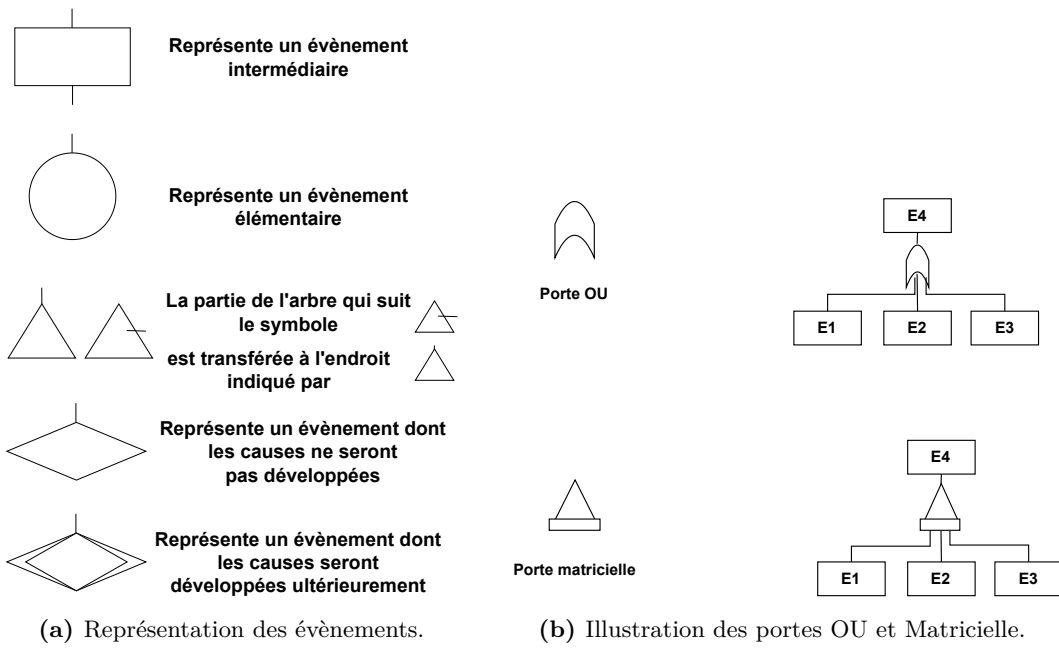


Figure 3.18 – Syntaxe pour la mise en place d'un arbre des causes.

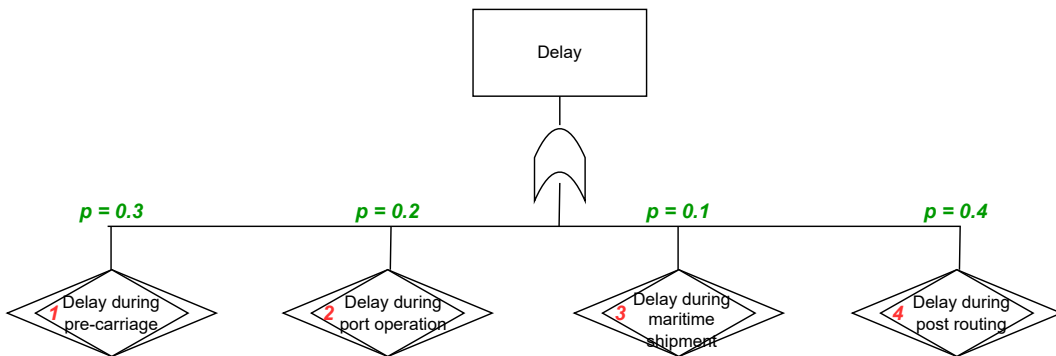


Figure 3.19 – Premier niveau de l'arbre des causes.

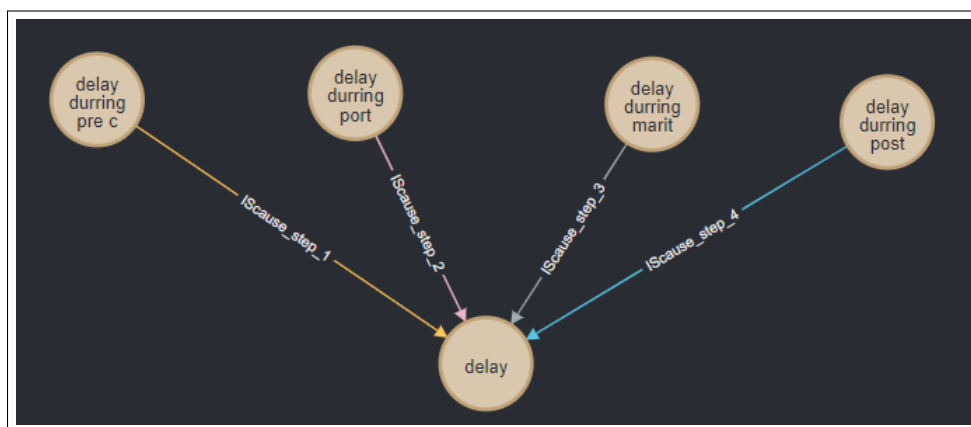


Figure 3.20 – Illustration des instances du concept *impact*.

Table 3.9 – Scénario d'accidents.

No.	Scénario d'accident	Activité	Danger	Évènement	Conséquence	Symptôme
1	Le conteneur a subi un retard durant le transport routier à cause d'une déviation de route. L'itinéraire initial contient une route avec un passage sous un pont, un camion avec un charagement trop haut a heurté le pont ce qui a occasionné une congestion de la route.	Pré-acheminement	Présence d'obstacle	Hauteur du charagement, Passage sous le pont d'un camion, Heurt du pont, congestion de la route	Déviation de route	Article de presse.
2	La livraison du conteneur a subi un retard à cause des opérations de manutention au port qui ont pris plus de temps que prévu. En effet de violents vents ont empêché la manutention des conteneurs avec les grues aux risques de causer des chutes et de blesser les employés.	Manutention du conteneur	Climat stable	Vents violents, période de l'année	Attente supplémentaire	Tweets, Articles de presse.
3	La phase de transport maritime du conteneur a pris plus de temps que prévu à cause d'une obstruction de la voie navigable par un navire. Lors de son passage dans le canal de navigation étroit, la stabilité du navire a été perturbée par un vent violent.	Transport maritime	Route étroite, dimension du navire	Passage au canal, vent violent, Congestion du canal	Attente	Tweets, Articles de presse

d'accueil. Les dangers sont également présents sur les liens, pour en citer quelques-uns, nous avons la présence des ponts sur les routes, l'étroitesse de la route, etc. Ces dangers sont susceptibles d'être concrétisés par des événements aléatoires et de générer des risques. Par exemple dans le scénario d'accident numéro 1 du tableau 3.9, la présence du pont sur l'itinéraire de transport est un danger qui a été concrétisé par deux événements aléatoires (le passage sous ce pont par un camion et le heurt du pont). Ces événements ont généré un risque de congestion sur l'itinéraire de transport qui lorsqu'il s'est réalisé a entraîné une déviation de route. L'analyse de ce scénario d'accident d'un point de vue événement nous a conduit à la mise en place d'un diagramme causal qui présente les relations de cause à conséquence entre les quatre événements (tentative de passage sous le pont → heurt du pont → congestion de la route → déviation de la route).

Grâce aux interviews, nous avons établi un diagramme causal des événements entraînant du retard sur le pré-acheminement. La figure 3.21 présente ce diagramme et son implémentation dans Neo4J est illustrée par la figure D.5 en annexe D (le lien «IsCause\_step\_1» spécifie le fait que le nœud source est la cause du nœud porté). Les causes associées à l'évènement climat extrême sont fournies en annexe D (figure D.1). En partant du retard sur le pré-acheminement et des événements aléatoires sur le flux de transport intermodal, nous avons établi avec les personnes interviewées cet arbre cause.

**Remarque :** Pour rappel les probabilités présentées sur l'arbre des causes ont été obtenues grâce aux entretiens menés avec les acteurs de la chaîne de transport, elles sont donc spécifiques à notre étude et difficilement généralisables à cause du nombre réduit de personnes interrogées.

Nous retrouvons le même arbre des causes pour la phase de post-acheminement à la seule différence qu'une cause supplémentaire qui est l'erreur de déchargement du conteneur a été ajoutée. La figure 3.22 présente l'arbre des causes pour les risques entraînant retard durant la phase de post-acheminement du conteneur.

### Scénario de génération des risques dans la phase de manutention au port

La phase de manutention des conteneurs s'effectue dans une instance du concept nœud du processus de transport intermodal. Elle présente des dangers (manipulation de marchandises dangereuses) qui peuvent retarder la livraison finale du conteneur. Les événements aléatoires tels que les climats instables, le manque de ressources (humaines et matériels) ou encore les temps d'attente longs sont susceptibles de concrétiser ces dangers.

Dans le scénario 2 du tableau 3.9 après l'identification des événements aléatoires entraînant le retard sur la livraison du conteneur, le diagramme de cause à conséquence se présente comme suit : Période de l'année → Vent trop fort → Attente supplémentaire.

L'arbre des causes du retard sur la phase de manutention du conteneur est présenté par la figure 3.23 et son implémentation dans Neo4J est illustrée par la figure D.6 en annexe D. Elle donne un aperçu des événements aléatoires pouvant générer du retard lors de la manutention du conteneur.

### Scénario de génération des risques dans la phase de transport maritime

Comme pour toutes les précédentes phases du processus de transport intermodal, la phase de transport maritime présente également des dangers pouvant entraîner un retard dans le processus de transport. Ces dangers sont susceptibles de se concrétiser pendant que le navire se trouve à quai, par exemple un retard de départ du navire, ou pendant un trajet entre deux POI, comme un temps d'attente inhabituellement long sur un port intermédiaire, ou encore la perte du conteneur qui engendre un retard infini.



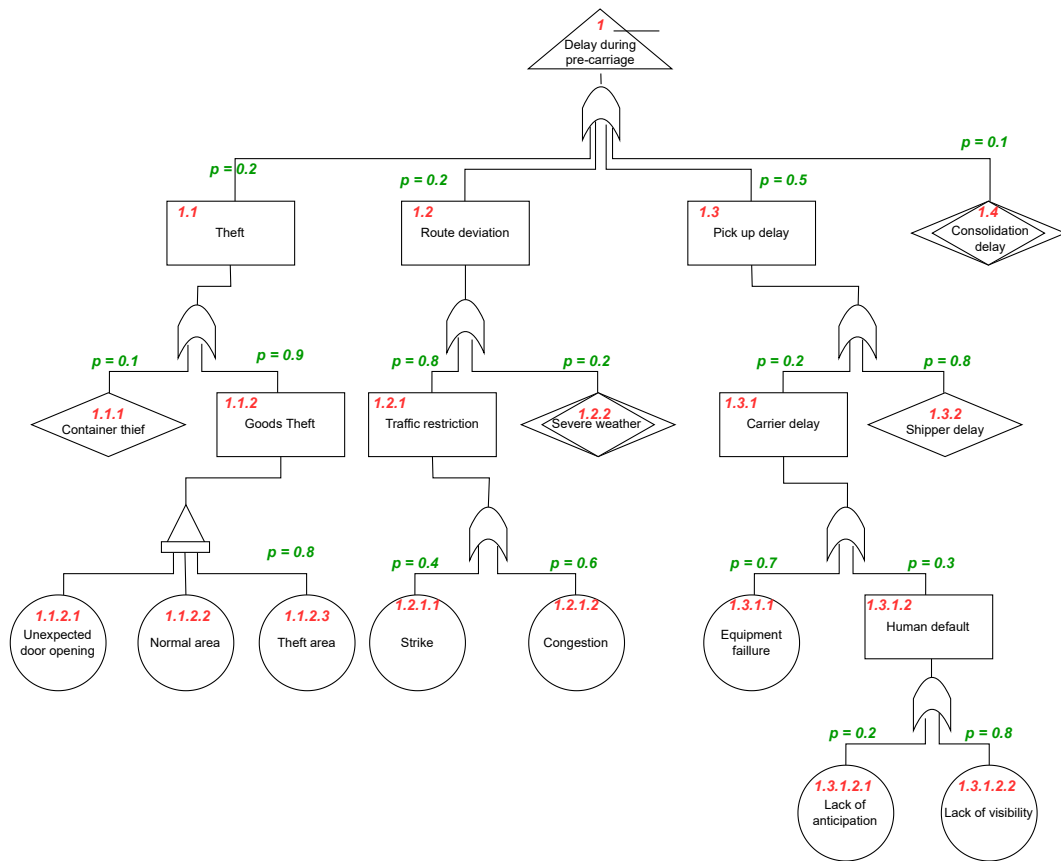


Figure 3.21 – Arbre des causes de retard sur le pré-acheminement.

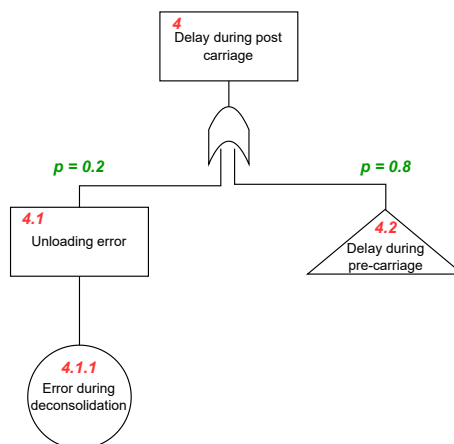


Figure 3.22 – Arbre des causes de retard sur le post-acheminement.

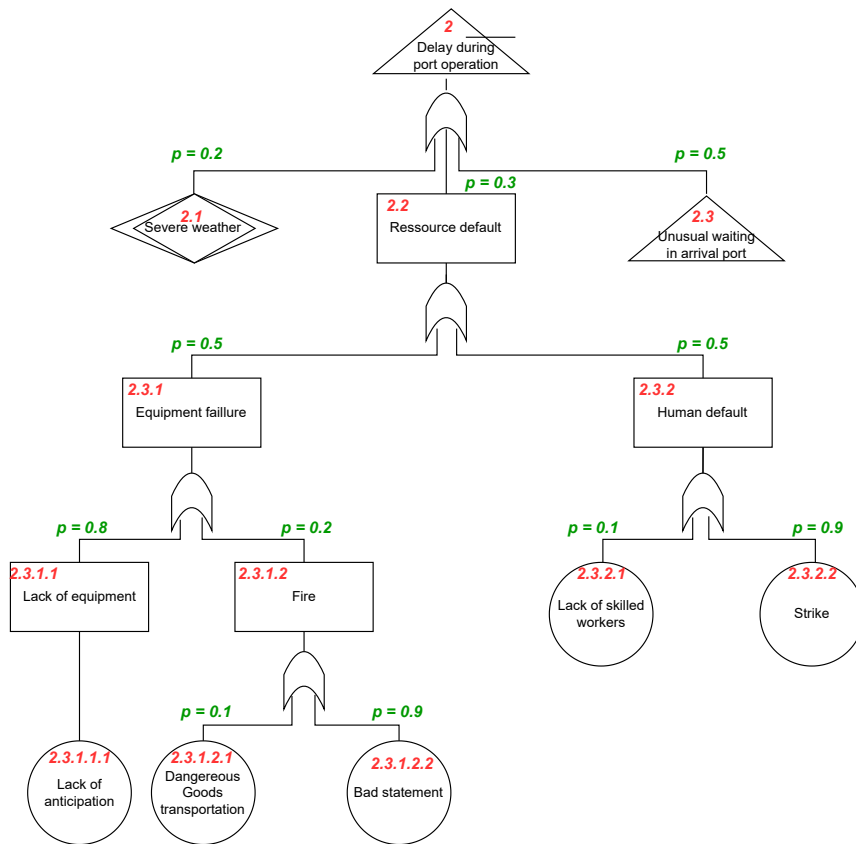


Figure 3.23 – Arbre des causes de retard pendant la phase de manutention.

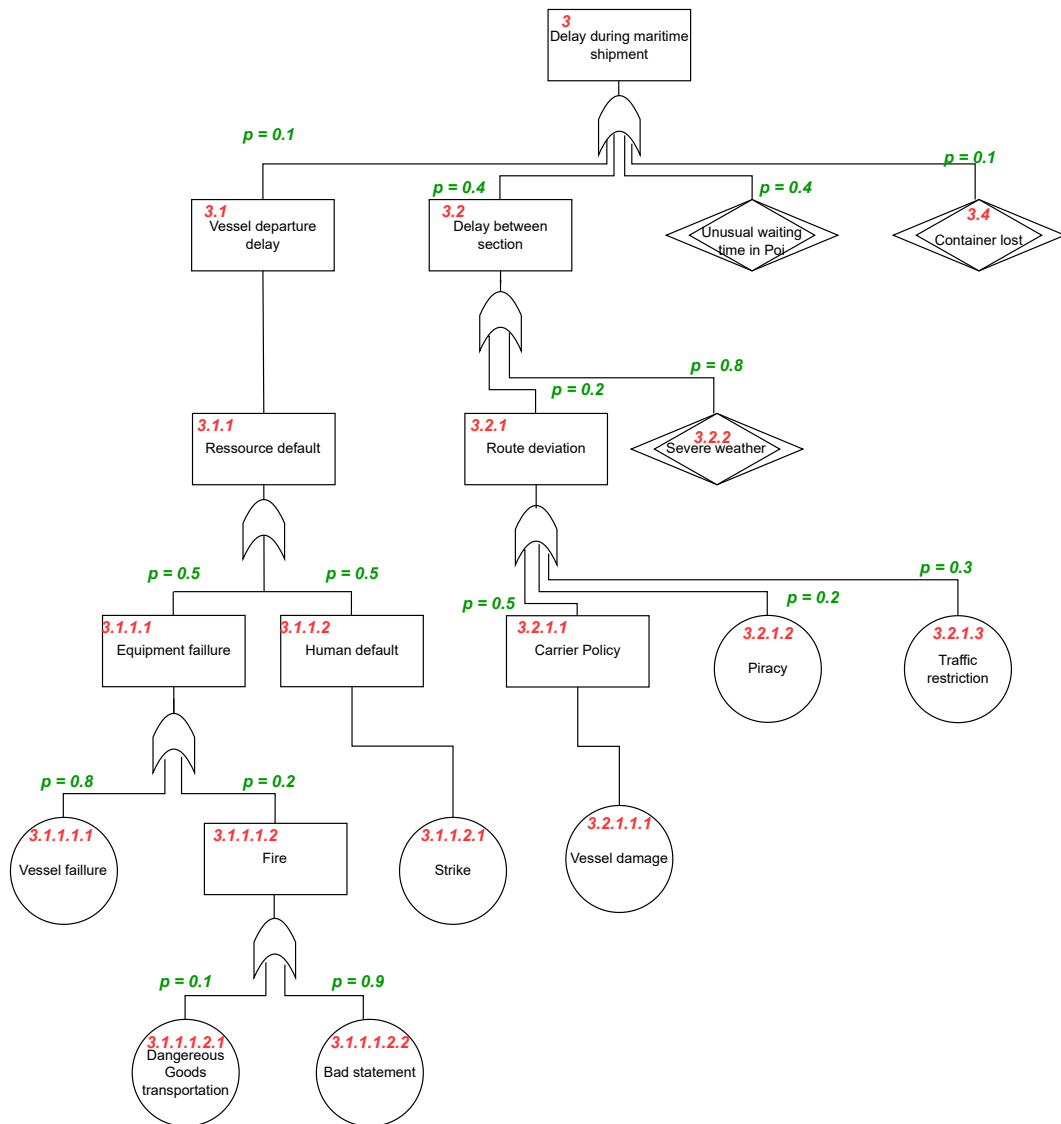


Figure 3.24 – Arbre des causes de retard pendant la phase de transport maritime.

Le scénario 3 du tableau 3.9 décrit un accident sur la phase de transport maritime où l'étroitesse du canal est un danger. L'enchaînement des évènements aléatoires suivant l'ordre décrit (passage d'un navire dans le canal → vent violent → congestion du canal) a entraîné un retard de livraison du conteneur.

La figure 3.24 présente l'arbre de causes des retards sur la phase de transport maritime et son implémentation dans Neo4J est illustrée par la figure D.7 en annexe D. Chaque mode de défaillance causant un potentiel retard sur la phase de transport maritime du conteneur y a été spécifié en déclinant les causes sources. Les modes de défaillance pour le temps d'attente inhabituel sur un POI sont disponibles en annexe D (figure D.3) et ceux pour la perte du conteneur sont présentés en annexe D (figure D.4).

## Conclusion

---

La question de recherche adressée dans ce chapitre est : Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ? Nous y avons répondu en proposant une ontologie de domaine qui spécifie, conceptualise et formalise les notions importantes dans le transport intermodal.

La première section de ce chapitre présente les principes et la méthodologie pour la mise en place d'une ontologie. Nous avons brièvement montré qu'il existe diverses méthodologies (METHONTOLOGY, NeOn, ON-TO-KNOWLEDGE, SENSUS, KACTUS, TOVE et USCHOLD & KING) pour la mise en place des ontologies et nous avons présenté les principales phases qui leur sont communes (*spécification, conceptualisation et formalisation de la connaissance*).

Cela nous a ensuite permis de proposer dans la section 3.3 une méthodologie pour la mise en place de l'ontologie pour modéliser les risques dans le transport intermodal. Les différentes méthodes utilisées pour acquérir les connaissances nécessaires afin de spécifier et de conceptualiser notre ontologie de domaine ont également été présentées et discutées dans cette section. Les méthodes (revue de littérature, interviews et questionnaire) présentées dans cette section nous ont permis d'identifier l'objectif de mise en place de l'ontologie qui est de permettre aux acteurs de la chaîne de transport intermodal de maîtriser les risques entraînant du retard lors du transit des conteneurs, ainsi que de recenser les concepts importants à formaliser.

Dans la section 3.4 de ce chapitre nous avons proposé un modèle pour la formalisation des connaissances autour du risque dans le transport intermodal. Cette représentation des connaissances sous la forme d'une ontologie globale est composée de deux modèles UML (un modèle sur le processus du transport intermodal qui décrit le contexte du domaine et un modèle sur les risques dans le transport intermodal qui décrit les différentes relations entre le risque et ses concepts sous-jacents).

L'implémentation et la population sous forme de graphe de l'ontologie est présentée dans la section 3.5 ; il s'agit de la base de connaissances. Un accent a été mis sur les concepts événements, risque et impact. Après avoir établi un diagramme causal présentant les relations de cause à conséquence entre les instances du concept événement concrétisant les risques et entraînant du retard dans le processus de transport, nous avons utilisé une base de données orientée graphe (Neo4J) pour implémenter et peupler notre graphe de connaissances (base de connaissances).

Notre objectif étant d'assister les acteurs de la chaîne de transport intermodal à gérer les risques lors du transit des marchandises, nous allons utiliser dans le chapitre 4 cette connaissance comme référence pour détecter en temps réel les événements aléatoires perturbant le flux de transport.



# 4

## Systeme de detection des risques temps reel

Introduction . . . . .	111
4.1 Description du systeme de detection temps reel des risques . . . . .	112
4.2 Module de collecte des donnees . . . . .	114
4.2.1 Les sources de donnees . . . . .	114
4.2.2 Processus de collecte des donnees . . . . .	114
4.2.3 Implimentation du module de collecte des donnees . . . . .	116
4.3 Traitement de l'information . . . . .	116
4.3.1 Le pre-traitement des donnees . . . . .	117
4.3.2 Creation des « <i>word embeddings</i> » . . . . .	119
4.3.3 Modele d'identification des symptomes . . . . .	120
4.3.4 Modele de detection des evenements . . . . .	127
4.4 Module d'exploitation de la connaissance . . . . .	132
Conclusion . . . . .	134

### Introduction

Dans ce chapitre nous repondons a notre deuxieme question de recherche : Comment detecter les evenements aleatoires (aleas) qui surviennent sur la chaine de transport grace aux donnees de traçabilité et de visibilité recueillies en temps reel ?

Dans le chapitre 3 nous avons mis en place une ontologie formalisant les connaissances sur le risque dans le transport intermodal. Elle presente les concepts contribuant a la generation du retard dans le transport intermodal et les differentes relations entre ces concepts.

Nous proposons dans ce chapitre de reutiliser cette connaissance comme une reference pour detecter en temps reel les evenements aleatoires perturbant le flux du transport intermodal. Pour atteindre cet objectif, les donnees de traçabilité/visibilité des conteneurs et des donnees provenant des sources d'informations externes a la chaine de transport seront utilisees. L'approche proposee pour la mise en place du systeme de detection des risques est basee sur le processus illustre a la figure 2.15 et sur celui d'un systeme expert.

Premierement, nous utilisons des mots-cles qui sont egalement les instances de la base de connaissances pour requeter les sources de donnees et ainsi recuperer des donnees textuelles susceptibles de vehiculer de l'information sur les evenements aleatoires. Nous utilisons ensuite des techniques d'apprentissage automatique pour detecter en temps reel les evenements

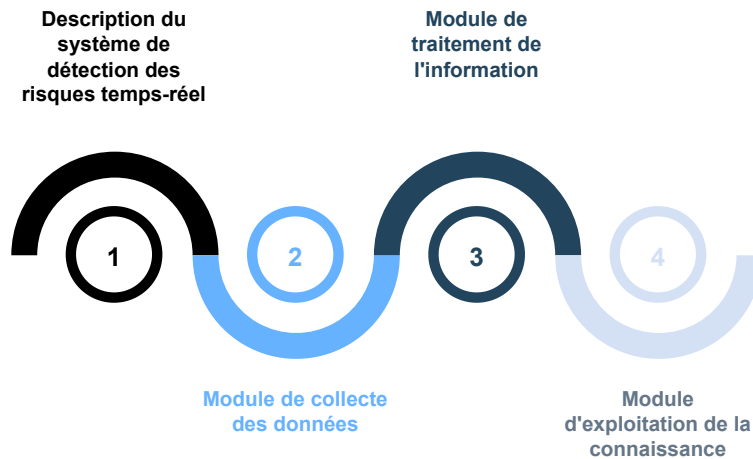


Figure 4.1 – Structure du chapitre 4.

aléatoires à partir de ces données. Puis, la base de connaissances est utilisée pour prévoir le retard sur la chaîne de transport à partir de règles d’inférence. Sur la figure 4.1 nous présentons la structure de ce chapitre.

La section 4.2 de ce chapitre présente le module de collecte de données. Nous y présentons les sources de données et le processus de collecte des données à partir des instances du concept évènement de l’ontologie.

Dans la section 4.3 nous présentons les différents composants du module de traitement de l’information. Cette partie présente les modèles d’identification des symptômes et celui de détection des évènements.

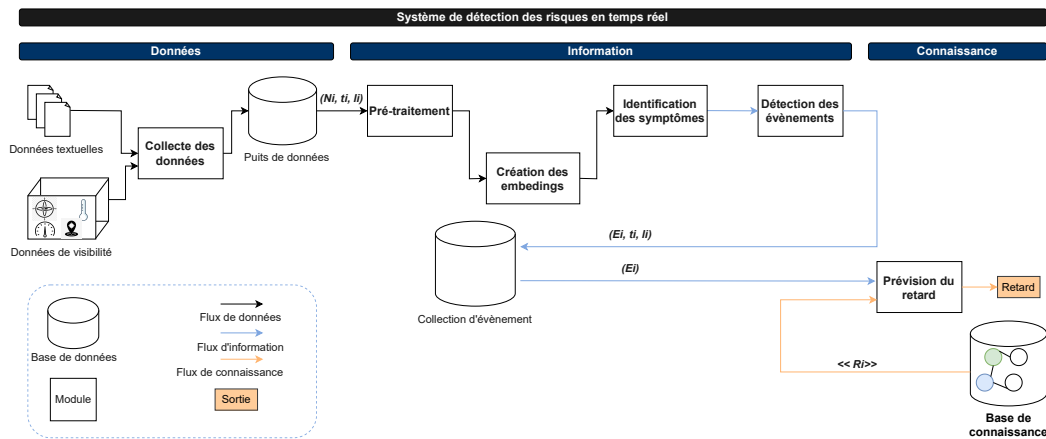
La section 4.4 quant à elle, présente le module d’exploitation de la connaissance pour la prévision du retard dans la chaîne de transport intermodal. Nous spécifions dans cette section les faits et les règles d’inférence qui sont utilisés pour prévoir un retard sur une phase du processus de transport intermodal.

## 4.1 Description du système de détection temps réel des risques

Dans nos travaux nous abordons la détection des risques comme un problème d’extraction en temps réel des évènements aléatoires perturbant le flux de transport des conteneurs.

Avant de décrire l’architecture du système de détection temps réel des risques, il est important de revenir sur les trois concepts du processus d’extraction des connaissances : (i) la donnée, (ii) l’information et (iii) la connaissance.

- La donnée : le LAROUSSE (2020) définit la donnée comme une «représentation conventionnelle d’une information en vue de son traitement informatique». Selon RUS (2002) les données sont des faits discrets et objectifs sur les évènements. Elles peuvent être quantitatives ou qualitatives et ne fournissent aucune information sur leur pertinence. L’auteur qualifie la donnée comme matière première essentielle pour créer de l’information. Par exemple, le texte «there is a congestion at Suez Canal» est une donnée textuelle.



**Figure 4.2** – Le modèle conceptuel du système de détection temps réel des risques.

- L'information : selon RUS (2002) l'information est de la donnée organisée de manière à être utile aux utilisateurs. En nous plaçant par exemple dans le contexte de gestion d'une chaîne d'approvisionnement, la donnée textuelle précédente devient une information.
- La connaissance : pour rappel nous avons adopté la définition de la connaissance proposée par MONTARNAL (2015). L'auteur définit la connaissance comme la compréhension sur un sujet que l'on obtient par l'expérience ou l'étude, connue par une personne ou par les gens en général. Un exemple de connaissance est l'inférence sur la perturbation de la chaîne d'approvisionnement à partir de la congestion du Canal de Suez.

La figure 4.2 présente l'architecture du système de détection en temps réel des risques, il se compose de trois modules :

1. Collecte des données : le module de collecte des données permet de récupérer toutes les données utiles et nécessaires pour la détection des événements aléatoires susceptibles de perturber le transport intermodal.
2. Traitement de l'information : le module de traitement de l'information est utilisé pour qualifier les données précédemment récupérées. Ce module est chargé de l'identification des symptômes et de la détection des événements aléatoires.
3. Exploitation de la connaissance : l'exploitation de la connaissance permet de prévoir le retard causé par les événements détectés en s'appuyant sur des règles d'inférence.

Tout d'abord, avant de pouvoir procéder à l'extraction des événements aléatoires, les articles de presse et les données provenant des réseaux sociaux sont rassemblés dans une base de données (le puits de données) par le module de collecte des données. Ce module va requêter régulièrement plusieurs sources de données et met à jour le puits de données. Le module de collecte de données utilise les données de visibilité des conteneurs pour déterminer la localisation des données à récupérer.

Ensuite, les données textuelles sont utilisées comme entrées du deuxième module qui est celui du traitement de l'information. Pour chacune des entrées, le module traitement de l'information vérifie si elle est susceptible de contenir un événement et le cas échéant l'événement est extrait. Les données d'entrées sont soumises au préalable à un pré-traitement linguistique afin de produire une représentation plus abstraite des textes. La phase de pré-traitement pour chaque entrée consiste à (i) la lemmatisation des données, (ii) la tokenisation des données et la (iii) suppression des mots vides (*stop words*). Une fois les données pré-traitées, nous utilisons une pile d'encodeurs pour vectoriser les *tokens* (création des «*word embeddings*»). Les *word embeddings* sont ensuite utilisés comme entrée des deux modèles



(identification des symptomes et detection des evenements) dans l'optique d'extraire les evenements aleatoires susceptibles de perturber le flux de marchandises.

Le troisieme module qui est l'exploitation de la connaissance consiste a prevoir le retard pouvant etre engendre par l'evenement identifie par extraction des donnees. Elle utilise le graphe de connaissances implimenté dans le chapitre 3 pour conclure au retard sur les phases du transport intermodal.

Dans la suite, nous detaillons chacun de ces modules.

## 4.2 Module de collecte des donnees

### 4.2.1 Les sources de donnees

L'interet de ce systeme reside dans sa capacite a agrer les donnees heterogenes et a les utiliser pour detecter les risques dans le transport intermodal.

A partir de l'arbre des causes qui a ete mis en place dans la section 3.4 nous avons identifie des sources de donnees a utiliser pour la detection des evenements aleatoires. Tout d'abord, un benchmark des sources de donnees susceptibles de relayer l'occurrence des evenements aleatoires a ete effectue. Les sources habituellement utilisees pour l'extraction des evenements dans la litterature tels que News-API<sup>1</sup> et Twitter<sup>2</sup> ou encore celles qui relayent des informations sur les perturbations du trafic (Marine Traffic<sup>3</sup>, Waze<sup>4</sup>) ou climatiques (OpenWeather<sup>5</sup>) ont ete considerees lors du benchmark.

Puis nous avons associe les sources de donnees a chaque evenement present dans l'arbre des causes en partant des evenement terminaux. Lorsqu'il etait impossible de trouver une ressource alertant sur un evenement terminal de l'arbre des causes, nous avons considere sa consequence immediate. Dans l'illustration presentee par la figure 4.3 nous presentons le resultat de l'identification des sources de donnees pour une sous-partie de l'arbre des causes pour la phase de pre-acheminement.

Le tableau 4.1 presente le resultat de ce benchmark, le type de donnees, le nom des ressources et les evenements aleatoires qu'elles permettent de detecter y sont specifies.

### 4.2.2 Processus de collecte des donnees

Le processus de collecte de donnees du systeme de detection des risques qui est declenche a l'approche d'un POI a pour objectif de collecter en temps reel les donnees liees aux evenements aleatoires susceptibles de generer des risques dans la chaine de transport intermodal. Ce processus utilise la position exacte du conteneur provenant des donnees de visibilite pour collecter les donnees qui nous interessent a partir des sources recensees precedemment.

Dès lors que la position du conteneur est connue, le module de collecte des donnees sollicite les sources de donnees tels que News-API ou Twitter qui ont ete precedemment identifiees (tableau 4.1) a partir de requetes basees sur des mots-cles et limitees sur la region du monde où se trouve le conteneur. Les donnees recueillies sont ensuite stockees sous forme d'un triplet  $(N_i, T_i, L_i)$  dans une base de donnees.  $N_i$  fait reference au contenu des donnees,  $T_i$  fait reference a la date de publication des donnees, et  $L_i$  fait reference a localisation du conteneur. Ces details sur les donnees seront utilises dans le module de traitement de l'information. La figure 4.4 presente le processus de collecte des donnees.

1. News-API : <https://newsapi.org>
2. Twitter : <https://developer.twitter.com>
3. Marine Traffic : <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/>
4. Waze : <https://www.waze.com/fr/live-map>
5. OpenWeather : <https://openweathermap.org/>
6. Eventregistry : <https://eventregistry.org/>

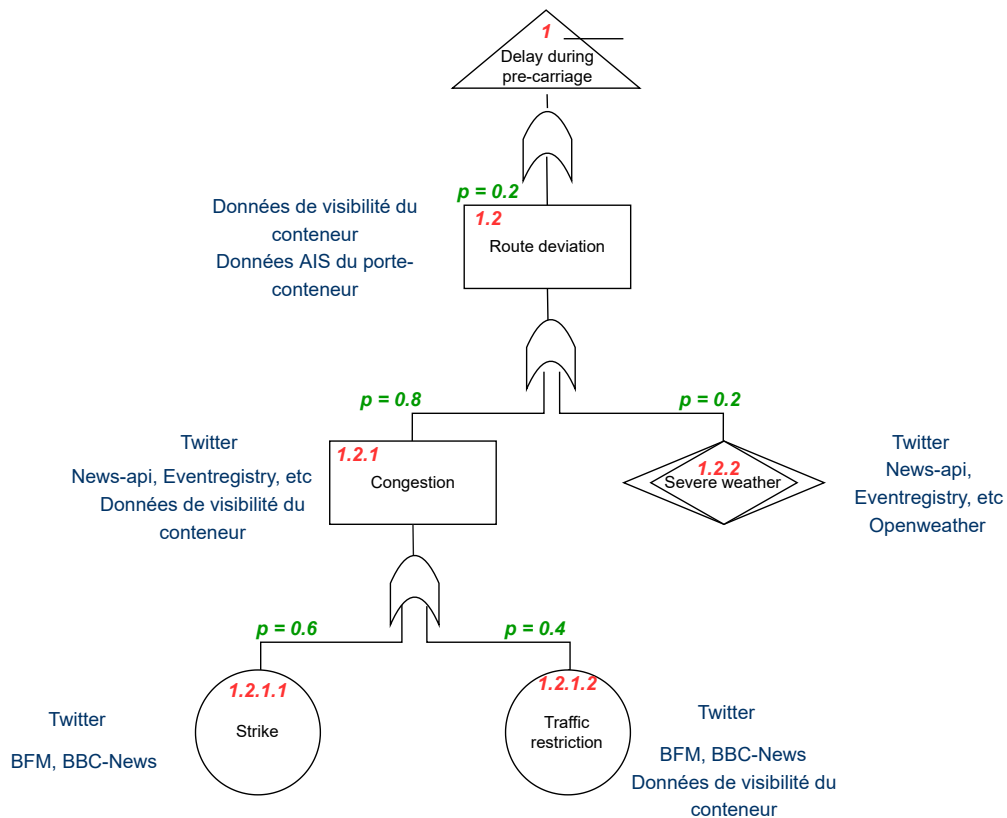


Figure 4.3 – Illustration du processus du benchmark des sources de données.

Table 4.1 – Les sources de données pour la détection des événements aléatoires.

Type de données	Type de ressources	Sources	Évènements
Numérique	Données météorologique	OpenWeather	Tempêtes, tornades, Vents violents, etc
	Données AIS	Marine Traffic, Fleetmon	Déviaton de route, congestion, incident du trafic
	Incident du trafic	Waze, google-Maps	Accident, déviation de route
	Donnée de visibilité	Smart container	Variation de température, humidité, pression, etc
Textuel	Réseau social	Twitter	Tempêtes, grèves, congestions, etc
	News	NewsApi, Eventregistry <sup>6</sup>	Grève, congestion, etc
	API spécifique	Avurnav	réglementation, incident du trafic

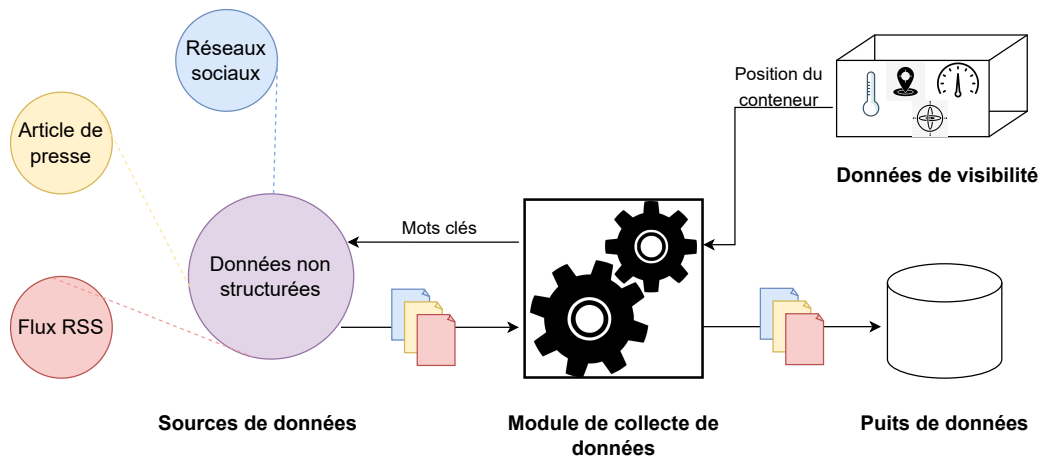


Figure 4.4 – Le processus de collecte des données.

### 4.2.3 Implémentation du module de collecte des données

Pour l'implémentation du module de collecte des données, nous utilisons le réseau social Twitter qui est reconnu comme une source majeure d'informations sur les événements publics. Twitter propose une plate-forme pour la récupération des données textuelles pouvant nous aider à comprendre l'opinion publique, à mesurer l'intérêt suscité par certains types de sujets ou à détecter en temps réel certains événements imprévisibles. En effet, ce réseau social a été utilisé pour l'extraction des événements (COCHE, 2018) ou encore pour prédire les marchés boursiers (PAGOLU *et al.*, 2016), entre autres applications (MAZOYER *et al.*, 2020).

En plus d'être utilisée dans de nombreux travaux d'extraction d'évènements, l'API<sup>7</sup> de Twitter permet de cibler et de requêter les données provenant d'une partie précise du monde. Elle est donc adaptée comme source pour l'implémentation du module de collecte des données. Comme explicité dans la sous-section précédente, nous sollicitons l'API Twitter avec des mots-clés qui correspondent aux instances génériques de la base de connaissances (tempête, tornade, congestion, grève, etc) et les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des endroits du monde qui nous intéressent. La réponse de l'API est sous format JSON<sup>8</sup> et nous récupérerons les attributs suivants :

- Id : il s'agit de l'identifiant unique du tweet ;
- Created\_at : correspond à la date à laquelle le tweet a été publié ;
- Full\_text : il s'agit du contenu du tweet ;
- Timestamp\_run : il s'agit de la date à laquelle le tweet a été mis dans le puits de données ;
- Longitude et latitude : la coordonnée géographique où le tweet a été publié.

La figure 4.5 présente la structure des données stockées dans le puits de données.

## 4.3 Traitement de l'information

Dans cette section nous nous intéressons au traitement et à l'exploitation des données textuelles pour extraire des événements aléatoires. La section est composée de quatre sous-sections qui sont développées ci-dessous : (1) le pré-traitement des données, (2) la création des prolongements des mots (*word embeddings*), (3) l'identification des symptômes et (4) la détection des événements.

7. API : Interface de Programmation d'Application

8. JSON : JavaScript Object Notation

```

    ☐ ▼ object {8}
    :: ☐   _id : 1562459659440574464
    :: ☐   timestamp_run : 2022-08-24T15:23:36.182Z
    :: ☐   ▼ tweets_json {4}
    :: ☐     created_at : Wed Aug 24 15:19:46 +0000 2022
    :: ☐     id : 1562459659440574464
    :: ☐     id_str : 1562459659440574464
    :: ☐     full_text : GN from typhoon #MaOn making landfall a few kilometres south of Hong Kong.
    :: ☐                   this is just a large rain band from the storm. bladerunner vibes.
    :: ☐                   https://t.co/AAQQfwVvIP
    :: ☐   latitude : 22.352734
    :: ☐   longitude : 114.1277
    
```

Figure 4.5 – Illustration d'une donnée stockée

### 4.3.1 Le pré-traitement des données

#### Description des méthodes de pré-traitement des données

Comme énoncé dans la sous-section 2.5.1, le pré-traitement des données (voir bloc pré-traitement sur la figure 4.2) est une étape importante dans l'utilisation des techniques de NLP. Il permet d'améliorer les performances des approches d'extraction d'évènements (MOHAN, 2015). Le pré-traitement des données est chargé d'éliminer les erreurs (données incomplètes, les ponctuations, etc) que contiennent les données textuelles non structurées. Ces erreurs sont susceptibles de corrompre les modèles que nous souhaitons mettre en place. Il s'agit de la première étape du processus de l'exploration des données textuelles.

Dans notre cas, le pré-traitement des données embarque plusieurs méthodes toutes disponibles dans les outils de NLP : la «lemmatisation» des données, la «tokenisation» des données et la suppression des mots vides (*stop words*).

- La «lemmatisation» des données : cette méthode permet de regrouper les mots d'une même famille ensemble : il s'agit d'un regroupement par lemme. Par exemple, les mots «is», «are», «be» seront transformés en «be» après la «lemmatisation». Elle a pour objectif de standardiser les données d'entrée.
- La «tokenisation» des données : la «tokenisation» permet de transformer un texte en une série de *tokens* individuels en se basant sur des délimiteurs tel que l'espace entre deux mots dans la plupart des langues (français, anglais, etc).
- Suppression des *stop words* : les «stop words » regroupent tous les mots, prépositions et pronoms, etc., qui ne donnent pas de sens réel aux textes dans les tâches de NLP. L'élimination des «stop words» est la tâche de pré-traitement la plus utilisée en NLP. Elle a pour objectif de supprimer les mots n'apportant pas d'information à la tâche de classification. Par exemple, «le, un, une, alors, qui, quoi» doivent être supprimés des données textuelles avant d'utiliser celles-ci pour l'analyse, la classification ou la prédiction.

La figure 4.6 présente le module de pré-traitement des données, les différentes transformations apportées aux données y sont explicitées.

#### Implémentation des méthodes de pré-traitement des données

Grâce aux nombreuses bibliothèques disponibles pour traiter des données et produire des modèles de prédiction, le langage Python a été utilisé pour la mise en place de l'ensemble des modèles du module de traitement de l'information.

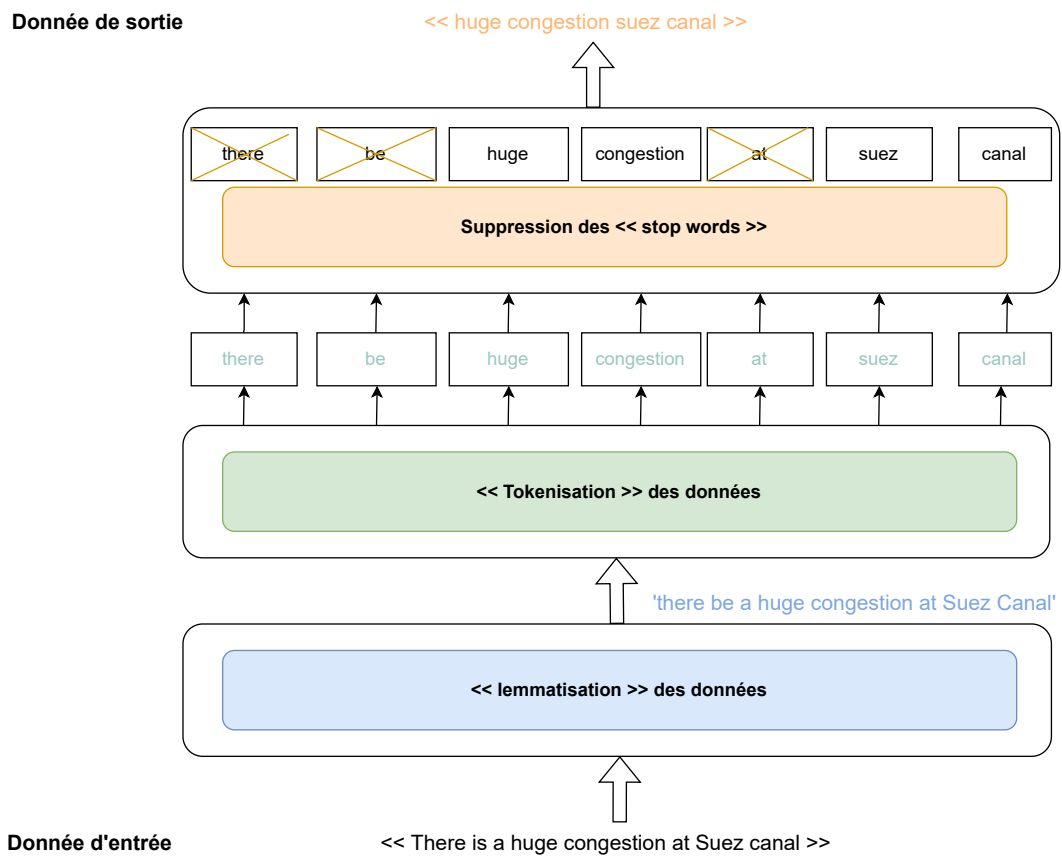


Figure 4.6 – Le module de pré-traitement des données.

Parmi les bibliothèques Python pour l'implémentation des méthodes de pré-traitement de données, les plus connues sont [NLTK](#)<sup>9</sup> et [Spacy](#)<sup>10</sup>. [NLTK](#) est très connu lorsqu'il s'agit de traitement de données textuelles. Elle donne accès à plus de 50 corpus et ressources lexicales, à des bibliothèques de traitement de texte pour la tokenisation et la lemmatisation. [Spacy](#) est reconnue pour sa vitesse de traitement, sa gestion optimisée de la mémoire et sa compatibilité avec les plus grands modèles d'apprentissage profond. Selon le site [LabsonMars](#)<sup>11</sup>, [Spacy](#) est la meilleure option pour le pré-traitement des données avant l'utilisation des techniques d'apprentissage.

Nous utilisons [Spacy](#) et [NLTK](#) qui disposent de bibliothèques toutes faites pour le pré-traitement des données textuelles. La lemmatisation et la tokenisation des données sont effectuées par des bibliothèques de traitement de données de [Spacy](#).

La suppression des «stop words» est réalisée à partir de [NLTK](#) qui dispose d'un vocabulaire de «stop words» générique selon le langage du corpus de texte à traiter, importable directement dans l'environnement de développement. L'ajout ou la suppression de mots à ce vocabulaire est possible. L'utilisation de la bibliothèque de suppression des «stop words» à partir de [NLTK](#) prend en entrée ce vocabulaire et les *tokens* des données textuelles, puis retire des données textuelles tous les *tokens* contenus dans le vocabulaire.

### 4.3.2 Création des «word embeddings»

#### Description du processus de création des *word embeddings*

Pour rappel un *word embedding* est une représentation vectorielle d'un mot ou d'une phrase qui a été obtenue à partir d'un modèle qui a été entraîné à partir d'un grand corpus de données textuelles. La représentation vectorielle du mot obtenue prend en compte le contexte dans lequel il est utilisé dans le texte ([WIEDEMANN et al., 2019](#)). En effet, contrairement aux autres méthodes de représentation vectorielle, le *word embedding* donne une représentation différente d'un même mot si le contexte diffère. Par exemple, la représentation vectorielle associée au mot «*storm*» diffère lorsqu'il est utilisé dans «There is a huge storm in Texas» et dans «The rock band storm is playing a concert tonight».

Comme énoncé dans la section 2.5.2, des auteurs tels que [WADDEN et al. \(2019\)](#) et [WIEDEMANN et al. \(2019\)](#) en testant plusieurs solutions de création de *word embeddings* sur différents corpus de données ont montré que [BERT](#) est la plus performante d'entre elles. Dans le module de traitement de l'information, après la phase de pré-traitement des données, le modèle pré-entraîné [BERT](#) est utilisé pour la représentation vectorielle de nos données. Ces vecteurs sont par la suite utilisés par les modèles d'identification des symptômes et de détection des événements.

La figure 4.7 illustre le processus de création des *word embeddings* qui correspond au bloc «création des embeddings» dans la figure 4.2. Il prend en entrée des textes et fournit en sortie des représentations vectorielles de chaque *token* d'entrée. Le processus de création des *word embeddings* avec [BERT](#) comprend 3 phases : (i) la première phase consiste à transformer les données d'entrée en séquence de mots (*tokens*). Le premier et le dernier *token* correspondent à des *tokens* spéciaux. Le premier *token*, «[CLS]» permet d'utiliser [BERT](#) pour les tâches de classification de texte et le dernier *token* «[SEP]» quant à lui spécifie la fin du texte d'entrée. (ii) La séquence de mots est ensuite incorporée dans des vecteurs (*embedding* d'entrées). Les *embedding* d'entrées sont enfin traités par (iii) la partie encodeur du transformer ([VASWANI et al., 2017](#)). La sortie est un ensemble d'incorporations de caractéristiques extraites (*embedding* de sortie), dont chacune représente le contexte local pour les mots correspondants dans le texte ([CHIU et al., 2020](#)).

9. Natural Language Toolkit : <https://www.nltk.org/>

10. Spacy : <https://spacy.io/>

11. LabsonMars : <https://labsonmars.com/python-nlp/>

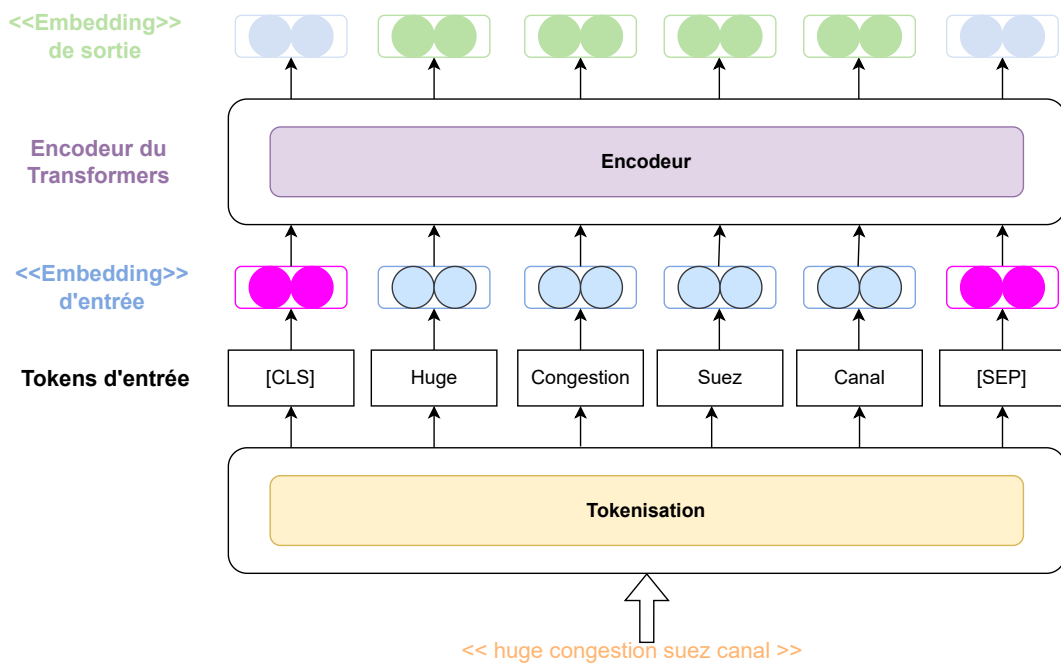


Figure 4.7 – Le processus de création des *embeddings*

Plus de notions sur la création des *embeddings* d'entrée et sur les transformers sont disponibles dans les travaux de CHIU *et al.* (2020), USUGA CADAVID *et al.* (2021) et VASWANI *et al.* (2017).

### Implémentation du processus de création des *word embeddings*

Le modèle pré-entraîné BERT est utilisé pour extraire les caractéristiques sémantiques des données textuelles puisque les représentations vectorielles qu'il fournit encodent chaque mot en tenant compte du contexte général des données. La mise en place du modèle de création des *word embeddings* est composé de trois parties : (i) le chargement du modèle pré-entraîné BERT, (ii) la création de *tokens* d'entrée du modèle et (iii) la création d'*embeddings* de sortie.

- Chargement du modèle pré-entraîné BERT : il s'agit de récupérer la version classique du modèle BERT qui a été pré-entraînée sur un grand corpus de données constitué de textes des pages Wikipédia en anglais (2 500 millions de mots) ainsi qu'un ensemble de livres (800 millions de mots). Nous téléchargeons BERT depuis Hugging Face<sup>12</sup> qui est une plateforme de science des données fournissant des bibliothèques pour la mise en place et le déploiement de modèles d'apprentissage automatique.
- Création de *tokens* d'entrées : la version de BERT mise à disposition sur Hugging Face est fournie avec un *tokenizer*. Nous utilisons ce dernier pour la tokenisation des textes.
- *Embeddings* de sortie : cette phase consiste à utiliser BERT pour créer une représentation vectorielle de dimension 512\*768 pour chaque série de *tokens* d'entrée.

### 4.3.3 Modèle d'identification des symptômes

Pour rappel, nous avons défini les symptômes dans la sous-section 3.3.2 comme toute manifestation qui révèle la survenue d'une instance du concept événement. L'objectif du modèle d'identification des symptômes est de déterminer si la donnée d'entrée est une

12. Hugging Face : <https://huggingface.co/bert-base-uncased>

manifestation d'un évènement aléatoire pouvant perturber l'une des phases du processus de transport intermodal. D'un point de vue fonctionnel le modèle d'identification des symptômes est un filtre essentiel qui permet au modèle de détection des évènements de mieux cibler les évènements aléatoires.

## Description du modèle d'identification des symptômes

Nous abordons l'identification des symptômes dans le système de détection des risques comme un problème de classification binaire. Pour ce faire nous utilisons la technique de *fine tuning* qui permet à BERT de résoudre des tâches spécifiques. Les auteurs dans (DEVLIN *et al.*, 2019) affirment que le processus de *fine tuning* est simple puisque le mécanisme d'auto-attention du transformer permet à BERT de modéliser de nombreuses tâches en aval. Le *fine tuning* consiste à ajouter une couche supplémentaire de réseau de neurones après la couche finale de BERT et à entraîner l'ensemble du réseau obtenu.

Dans nos travaux, le processus de *fine tuning* est réalisé en utilisant un classifieur constitué d'une réseau neuronal afin de spécialiser BERT pour l'identification des données textuelles contenant des informations liées à des évènements aléatoires. Une approche d'apprentissage supervisée est utilisée pour entraîner le classifieur à reconnaître les symptômes. Ce dernier fournit une distribution de probabilité  $\alpha \in [0, 1]$  en sortie. Nous considérons que la donnée est une manifestation d'un évènement aléatoire lorsque  $\alpha$  tend vers 1 et inversement si  $\alpha$  tend vers 0, la donnée ne présente aucun symptôme. Le corpus de données utilisé pour l'entraînement du classifieur est présenté dans la sous-section suivante.

La figure 4.8 présente l'architecture du modèle d'identification des symptômes qui correspond au bloc «identification des symptômes» dans la figure 4.2. Une couche de réseau de neurones artificiels avec en sortie une distribution de probabilité a été ajoutée à la sortie de BERT pour effectuer la classification des données. Pour les problèmes de classification, le premier *embedding* en sortie de BERT (celui du *token* [CLS]) est utilisé parce qu'il capture la sémantique de la phrase entière (VASWANI *et al.*, 2017).

## Implémentation du modèle d'identification des symptômes

Nous nous sommes focalisés sur deux catégories d'évènements dans le cadre de l'implémentation des modèles d'identification des symptômes et de détection des évènements. En fonction de la nature, de la disponibilité et de la quantité de données annotées disponibles pour la mise en place d'une approche d'apprentissage supervisée, nous avons opté pour les catégories d'évènements suivant : (i) climat extrême<sup>13</sup> et (ii) restriction du trafic<sup>14</sup>. Ce choix est motivé par l'existence de nombreux corpus de données annotés sur ces deux catégories d'évènements. Une catégorie d'évènement étant simplement un regroupement d'évènements aléatoires selon leur source (voir la figure 3.11b).

### Corpus de données disponible

Dans la littérature des auteurs tels que (DABIRI, 2018 ; MAZOYER *et al.*, 2020 ; MCMINN *et al.*, 2013 ; MELE *et al.*, 2019) ont constitué des corpus de données textuelles étiquetés permettant d'entraîner des modèles d'extraction d'évènements. Ces données sont accessibles à la demande pour les besoins de recherche.

MELE *et al.* (2019) ont mis en place un corpus de données textuelles en anglais composé d'articles de presse, de flux RSS et de tweets. Les auteurs ont récolté ces données durant 4 mois (de Mars à Juin 2016) sur neuf sources différentes. Certaines données ont été étiquetées en fonction des types d'évènements qu'elles relayent. Au total, le corpus contient 147 000

13. Severe weather

14. Traffic restriction



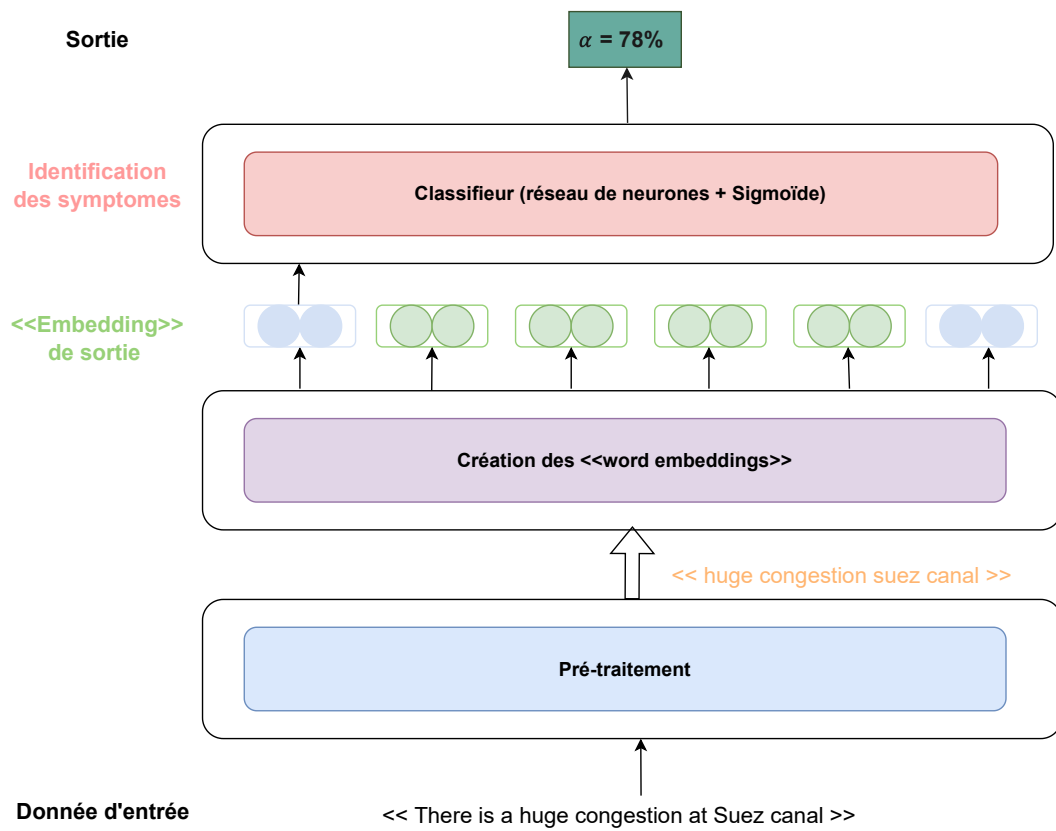


Figure 4.8 – Le processus d'identification des symptômes

données dont 4000 ont été étiquetées suivant 57 évènements médiatiques (tornade, inondation, tempête, etc).

MCMINN *et al.* (2013) proposent un grand corpus de tweets en anglais pour la détection d'évènements. Ce corpus propose 120 millions de tweets recueillis sur un mois. A notre connaissance, c'est le plus grand corpus de données Twitter actuellement disponible sur notre thématique. Il contient plus de 150 000 tweets étiquetés suivant au moins 9 catégories d'évènements (sport, accident et désastre naturel, économie, etc.).

Les auteurs dans (MAZOYER *et al.*, 2020) proposent un corpus étiqueté de tweets en français (Event2018) pour la détection d'évènements. Ces données recueillies sur une période d'un mois (août 2018) ont été étiquetées manuellement suivant 17 catégories d'évènements (art, désastre et accident, climat, sport, etc.).

DABIRI (2018) propose un corpus de 20439 tweets étiquetés suivant trois catégories d'évènements. Ce corpus a été créé à partir de l'API de recherche de Twitter et chacun des tweets a été classé dans l'une des trois catégories suivantes : (i) pas de trafic pour tous les tweets qui ne rentrent pas dans les deux autres catégories, (ii) incident de circulation pour étiqueter tous tweets signalant des événements non récurrents qui génèrent une augmentation anormale de du trafic ou réduisent la capacité des infrastructures de transport tels que les accidents de la route, les véhicules en panne, l'entretien des autoroutes, les zones de travaux, la fermeture de routes, les incendies de véhicules, etc. Puis (iii) la dernière catégorie, conditions de circulation et informations qui signale tous les tweets faisant état de la libération ou de la réouverture de routes qui avaient déjà été affectées par des évènements de trafic.

### Corpus de données d'entraînement du modèle d'identification des symptômes

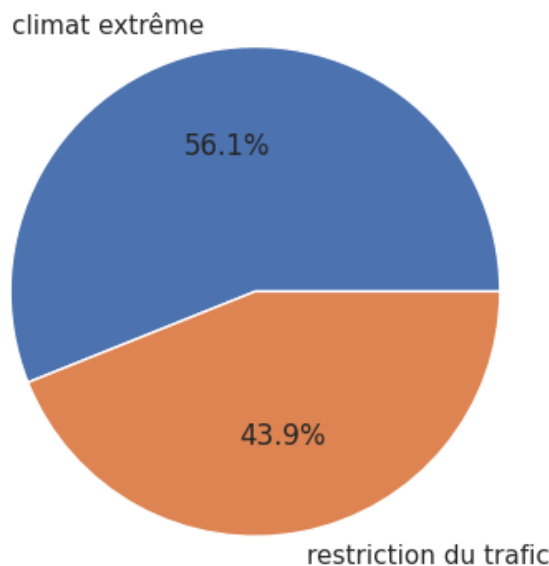
Bien qu'il existe des données étiquetées pour entraîner les modèles de détection des évènements, à notre connaissance il existe peu de corpus de données (du moins en accès libre) qui font référence spécifiquement aux évènements aléatoires perturbant le flux de transport intermodal. Parmi les quatre références que nous avons citées plus haut, seule une infime partie des corpus proposés par DABIRI (2018) et MELE *et al.* (2019) a pu être intégrée dans nos travaux. Cela s'explique par le fait que le modèle de création de *word embedding* BERT ne considère que 510 premiers mots dans le texte d'entrée. Ce qui nous pousse à écarter la majorité des articles de presse dont les longueurs sont relativement supérieures à cette limite.

En plus des corpus de données disponibles, nous avons constitué un corpus de données textuelles de 47500 tweets en requêtant l'API Twitter sur une période d'un mois (Mars 2021) grâce au module de collecte de données.

Contraint par BERT et pour être certain que le modèle que nous souhaitons mettre en place capture entièrement le sens sémantique des données textuelles, nous entraînons le modèle d'identification des symptômes avec des données textuelles dont la longueur est inférieure à 510 *tokens*. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps annoté manuellement 2300 tweets suivant le fait qu'ils présentent ou non un symptôme pour le flux de transport des marchandises. Nous avons ensuite intégré à cet échantillon de données 320 articles de flux RSS et 97 tweets provenant du corpus annoté sur la catégorie climat extrême par MELE *et al.* (2019). Puis, seulement 1000 tweets du corpus de données de DABIRI (2018) ont été intégrés à notre corpus de données. Ceci pour éviter que le classifieur n'apprenne à reconnaître que les symptômes caractérisant un incident du trafic. Nous avons fait en sorte de garder un équilibre entre les deux catégories (climat extrême et restriction du trafic) de symptômes dans les données. Le tableau 4.2 présente la distribution des données suivant les sources et la figure 4.9 illustre la répartition des deux catégories d'évènements dans les symptômes.

**Table 4.2** – Distribution du corpus de données.

Sources	Symptôme	Pas de symptôme	Total
Tweets	2030	1367	3397
Flux RSS	330	20	350
Distribution (%)	63%	37%	100%

**Figure 4.9** – Distribution des catégories d'événements

**NB** : Les données provenant des corpus de données existants qui ont été intégrées aux données d'entraînement sont annotées suivant les événements «climat extrême» et «restriction du trafic». Après une relecture nous les avons ré-annoté suivant le fait qu'elles représentent un symptôme ou non.

## Entraînement et évaluation du modèle d'identification des symptômes

### Entraînement

Selon VABALAS *et al.* (2019), une approche fiable pour évaluer les performances d'un modèle d'apprentissage automatique est d'entraîner le modèle avec des données disponibles et d'évaluer ses performances de classification en utilisant des données nouvellement collectées ou un ensemble de données distinctes. Une autre approche également connue pour sa fiabilité, consiste à séparer le corpus de données en deux ensembles avant de développer le modèle : un ensemble d'entraînement et un ensemble de validation. L'ensemble d'entraînement est utilisé pour entraîner le modèle et l'ensemble de validation pour évaluer ses performances.

Pour nous assurer des performances du modèle d'identification des symptômes, le corpus de données a été décomposé en deux parties : (i) les données d'entraînement qui correspond à 80% du corpus et (ii) les données de validation (20% du corpus de données).

**Les métriques**

Selon HAOUARI *et al.* (2020), la matrice de confusion est souvent utilisée pour l'évaluation des classifieurs dans le domaine de l'apprentissage automatique. C'est une matrice de taille  $n \times n$  où  $n$  représente le nombre de classes. La matrice de confusion permet d'observer comment le modèle classe l'ensemble de test par rapport à sa vraie classe. Dans le cas du classifieur du modèle d'identification des symptômes, il s'agit d'un problème à deux classes (True : symptôme ; false : pas de symptôme) comme présenté par le tableau 4.3.

**Table 4.3** – Illustration de la matrice de confusion.

	False	True
False	TN <sup>15</sup>	FP <sup>16</sup>
True	FN <sup>17</sup>	TP <sup>18</sup>

D'autres méthodes d'évaluation de la performance des classifieurs découlent de la matrice de confusion, nous citons ci-dessous quelques-unes des métriques utilisées :

- La justesse (accuracy) =  $\frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$  qui est le pourcentage de prédiction juste du modèle sur le nombre total d'entrées.
- La précision =  $\frac{TP}{TP+FP}$ , qui est la proportion de prédictions correctes avec l'ensemble de données de validation du modèle. Elle représente le rapport entre le nombre de prédictions correctes et le nombre total d'échantillons d'entrées.
- Le rappel (Recall) =  $\frac{TP}{TP+FN}$  représente le pourcentage de vrai positif qui a été identifié par le modèle.
- Le F<sub>1</sub>-score =  $2 * \frac{Recall * Precision}{Recall + Precision}$  qui est la moyenne harmonique de la précision et du rappel. Elle est utile lorsqu'un équilibre entre la précision et le rappel est recherché.

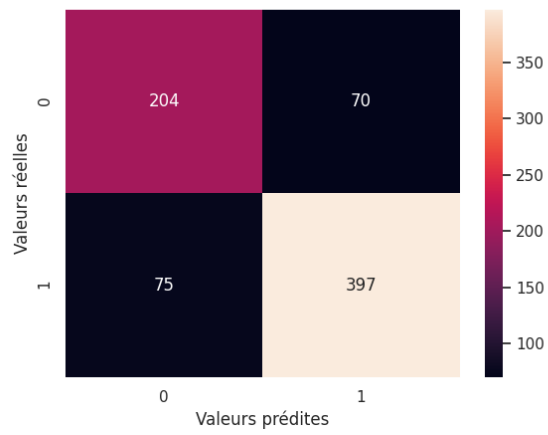
Le tableau 4.4 présente les résultats obtenus sur les données de validation suivant différentes valeurs du seuil de probabilité. La figure 4.10 présente les matrices de confusion pour les seuils considérés.

**Table 4.4** – Métriques du modèle d'identification des symptômes

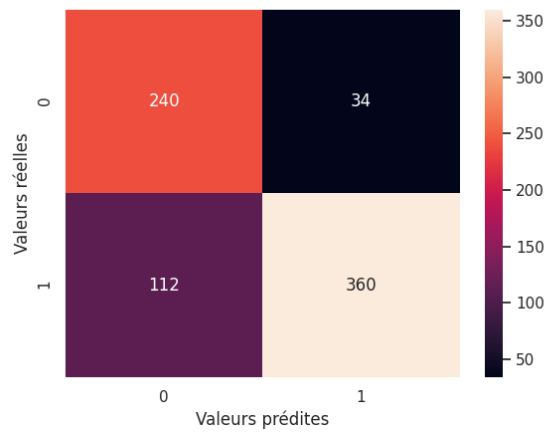
Métriques	$\alpha = 0.50$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.9$
Accuracy	0.80	0.80	0.77
Précision	0.85	0.91	0.95
Recall	0.84	0.76	0,76
F <sub>1</sub> -score	0.86	0.82	0.84

L'objectif du modèle d'identification des symptômes étant de filtrer les données en ne conservant que celles qui font référence à un évènement susceptible de perturber le flux de transport, il doit ainsi présenter un taux de faux positif faible. Selon la matrice de confusion 4.10c, un seuil de filtrage  $\alpha = 0.9$  est mieux adapté à notre contexte. Cependant, cette valeur de  $\alpha$  présente également un nombre de faux négatifs assez élevé. Dans notre domaine d'application, cela ne pose pas de problème réel car

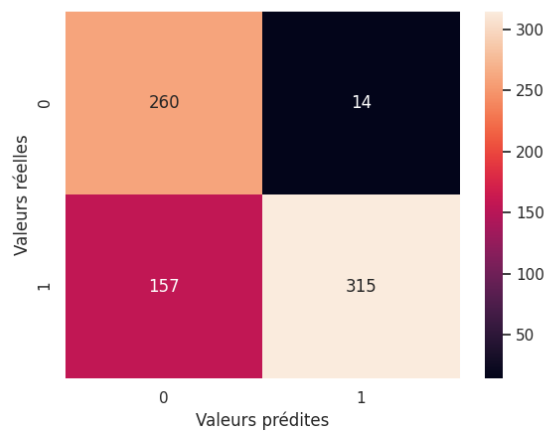
15. TN : True Negative  
 16. FP : False Positive  
 17. FN : False Negative  
 18. TP : True Positive



(a) Matrice de confusion pour  $\alpha = 0.5$



(b) Matrice de confusion pour  $\alpha = 0.75$



(c) Matrice de confusion pour  $\alpha = 0.9$

Figure 4.10 – Les matrices de confusion pour différentes valeurs de  $\alpha$

nous sommes souvent confrontés à des signaux forts (par exemple, plusieurs données textuelles sur le même évènement). Une solution est proposée dans la section 5.3 pour améliorer les performances de ce modèle.

#### 4.3.4 Modèle de détection des évènements

Le modèle de détection d'évènements est dédié à l'extraction des évènements aléatoires susceptibles de créer du retard lors du transit des conteneurs. Il prend en entrée les *word embeddings* des données textuelles après qu'elles aient été filtrées par le modèle d'identification des symptômes et fournit en sortie une liste d'évènements aléatoires  $E_i$ .

##### Description du modèle de détection des évènements

La détection des évènements aléatoires perturbant le flux de transport intermodal est traitée dans nos travaux comme un problème d'extraction d'évènements basé sur le calcul de similarité sémantique entre deux entités. Pour rappel, la similarité sémantique permet de produire un score mesurant la ressemblance entre les significations des entités comparées (RESNIK, 1995). Nous utilisons la similarité sémantique dans notre modèle pour l'extraction des évènements aléatoires susceptibles de perturber le flux de transport intermodal.

Le modèle de détection des évènements s'inspire des travaux de COCHE (2018) qui propose une solution pour la reconnaissance d'entités nommées dans des données textuelles concernant les situations de crise. Cette solution repose sur un «espace vectoriel» et un «algorithme de propagation des étiquettes». Tout d'abord, la solution de l'auteur vectorise les données textuelles étiquetées avec la méthode de création d'*embedding* BERT afin de créer un espace vectoriel fourni avec une distance de similarité sémantique. L'espace vectoriel contient des «clusters» de vecteurs composés d'entités sémantiquement similaires. Les données non étiquetées sont ensuite transformées en vecteurs et projetées dans l'espace vectoriel. Selon leur appartenance à un des «clusters» de l'espace vectoriel, l'algorithme de propagation des étiquettes est utilisé pour leur attribuer une étiquette.

Notre modèle de détection des évènements est composé de deux étapes : (1) création d'un *word embedding* de référence et (2) le calcul de la proximité sémantique entre l'*embedding* de référence et tout autre *word embedding* suspecté d'être un évènement d'intérêt (occurrence d'un évènement aléatoire dans les données). Le processus de création des *word embeddings* (sous-section 4.3.2) est utilisé pour créer des représentations vectorielles d'une entité dont nous sommes sûrs qu'elle représente un évènement aléatoire perturbant le flux de marchandises et des entités susceptibles d'être des évènements aléatoires. Puis, une métrique de similarité sémantique est utilisée pour déterminer la proximité sémantique entre l'*embedding* de référence et les *embeddings* des autres entités.

1. Création du *word embedding* de référence : elle est composée de deux parties (i) identification des données textuelles (textes de référence) explicites contenant des instances de la base de connaissances (telles que tempête, grève, congestion, etc) pour créer des *embeddings* de référence. Il est important de préciser que le processus de création d'*embedding* crée une représentation vectorielle pour chacun des *tokens* dans le texte qui prend en compte le contexte général de ce dernier. La deuxième partie (ii) consiste à extraire le *word embedding* correspondant à l'instance de l'évènement d'intérêt. Par exemple, en utilisant le texte suivant : «Congestion at Shanghai port threatens to hamper global trade.» pour la création de l'*embedding* de référence pour la catégorie d'évènement restriction du trafic. Après avoir appliqué le processus de création des *word embeddings* sur cette phrase, nous récupérons le deuxième vecteur de sortie (qui est celui de «Congestion»), sachant que le premier vecteur est l'*embedding* du *token* spécial. La figure 4.11 illustre le processus utilisé.

2. Calcul de la similarité sémantique : il consiste à calculer le score de similarité sémantique entre les *word embeddings* de références avec tous les *embeddings* d'une donnée textuelle ayant été caractérisée positive par le modèle d'identification des symptômes. Le calcul de la similarité sémantique requiert le choix d'une métrique spécifique. De nombreuses métriques ont été proposées pour évaluer la similarité sémantique entre deux représentations vectorielles de mots telles que la corrélation de Spearman (MARTINEZ-GIL, 2014) et de l'EDRM<sup>19</sup> (HIEBEL *et al.*, 2022), ou la similarité cosinus (KOUTROUMBAS *et al.*, 2008). Plus de notions sur les métriques de similarité sémantique sont disponibles dans l'article de PATWARDHAN *et al.* (2003) qui ont réalisé une étude comparative sur quelques métriques.

Dans notre modèle de détection des événements nous utilisons la similarité cosinus qui est la métrique vectorielle usuelle la plus utilisée pour le calcul de similarité sémantique entre deux textes (HIEBEL *et al.*, 2022). La similarité cosinus est calculée en mesurant le cosinus de l'angle entre deux vecteurs. L'équation 4.1 présente la formule utilisée pour calculer la similarité cosinus entre deux vecteurs  $X$  et  $Y$  (KOUTROUMBAS *et al.*, 2008). La figure 4.12 présente le processus de calcul de similarité sémantique.

$$S_{\text{cosinus}}(X, Y) = \frac{X^T Y}{\|X\| \|Y\|} \quad (4.1)$$

où

$$\|X\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4.2)$$

$$\|Y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4.3)$$

Le tableau 4.5 présente un exemple sur le calcul de la similarité sémantique entre le *word embedding* de référence du *token* «congestion» provenant du texte : «Congestion at shanghai port threatens to hamper global trade» et les *word embeddings* des *tokens* du texte suivant : «Recurrent congestion in the port of Le Havre is a source of delay for the container ship».  $\text{Ref}_{\text{emb}}$  indique le *word embedding* de référence qui correspond à la représentation vectorielle du mot congestion et  $\text{Emb}_{\text{token}_i}$  indique le *word embedding* d'un *token* d'entrée.  $\text{Cos}(\text{Ref}_{\text{emb}}, \text{Emb}_{\text{token}_i})$  est le score de similarité obtenu en appliquant la similarité cosinus.

**Table 4.5** – Exemple d'application de la mesure de similarité

Nb.	Token d'entrée	Cos(Ref <sub>emb</sub> , Emb <sub>token</sub> )
1	Recurrent	0.658
2	Congestion	0.960
3	Port	0.423
4	Le Havre	0.203
5	source	0.413
6	delay	0.629
7	container	0.381

19. EDRM : Exactitude en Distance Relative à la Solution Moyenne

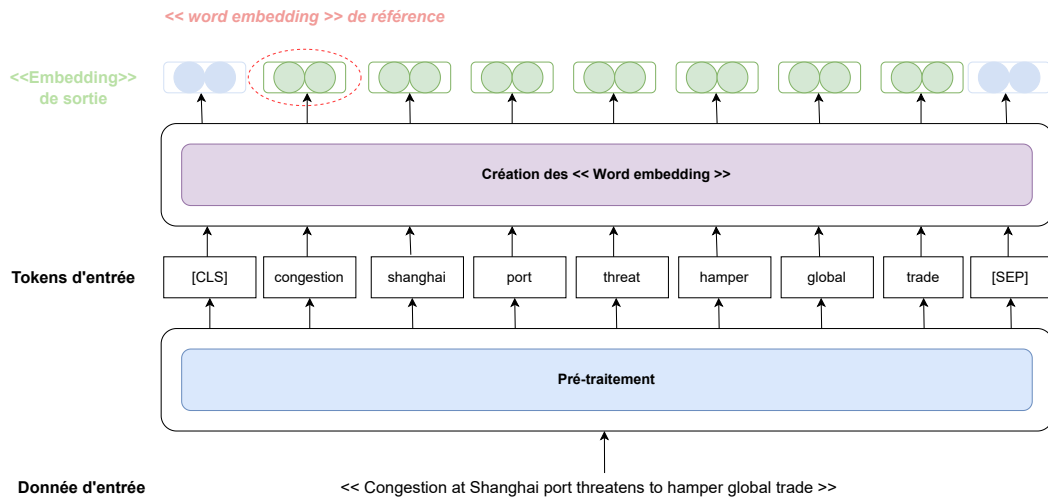


Figure 4.11 – Création des *word embeddings* de référence

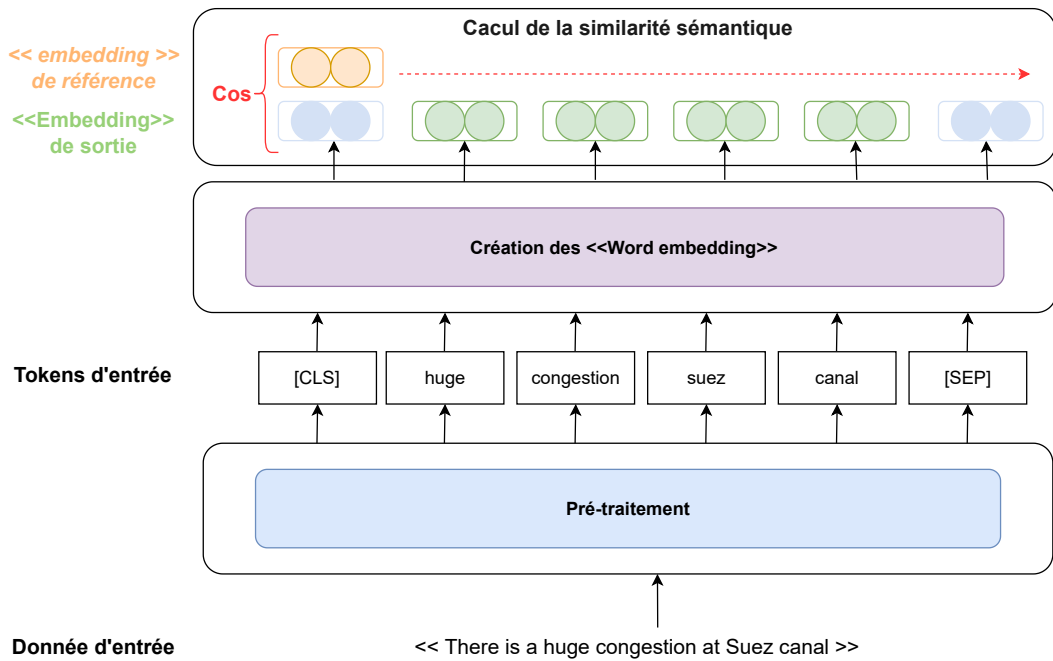


Figure 4.12 – Le processus de calcul de la similarité sémantique



## Implémentation du modèle de détection des événements

Nous présentons dans cette sous-section les phases d'implémentation du modèle de détection des événements.

### Création du *word embedding* de référence et calcul de la similarité sémantique

Pour la création des *word embeddings* de référence pour le climat extrême nous avons utilisé le texte de référence suivant : «A violent storm is approaching the coast» et pour celui de la catégorie restriction du trafic le texte «Recurrent congestion in the port of Le Havre is a source of delay for the container ship» a été considéré. Le choix d'utilisation de ces deux phrases comme référence a été motivé par le fait qu'elles font explicitement état d'événements aléatoires ayant perturbés le flux de marchandises lors du transport intermodal. L'*embedding* du mot «*storm*» et celui de «*congestion*» est ensuite utilisé pour le calcul de la similarité sémantique avec les autres *word embeddings*.

**Remarque :** L'identification des textes de référence pour la création de l'*embedding* de référence est une étape importante dans la mise en place du modèle de détection des événements. En effet, le choix du texte de référence conditionne les performances du modèle. Dans nos travaux nous avons choisi les textes de référence de manière assez intuitive.

Une piste d'amélioration et de consolidation est de s'inspirer des travaux de KROPCZYNSKI *et al.* (2018) pour retrouver le texte de référence pour chacune des catégories d'événements. Dans l'optique d'identifier les informations pertinentes dans les textes faisant référence aux situations de crise, les auteurs de cet article ont mené une expérience sociale avec des experts du domaine. Durant cette expérience, il a été demandé aux experts de proposer, suivant certaines contraintes, des tweets qui décrivent une situation de crise. L'étape d'analyse des textes proposés par les participants a permis aux chercheurs d'identifier les critères nécessaires pour qu'un texte («the golden tweet») soit exploitable en gestion de crise. En utilisant une démarche similaire, nous pourrions être capables de consolider le choix des textes de référence et les performances du modèle de détection des événements.

### Choix du seuil de la métrique de similarité sémantique

Le seuil de la métrique de similarité sémantique  $\beta$  est un seuil considéré comme suffisant pour que le *word embedding* soit similaire à l'*embedding* de référence. C'est-à-dire que ce seuil indique le score minimum pour lequel le mot représenté par le *word embedding* est considéré comme un événement d'intérêt.

Pour déterminer ce seuil  $\beta$  nous proposons de mesurer la distribution des scores de «*word embeddings*» d'intérêt que nous avons réalisés et de sélectionner le score qui permettra d'éliminer les faux positifs lors de la détection des événements. La figure 4.13 présente un exemple de la distribution de la mesure de la similarité sémantique des événements *tempête*, *tornado*, *cyclone*, *vent fort*, *inondation* et d'autres mots avec l'*embedding* de tempête dans le texte «A violent storm is approaching the coast» comme *word embedding* de référence. Cette figure montre que les mots *tornado*, *cyclone*, *inondation* et *vent violent* sont sémantiquement proches du mot *tempête* par rapport aux autres mots. Nous pouvons donc conclure d'après ce graphique que le seuil adapté pour la détection d'un événement de type climat extrême est de 0.5, il permet de considérer et d'extraire tout événement proche au sens sémantique du mot *tempête* et de le classer comme un climat extrême.

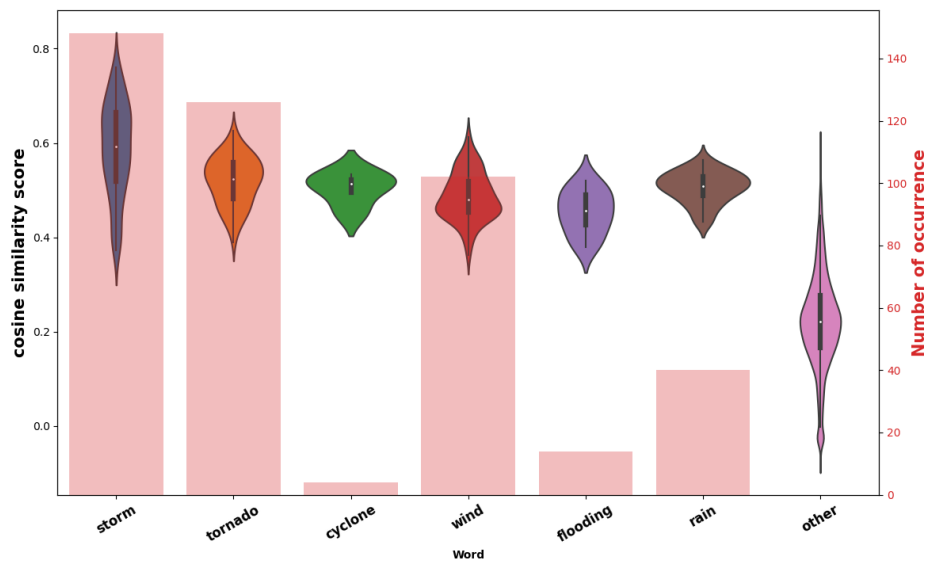


Figure 4.13 – Illustration du choix du seuil pour la détection d'évènement

### Évaluation du modèle de détection des évènements

Dans l'optique d'évaluer les performances du modèle de détection des évènements nous utilisons les données qui sont des manifestations d'évènements aléatoires du corpus de données présenté dans la sous-section 4.3.3. Pour rappel, il est annoté suivant deux catégories d'évènements : (i) climat extrême, (ii) restriction du trafic. Le tableau 4.6 présente les évènements et leur distribution dans le corpus de données.

Table 4.6 – Distribution des catégories d'évènements dans le corpus de données

No	Catégorie d'évènement	Nombre	Évènement
1	Climat extrême	1322	Tempête, inondation, tornade
2	Incident du trafic	1038	Congestion, grève, accident

Pour évaluer la performance du modèle, nous assimilons la détection des évènements aléatoires à un problème de classification multiple suivant trois classes. Les deux premières classes correspondent aux catégories d'évènements et la troisième est la catégorie *pas d'évènement*. Cette dernière classe stipule que le modèle ne détecte aucun évènement aléatoire susceptible de perturber la chaîne de transport. Lorsqu'une donnée est classée dans cette catégorie, cela signifie que le score de similarité sémantique entre l'*embedding* de référence et les *embeddings* de la donnée est inférieur au seuil de détection.

Comme pour l'évaluation du modèle d'identification des symptômes, la matrice de confusion est utilisée pour l'évaluation du modèle de détection des évènements. La figure 4.14 présente la matrice de confusion après l'utilisation du modèle de détection des évènements sur le corpus de données annoté.

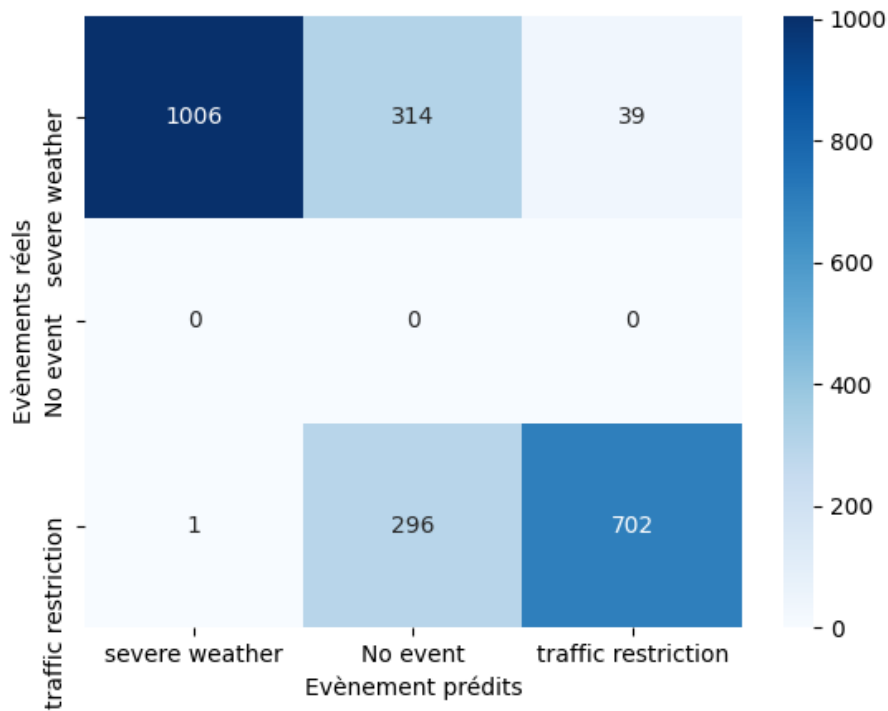


Figure 4.14 – Matrice de confusion pour le modèle de détection des événements

Malgré le fait que la matrice de confusion ne soit pas parfaite, les résultats obtenus avec le modèle de détection des événements sur les deux catégories d'évènements sont satisfaisants pour soutenir l'aide à la décision. En effet sur 1322 événements réels signalant un climat extrême susceptible de perturber le flux des conteneurs le modèle de détection des événements arrive à détecter 1006 (soit un pourcentage de réussite de 76%) et sur 1038 données relayant des événements sur la restriction du trafic il en détecte 702 (pourcentage de réussite de 67%).

Dans nos travaux, nous sommes en présence de signaux forts et plutôt redondants, les données dans une même région du monde relayent très souvent la même information. Ainsi avec ces performances de détection nous sommes quasiment certains de détecter l'occurrence des événements aléatoires lors du transport intermodal.

## 4.4 Module d'exploitation de la connaissance

Dans les sections précédentes nous avons montré comment nous détectons les événements aléatoires perturbant le processus de transport intermodal des marchandises à partir des données de traçabilité/ visibilité et des données textuelles. Cette section concerne la prévision du retard que peuvent engendrer ces événements grâce au graphe de connaissances implémenté dans le chapitre 3. La démarche proposée est composée de deux étapes : (1) l'identification de la phase de transport (pré/post-acheminement, manutention du conteneur et transport maritime) dans laquelle se trouve le conteneur suivi, et (2) la prévision du retard. Chacune de ces phases est développée dans les points ci-dessous.

1. Identification de la phase de transport : elle a pour objectif de déterminer la phase de transport sur laquelle se trouve le conteneur lors de la détection de l'évènement aléatoire. Cette information est obtenue grâce aux données de localisation (longitude et latitude) du conteneur. La visibilité indique la position exacte du conteneur. Lorsqu'elle (position du conteneur) n'est pas disponible à l'instant  $t$ , nous récupérons le dernier point de passage fourni par les données de traçabilité. Ensuite, tous les points de passage du conteneur sont classés par ordre croissant et comparé au timestamp<sup>20</sup> de l'évènement détecté. Si le timestamp de l'évènement aléatoire se trouve avant celui du port de départ, le conteneur est dans sa phase de pré-acheminement et si le timestamp se trouve après celui du port d'arrivée le conteneur est dans sa phase de post-acheminement. En revanche, s'il existe un *event*<sup>21</sup> signalant l'arrivée à un port et aucun *event* signalant la sortie de ce port, nous sommes dans la phase de manutention du conteneur. Enfin, si il existe un *event* signalant le départ d'un port et plus aucun évènement signalant l'entrée dans un autre port, nous considérons que nous sommes dans la phase du transport maritime. L'algorithme 1 présente le processus d'identification de la phase du transport intermodal.

**NB** : Il est important de préciser que nous nous plaçons dans un cas idéal où nous avons accès à l'ensemble des données de traçabilité et de visibilité des conteneurs durant leur transit, ce qui n'est pas le cas dans certains transports. Par exemple lorsqu'il n'y a pas de transmission de données en temps réel quand le conteneur est placé en fond de cale du navire. Nous proposons dans le chapitre 5.3 une piste de recherche pour s'affranchir de cette limite.

2. Préviation du retard : après la détection de l'évènement aléatoire, ce dernier est ajouté au graphe de connaissances et est lié à une instance générique d'évènement. L'évènement est ajouté avec un attribut faisant référence à l'étape de transport où il a été détecté. Par exemple, la détection d'une restriction du trafic à Shanghai sur une étape de post-acheminement sera ajoutée au graphe et lié à l'évènement générique restriction du trafic avec le type de lien *same\_as*. La figure 4.15 illustre l'ajout de cet évènement dans le graphe de connaissances. La figure 4.15a décrit l'évènement générique et la figure 4.15b présente la description de l'évènement ajouté avec les attributs longitude et latitude qui indiquent le lieu où il a été détecté. L'algorithme 2 présente le processus d'ajout d'un évènement détecté durant le transit des conteneurs. Il prend en entrée les évènements aléatoires et fournit en sortie, grâce aux règles d'inférence, la phase du transport intermodal impactée, le type de l'impact (retard) et la cause source du retard.

Les règles d'inférence sont définies grâce aux commandes (cypher query language) de Neo4j. Pour rappel, notre base de connaissances est implémentée sous le système de gestion de base de données graphes Neo4j. Ces règles permettent de remonter sur un impact de type retard à partir d'un évènement terminal ou intermédiaire du graphe de connaissances. Un exemple d'inférence pour la restriction du trafic à Shanghai est présenté sur la figure 4.16. A partir de l'évènement générique, nous remontons sur les conséquences possibles en fonction de la phase de transport identifiée (étape 2 sur la figure 4.16). La conséquence terminale est susceptible de créer un retard sur la phase du transport (étape 3 sur la figure 4.16) et cette dernière retarde toute la chaîne de transport (étape 4 sur la figure 4.16). Cette inférence récupère la conséquence et l'impact d'une restriction du trafic sur l'étape du post-acheminement. Le tableau 4.7 présente l'intégralité des nœuds et liens du graphe de connaissances.

20. timestamp : Le moment précis (date et l'heure) où l'évènement est détecté

21. *Event* : il s'agit d'évènement de transport tel que l'arrivée à un port, variation des condition de transport, etc.

---

**Algorithme 1** : Algorithme d'identification de la phase de transport

---

**Entrées** : Localisation du conteneur ( $L_c$ ) ; Points de passages ( $Poi_p$ ) ; Évènement aléatoire ( $E_i, T_i, T_i$ )

**Sorties** : Phase du transport intermodal (**Phase**)

initialisation

**si** Port de départ  $\notin$  dans  $Poi_p$  **alors**

    | **Phase**  $\leftarrow$  pré-acheminement;

**sinon**

    | **si** Port d'arrivée  $\in$  dans  $Poi_p$  **alors**

        | **Phase**  $\leftarrow$  post-acheminement;

    | **sinon**

        | **si**  $L_c = Poi_p$  **alors**

            | **Phase**  $\leftarrow$  post-acheminement;

        | **sinon**

            | **Phase**  $\leftarrow$  maritime;

        | **finsi**

    | **finsi**

**finsi**

---



---

**Algorithme 2** : Algorithme d'ajout d'un évènement aléatoire dans la base de connaissances

---

**Entrées** :  $E_i$  évènement aléatoire ; localisation de l'évènement ( $L_i$ ) ; évènements  $Be_i$  de la base de connaissances  $BC$

**Sorties** :  $E_i$  évènement aléatoire, Impact de l'évènement aléatoire  $I_i$

initialisation;

**pour**  $Be_i \leftarrow BC$  **faire**

    | **si**  $E_i = Be_i$  **alors**

        | insérer  $E_i$  comme une instance de  $Be_i$ ;

    | **sinon**

        | retourner au debut de la section actuelle;

    | **finsi**

**fin**

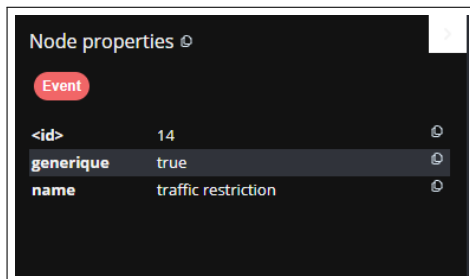
---

## Conclusion

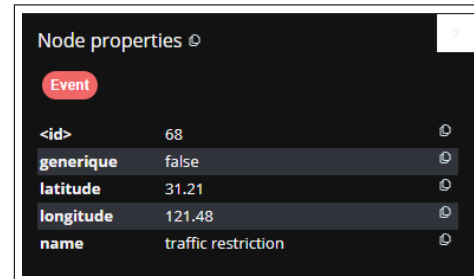
Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments de réponse à notre deuxième question de recherche : *Comment détecter les évènements aléatoires (aléas) qui surviennent sur la chaîne de transport grâce aux données de traçabilité et de visibilité recueillies en temps réel ?* Nous proposons un système de détection temps réel des risques basé sur le processus d'extraction des connaissances. Ce système permet de détecter en temps réel les évènements aléatoires perturbant le flux de transport intermodal et de prédire le retard qu'ils engendrent.

Dans la section 4.1 de ce chapitre nous présentons le système de détection temps réel des risques. La détection des évènements aléatoires a été abordée comme un problème d'extraction d'évènements. Le système de détection des risques est composé de trois modules : (i) le module de collecte des données, (ii) le module de traitement de l'information et (iii) le module d'exploitation de la connaissance.

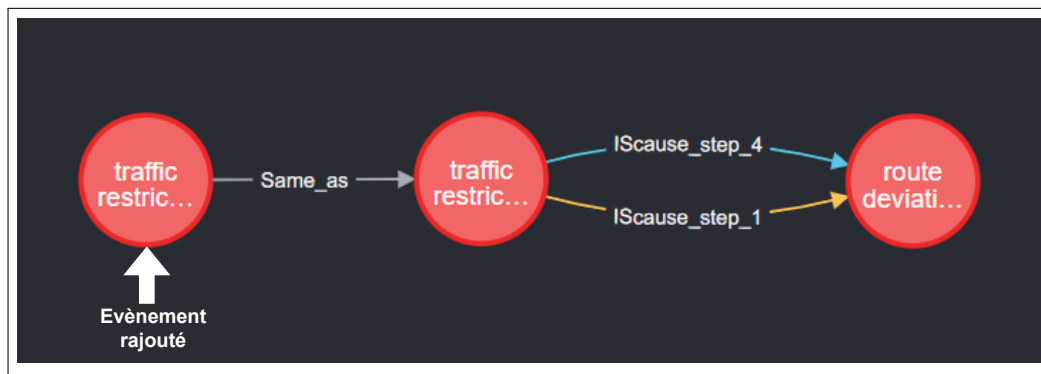
La section 4.2 est dédiée à la présentation du module de collecte des données. Dans cette section nous présentons les sources de données susceptibles de relayer des informations sur la perturbation de la chaîne de transport intermodal et le processus de collecte des données nécessaires pour la détection des évènements aléatoires.



(a) Évènement générique de la base de connaissances.



(b) Évènement ajouté.

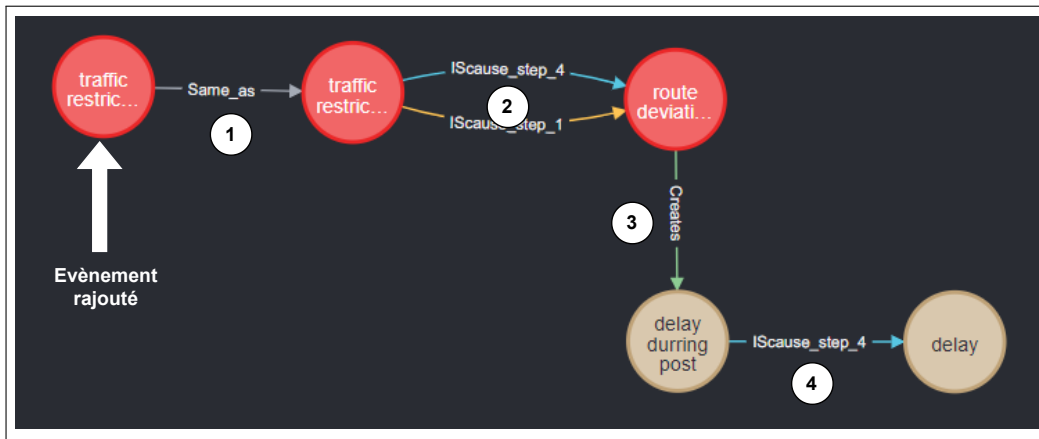


(c) Illustration de l'ajout d'une restriction du trafic au graphe de connaissances.

**Figure 4.15** – Ajout de l'évènement détecté dans le graphe de connaissances.

**Table 4.7** – Les entités de la base de connaissances

Nœud(Source)	Liens(►)	Nœud(Portée)
Évènement générique	IsCause_step_i	Évènement générique
Évènement	Same_as	Évènement générique
Évènement générique	Concerns	Risque
Évènement générique	Create	Impact



**Figure 4.16** – Exemple de règles métiers pour une instance de restriction du trafic.

Dans la section 4.3 le module de traitement de l'information est présenté. Ce module est utilisé pour extraire de l'information des données. Il est composé de quatre principaux modèles : (i) modèle de pré-traitement de la donnée qui a pour objectifs de produire une représentation abstraite des données, (ii) le modèle d'identification des symptômes qui filtre la donnée en déterminant si elle est ou pas une manifestation de l'occurrence d'un évènement et (iii) le modèle de détection des évènements qui est dédié à l'extraction des évènements aléatoires dans le texte.

La section 4.4 présente le module d'exploitation de la connaissance qui s'appuie sur le graphe de connaissances pour prévoir le retard dans les différentes phases du transport. Ce module fournit les conséquences des évènements aléatoires sur la chaîne de transport intermodal.

Ce chapitre propose un système de détection de risques en temps réel basé sur une approche hybride. Il utilise une approche d'apprentissage profond pour la détection des évènements aléatoires durant le transit des conteneurs et des règles métiers implémentées dans une base de connaissances pour inférer sur le retard qu'engendrent ces évènements. Nous allons dans le chapitre 5 proposer un cas d'application du système de détection temps réel des risques pour illustrer son fonctionnement.

**NB** : L'approche hybride du système de détection des risques permet également d'évaluer la pertinence de l'ontologie proposée dans le chapitre 3 à partir d'une étude empirique.

# 5

## Mise en œuvre du système de détection temps réel des risques : Cas d'application

Introduction . . . . .	137
5.1 Description du cas d'application pour la détection d'un climat extrême . . . . .	138
5.2 Détection des évènements et prévision du retard . . . . .	139
5.2.1 Les données d'entrée du système de détection temps réel des risques . . . . .	139
5.2.2 Détection des évènements . . . . .	140
5.2.3 Prévision du retard . . . . .	142
5.2.4 Présentation du service de détection des évènements aléatoires . . . . .	142
5.3 Discussion et évaluation du système de détection temps réel des risques . . . . .	144
Conclusion et généralisation du système de détection temps réel des risques . . . . .	145

### Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre 4 de ce manuscrit le système de détection en temps réel des risques dans le transport intermodal. Ce système est basé sur une approche hybride conciliant une approche d'apprentissage profond pour la détection des évènements aléatoires et sur une approche basée sur de la connaissance experte pour la prévision des retards dans la chaîne de transport intermodal.

Nous proposons dans ce chapitre une implémentation du modèle conceptuel présenté par la figure 4.2 à partir de données textuelles provenant de l'API Twitter et de la position des conteneurs issue des données de traçabilité et de visibilité fournies par le tracker de conteneur de notre partenaire industriel Next4. Il s'agit d'illustrer les contributions des chapitres 3 et 4 en proposant une preuve de concept du système de détection en temps réel des risques et en l'appliquant à un cas d'usage.

La section 5.1 de ce chapitre présente une description du cas d'application du système de détection en temps réel des risques dans lequel nous spécifions la catégorie évènement que nous cherchons à détecter.

La section 5.2 présente la chaîne de traitement des données d'entrée jusqu'à la prévision du retard. Elle propose une description des données utilisées et les transformations qu'elles subissent. Cette section présente également les résultats du système de détection en temps





**Figure 5.1** – Exemple de tweet sur l'inondation à Durban.

réel des risques et un service mis en place pour la remontée des occurrences des événements aléatoires lors du transport intermodal.

Dans la section 5.3 de ce chapitre, nous discutons et évaluons les résultats du système de détection en temps réel des risques sur le cas d'application.

## 5.1 Description du cas d'application pour la détection d'un climat extrême

Pour rappel, un climat extrême désigne l'occurrence de tous les événements de type tempête, inondation, tornade, etc, susceptibles de perturber le flux de transport intermodal. Le 14 avril 2022, l'Afrique du Sud plus précisément la ville de Durban a été frappée par de fortes intempéries qui ont gravement endommagé les infrastructures avec des routes dévastées et des ponts effondrés. Durban est ouverte sur l'océan Indien et son port est l'un des principaux terminaux maritimes du continent Africain. Cette inondation a été relayée sur les réseaux sociaux et par les articles de presse comme le montre la figure 5.1.

Un conteneur d'un client de notre partenaire industriel (NEXT4) est passé par le port de Durban durant cette période. Ceci a permis au module de collecte des données qui pour rappel se déclenche à l'approche d'un POI de récupérer des tweets faisant référence à des inondations durant la phase de manutention du conteneur. La figure 5.2 présente l'itinéraire emprunté par le conteneur lors de son transit.

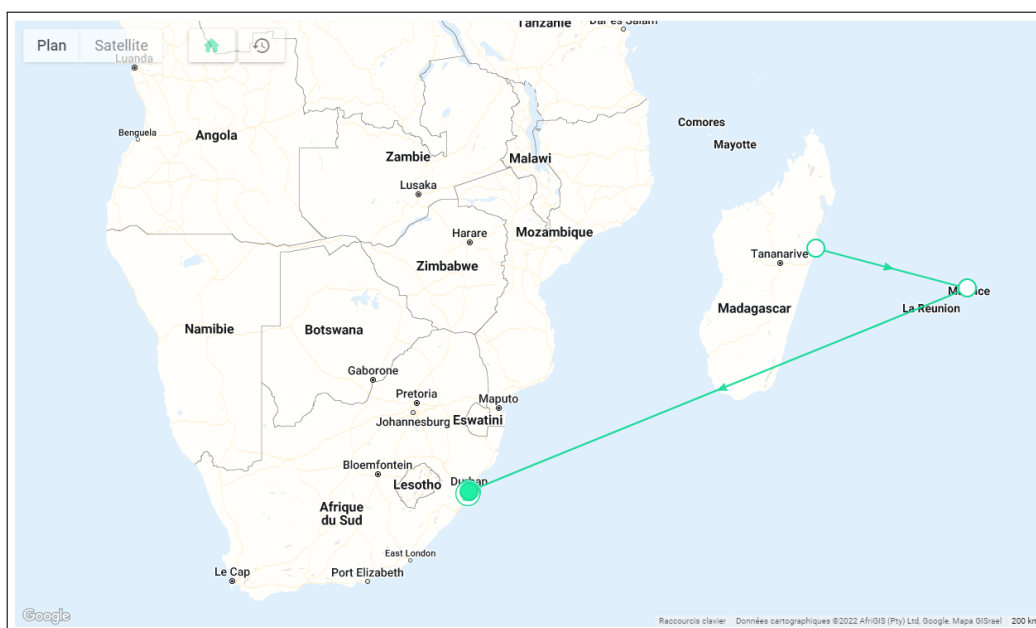


Figure 5.2 – Itinéraire du conteneur obtenue via la plateforme NEXT4.

## 5.2 Détection des événements et prévision du retard

Le suivi en temps réel des conteneurs durant leur transit grâce au tracker de NEXT4 nous a permis de collecter des tweets susceptibles d’informer sur les perturbations impactant le flux de transport intermodal. Nous présentons dans les sous-sections suivantes les données collectées et les traitements qu’elles ont subis.

### 5.2.1 Les données d’entrée du système de détection temps réel des risques

Cette sous-section présente la structure des données utilisées pour le cas d’application.

#### Les données de traçabilité et de visibilité

Pour rappel, notre partenaire industriel NEXT4 fournit une solution de traçabilité et de visibilité en temps réel à leurs clients à travers un tracker fixé sur le conteneur et une plateforme web permettant de suivre l’avancée de leurs conteneurs. Cette solution communique aux clients de Next4 des données sur (1) les variations des conditions du transport des conteneurs et (2) des événements de transport lors du transit de ce dernier.

#### 1. Les données sur les conditions de transports :

- La température ;
- L’humidité ;
- La pression ;
- Les chocs.

#### 2. Les événements de transport :

- Le POI de départ ;

- Le POI d'arrivée ;
- Les POIs intermédiaires (zone de transit, zone de stockage, port intermédiaire, etc) ;
- La position du conteneur (longitude et latitude) ;
- Les grutages <sup>1</sup>.

Nous allons nous intéresser aux événements de transport, plus spécifiquement aux différents POIs et à la position du conteneur. Cette dernière est utilisée par le système de détection en temps réel des risques pour la collecte des données textuelles. Les POIs sont utilisés pour déterminer la phase de transport dans laquelle se trouve le conteneur lors de son transit intermodal.

### Les données textuelles

Les données textuelles utilisées par le système de détection ont été collectées à partir de l'API-Twitter en utilisant la position du conteneur et les mots clés tempêtes, inondations, vent fort et tornade. Nous avons défini un rayon de 20 kilomètres autour de la position du conteneur et un horizon d'une semaine pour la collecte des tweets. C'est-à-dire que tout tweet qui a été publié dans les 7 derniers jours dans une zone de 20 km autour de la position du conteneur et satisfaisant aux conditions définies dans la requête fut collecté. La position du conteneur sur le port de Durban a été remontée par les données de visibilité le 19 avril 2022. Ce jour même 21 tweets ont été collectés dont le plus ancien date du 12 avril («The rains are back. With strong gusts of wind.») et le plus récent du 19 avril (tweet 1 <sup>2</sup>). La structure de ces données reste inchangée par rapport à celle présentée sur la figure 4.5.

## 5.2.2 Détection des événements

Après avoir pris soin de supprimer les retweets (10), l'ensemble des tweets restants (11) est traité par les différents modèles du traitement de l'information. Premièrement, les données sont pré-traitées à partir du module de pré-traitement des données dans l'optique de produire une représentation plus abstraite des textes. Le tableau 5.1 présente le contenu des données recueillies.

Ensuite, le modèle d'identification des symptômes est utilisé pour vérifier si certaines de ces données sont des manifestations d'événements aléatoires susceptibles de perturber le flux de transport intermodal. Cette étape inclut la transformation du texte d'entrée en *word embeddings* comme décrit dans la sous-section 4.3.2. Le tableau 5.2 présente les résultats de l'application du modèle d'identification des symptômes sur les données. Comme défini dans la sous-section 4.3.3, un seuil de 0,9 a été considéré pour la détection des symptômes.

Toutes les données qui ont été qualifiées comme une manifestation d'un événement aléatoire sont utilisées comme entrée du modèle de détection des événements. Dans cette étape les *word embeddings* de chacun des tokens d'entrée des données sont utilisés pour le calcul de la similarité sémantique avec l'*embedding* de référence (tempête). Le seuil de 0,5 sera considéré lors de l'utilisation de métrique de similarité sémantique cosinus comme décrit dans la sous-section 4.3.4. Le tableau 5.3 présente les résultats obtenus après l'application du modèle de détection des événements sur les données d'entrée caractérisées comme manifestation d'événement aléatoire selon les résultats du modèle d'identification des symptômes.

---

1. Grutage : Manutention du conteneur à l'aide d'une grue  
2. Nous préférons ne pas afficher ce tweet car il a une connotation raciale

**Table 5.1** – Données du cas d’usage.

No.	Contenu textuel
Txt.1	tweet 1
Txt.2	Thank you God for saving us from Storm and sever floods  May those who are victims of floods stay strong in all ways.
Txt.3	Living in KZN makes you strong. Survived the lockdown, the looting, the vicious storm and tonight another sabotage of the substation. Half the town is again without power. We bang our heads against the ANC-brick wall of the lawlessness and keep smiling.
Txt.4	No wind? It was pretty strong yesterday afternoon and followed by light rain.
Txt.5	Well, the flooding did some serious damage! Roads closed. Water disruption, communication disruption etc etc. Please everyone, we implore you : stay strong, stay safe! Roads are blocked and washed away. Help where you can.
Txt.6	The rains are back. With strong gusts of wind.
Txt.7	IN PICS  The ongoing showers has caused a road collapsed at Nhlungwane, north of Durban, as the heavy rains continues to wreak havoc across the province of KwaZulu-Natal.
Txt.8	I doubt bro the current is really strong and the wind was not even helping matters but let’s just pray for a miracle coz we all need 1 here in Durban.
Txt.9	Durban is flooding guys check on your friends and family members it really bad and it getting worse now, wind is getting strong with non stop heavy rain.
Txt.10	Fortunately it’s not my garden. Used to have one though, slightly bigger. Not sure if the dirt road can be travelled on yet with my little car. Will find out tomorrow. But jeez, it’s not stopping & the wind is strong as well. Add the Corrugated roofing, I can’t think.
Txt.11	Businesses are dealing with port closures, congestion, and vehicle looting, and while the flooding has caused roadblocks and damage to trucks and containers, there will be no shortages of fuel or food as a direct result of the storm. #KZNFloods.

**Table 5.2** – Résultats à la sortie du modèle d'identification des symptômes.

No. Texte	Valeur $\alpha$	Symptôme
Txt.1	0.47	Non
Txt.2	0.61	Non
Txt.3	0.47	Non
Txt.4	0.55	Non
Txt.5	0.82	Non
Txt.6	0.90	Oui
Txt.7	0.37	Non
Txt.9	0.96	Oui
Txt.10	0.60	Non
Txt.11	0.95	Oui

**Table 5.3** – Résultats à la sortie du modèle de détection des événements.

No. Texte	Valeur $\beta$	Catégorie de l'évènement
Txt.6	0.62	Climat extrême
Txt.9	0.60	Climat extrême
Txt.11	0.68	Climat extrême

L'utilisation du module de traitement de l'information fait état de l'occurrence d'un climat extrême dans la ville de Durban, qui est un point de passage du conteneur d'un client de notre partenaire industriel comme présenté sur la figure 5.2.

### 5.2.3 Prévision du retard

La prévision du retard consiste à déterminer la phase du processus de transport intermodal dans lequel se trouve le conteneur, puis à ajouter l'évènement détecté dans le graphe de connaissances afin de remonter son impact potentiel.

Dans un premier temps, nous appliquons l'algorithme 1 (voir la section 4.4) sur les données de traçabilité du conteneur cible. Celui-ci nous permet de récupérer la phase du processus de transport intermodal dans laquelle se trouve le conteneur lors de la détection de l'évènement aléatoire. La sortie de l'algorithme nous indique que le conteneur se trouve dans la phase de manutention du conteneur.

Après avoir déterminé que le conteneur est dans une phase de manutention, nous ajoutons l'évènement climat extrême (figure 5.3) dans le graphe de connaissances comme illustré sur la figure 5.4. Il est relié à l'évènement générique climat extrême par le lien *Same\_as* et les règles d'inférence permettent de remonter à un retard sur la phase de manutention du conteneur.

### 5.2.4 Présentation du service de détection des événements aléatoires

Cette sous-section décrit le service de détection des événements aléatoires qui a été mis en place et illustré sur la figure 5.5. Ce service permet de remonter l'occurrence des événements aléatoires du système de détection des risques à notre partenaire industriel.

La chaîne de traitement de l'information reçoit en entrée les événements de transport (*event*) du conteneur récupérés depuis la base de données de NEXT4. A partir de la localisation du



Figure 5.3 – Attribut de l'évènement climat extrême.

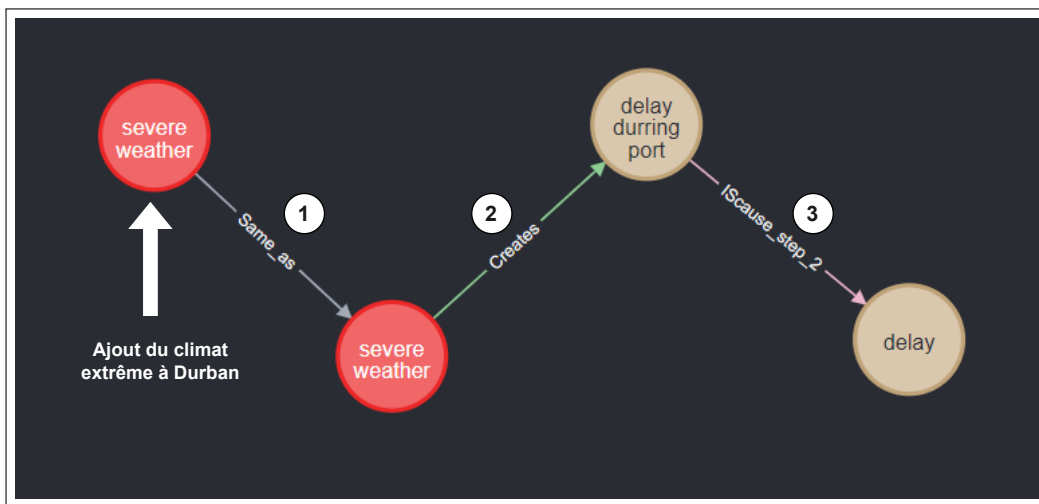


Figure 5.4 – Ajout de l'évènement climat extrême au graphe de connaissances.

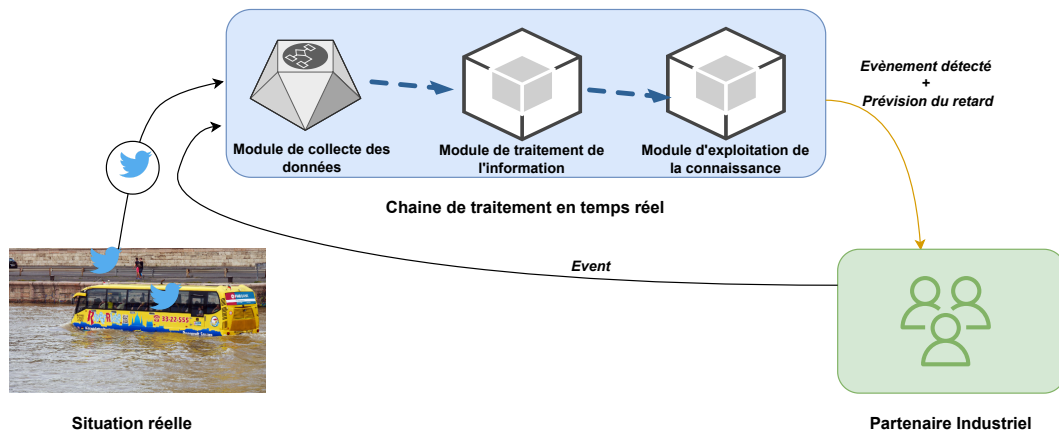


Figure 5.5 – Schéma d'illustration du service de détection des événements aléatoires

conteneur, la chaîne de traitement sollicite l'API Twitter pour la collecte des données jusqu'à la détection de l'évènement et la prévision du retard.

Les informations sur le retard prédit et l'évènement détecté sont stockés dans une base de données et sont accessibles à partir d'une requête.

### 5.3 Discussion et évaluation du système de détection temps réel des risques

Dans ce cas d'utilisation, à partir des données de visibilité fournies par notre partenaire industriel, le module de collecte de données du système de détection temps réel des risques nous a permis de recueillir 21 tweets autour de la ville de Durban.

Le système de détection des risques à travers le modèle d'identification des symptômes qualifie dans un premier temps les données collectées et juge que trois d'entre elles sont des manifestations d'évènements aléatoires susceptibles de perturber la chaîne de transport intermodal tout en excluant le reste des données. Ensuite, le modèle de détection des évènements confirme la présence d'un climat extrême sur le port de Durban à partir des trois textes.

Enfin le module d'exploitation de la connaissance du système ajoute dans ce cas d'application le climat extrême dans le graphe de connaissances et conclut grâce aux règles d'inférence à un retard dans les opérations de manutention du conteneur.

Le port de Durban est un POI régulier du client de notre partenaire industriel. Une analyse a posteriori du transport de ce conteneur avec les données de traçabilité, montre que les opérations de manutention ont duré 6 jours contre un jour en moyenne dans des conditions de transport normal.

Le système de détection en temps réel des risques arrive à détecter grâce aux modules de collecte de données et de traitement de l'information les évènements aléatoires qui perturbent le flux de transport intermodal et à indiquer grâce au module d'exploitation de la connaissance la phase de transport retardée.

## Conclusion et généralisation du système de détection temps réel des risques

Ce chapitre nous a permis d'illustrer les contributions de nos travaux dans la gestion des risques du transport intermodal. Il présente un cas d'application du système de détection en temps réel des risques dans la chaîne de transport intermodal. Ce cas d'application illustre l'utilisation des trois modules composant le système pour la détection d'un climat extrême et la prévision du retard que ce dernier engendre dans le flux des marchandises conteneurisées.

Nous avons expérimenté et validé les modules de collecte de données, de traitement de l'information et d'exploitation de la connaissance du système de détection temps réel des risques à partir de l'API-Twitter.

Nous proposons dans le cadre de nos travaux de thèse un service permettant d'automatiser la chaîne de traitement des données du module de collecte des données et les données de traçabilité/ visibilité. Il permet aux utilisateurs de suivre en temps quasi-réel les événements aléatoires susceptibles de perturber le flux de leur marchandises conteneurisées.

Le but du cas d'application présenté dans ce chapitre a été d'illustrer le système de détection temps réel des risques sur un cas pratique et réel. En fonction des données de traçabilité et de visibilité à notre disposition nous avons mis en exergue la détection de la catégorie d'évènement de type «climat extrême». Nous avons montré dans la section 5.3 que les résultats du système sont satisfaisants pour cette catégorie d'évènement et pour les données provenant de l'API-Twitter. Le service de détection en temps réel des événements aléatoires que nous proposons se situe actuellement dans la phase 3 du niveau de maturité de l'échelle TRL. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour le rendre généralisable et industrialisable.





# Conclusion et perspectives

LARSON *et al.* (1998) définit la chaîne d'approvisionnement comme toutes les activités associées au déplacement des marchandises depuis le stade des matières premières jusqu'à l'utilisateur final. Pour ses nombreux avantages tels que le gain de temps ou la sécurité qu'il offre, le transport intermodal est utilisé pour l'acheminement de 80% des produits transportés. Toutefois, de nombreux aléas tels que les congestions, les tempêtes, les grèves, etc, perturbent le flux intermodal des marchandises. Ces perturbations impactent négativement toute la chaîne d'approvisionnement entraînant des retards de livraison et une augmentation des coûts de transport. Dans l'objectif de réduire l'impact de ces aléas, de nombreux travaux ont été proposés dans la littérature pour aider les acteurs impliqués dans la chaîne d'approvisionnement à traiter les risques liés au transport des marchandises. Ce travail s'inscrit dans cette dynamique. En nous appuyant sur la connaissance des experts du risque, des innovations récentes pour l'amélioration de la traçabilité et de la visibilité des transports et sur les flux de données porteuses de connaissances sur les aléas, nous proposons un système de détection des risques en temps réel pour permettre aux acteurs de la chaîne d'approvisionnement d'être plus réactif et proactif face aux risques.

Nous présentons dans les sections ci-dessous un bilan des travaux présentés dans ce mémoire en y précisant nos contributions. Ensuite, nous soulignons les limites de nos travaux et présentons les perspectives de recherches à court et moyen-long terme qu'ils offrent.

## Synthèse des travaux et bilan des contributions

Nos travaux de recherche s'intéressent à l'aide à la décision pour supporter les activités des acteurs impliqués dans la chaîne de transport intermodal (exportateurs, consignataires, transporteurs, compagnie maritime, etc). Plus précisément, nous nous intéressons à la gestion des risques durant le transport intermodal. Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés aux événements aléatoires susceptibles de perturber le flux de marchandises. Notre objectif est de proposer aux acteurs impliqués dans la chaîne de transport intermodal une solution permettant de pallier les limites des outils actuels de gestion des aléas (outils de traçabilité et de visibilité).

Pour ce faire, nous avons exploré dans le chapitre 2 de ce manuscrit l'état de l'art sur les solutions et les outils proposés par les chercheurs et les industriels pour gérer les risques dans le transport intermodal.

Le chapitre 3 présente notre première contribution qui répond à notre première question de recherche : *Comment présenter les connaissances expertes sur la gestion des risques entraînant du retard dans le transport intermodal des conteneurs pour pouvoir les réutiliser ?*

Nous présentons dans ce chapitre un modèle de connaissance du risque dans le transport intermodal sous la forme d'une ontologie. Nous nous sommes intéressés à la modélisation des connaissances sur les risques engendrant du retard dans le transport intermodal. En nous inspirant de la méthodologie de mise en place des ontologies METHONTOLOGY, et grâce à une série d'interviews et d'un questionnaire adressé aux acteurs de la chaîne de transport, nous proposons un diagramme UML permettant de formaliser et de capitaliser la connaissance du risque dans transport intermodal. Cette ontologie a vocation d'être une référence pour la gestion des risques dans le transport des marchandises. Elle a été implémentée sous la forme d'un graphe de connaissances dans l'optique de l'exploiter pour détecter les risques en temps réel.

Le système de détection des risques en temps réel est la deuxième contribution de nos travaux de recherche. Présenté dans le chapitre 4, il répond à notre deuxième question de recherche : *Comment détecter les événements aléatoires (aléas) qui surviennent sur la chaîne de transport grâce aux données de traçabilité et de visibilité recueillies en temps réel ?*

Dans le chapitre 4, nous présentons et détaillons les trois modules composant le système de détection des risques en temps réel. (i) Nous commençons par le module de collecte des données qui permet de collecter l'ensemble des données nécessaires pour la détection des événements aléatoires. (ii) Ensuite, le module de traitement de l'information qui permet de qualifier puis d'extraire des données récoltées les événements aléatoires susceptibles de perturber la chaîne de transport est présenté. (iii) Enfin, le module d'exploitation de la connaissance qui permet de prévoir le retard pouvant être engendré par l'évènement précédemment extrait des données est présenté. Ce dernier module s'appuie sur le graphe de connaissances implémenté dans le chapitre 3 pour conclure au retard sur les phases du transport intermodal. Nous proposons une implémentation pour la détection de catégories d'évènements aléatoires (climat extrême et restriction du trafic) pour l'ensemble des 3 modules.

Le chapitre 5 présente un cas d'usage réel pour la détection d'un climat extrême et la prévision du retard durant le transit d'un conteneur d'un client de notre partenaire industriel. C'est une preuve de concept du système de détection des risques en temps réel proposé.

À notre connaissance, il n'existe pas de modèle de connaissance spécifiquement dédié à la gestion des risques dans le transport intermodal. En plus de la formalisation des concepts, la mise en place de l'arbre des causes définissant les relations de cause à conséquence des événements aléatoires engendrant du retard dans les phases du transport intermodal est un apport supplémentaire dans le domaine de la gestion des risques. Pour ce qui est de la détection des événements aléatoires et de la prévision du retard, notre système est l'un des rares à notre connaissance qui utilise simultanément les données de traçabilité/ visibilité (données de localisation) du conteneur et des données textuelles hétérogènes pour proposer ces fonctionnalités en temps réel.

## Les limites et perspectives de nos travaux

Au cours de nos travaux de recherches, nous avons été amenés à faire des choix aussi bien scientifiques que techniques pour répondre à notre problématique de recherche : **Comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur les délais d'acheminement des marchandises en transport conteneurisé dans un contexte intermodal ?** Malheureusement, quelques-unes des questions de recherche que soulève cette problématique

n'ont pas été entièrement résolues. Cette section a vocation d'énoncer des axes de réflexion à envisager à court et moyen-long terme dans la continuité de notre travail.

## Les limites et les perspectives à court terme

Bien que le système de détection en temps-réel des risques fonctionne actuellement, il est nécessaire de s'affranchir de certaines limites pour améliorer ses performances et permettre son industrialisation. En ce sens, nous développons dans les sous-sections ci-dessous les limites de nos travaux de recherches qui ouvrent des perspectives de recherche prometteuses.

### Les limites et les perspectives pour la base de connaissances

La base de connaissances a été implémentée à partir de l'ontologie de domaine sur les risques dans le transport intermodal. Cependant pour l'acquisition des connaissances sur les risques, seulement 16 interviews ont été menées et la majorité des personnes qui ont contribué à déterminer l'occurrence des risques sur les phases du processus de transport intermodal à travers le questionnaire sont localisées en France. Il nous paraît nécessaire d'augmenter le nombre d'interviews et de solliciter plus d'acteurs participant à la gestion des risques provenant du monde entier pour apporter plus de pertinence à la base de connaissances.

### Les limites et les perspectives pour la création des *word embeddings*

Le modèle pré-entraîné [BERT](#) que nous utilisons dans le système de détection en temps-réel des risques ne considère que les 510 premiers mots d'un texte d'entrée. Ce qui nous a contraint à implémenter nos modèles d'identification des symptômes et de détection des événements avec des textes d'une longueur inférieure ou égale à 510 mots. En pratique, certains articles de presse ont une longueur bien supérieure à la limite imposée par [BERT](#). En l'état actuel, notre système de détection des risques ne serait pas capable de traiter en intégralité ce type de texte. Il est nécessaire de s'affranchir de cette limite pour que le système de détection en temps-réel des risques puisse prendre en compte l'ensemble des sources de données.

### Les limites et les perspectives pour le modèle d'identification des symptômes

Le modèle d'identification des symptômes présente deux limites : (i) le corpus de données utilisé (ii) et le choix du seuil d'identification des symptômes  $\alpha$  (seuil de filtrage des données textuelles).

- Le corpus de données utilisé : le corpus de données utilisé pour le *fine tuning* de [BERT](#) pour l'identification des symptômes est composé de données sur la catégorie d'événements climat extrême et restriction du trafic et en plus, la quantité de donnée utilisée est inférieure à celle requise pour avoir de très bonne performance de classification. Pour améliorer les performances du modèle d'identification des symptômes, il serait intéressant pour le *fine tuning* de [BERT](#), d'utiliser un plus grand corpus de données annoté.
- Le choix du seuil de filtrage  $\alpha$  : nous avons effectué des tests sur plusieurs valeurs de  $\alpha$ , afin de choisir celle qui nous permet d'avoir le moins de faux positifs dans l'identification des symptômes. Cependant la valeur de  $\alpha$  (0,9) considérée contient beaucoup de faux négatifs (figure 4.10c).

Le modèle d'identification des symptômes gagnerait plus en performance en utilisant une méthode de calibration pour maîtriser le niveau de confiance accordé au modèle. Par exemple, des auteurs tels que [FENG \(2021\)](#) et [R. S. SMITH et al. \(2010\)](#) ont montré qu'avec l'utilisation de la calibration, les modèles de classification produisent de meilleurs résultats.

## Les limites et les perspectives pour le modèle de détection des événements

Les dernières limites que nous évoquons dans cette sous-section sont celles associées au modèle de détection des événements. Ce dernier présente également deux limites : (i) la dimension des vecteurs d'*embedding* et (ii) le choix de la métrique de similarité sémantique.

- La dimension des vecteurs d'*embedding* : la version standard de BERT fournit en sortie un vecteur d'*embedding* d'une taille de 512\*768 pour chaque *token* d'entrée. Selon VENKAT (2018), un nombre élevé de dimensions permet théoriquement de stocker plus d'informations, mais est rarement utile en pratique en raison de la plus grande possibilité de bruit et de redondance dans les données. En effet, un nombre inférieur de dimension d'un vecteur d'*embedding* peut contenir autant d'informations que les dimensions originales.

Pour augmenter les performances du modèle de détection des événements, nous proposons la mise en place de méthodes pour la réduction de la dimension des vecteurs d'*embedding*. Une des pistes à considérer pour la réduction de la dimension des vecteurs d'*embedding* sans une perte d'information sont les travaux de COCHE (2018). L'auteur propose dans ses travaux un algorithme fondé sur UMAP (MCINNES *et al.*, 2020) pour réduire la dimension de vecteur d'*embedding* dans l'optique de faciliter un problème de clustering.

- Le choix de la métrique de similarité sémantique : nous utilisons la similarité cosinus dans le modèle de détection d'évènement. Ce choix a été motivé par la grande utilisation de cette métrique pour la classification des textes. Cependant d'autres métriques telles que la corrélation de Spearman ou EDRM sont également utilisables.

Il convient de faire un benchmark des différentes métriques de similarité sémantique sur notre corpus de données et de sélectionner celle qui fournit les meilleurs scores.

## Les limites et les perspectives à moyen-long termes

Nous donnons dans cette sous-section des pistes de recherche à moyen-long terme pour l'amélioration de la gestion des risques dans le transport intermodal.

### Prise en compte des fausses informations

Les sources d'information (articles de presse ou réseau sociaux) sont gangrenées par de fausses informations (SEFFI, 2020). Les fausses informations sont, comme l'expression l'indique, de fausses informations bénéficiant d'une large diffusion.

Notre système de détection des risques en temps-réel collecte des données textuelles issues de sources diverses et variées. Pour être certain de la pertinence des événements détectés, il est important que le système de détection des risques puisse distinguer les informations authentiques des fausses informations.

Les travaux de ZHOU *et al.* (2019) sur la détection des fausses informations nous permettent de lister quelques pistes à explorer :

- Comparaison entre la connaissance relationnelle extraite des textes à vérifier et celle des textes représentant des faits réels ;
- Quantification des différences entre le style d'écriture des fausses informations et celles des informations authentiques ;
- Évaluation de la crédibilité des titres, des sources pour distinguer les informations authentiques de celles qui sont fausses.

## Prédiction de l'ETA

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2, des auteurs tels que ALESSANDRINI *et al.* (2019), DORRI *et al.* (2018), GUO *et al.* (2015) et ONUT *et al.* (2011) proposent des solutions pour la prédiction de l'ETA des navires dans le transport des marchandises. Cependant, à notre connaissance il n'existe pas de travaux dans la littérature qui adresse l'ETA à l'échelle du conteneur. Cela pourrait s'expliquer par le manque de données de traçabilité et de visibilité des conteneurs avant l'apparition des smart conteneurs. En effet, contrairement au AIS et EDI, le smart conteneur est un concept très récent et son utilisation de plus en plus grandissante dans le transport intermodal permet de coller digitalement à la caractéristique originelle du conteneur qui est l'intermodalité. La disponibilité actuelle des données de traçabilité et de visibilité des conteneurs offre de nombreuses possibilités. Nous proposons de les exploiter pour la prédiction d'une ETA dynamique prenant en compte l'impact temporel des aléas. Nous entendons par ETA dynamique, une estimation du temps d'arrivée des conteneurs capable de s'adapter en temps réel en fonction des aléas rencontrés durant le transport.

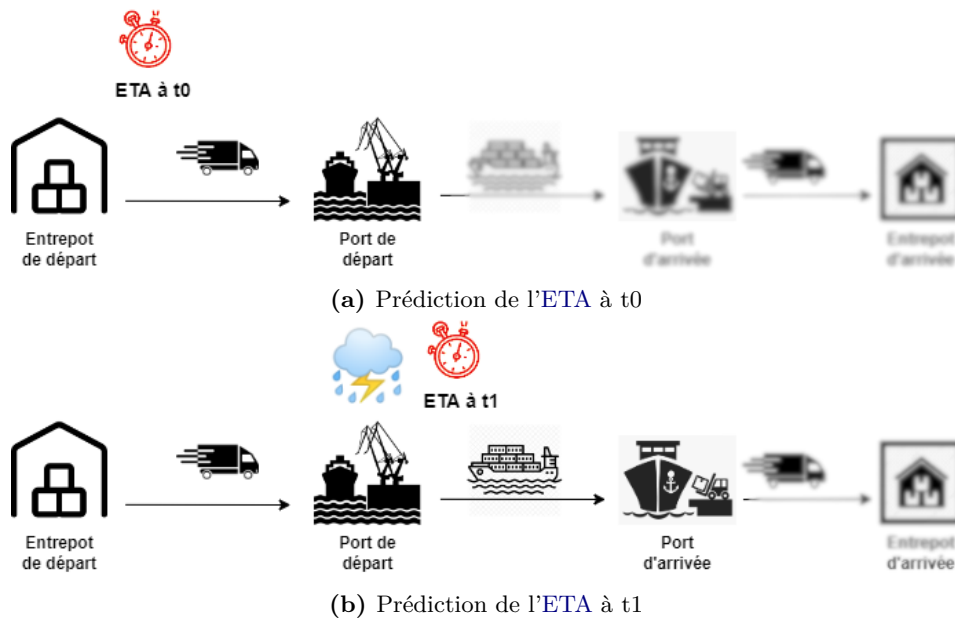
La prédiction de l'ETA dynamique des conteneurs en intégrant les événements aléatoires dans l'algorithme de prédiction s'inscrit dans le prolongement de nos travaux. Cette ETA nous permettra de déterminer l'impact des événements détectés par le système de détection en temps réel des risques. Nous proposons de suivre une méthodologie composée de deux étapes pour la prédiction d'une ETA dynamique alimentée par le système de détection en temps réel des risques.

1. Corpus de données des temps de parcours : il s'agit dans cette étape d'utiliser le système de détection en temps réel des risques pour constituer une base de données du temps nécessaire pour transporter un conteneur d'un POI à un autre POI. Ces données contiendront des précisions sur l'occurrence d'un aléa ou non durant le transit des conteneurs. Une section est définie comme le transport de conteneur entre deux POIs. Ce corpus de données sera utilisé pour entraîner le modèle de prédiction de l'ETA dynamique.
2. Modèle de prédiction de l'ETA dynamique : cette étape consiste à mettre en place un modèle statistique capable d'estimer le temps nécessaire pour parcourir chacune des sections de l'itinéraire du transport. Cette estimation prend en compte les événements aléatoires susceptibles de retarder l'acheminement du conteneur et d'autres variables  $y_i$  dépendantes ou indépendantes que nous définirons dans des travaux à venir. L'ETA a vocation à être recalculée à chaque passage à un POI, d'où sa caractéristique dynamique. Une solution envisageable pour la mise en place du modèle de prédiction est l'utilisation d'un modèle de régression qui sera entraîné avec le corpus de données des temps de parcours.

La figure 5.6 présente un flux de transport conteneurisé intermodal où on distingue clairement son caractère évolutif avec l'apparition ou non d'un événement aléatoire. A chaque arrivée dans un POI, le système de détection en temps réel des risques est utilisé pour vérifier si un événement aléatoire est susceptible de perturber le flux de transport. En fonction de sa sortie, l'ETA est recalculée à partir du modèle de prédiction.

## Prise en compte d'autres sources de données

Le système de détection en temps réel des risques a été mis en place sur la base de la disponibilité des données de localisation du conteneur provenant de la traçabilité et de visibilité de ce dernier. Cette hypothèse simplificatrice n'est pas toujours vraie pour tous les transports. Par exemple, dans les cas de figure suivants : (i) conteneur en fond de cale, (ii) défaillance du tracker et (iii) pas d'antenne relais à proximité, les données de visibilité et de traçabilité sont indisponibles.



**Figure 5.6** – Illustration de la prédiction dynamique de l'ETA

Pour s'affranchir de cette hypothèse, il est important d'étendre les sources de données à intégrer dans notre système. Nous listons ci-dessous des sources de données à considérer dans la continuité de nos recherches.

- Données AIS : l'intégration des données AIS par exemple dans le système de détection en temps réel des risques nous permettrait de suivre en temps quasi réel l'évolution de la phase maritime du transport intermodal. Cependant, cela suppose de déterminer sur quel navire est chargé le conteneur.
- Données provenant des API des compagnies logistiques : les compagnies logistiques fournissent à leurs clients des web-API permettant de suivre avec une certaine précision le conteneur lors de son transport. L'agrégation de ces données permettrait de pallier le problème de manque de visibilité et de traçabilité ponctuel dans le transport intermodal.
- Données portuaires : ces données permettent d'avoir accès à l'ensemble des entrées et sorties des navires lors de leurs passages aux ports. Ces données renseignent également sur la capacité d'accueil des ports. Leur intégration, permettrait de prédire ou de diagnostiquer les cas de congestions dans les différents ports et aussi de pallier un temps soit peu au problème de visibilité dans le transport intermodal.
- Données GPS : l'intégration des données GPS tel que Waze<sup>3</sup> qui signale les restrictions du trafic perturbant les itinéraires de transport, permettrait d'améliorer les performances du système de détection en temps réel des risques.

3. Waze : <https://www.waze.com/fr/live-map/>



## **Grille d'entretien**



### Grille d'entretien – Projet DISC

Société : .....	
Interlocuteur :	
Nom : .....	Fonction : .....
Mail : .....	Tél. : .....
Activité principale : .....	
Date création : .....	
Effectif : .....	

#### Thème A : Système de traçabilité

<p><b>A-1- La cartographie des processus</b></p> <p>1- Quel est la nature des marchandises que vous transportez ? <input type="checkbox"/></p> <p>2- Quels sont les volumes transportés et les destinations à l'international ? <input type="checkbox"/></p> <p>3- Pouvez-vous me donner les principales étapes de votre processus de transport (l'organisation du transport) ? <input type="checkbox"/></p> <p>4- Quels sont les règles associées à l'organisation du transport (Les indicateurs de performances) ? <input type="checkbox"/></p> <p>5- Comment vous agissez sur ces règles (les leviers) ? <input type="checkbox"/></p> <p>6- Comment est géré le passage en douanes de vos conteneurs ? <input type="checkbox"/></p> <p>7- Quels sont vos attentes vis-à-vis de ce mode de fonctionnement ? <input type="checkbox"/></p>	<p><i>Processus métiers et décisionnels</i> <i>Variables de décisionnels</i> <i>Risques associés au processus de transport</i></p> <p>Comment vous achetez le transport ?</p> <p>Comment est-ce que vous choisissez vos transitaires ?</p> <p>Comment le transport est réalisé de l'entrepôt du client jusqu'au navire?</p>
<p><b>A-2- Les fonctionnalités du Système de traçabilité</b></p> <p>8- Quels sont les ressources (outils) que vous utilisez pour organiser le transport des conteneurs ? <input type="checkbox"/></p> <p>9- Votre outil dispose-t-il d'un système de traçabilité des conteneurs ? <input type="checkbox"/></p> <p>10- Le système de traçabilité fournit-il des informations sur l'environnement du conteneur durant son transport ? <input type="checkbox"/></p> <p>11- Utilisez-vous un tracker pour assurer la traçabilité de vos transports ? <input type="checkbox"/></p>	<p><i>Ressources utilisés</i> <i>L'utilité et fiabilité des informations récoltées</i> <i>Usage future des données de traçabilité</i></p>

<p>12- Quelles sont les informations qui vous sont remontées à travers ce système ? <input type="checkbox"/></p> <p>13- Quel est le niveau de confiance que vous accordez aux informations remontées ? <input type="checkbox"/></p>	
<p><b>A-3- Enjeux business pour l'entreprise</b></p> <p>14- Quels usages faites-vous actuellement de ces informations de traçabilité ? <input type="checkbox"/></p> <p>15- Quels sont les opportunités non exploitées que peuvent apporter les systèmes de traçabilité ? <input type="checkbox"/></p> <p>16- Est-ce que vous vous préoccuper de l'empreinte carbone de vos expéditions ? <input type="checkbox"/></p> <p>17- En supposant que vous avez la possibilité d'avoir l'ensemble des informations durant le transit du conteneur quel serait pour vous le parfait outil pour vous assister dans l'organisation de vos transports ? <input type="checkbox"/></p> <p>18- Quel serait son apport du point du vue fonctionnel et financier ? <input type="checkbox"/></p>	<p><i>Si je vous demande de prioriser le délai, le coût la qualité et l'empreinte écologique de vos transport quel serait votre classification?</i></p>

<b>Thème B : Système de gestion des risques</b>	
<p><b>B-1- Les risques rencontrés</b></p> <p>19- A quels types de risques sont soumis vos conteneurs durant le transit ? <input type="checkbox"/></p> <p>20- Pouvez-vous me donner les zones à risque en fonction de vos destinations ? <input type="checkbox"/></p> <p>21- Diriez-vous que ces risques sont récurrents ? <input type="checkbox"/></p>	<p><b>Zones et types de risques</b></p> <p>Pouvez-vous me donner un vrai problème que vous avez rencontré récemment ?</p> <p>La pertinence des risques</p>
<p><b>B-2- Cadre de gestion des risques</b></p> <p>22- Quels sont les principales causes de ces risques ? <input type="checkbox"/></p> <p>23- Quels sont les conséquences de des risques sur la supply chain ? <input type="checkbox"/></p> <p>24- Comment agissez-vous sur ces risques ? <input type="checkbox"/></p> <p>25- Quels sont les outils que vous utilisez ? <input type="checkbox"/></p> <p>26- Ces outils vous permettent-ils de gérer l'ensemble des risques en temps réel ? <input type="checkbox"/></p> <p>27- Quels sont les risques que vous n'arrivez pas à traiter ? <input type="checkbox"/></p> <p>28- Avez-vous des idées ou des projets en cours pour mieux appréhender ce problème ? <input type="checkbox"/></p>	<p><b>Impacts des risques sur la supply chain</b></p> <p><b>Cadre de gestion des risques</b></p>

**B-3- Ouvertures**

29- Comment traitez-vous avec les assurances concernant les pertes (en mer, en port...)?

30- Que pensez-vous d'un outil permettant d'identifier les risques en temps réels?

# B

## Rapport d'entretien

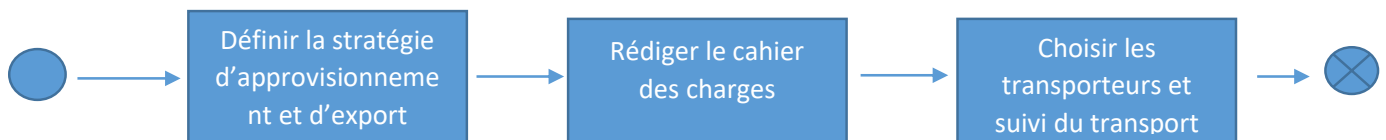
## Rapport d'entretien

Société : [REDACTED]	02/03/2020
Interlocuteur : [REDACTED]	
Nom : [REDACTED]	
Fonction : Responsable de transport	
Mail : [REDACTED]	Tél. :
Activité principale : Production de produit de beauté et de fragrance	
Date création : [REDACTED]	
Effectif : 2462 salariés	

### Thème A : Système de traçabilité

#### A-1- La cartographie des processus

1. 1000 Conteneurs transporté annuellement ce qui représente 1/3 des expéditions de [REDACTED] avec 50% des expéditions vers les USA.
2. Utilisation de routes régulières pour le transport des marchandises.
3. Valeurs marchandes des conteneurs assez élevé plus d'un million.
4. Processus :



5. Utilisation actuel de deux transporteurs référencés DB schenker et Bolloré avec des contrats établis sur une période de 3 à 5 ans.
6. Les prestataires sont choisis en fonction de :

- RSE
- Volumétrie transporté
- Fonctionnalité technologique
- Prix...

7. Indicateurs de performances des prestataires actuels :

- Lead time
- Pertes
- Vols
- Dommages sur les produits

8. [REDACTED] s'intéresse à leur empreinte carbone mais pas d'autre usage ce jour de cette empreinte que l'établissement d'un bilan carbone.

### A-2- Système de traçabilité

1. Dans un premier temps utilisation des systèmes proposés par les deux transporteurs dont le tracker next4 proposé par Bolloré logistics.
2. Passage au tracker safecube pour assurer la gestion et administration en internes pour un meilleur suivi en temps réel des conditions de transport.
3. Principales informations exploitées :
  - Géolocalisation en temps réel
  - Suivi de l'environnement du conteneur (ouverture de portes, variation de température et l'humidité, chocs...)
  - Suivi de la qualité du transport.
  - Transparence et partage de l'information sur toute la supply chain.
4. Utilisation des données de traçabilité temps réels :
  - Suivi en temps réels des conteneurs pendant le transit
  - Pas d'analyse appliquée sur les données recueillies pour le moment.

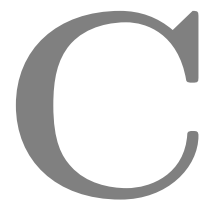
## Thème B : Système de gestion des risques

### B-1- Les risques rencontrés

1. Routes régulières donc peu d'aléas avec un pourcentage de 99.9% des colis livrés en état.
2. Le timing est bien respecté vu la connaissance des routes par contre un retard de plus de semaines serait problématique mais tout est mis en œuvre pour éviter cela à travers l'amélioration continue
3. Le taux de litige est faible.

## **Fonctionnalités intéressantes à développer pour l'interlocuteur**

- Volonté d'avoir une solution de traçabilité indépendamment de celle proposé par les transitaires.
- Challenger les transitaires sur le choix des itinéraires sur un long terme avec une bonne connaissance des flux.



## **Structure du questionnaire**



Can you rate these risks based on their occurrence in multimodal containerized transport?

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Route deviation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Switch error	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Piracy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Unexpected Door opening	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Unexpected Temperature/humidity variation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Shocs	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vehicule or Goods damage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
vehicule or Goods theft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Long waiting time	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Congestion	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fire	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Unstable weather	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transport Strike	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Political instability	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bridges collision	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figure C.1** – Structure du questionnaire

# D

## **Implémentation et population de la base de connaissances**

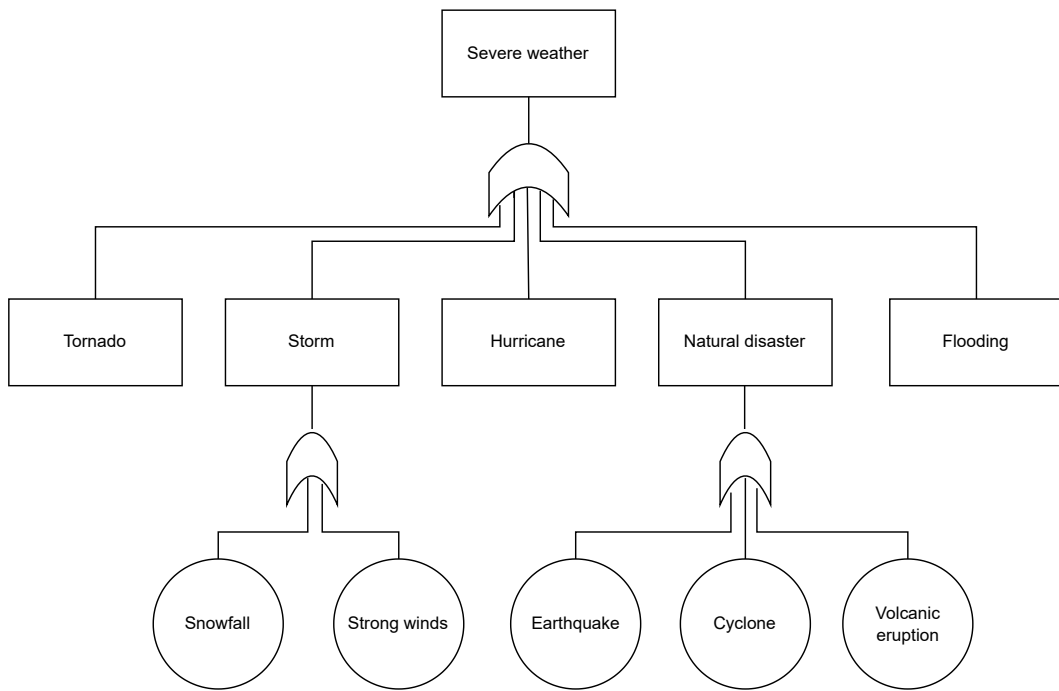


Figure D.1 – Arbre des causes de climat extrême

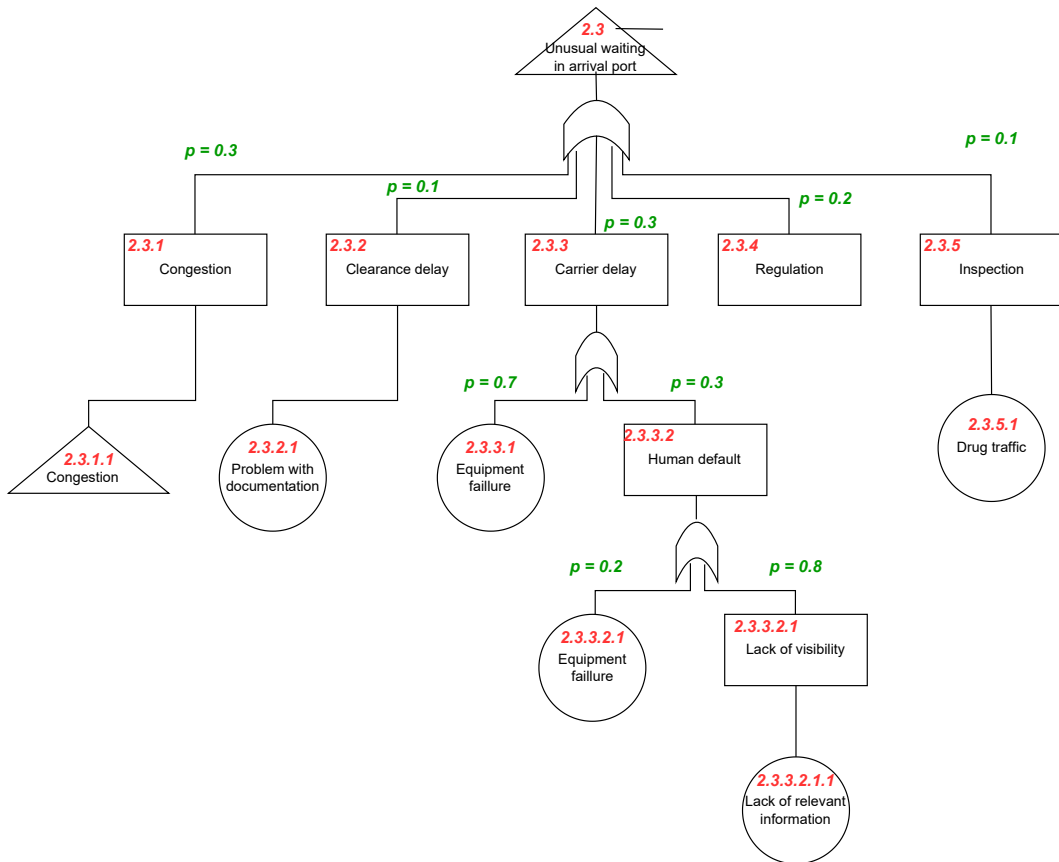


Figure D.2 – Temps d'attente inattendu au port d'arrivée

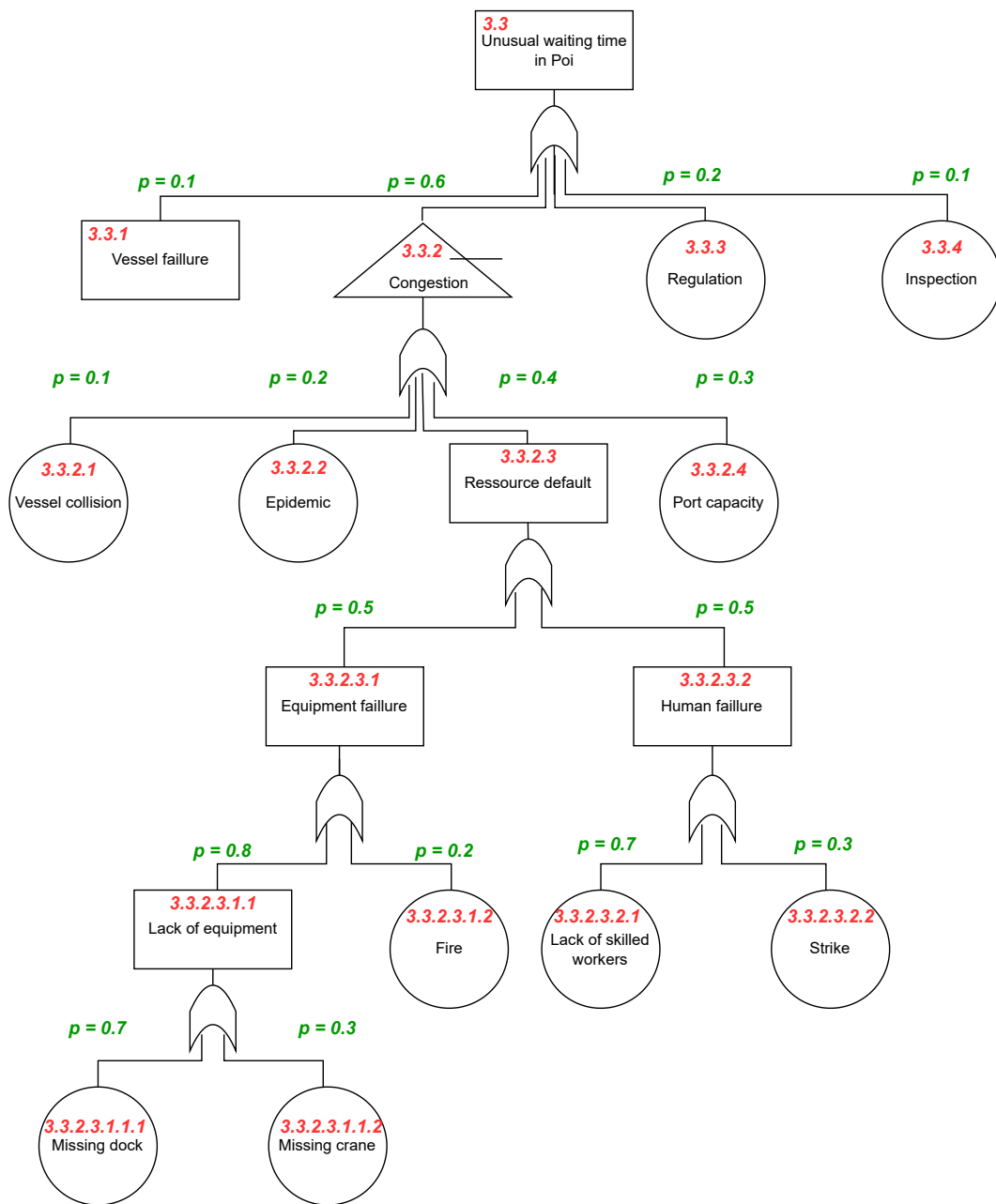


Figure D.3 – Modes de défaillances pour un temps d’attente inhabituel sur un POI

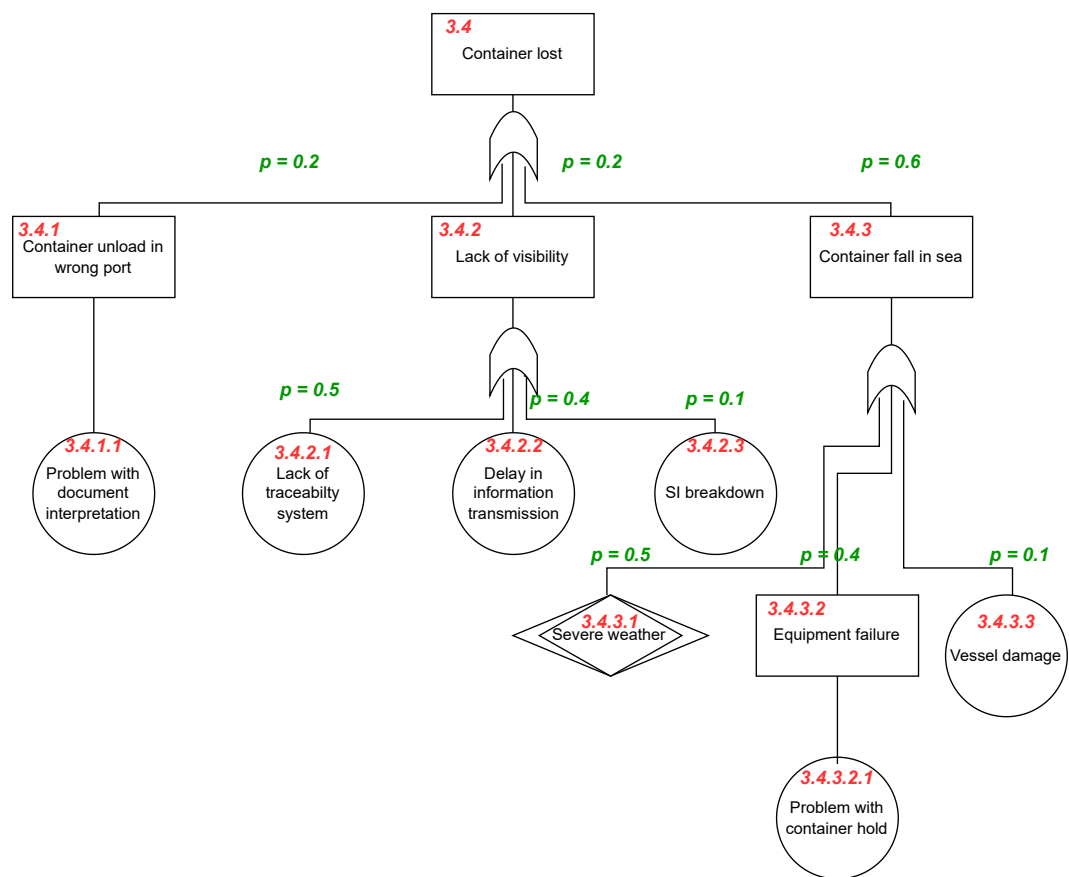


Figure D.4 – Modes de défaillances associé à la perte du conteneur

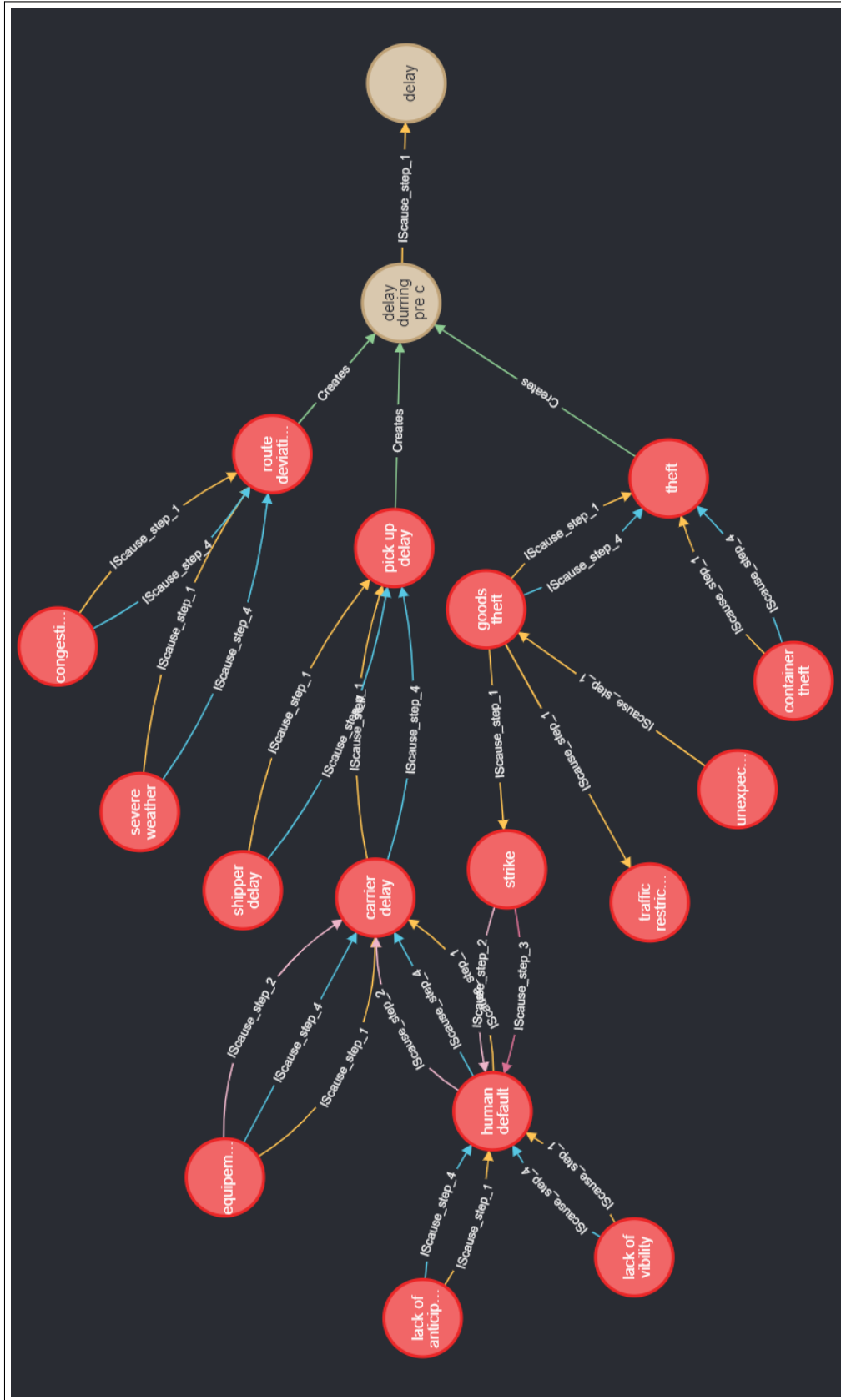


Figure D.5 – Illustration de l'implémentation des causes du retard durant le pré-achèvement.

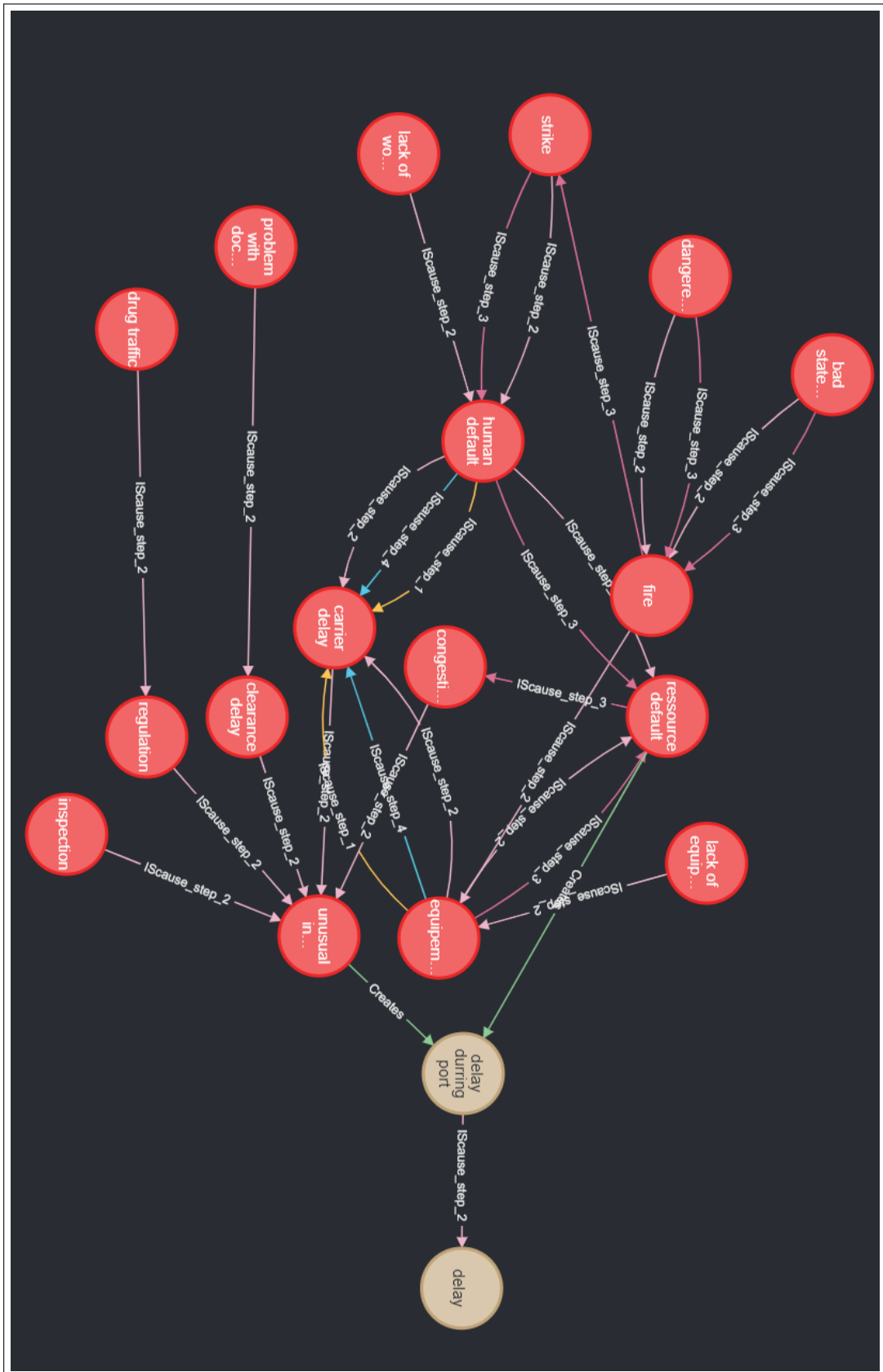


Figure D.6 – Illustration de l'implémentation des causes du retard durant la manutention du conteneur.

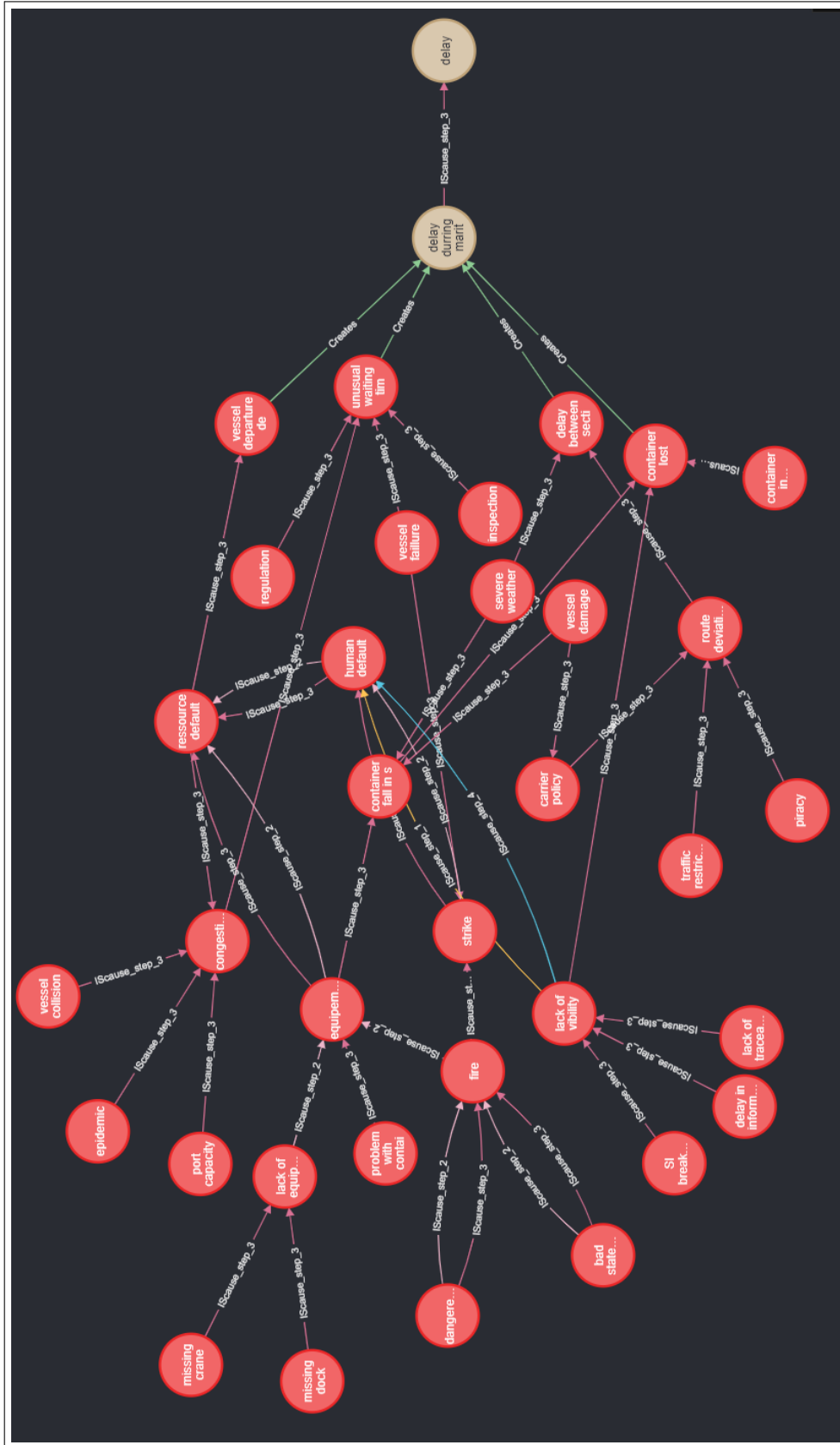


Figure D.7 – Illustration de l'implémentation des causes du retard pendant le transport maritime.





# Liste des publications

Certains des travaux associés à cette thèse ont été publiés ou sont en cours de publications. Nous énumérons ci-dessous ceux qui ont déjà été publiés.

1. C. Aboubakar Ouedraogo, S. Namakiaraghi, C. Rosemont, A. Montarnal, M. Luras and D. Gourc, "Traceability and Risk Management in Multi-modal Container Transport : A Small - Scale Review of methods and technologies," 2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL), Rabat, Morocco, 2020, pp. 1-7, doi : 10.1109/GOL49479.2020.9314760
2. OUEDRAOGO, Cheik Aboubakar, ROSEMONT, Cedric, NAMAKIARAGHI, Sina, et al. Maritime risks taxonomy : A structured literature review of maritime risks classification. In MOSIM'20 - 13ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2020, Agadir (on line ), Morocco. 17 p. hal-03048795f
3. Ouedraogo, C., Montarnal, A., Gourc, D. (2022). 'Multimodal Container Transportation Traceability and Supply Chain Risk Management : A Review of Methods and Solutions', International Journal of Supply and Operations Management, 9(2), pp. 212-234. doi : 10.22034/ijsum.2022.109139.2201



# Table des figures

1	Structure du mémoire. . . . .	5
1.1	Illustration d'un conteneur et d'une palette de marchandises. . . . .	9
1.2	Trafic maritime mondial. . . . .	9
1.3	Transport maritime conteneurisé. . . . .	11
1.4	Évolution du nombre de conteneurs transportés dans le monde. . . . .	11
1.5	Le transport fluvial conteneurisé. . . . .	12
1.6	Le transport ferroviaire conteneurisé. . . . .	13
1.7	Le transport routier conteneurisé. . . . .	13
1.8	Évolution du transport de marchandises par mode en France de 1999 à 2018. . . . .	14
1.9	La chaîne de transport intermodal. . . . .	16
1.10	Les acteurs dans le transport intermodal de conteneurs. . . . .	17
1.11	Illustration de la traçabilité et de la visibilité dans la transport intermodal . . . . .	18
2.1	Structure du chapitre 2 . . . . .	28
2.2	Scénario d'accident (Delmotte <i>et al.</i> , 2014) . . . . .	29
2.3	Le processus de gestion des risques . . . . .	32
2.4	Méthodologie de recherche pour l'analyse des risques dans le transport intermodal . . . . .	34
2.5	Distribution des travaux sur l'analyse des risques dans le transport intermodal . . . . .	34
2.6	Les facteurs de risques dans la chaîne d'approvisionnement (Chu <i>et al.</i> , 2020) . . . . .	38
2.7	Les types d'impacts dans le transport intermodal. . . . .	39
2.8	Matrice des risques . . . . .	41
2.9	Structure hiérarchique des facteurs de risques de la chaîne d'approvisionnement (Sharma <i>et al.</i> , 2021) . . . . .	43
2.10	Illustration graphique d'un réseau bayésien avec 3 variables . . . . .	43
2.11	Arbre des causes pour un risque d'accident (He <i>et al.</i> , 2022). . . . .	46

Table des figures

2.12	Méthodologie de recherche. . . . .	47
2.13	Distribution des articles. . . . .	49
2.14	Illustration de routes maritimes. . . . .	50
2.15	Extraction de la connaissance. . . . .	54
2.16	Définition de la connaissance. . . . .	54
2.17	Système à la base de connaissances. . . . .	55
2.18	Méthodes de modélisation des connaissances d'après Yun <i>et al.</i> (2021). . . . .	56
2.19	Données textuelles sur la congestion du canal de Suez . . . . .	60
2.20	Architecture pour l'extraction d'évènements basée sur les techniques d'apprentissage automatique (Xiang <i>et al.</i> , 2019). . . . .	61
2.21	Architecture des Transformers (Vaswani <i>et al.</i> , 2017). . . . .	64
2.22	Modèle d'extraction d'évènements basé sur l'utilisation de la connaissance (Xiang <i>et al.</i> , 2019). . . . .	64
2.23	Positionnement des travaux de recherche . . . . .	67
3.1	Structure du chapitre. . . . .	70
3.2	Illustration de concepts sous le formalisme UML. . . . .	72
3.3	Méthodologie pour le développement de l'ontologie. . . . .	74
3.4	Pyramide du Web Sémantique ( <i>Semantic Web - W3C 2023</i> ) . . . . .	77
3.5	Méthodes d'acquisition des connaissances . . . . .	78
3.6	Structures des interviews. . . . .	81
3.7	Méthodologie d'analyse des interviews. . . . .	84
3.8	Répartition de la population. . . . .	87
3.9	Occurrences des risques. . . . .	88
3.10	Taxonomie des concepts pour la modélisation du processus de transport intermodal. . . . .	94
3.11	Taxonomie des concepts pour la modélisation des risques. . . . .	95
3.12	Illustration de la relation entre deux concepts. . . . .	96
3.13	Diagramme UML de l'ontologie du processus de transport intermodal. . . . .	98
3.14	Diagramme UML de l'ontologie des risques dans le transport intermodal. . . . .	99
3.15	Diagramme UML de l'ontologie globale. . . . .	100
3.16	Adaptation des entités du diagramme UML en entités du graphes de connaissances. . . . .	101
3.17	Implémentation des connaissances. . . . .	102
3.18	Syntaxe pour la mise en place d'un arbre des causes. . . . .	103
3.19	Premier niveau de l'arbre des causes. . . . .	103
3.20	Illustration des instances du concept <i>impact</i> . . . . .	103
3.21	Arbre des causes de retard sur le pré-acheminement. . . . .	106

---

3.22	Arbre des causes de retard sur le post-acheminement. . . . .	106
3.23	Arbre des causes de retard pendant la phase de manutention. . . . .	107
3.24	Arbre des causes de retard pendant la phase de transport maritime. . . . .	108
4.1	Structure du chapitre 4. . . . .	112
4.2	Le modèle conceptuel du système de détection temps réel des risques. . . . .	113
4.3	Illustration du processus du benchmark des sources de données. . . . .	115
4.4	Le processus de collecte des données. . . . .	116
4.5	Illustration d'une donnée stockée . . . . .	117
4.6	Le module de pré-traitement des données. . . . .	118
4.7	Le processus de création des <i>embeddings</i> . . . . .	120
4.8	Le processus d'identification des symptômes . . . . .	122
4.9	Distribution des catégories d'évènements . . . . .	124
4.10	Les matrices de confusion pour différentes valeurs de $\alpha$ . . . . .	126
4.11	Création des <i>word embeddings</i> de référence . . . . .	129
4.12	Le processus de calcul de la similarité sémantique . . . . .	129
4.13	Illustration du choix du seuil pour la détection d'évènement . . . . .	131
4.14	Matrice de confusion pour le modèle de détection des évènements . . . . .	132
4.15	Ajout de l'évènement détecté dans le graphe de connaissances. . . . .	135
4.16	Exemple de règles métiers pour une instance de restriction du trafic. . . . .	136
5.1	Exemple de tweet sur l'inondation à Durban. . . . .	138
5.2	Itinéraire du conteneur obtenue via la plateforme NEXT4. . . . .	139
5.3	Attribut de l'évènement climat extrême. . . . .	143
5.4	Ajout de l'évènement climat extrême au graphe de connaissances. . . . .	143
5.5	Schéma d'illustration du service de détection des évènements aléatoires . . . . .	144
5.6	Illustration de la prédiction dynamique de l'ETA . . . . .	152
C.1	Structure du questionnaire . . . . .	162
D.1	Arbre des causes de climat extrême . . . . .	164
D.2	Temps d'attente inattendu au port d'arrivée . . . . .	164
D.3	Modes de défaillances pour un temps d'attente inhabituel sur un POI . . . . .	165
D.4	Modes de défaillances associé à la perte du conteneur . . . . .	166
D.5	Illustration de l'implémentation des causes du retard durant le pré-acheminement. . . . .	167
D.6	Illustration de l'implémentation des causes du retard durant la manutention du conteneur. . . . .	168
D.7	Illustration de l'implémentation des causes du retard pendant le transport maritime. . . . .	169



# Liste des tableaux

1.1	Les solutions industrielles pour la traçabilité et la visibilité du transport intermodal . . . . .	24
2.1	Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité sur de la chaîne de transport intermodal . . . . .	42
2.2	Méthodes d'analyse des risques . . . . .	47
2.3	Fonctionnalités pour la gestion des risques. . . . .	53
3.1	Méthodologies de mise en place d'ontologies d'après. . . . .	73
3.2	Matrice d'intersection entre les méthodes d'acquisition de connaissances et la méthodologie de mise en place de l'ontologie. . . . .	78
3.3	Typologie des risques dans le transport intermodal. . . . .	80
3.4	Liste de profils des personnes interviewées. . . . .	82
3.5	Occurrence potentiel des facteurs de risques sur les phases du processus de transport intermodal. . . . .	86
3.6	Relations du diagramme de classes UML . . . . .	94
3.7	Liens entre les concepts de l'ontologie. . . . .	98
3.8	Les entités de la base de connaissances. . . . .	101
3.9	Scénario d'accidents. . . . .	104
4.1	Les sources de données pour la détection des événements aléatoires. . . . .	115
4.2	Distribution du corpus de données. . . . .	124
4.3	Illustration de la matrice de confusion. . . . .	125
4.4	Métriques du modèle d'identification des symptômes . . . . .	125
4.5	Exemple d'application de la mesure de similarité . . . . .	128
4.6	Distribution des catégories d'évènements dans le corpus de données . . . . .	131
4.7	Les entités de la base de connaissances . . . . .	135
5.1	Données du cas d'usage. . . . .	141
5.2	Résultats à la sortie du modèle d'identification des symptômes. . . . .	142
5.3	Résultats à la sortie du modèle de détection des événements. . . . .	142





# Acronymes

<b>ADC</b> Analyse par arbre des causes : Méthode d'évaluation des risques . . . . .	39, 44, 45, 66
<b>AFNOR</b> Association Française de NORmalisation : depuis la loi de 1901, elle composée de près de 2 500 entreprises adhérentes. Sa mission est d'animer et de coordonner le processus d'élaboration des normes et de promouvoir leur application . . . . .	30
<b>AGR</b> Analyse globale des risques : Méthodes de gestion des risques systèmes . . . . .	39, 46
<b>AIS</b> Système d'Identification Automatique . . . . .	21, 22, 48, 50, 84, 114, 150, 151
<b>AMDEC</b> Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité : Méthode d'évaluation des risques . . . . .	39, 40, 44, 45, 66
<b>API</b> Application programming interface . . . . .	114, 116, 123, 137, 140, 142, 145, 152
<b>APR</b> Analyse préliminaire des risques : Méthodes d'identification et d'évaluation des risques . . . . .	39, 46
<b>BERT</b> Bidirectional Encoder Representations from Transformers . . . . .	63, 119–121, 123, 127, 149, 150
<b>CNN</b> Les réseaux de neurones covolutifs . . . . .	62
<b>CommonKADS</b> CommonKADS : Common Knowledge Acquisition and Design Support . . . . .	55
<b>DGPS</b> Differential Global Positioning System . . . . .	22
<b>DISC</b> Data drIven Supply Chain management . . . . .	2
<b>EDI</b> Institut Mines-Télécom : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances. . . . .	21, 22, 150
<b>EDRM</b> Exactitude en Distance Relative à la Solution Moyenne . . . . .	127, 150
<b>ETA</b> Estimated Time of Arrival : Estimation de l'heure d'arrivée . . . . .	48, 50–52, 66, 84, 89, 150, 151, 175
<b>ETI</b> Entreprises de taille intermédiaire . . . . .	81
<b>FSL</b> Institut Mines-Télécom : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances. . . . .	16, 22
<b>FST</b> Institut Mines-Télécom : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances. . . . .	21
<b>GE</b> Grandes entreprises . . . . .	81
<b>GPS</b> Global Positioning System . . . . .	22, 152

<b>Hazid</b> Hazard identification : Méthode d'identification des risques . . . . .	39, 46
<b>IA</b> Intelligence Artificielle . . . . .	50, 51
<b>IMO</b> International maritime organization : depuis 1947, Une commission économique pour l'Europe des Nations unies pour encourager la coopération économique entre les États membres. . . . .	52
<b>ISO</b> International Organization of Standardization : depuis 1964, une organisation qui élabore des normes internationales d'application volontaire, fondées sur le consensus, pertinentes pour le marché, soutenant l'innovation et apportant des solutions aux enjeux mondiaux. . . . .	17, 30, 31, 75
<b>JSON</b> Notation Objet issue de JavaScript : Un format léger d'échange de données . . . .	116
<b>MMSI</b> Maritime Mobile Service Identity : Numéro d'identification unique du navire . . . .	21
<b>NE</b> entité nommée. . . . .	59
<b>NER</b> Reconnaissance d'entités nommées. . . . .	59, 61, 65
<b>NLP</b> Natural Language Processing : Le traitement automatique du langage . . . . .	57–59, 61–63, 66, 116, 117
<b>NLTK</b> Natural Language Toolkit . . . . .	117, 119
<b>OCDE</b> Union Européen : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances. . . . .	14
<b>OWL</b> Ontology Web Language . . . . .	75, 76
<b>PAH</b> Processus d'Analyse Hiérarchique : Méthode d'évaluation des risques . . . .	39, 41, 45
<b>PME</b> Petites et moyennes entreprises . . . . .	81
<b>POI</b> Point of Interest : Point d'intérêt . . . . .	79, 85, 92, 93, 105, 108, 114, 138–140, 144, 151, 163, 175
<b>POS</b> Part-of-speech tagging . . . . .	59, 61, 63
<b>RDF</b> Resource Description Framework . . . . .	75
<b>RDFS</b> Resource Description Framework Schema . . . . .	75, 76
<b>RFID</b> Radio Frequency Identification : radio-identification est une technologie qui permet de mémoriser, stocker, enregistrer et récupérer des données à distance à l'aide de marqueurs (Tags RFID) . . . . .	48, 51
<b>RNA</b> Réseau de Neurones Artificiels : . . . . .	58
<b>RNN</b> Les réseaux de neurones récurrents . . . . .	62
<b>SCOR</b> Supply Chain Operations Reference model . . . . .	31
<b>SVM</b> Support Vector Machine . . . . .	61
<b>TF-IDF</b> TF-IDF : Term Frequency-Inverse Document Frequency . . . . .	62
<b>TMS</b> Institut Mines-Télécom : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances. . . . .	22
<b>TPE</b> Très petites entreprises . . . . .	81
<b>TRL</b> Technology readiness level : Échelle d'évaluation de maturité d'une technologie jusqu'à son intégration dans un système complet et son industrialisation. . . . .	145
<b>UMAP</b> Uniform Manifold Approximation an Projection for Dimension Reduction . . . .	150
<b>UML</b> Unified Modeling Language : . . . .	69–71, 75, 76, 91, 93, 96, 97, 99, 101, 109, 147, 174, 177
<b>UNECE</b> United Nations Economic Commission for Europe : depuis 1947, Une commission économique pour l'Europe des Nations unies pour encourager la coopération économique entre les États membres. . . . .	14

---

**UTI** Unité de transport intermodal : depuis 2017, intégration dans un seul institut des écoles de télécom et de la plupart des écoles des mines, sous la tutelle du ministère de l'Économie et des Finances..... 10, 13, 71, 92



# Bibliographie

- (9000, 2005) ISO 9000. *ISO 9000:2005*. ISO. URL: <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/04/21/42180.html> (cf. p. 19).
- (Abdoli, 2014) Alex Zagros Abdoli. « [La congestion maritime](#) ». Haute école de gestion de Genève, 2014 (cf. p. 8, 9).
- (Ahn, 2006) David Ahn. “[The stages of event extraction](#)”. *Proceedings of the Workshop on Annotating and Reasoning about Time and Events*. Sydney, Australia: Association for Computational Linguistics, juill. 2006, p. 1-8 (cf. p. 61).
- (Alessandrini *et al.*, 2019) A. Alessandrini, F. Mazzarella et M. Vespe. “[Estimated Time of Arrival Using Historical Vessel Tracking Data](#)”. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 20.1 (jan. 2019), p. 7-15 (cf. p. 50, 53, 151).
- (Alyami *et al.*, 2019) Hani Alyami, Zaili Yang, Ramin Riahi, Stephen Bonsall et Jin Wang. “[Advanced Uncertainty Modelling for Container Port Risk Analysis](#)”. *Accident Analysis & Prevention* 123 (fév. 2019), p. 411-421 (cf. p. 44, 45, 47).
- (Amador *et al.*, 2009) C. Amador, J.-P. Emond et M.C.N. Nunes. “[Application of RFID technologies in the temperature mapping of the pineapple supply chain](#)”. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety* 3.1 (2009), p. 26-33 (cf. p. 51, 53).
- (Anwar, 2019) Mahwish Anwar. “[Digitalization in Container Terminal Logistics : A Literature Review](#)”. eng. 2019, p. 1-25 (cf. p. 53).
- (Ayachi, 2020) Rania Ayachi. “[Ingénierie Des Risques à Base de Connaissances Pour La Relation Client Fournisseur](#)”. These de doctorat. Toulouse, INPT, 16 déc. 2020 (cf. p. 54, 55).
- (Baksh *et al.*, 2018) A.-A. Baksh, R. Abbassi, V. Garaniya et F. Khan. “[Marine Transportation Risk Assessment Using Bayesian Network: Application to Arctic Waters](#)”. *Ocean Engineering* 159 (2018), p. 422-436 (cf. p. 44).
- (Becker *et al.*, 1997) Marcel Becker et Stephen F Smith. “[An ontology for multi-modal transportation planning and scheduling](#)”. *Technical Report CMU-R I-TR-98-15* (1997) (cf. p. 90).
- (Bénaben *et al.*, 2016) Frédéric Bénaben, Matthieu Lauras, Sébastien Truptil et Nicolas Salatgé. “[A Metamodel for Knowledge Management in Crisis Management](#)”. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). ISSN: 1530-1605. Jan. 2016, p. 126-135 (cf. p. 90, 91).

- (Benaïssa *et al.*, 2014) Ezzeddine Benaïssa, Imen Charfeddine, Sabri Bendriss et Abdellatif Benabdelhafid. “[Ontological model for knowledge capitalization in multimodal transport domain](#)”. *2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*. 2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT). Mai 2014, p. 35-40 (cf. p. 90, 91).
- (Ber *et al.*, 2006) Florence Le Ber, Jean Lieber et Amedeo Napoli. *Les systèmes à base de connaissances*. Vuibert, 2006, p. 1197 (cf. p. 54).
- (Bernaras *et al.*, 1996) A. Bernaras, I. Laresgoiti, N. Bartolome et J. Corera. “[An Ontology for Fault Diagnosis in Electrical Networks](#)”. *Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*. Jan. 1996, p. 199-203 (cf. p. 73).
- (Bešković *et al.*, 2020) B. Bešković et M. Golnar. “[Eliminating barriers for sustainable transport systems on maritime silk road and baltic-adriatic corridor under BRI](#)”. *Sustainability (Switzerland)* 12.18 (2020) (cf. p. 52, 53).
- (Bini, 2018) Stefano A. Bini. “[Artificial Intelligence, Machine Learning, Deep Learning, and Cognitive Computing: What Do These Terms Mean and How Will They Impact Health Care?](#)” *The Journal of Arthroplasty* 33.8 (1<sup>er</sup> août 2018), p. 2358-2361 (cf. p. 58).
- (Björne *et al.*, 2018) Jari Björne et Tapio Salakoski. “[Biomedical Event Extraction Using Convolutional Neural Networks and Dependency Parsing](#)”. *Proceedings of the BioNLP 2018 workshop*. Melbourne, Australia: Association for Computational Linguistics, juill. 2018, p. 98-108 (cf. p. 62).
- (Bollen *et al.*, 2006) A.F. Bollen, C.P. Riden et L.U. Opara. “[Traceability in postharvest quality management](#)”. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation* 1.1 (2006), p. 93-105 (cf. p. 53).
- (Borgida, 1996) Alex Borgida. “[On the Relative Expressiveness of Description Logics and Predicate Logics](#)”. *Artificial Intelligence* 82.1 (1<sup>er</sup> avr. 1996), p. 353-367 (cf. p. 75).
- (Brewer *et al.*, 1999) Alexander Brewer, Nancy Sloan et Thomas Landers. “[Intelligent Tracking in Manufacturing](#)”. *Journal of Intelligent Manufacturing* 10 (1<sup>er</sup> sept. 1999), p. 245-250 (cf. p. 53).
- (Broom, 2005) Alex Broom. “[Using Qualitative Interviews in CAM Research: A Guide to Study Design, Data Collection and Data Analysis](#)”. *Complementary Therapies in Medicine* 13.1 (1<sup>er</sup> mars 2005), p. 65-73 (cf. p. 81, 83).
- (Bukkapatnam *et al.*, 2007) S.T.S. Bukkapatnam et R. Komanduri. “[Container integrity and condition monitoring using RF vibration sensor tags](#)”. 2007, p. 585-590 (cf. p. 51, 53).
- (Calvanese *et al.*, 2001) Diego Calvanese, Giuseppe De Giacomo, Daniele Nardi et Maurizio Lenzerini. “[Reasoning in Expressive Description Logics](#)”. *Handbook of Automated Reasoning*. NLD: Elsevier Science Publishers B. V., jan. 2001, p. 1581-1634 (cf. p. 75).
- (Cao *et al.*, 2019) Shoufeng Cao, Kim Bryceson et Damian Hine. “[An Ontology-based Bayesian Network Modelling for Supply Chain Risk Propagation](#)”. *Industrial Management & Data Systems* 119.8 (1<sup>er</sup> jan. 2019), p. 1691-1711 (cf. p. 57, 71, 90, 91).
- (Carn, 2011) J. Carn. “[Smart container management: Creating value from real-time container security device data](#)”. 2011, p. 457-465 (cf. p. 53).
- (Caulier, 1999) Patrice Caulier. *Concepts Du Modèle de l'expertise CommonKADS Pour La Modélisation Au Niveau Connaissances*. Avr. 1999 (cf. p. 56).
- (Chang *et al.*, 2016) Chia-Hsun Chang, Jingjing Xu et Dong-Ping Song. “[Impact of Different Factors on the Risk Perceptions of Employees in Container Shipping Companies: A Case Study of Taiwan](#)”. *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 8.4 (2016), p. 361-388 (cf. p. 35, 36).
- (Chargui *et al.*, 2020) K. Chargui, T. Zouadi, A. El Fallahi, M. Reghioui et T. Aouam. “[A quay crane productivity predictive model for building accurate quay crane schedules](#)”. *Supply Chain Forum* (2020) (cf. p. 53).

- 
- (Charlampowicz *et al.*, 2020) Jędrzej Charlampowicz et Cezary Mankowski. “[Economic efficiency evaluation system of maritime container terminals](#)”. English. *Ekonomia I Prawo Economics and Law* 19.1 (mars 2020). Place: Torun Publisher: Uniwersytet Mikołaja Kopernika-Nicolaus Copernicus Univ WOS:000528247500002, p. 21-32 (cf. p. 53).
- (Chasseray, 2021) Yohann Chasseray. “[Population d’ontologies automatisée, non supervisée et indépendante du domaine à partir de données non structurées](#)”. These de doctorat. Toulouse, INPT, 17 nov. 2021 (cf. p. 99).
- (Cherkassky, 1998) Vladimir Cherkassky. “[Fuzzy Inference Systems: A Critical Review](#)”. *Computational Intelligence: Soft Computing and Fuzzy-Neuro Integration with Applications*. Sous la dir. Okyay Kaynak, Lotfi A. Zadeh, Burhan Türkşen et Imre J. Rudas. NATO ASI Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, p. 177-197 (cf. p. 44).
- (Chiche *et al.*, 2022) Alebachew Chiche et Betselot Yitagesu. “[Part of speech tagging: a systematic review of deep learning and machine learning approaches](#)”. *Journal of Big Data* 9.1 (24 jan. 2022), p. 10 (cf. p. 59).
- (Chiu *et al.*, 2020) Billy Chiu et Simon Baker. “[Word embeddings for biomedical natural language processing: A survey](#)”. *Language and Linguistics Compass* 14 (1<sup>er</sup> déc. 2020) (cf. p. 119, 120).
- (Chou *et al.*, 2013) C.-C. Chou, J.-F. Ding, T.-M. Chang, C.-P. Wong, W.-C. Lin, C.-Y. Wang, W.-C. Chang, C.-Y. Lin et K.-E. Chang. “[Operation management of port logistics in the global supply Chain](#)”. *Advanced Materials Research* 706-708 (2013), p. 2087-2090 (cf. p. 53).
- (Chouigui *et al.*, 2018) Amina Chouigui, Oussama Ben Khiroun et Bilel Elayeb. “[A TF-IDF and Co-occurrence Based Approach for Events Extraction from Arabic News Corpus](#)”. *Natural Language Processing and Information Systems*. Sous la dir. Max Silberstein, Faten Atigui, Elena Kornyshova, Elisabeth Métails et Farid Meziane. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 272-280 (cf. p. 62).
- (Chu *et al.*, 2020) Chih-Yuan Chu, Kijung Park et Gül E. Kremer. “[A Global Supply Chain Risk Management Framework: An Application of Text-Mining to Identify Region-Specific Supply Chain Risks](#)”. *Advanced Engineering Informatics* 45 (1<sup>er</sup> août 2020), p. 101053 (cf. p. 35, 36, 38).
- (Clément, 2019) Antoine Clément. « [Proposition d’indicateurs de robustesse basés sur la prise en compte des risques afin d’évaluer les tournées de transport routier de marchandises](#) ». Thèse de doct. Ecole des Mines d’Albi-Carmaux, 5 nov. 2019 (cf. p. 10, 12, 16, 22, 30).
- (Coche, 2018) Julien Coche. “[Extraction automatisée de modèle de situation de crise à partir de données issues de réseaux sociaux](#)”. These en préparation. Ecole nationale des Mines d’Albi-Carmaux, 2018 (cf. p. 116, 127, 150).
- (Cominelli *et al.*, 2020) Simone Cominelli, William D. Halliday, Matthew K. Pine, R. Casey Hilliard, Jack W. Lawson, Nadia Duman et Rodolphe Devillers. “[Vessel Noise in Spatially Constricted Areas: Modeling Acoustic Footprints of Large Vessels in the Cabot Strait, Eastern Canada](#)”. *Ocean & Coastal Management* 194 (15 août 2020), p. 105255 (cf. p. 52).
- (Conca *et al.*, 2018) Andrea Conca, Angela Di Febbraro, Davide Giglio et Francesco Rebora. “[Automation in freight port call process: real time data sharing to improve the stowage planning](#)”. *Transportation Research Procedia*. EURO Mini Conference on "Advances in Freight Transportation and Logistics" 30 (1<sup>er</sup> jan. 2018), p. 70-79 (cf. p. 22).
- (Corcho *et al.*, 2005) Oscar Corcho, Mariano Fernández-López, Asunción Gómez-Pérez et Angel López-Cima. “[Building Legal Ontologies with METHONTOLOGY and WebODE](#)”. *Law and the Semantic Web: Legal Ontologies, Methodologies, Legal Information Retrieval, and Applications*. Sous la dir. V. Richard Benjamins, Pompeu Casanovas, Joost Breuker et Aldo Gangemi. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, p. 142-157 (cf. p. 71).



- (Crainic, 2003) Teodor Gabriel Crainic. “[Long-Haul Freight Transportation](#)”. *Handbook of Transportation Science*. Sous la dir. Randolph W. Hall. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US, 2003, p. 451-516 (cf. p. 8).
- (Cullinane *et al.*, 2016) Kevin Cullinane, Po-Hsing Tseng et Gordon Wilmsmeier. “[Estimation of container ship emissions at berth in Taiwan](#)”. *International Journal of Sustainable Transportation* 10.5 (mai 2016), p. 466-474 (cf. p. 52).
- (Dabiri, 2018) Sina Dabiri. [Tweets with traffic-related labels for developing a Twitter-based traffic information system](#). Type: dataset. 23 mars 2018 (cf. p. 121, 123).
- (Delmotte *et al.*, 2014) Sebastien Delmotte et Alain Desroches. “[Quantitative Global Risk Analysis \(GRAq\)](#)”. *19 ième Congrès Lambda-Mu de l’Institut de la Maîtrise des Risques*. IMDR. Dijon, France, oct. 2014 (cf. p. 29).
- (Desroches *et al.*, 2016) Alain Desroches, Nadia Agui, Michel Dadoun et Sébastien Delmotte. *Analyse globale des risques: principes et pratiques*. 2e édition. Paris: Lavoisier-Hermes, 2016. xxix+383 (cf. p. 29, 31, 39, 40, 47, 93).
- (Devlin *et al.*, 2019) Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee et Kristina Toutanova. “[BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding](#)”. 24 mai 2019. arXiv: [1810.04805 \[cs\]](#) (cf. p. 63, 121).
- (Do *et al.*, 2016) Ngoc Anh Dung Do, Izabela Ewa Nielsen, Gang Chen et Peter Nielsen. “[A simulation-based genetic algorithm approach for reducing emissions from import container pick-up operation at container terminal](#)”. en. *Annals of Operations Research* 242.2 (juill. 2016), p. 285-301 (cf. p. 52).
- (Dorri *et al.*, 2018) Ali Dorri, Salil S. Kanhere et Raja Jurdak. “[Multi-Agent Systems: A Survey](#)”. *IEEE Access* 6 (2018), p. 28573-28593 (cf. p. 49, 53, 151).
- (Drinkwater *et al.*, 2018) J.L. Drinkwater, D. Morris, T. Eaton et B. Hare. “[No-Touch-Transfer: Pre-sterilised Container Entry into EU Grade a Filling Environments Following GMP and QRM Principles](#)”. *European Journal of Parenteral and Pharmaceutical Sciences* 23.2 (2018), p. 43-52 (cf. p. 53).
- (Dua *et al.*, 2019) Aman Dua et Deepankar Sinha. “[Assessment of Quality of Multimodal Transportation for Containerized Exports](#)”. *IIM Kozhikode Society & Management Review* 8.1 (1<sup>er</sup> jan. 2019), p. 10-22 (cf. p. 16).
- (Dubreuil, 2007) Julien Dubreuil. « [La logistique des terminaux portuaires de conteneurs](#) ». Mémoire accepté. Montréal (Québec, Canada): Université du Québec à Montréal, fév. 2007 (cf. p. 15).
- (Duijm, 2015) Nijs Jan Duijm. “[Recommendations on the Use and Design of Risk Matrices](#)”. *Safety Science* 76 (1<sup>er</sup> juill. 2015), p. 21-31 (cf. p. 40, 47).
- (Fabiano *et al.*, 2010) Bruno Fabiano, Fabio Curro, Andrea P. Reverberi et Renato Pastorino. “[Port Safety and the Container Revolution: A Statistical Study on Human Factor and Occupational Accidents over the Long Period](#)”. *Safety Science* 48.8 (oct. 2010), p. 980-990 (cf. p. 36).
- (Fan *et al.*, 2020) C. Fan, K. Wróbel, J. Montewka, M. Gil, C. Wan et D. Zhang. “[A Framework to Identify Factors Influencing Navigational Risk for Maritime Autonomous Surface Ships](#)”. *Ocean Engineering* 202 (2020) (cf. p. 2, 36).
- (Faucher *et al.*, 2008) Cyril Faucher, Frédéric Bertrand et Jean-Yves Lafaye. « [Génération d’ontologie à partir d’un modèle métier UML annoté](#) ». *Revue des Nouvelles Technologies de l’Information* 12 (2008), p. 65 (cf. p. 76).
- (Feng, 2021) Runhai Feng. “[Improving uncertainty analysis in well log classification by machine learning with a scaling algorithm](#)”. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 196 (1<sup>er</sup> jan. 2021), p. 107995 (cf. p. 149).

- 
- (Fernández-López *et al.*, 1997) M. Fernández-López, A. Gómez-Pérez et N. Juristo. “[METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering](#)”. *Proceedings of the Ontological Engineering AAAI-97 Spring Symposium Series / AAAI-97 Spring Symposium Series / 24-26 March 1997 / Stanford University, EEUU*. AAAI-97 Spring Symposium Series. Stanford University, EEUU: Facultad de Informática (UPM), mars 1997 (cf. p. 71, 73, 76).
- (Gayathri *et al.*, 2018) R. Gayathri et V. Uma. “[Ontology based knowledge representation technique, domain modeling languages and planners for robotic path planning: A survey](#)”. *ICT Express*. Artificial Intelligence and Machine Learning Approaches to Communication 4.2 (1<sup>er</sup> juin 2018), p. 69-74 (cf. p. 55).
- (Gourc, 2006) Didier Gourc. « [Vers un modèle général du risque pour le pilotage et la conduite des activités de biens et de services : Propositions pour une conduite des projets et une gestion des risques intégrées](#) ». thesis. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 11 avr. 2006 (cf. p. 29-31).
- (Grishman *et al.*, 1996) Ralph Grishman et Beth Sundheim. “[Message Understanding Conference- 6: A Brief History](#)”. *COLING 1996 Volume 1: The 16th International Conference on Computational Linguistics*. COLING 1996. 1996 (cf. p. 59).
- (Gruber, 1993) Thomas R. Gruber. “[A Translation Approach to Portable Ontology Specifications](#)”. *Knowledge Acquisition* 5.2 (1<sup>er</sup> juin 1993), p. 199-220 (cf. p. 55, 71).
- (Gruber, 1995) Thomas R. Gruber. “[Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing?](#)” *International Journal of Human-Computer Studies* 43.5 (1<sup>er</sup> nov. 1995), p. 907-928 (cf. p. 72).
- (Grüninger *et al.*, 1995) Michael Grüninger et Mark S. Fox. “Methodology for the Design and Evaluation of Ontologies”. 1995 (cf. p. 73).
- (Guarino, 1998) Nicola Guarino. *Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the First International Conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy*. IOS Press, 1998. 356 p. Google Books: [Wf5p3\\_fUxacC](#) (cf. p. 55).
- (Gudelj *et al.*, 2008) A. Gudelj, M. Krčum et P. Krčum. “[The Role of Information Technology in Maritime Education for Hazard Avoidance](#)”. *International Journal of Emergency Management* 5.3-4 (2008), p. 219-234 (cf. p. 2, 36).
- (Guo *et al.*, 2015) Z. X. Guo, E. W. T. Ngai, Can Yang et Xuedong Liang. “[An RFID-based Intelligent Decision Support System Architecture for Production Monitoring and Scheduling in a Distributed Manufacturing Environment](#)”. *International Journal of Production Economics* 159 (1<sup>er</sup> jan. 2015), p. 16-28 (cf. p. 53, 151).
- (Haass *et al.*, 2015) Rasmus Haass, Patrick Dittmer, Marius Veigt et Michael Lütjen. “[Reducing food losses and carbon emission by using autonomous control – A simulation study of the intelligent container](#)”. en. *International Journal of Production Economics* 164 (juin 2015), p. 400-408 (cf. p. 53).
- (Haouari *et al.*, 2020) Ahmed Taha Haouari, Labiba Souici-Meslati, Fadila Atil et Djamel Meslati. “[Empirical comparison and evaluation of Artificial Immune Systems in inter-release software fault prediction](#)”. *Applied Soft Computing* 96 (2020), p. 106686 (cf. p. 125).
- (He *et al.*, 2022) Jingshi He, Xiangjun Fan et Li-Chun Wu. “[Identification and Evaluation of Urban Rail Transit Operation Risk Factors Based on Entropy-AHP Hybrid Constrained DEA Method](#)”. *Journal of Advanced Transportation* 2022 (19 mai 2022), e6241096 (cf. p. 46).
- (Heckmann *et al.*, 2015) Iris Heckmann, Tina Comes et Stefan Nickel. “[A Critical Review on Supply Chain Risk – Definition, Measure and Modeling](#)”. *Omega* 52 (1<sup>er</sup> avr. 2015), p. 119-132 (cf. p. 31).
- (Heinold *et al.*, 2020) Arne Heinold et Frank Meisel. “[Emission Limits and Emission Allocation Schemes in Intermodal Freight Transportation](#)”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 141 (1<sup>er</sup> sept. 2020), p. 101963 (cf. p. 52).

- (Hernandez, 2005) Nathalie Jane Hernandez. « [Ontologies de domaine pour la modélisation du contexte en Recherche d'information](#) ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 6 déc. 2005 (cf. p. 71).
- (Hervas-Peralta *et al.*, 2019) Miguel Hervas-Peralta, Sara Poveda-Reyes, Gemma Dolores Molero, Francisco Enrique Santarremigia et Juan-Pascual Pastor-Ferrando. “[Improving the Performance of Dry and Maritime Ports by Increasing Knowledge about the Most Relevant Functionalities of the Terminal Operating System \(TOS\)](#)”. English. *Sustainability* 11.6 (mars 2019). Place: Basel Publisher: Mdpi WOS:000465613000103, p. 1648 (cf. p. 53).
- (Hiebel *et al.*, 2022) Nicolas Hiebel, Karën Fort, Aurélie Névéol et Olivier Ferret. “[CLISTER : Un corpus pour la similarité sémantique textuelle dans des cas cliniques en français \(CLISTER : A Corpus for Semantic Textual Similarity in French Clinical Narratives\)](#)”. *Actes de la 29e Conférence sur le Traitement Automatique des Langues Naturelles. Volume 1 : conférence principale*. JEP/TALN/RECITAL 2022. Avignon, France: ATALA, juin 2022, p. 287-296 (cf. p. 128).
- (Ho *et al.*, 2015) William Ho, Tian Zheng, Hakan Yildiz et Srinivas Talluri. “[Supply Chain Risk Management: A Literature Review](#)”. *International Journal of Production Research* 53.16 (18 août 2015), p. 5031-5069 (cf. p. 35-37, 47, 79).
- (Hogenboom *et al.*, 2016) Frederik Hogenboom, Flavius Frasinca, Uzay Kaymak, Franciska de Jong et Emiel Caron. “[A Survey of event extraction methods from text for decision support systems](#)”. *Decision Support Systems* 85 (1<sup>er</sup> mai 2016), p. 12-22 (cf. p. 60, 63, 65).
- (Hossain *et al.*, 2019) N.U.I. Hossain, F. Nur, S. Hosseini, R. Jaradat, M. Marufuzzaman et S.M. Puryear. “[A Bayesian Network Based Approach for Modeling and Assessing Resilience: A Case Study of a Full Service Deep Water Port](#)”. *Reliability Engineering and System Safety* 189 (2019), p. 378-396 (cf. p. 2, 36, 41).
- (ISO 31000, 2018) ISO 31000. [ISO 31000 Risk Management—Principles and Guidelines](#). ISO. 2018. URL: <http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/home/standards/popular-standards/iso-31000-risk-management.html> (cf. p. 31).
- (Jean Delahousse, 2020) Jean Delahousse. [Qu'est ce qu'un graphe de connaissance ?](#) Jean Delahousse. 2020. URL: <https://www.jean-delahousse.net/graphe-de-connaissance-ontologie-vocabulaires-controles/> (cf. p. 76).
- (B. Jiang *et al.*, 2018) Bao Jiang, Jian Li et Siyi Shen. “[Supply Chain Risk Assessment and Control of Port Enterprises: Qingdao Port as Case Study](#)”. *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 34.3 (1<sup>er</sup> sept. 2018), p. 198-208 (cf. p. 36, 79).
- (Q. Jiang *et al.*, 2019) Qing Jiang, Zhengxing Xiao, Cuiping Ru, Zhengyong Zhang, Liusan Wang, Rujing Wang, He Huang, Bin Li, Yanxin Yin et Xiaoping Huang. “[Study on the Modeling Method of Knowledge Base System in Web Environment](#)”. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 33.09 (août 2019), p. 1959031 (cf. p. 57).
- (Jouve, 1992) Christine Jouve. « [Représentation des connaissances pour les problèmes de conception. Application à un système à base de connaissances pour la conception de réseaux informatiques : NEST.](#) » Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 3 sept. 1992 (cf. p. 56).
- (Khelfi, 2010) M F Khelfi. [Gestion du Degré de Certitude des Connaissances : Extension et Adaptation du Système « CASI »](#). Rapp. tech. 2010, p. 98 (cf. p. 56).
- (Kontovas *et al.*, 2020) C.A. Kontovas et K. Sooprayen. “[Maritime cargo prioritisation during a prolonged pandemic lockdown using an integrated tosis-knapsack technique: A case study on small island developing states—the rodrigues island](#)”. *Sustainability (Switzerland)* 12.19 (2020), p. 1-20 (cf. p. 52, 53).
- (Koutroumbas *et al.*, 2008) Konstantinos Koutroumbas et Sergios Theodoridis. [Pattern Recognition](#). Academic Press, 26 nov. 2008. 981 p. (cf. p. 128).

- 
- (Kropczynski *et al.*, 2018) Jessica Kropczynski, Rob Grace, Julien Coche, Shane Halse, Eric Obeysekare, Aurelie Montarnal, Frederick Benaben et Andrea Tapia. “[Identifying Actionable Information on Social Media for Emergency Dispatch](#)”. *ISCRAM Asia Pacific 2018: Innovating for Resilience – 1st International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management Asia Pacific*. Wellington, New Zealand, nov. 2018, p.428-438 (cf. p. 130).
- (Krupka, 1995) George Krupka. “[SRA: Description of the SRA System as Used for MUC-6](#)”. *Sixth Message Understanding Conference (MUC-6): Proceedings of a Conference Held in Columbia, Maryland, November 6-8, 1995*. 1995 (cf. p. 59).
- (Kurbatova *et al.*, 2021) Natalja Kurbatova et Rowan Swiers. “[Disease ontologies for knowledge graphs](#)”. *BMC Bioinformatics* 22.1 (21 juill. 2021), p. 377 (cf. p. 76, 99).
- (Labib, 2021) Ashraf Labib. “[Towards a New Approach for Managing Pandemics: Hybrid Resilience and Bowtie Modelling](#)”. *Safety Science* 139 (juill. 2021), p. 105274 (cf. p. 45).
- (Lack *et al.*, 2011) Daniel A. Lack *et al.* “[Impact of Fuel Quality Regulation and Speed Reductions on Shipping Emissions: Implications for Climate and Air Quality](#)”. *Environmental Science & Technology* 45.20 (15 oct. 2011), p. 9052-9060 (cf. p. 52).
- (Lan *et al.*, 2021) Ning Lan, Shuqun Yang, Ling Yin et Yongbin Gao. “[Research on Knowledge Graphs with Concept Lattice Constraints](#)”. *Symmetry* 13.12 (déc. 2021). Number: 12 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2363 (cf. p. 76, 99).
- (Laniel *et al.*, 2011) M. Laniel, I. Uysal et J. P. Emond. “[Radio Frequency Interactions with Air Cargo Container Materials for Real-Time Cold Chain Monitoring](#)”. English. *Applied Engineering in Agriculture* 27.4 (juill. 2011). Place: St Joseph Publisher: Amer Soc Agricultural & Biological Engineers WOS:000294322500016, p. 647-652 (cf. p. 53).
- (Larousse, 2020) Éditions Larousse. *Définitions : donnée - Dictionnaire de français Larousse*. 2020. URL: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/donn%C3%A9e/26436> (cf. p. 14, 112).
- (Larson *et al.*, 1998) Paul D. Larson et Dale S. Rogers. “[Supply Chain Management: Definition, Growth and Approaches](#)”. *Journal of Marketing Theory and Practice* 6.4 (1998), p. 1-5 (cf. p. 147).
- (Lauras *et al.*, 2015) Matthieu Lauras, Sébastien Truptil et Frédéric Bénaben. “[Towards a better management of complex emergencies through crisis management meta-modelling](#)”. *Disasters* 39.4 (2015). \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/disa.12122>, p. 687-714 (cf. p. 30, 90, 91).
- (Lei *et al.*, 2019) Xue Lei et Cameron A. MacKenzie. “[Assessing Risk in Different Types of Supply Chains with a Dynamic Fault Tree](#)”. *Computers & Industrial Engineering* 137 (nov. 2019), p. 106061 (cf. p. 45, 47).
- (Jiayao Li *et al.*, 2018) Jiayao Li, Frédéric Bénaben, Juanqiong Gou et Wenxin Mu. “[A Proposal for Risk Identification Approach in Collaborative Networks Considering Susceptibility to Danger](#)”. *Collaborative Networks of Cognitive Systems*. Sous la dir. Luis M. Camarinha-Matos, Hamideh Afsarmanesh et Yacine Rezgui. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 74-84 (cf. p. 30).
- (Jing Li *et al.*, 2022) Jing Li, Aixin Sun, Jianglei Han et Chenliang Li. “[A Survey on Deep Learning for Named Entity Recognition](#)”. *Ieee Transactions on Knowledge and Data Engineering* 34.1 (1<sup>er</sup> jan. 2022). Place: Los Alamitos Publisher: Ieee Computer Soc WOS:000728576400004, p. 50-70 (cf. p. 59).
- (W. Li *et al.*, 2015) W. Li, Y. Wu et M. Goh. *Planning and scheduling for maritime container yards: Supporting and facilitating the global supply network*. Planning and Scheduling for Maritime Container Yards: Supporting and Facilitating the Global Supply Network. Pages: 110. 2015 (cf. p. 53).

- (Liddy, 2001) Elizabeth Liddy. “Natural Language Processing”. *School of Information Studies - Faculty Scholarship*. Jan. 2001 (cf. p. 58).
- (Lin *et al.*, 2021) Jinjiao Lin, Yanze Zhao, Weiyuan Huang, Chunfang Liu et Haitao Pu. “Domain knowledge graph-based research progress of knowledge representation”. *Neural Computing and Applications* 33.2 (1<sup>er</sup> jan. 2021), p. 681-690 (cf. p. 76, 99).
- (Liu *et al.*, 2016) Yi Liu, Weili Han, Yin Zhang, Lulu Li, Junyu Wang et Lirong Zheng. “An Internet-of-Things solution for food safety and quality control: A pilot project in China”. en. *Journal of Industrial Information Integration* 3 (sept. 2016), p. 1-7 (cf. p. 53).
- (Longaray *et al.*, 2019) Andre Andrade Longaray, Ana Luiza Gomes, Diogo Garcia Storino, Vilmar Goncalves Tondolo et Rosana Portella Tondolo. “APPLICATION OF THE FMEA METHOD FOR THE ANALYSIS OF INACCURACIES IN THE MANAGEMENT OF EMPTY CONTAINER MOVEMENT: A CASE STUDY”. *SISTEMAS & GESTAO* 14.3 (sept. 2019), p. 269-278 (cf. p. 40, 45, 47).
- (Lugan, 2009) Jean-Claude Lugan. « La définition des systèmes ». T. 5e éd. 2738 t. Que sais-je ? ISSN : 0768-0066. Paris cedex 14: Presses Universitaires de France, 2009, p. 32-50 (cf. p. 29).
- (Lugen, 2017) Marine Lugen. *Petit guide de méthodologie de l'enquête*. Rapp. tech. 2017 (cf. p. 79, 83, 85).
- (Mahfoudh, 2015) Mariem Mahfoudh. « Adaptation d'ontologies avec les grammaires de graphes typés : évolution et fusion ». Thèse de doct. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 29 mai 2015 (cf. p. 72, 75, 76).
- (Mahmood *et al.*, 2019) S. Mahmood, R. Hasan, A. Ullah et K.U. Sarker. “SMART security alert system for monitoring and controlling container transportation”. 2019 (cf. p. 53).
- (Marquès, 2010) Guillaume Marquès. « Management des risques pour l'aide à la gestion de la collaboration au sein d'une chaîne logistique : une approche par simulation ». Thèse de doct. 10 déc. 2010 (cf. p. 31, 32, 36, 79).
- (Martinez-Gil, 2014) Jorge Martinez-Gil. “An Overview of Textual Semantic Similarity Measures Based on Web Intelligence”. *Artificial Intelligence Review* 42.4 (déc. 2014), p. 935-943 (cf. p. 128).
- (Matmat, 2010) Mohamed Matmat. “Pour Une Approche Complète de l'évaluation de Fiabilité Dans Les Microsystèmes”. These de doctorat. Toulouse, INSA, 3 sept. 2010 (cf. p. 44).
- (Matsukura *et al.*, 2010) Hiroshi Matsukura, Maytouch Udommahuntisuk, Hiroyuki Yamato et A. A. B. Dinariyana. “Estimation of CO2 reduction for Japanese domestic container transportation based on mathematical models”. en. *Journal of Marine Science and Technology* 15.1 (mars 2010), p. 34-43 (cf. p. 52).
- (Matsuo *et al.*, 2022) Yutaka Matsuo, Yann LeCun, Maneesh Sahani, Doina Precup, David Silver, Masashi Sugiyama, Eiji Uchibe et Jun Morimoto. “Deep Learning, Reinforcement Learning, and World Models”. *Neural Networks* 152 (1<sup>er</sup> août 2022), p. 267-275 (cf. p. 58).
- (Mazouni, 2008) Mohamed Habib Mazouni. « Pour une meilleure approche du management des risques: de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 13 nov. 2008 (cf. p. 40, 45).
- (Mazoyer *et al.*, 2020) Béatrice Mazoyer, Julia Cagé, Nicolas Hervé et Céline Hudelot. “A French Corpus for Event Detection on Twitter”. *Proceedings of the 12th Language Resources and Evaluation Conference*. LREC 2020. Marseille, France: European Language Resources Association, mai 2020, p. 6220-6227 (cf. p. 116, 121, 123).
- (McInnes *et al.*, 2020) Leland McInnes, John Healy et James Melville. *UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction*. Sept. 2020. arXiv: 1802.03426 [cs, stat] (cf. p. 150).

- 
- (McMinn *et al.*, 2013) Andrew J. McMinn, Yashar Moshfeghi et Joemon M. Jose. “[Building a large-scale corpus for evaluating event detection on twitter](#)”. *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Information & Knowledge Management*. CIKM '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 27 oct. 2013, p. 409-418 (cf. p. 121, 123).
- (Meijer, 2017) Ricardo Meijer. *ETA Prediction: Predicting the ETA of a Container Vessel Based on Route Identification Using AIS Data*. Rapp. tech. 2017 (cf. p. 51, 53).
- (Mele *et al.*, 2019) Ida Mele et Fabio Crestani. “[A Multi-Source Collection of Event-Labeled News Documents](#)”. *Proceedings of the 2019 ACM SIGIR International Conference on Theory of Information Retrieval*. Santa Clara CA USA: ACM, sept. 2019, p. 205-208 (cf. p. 121, 123).
- (Merlin, 1991) Pierre Merlin. *Géographie, économie et planification des transports / Pierre Merlin,...* Fondamental. Presses universitaires de France, 1991 (cf. p. 12).
- (Mihalcea *et al.*, 2006) Rada Mihalcea, Courtney Corley et Carlo Strapparava. “[Corpus-Based and Knowledge-based Measures of Text Semantic Similarity](#)”. Juill. 2006 (cf. p. 60).
- (Mikolov *et al.*, 2013) Tomas Mikolov, Ilya Sutskever, Kai Chen, Greg Corrado et Jeffrey Dean. *Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality*. 16 oct. 2013. arXiv: [1310.4546\[cs, stat\]](#) (cf. p. 59).
- (Milton, 2008) Nick R. Milton. *Knowledge Technologies*. Polimetrica s.a.s., 2008. 141 p. Google Books: [qXwBQmMmMtQC](#) (cf. p. 54).
- (Minsky, 2019) M. Minsky. “[A Framework For Representing Knowledge](#)”. *A Framework For Representing Knowledge*. De Gruyter, juill. 2019, p. 1-25 (cf. p. 75).
- (Mitchell *et al.*, 1986) Tom M. Mitchell, Jaime G. Carbonell et Ryszard S. Michalski. *Machine Learning: A Guide to Current Research*. Springer Science & Business Media, 30 avr. 1986. 460 p. Google Books: [I5GcpyPx3RwC](#) (cf. p. 58).
- (Miwa *et al.*, 2010) Makoto Miwa, Rune Sætre, Jin-Dong Kim et Jun'ichi Tsujii. “[Event extraction with complex event classification using rich features](#)”. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology* 08.1 (fév. 2010). Publisher: World Scientific Publishing Co., p. 131-146 (cf. p. 61).
- (Mohan, 2015) Vijayarani Mohan. “[Preprocessing Techniques for Text Mining - An Overview](#)” (fév. 2015) (cf. p. 58, 117).
- (Montarnal, 2015) Aurélie Montarnal. “[Deduction of Inter-Organizational Collaborative Business Processes within an Enterprise Social Network](#)”. These de doctorat. Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux, 8 oct. 2015 (cf. p. 54, 56, 113).
- (Moslemi, 2016) Amir Moslemi. *Performance Improvement in Mediterranean Operations Using Risk Management Analysis : Case Study of Containerships Group Ltd*. Rapp. tech. 2016 (cf. p. 31, 35, 36).
- (Munuzuri *et al.*, 2020) Jesus Munuzuri, Luis Onieva, Pablo Cortes et Jose Guadix. “[Using IoT data and applications to improve port-based intermodal supply chains](#)”. English. *Computers & Industrial Engineering* 139 (jan. 2020). Place: Oxford Publisher: Pergamon-Elsevier Science Ltd WOS:000509784000067, p. 105668 (cf. p. 52, 53).
- (Neal *et al.*, 2019) Aaron D. Neal, Richard G. Sharpe, Paul P. Conway et Andrew A. West. “[smARTI-A Cyber-Physical Intelligent Container for Industry 4.0 Manufacturing](#)”. *Journal of Manufacturing Systems* 52.A (juill. 2019), p. 63-75 (cf. p. 21).
- (Nguyen, 2020) Son Nguyen. “[A Risk Assessment Model with Systematical Uncertainty Treatment for Container Shipping Operations](#)”. *Maritime Policy & Management* 47.6 (17 août 2020), p. 778-796 (cf. p. 36).
- (O'Hara *et al.*, 1997) Kieron O'Hara et Nigel Shadbolt. “[Interpreting Generic Structures: Expert Systems, Expertise and Context](#)”. *Expertise in Context: Human and Machine*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 30 mai 1997, p. 449-474 (cf. p. 56).

- (Onut *et al.*, 2011) Semih Onut, Umut R. Tuzkaya et Erçin Torun. “[Selecting Container Port via a Fuzzy ANP-based Approach: A Case Study in the Marmara Region, Turkey](#)”. *Transport Policy* 18.1 (1<sup>er</sup> jan. 2011), p. 182-193 (cf. p. 53, 151).
- (Oudani, 2016) Mustapha Oudani. “[Optimisation Des Problèmes de Transport Multimodal](#)”. Sous la direction de Jaouad Boukachour et de Ahmed El Hilali Alaoui. Soutenue le 21-05-2016, à Le Havre en cotutelle avec l’Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc). Faculté de droit, dans le cadre de École doctorale sciences physiques mathématiques et de l’information pour l’ingénieur (Saint-Etienne-du-Rouvray, Seine-Maritime ; ....-2016), en partenariat avec Normandie Université et de Laboratoire de Mathématiques Appliquées du Havre (Le Havre, Seine-Maritime) (laboratoire). Thèse de Doctorat. Le Havre, mai 2016 (cf. p. 7, 8, 13, 14).
- (Ouedraogo *et al.*, 2022) Cheik Ouedraogo, Aurelie Montarnal et Didier Gourc. “[Multimodal Container transportation traceability and Supply Chain Risk Management: A Review of Methods and Solutions](#)”. *International Journal of Supply and Operations Management* 9.2 (mai 2022), p. 212-234 (cf. p. 10, 19).
- (OUEDRAOGO *et al.*, 2020) Cheik Aboubakar OUEDRAOGO, Sina Namakiaraghi, Cedric ROSEMONT, Aurelie Montarnal, Matthieu Lauras et Didier Gourc. “[Traceability and Risk Management in Multi-modal Container Transport: A Small - Scale Review of Methods and Technologies](#)”. *GOL’20 - The 5th Edition of the IEEE International Conference on Logistics Operations Management*. Rabat, Morocco, oct. 2020, 8 p. (Cf. p. 20, 21).
- (Pagolu *et al.*, 2016) Venkata Sasank Pagolu, Kamal Nayan Reddy Challa, Ganapati Panda et Babita Majhi. *Sentiment Analysis of Twitter Data for Predicting Stock Market Movements*. 28 oct. 2016. arXiv: [1610.09225 \[cs\]](#) (cf. p. 116).
- (Pallotta *et al.*, 2013) G. Pallotta, M. Vespe et K. Bryan. “[Vessel Pattern Knowledge Discovery from AIS Data: A Framework for Anomaly Detection and Route Prediction](#)”. English. *Entropy* 15.6 (2013). Publisher: MDPI, p. 2218-2245 (cf. p. 53).
- (Palmer *et al.*, 2018) Claire Palmer, Esmond N. Urwin, Ali Niknejad, Dobrila Petrovic, Keith Popplewell et Robert I. M. Young. “[An Ontology Supported Risk Assessment Approach for the Intelligent Configuration of Supply Networks](#)”. *Journal of Intelligent Manufacturing* 29.5 (juin 2018), p. 1005-1030 (cf. p. 57).
- (Papert *et al.*, 2016) Marcel Papert, Patrick Rimpler et Alexander Pflaum. “[Enhancing supply chain visibility in a pharmaceutical supply chain Solutions based on automatic identification technology](#)”. English. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 46.9 (2016). Place: Bingley Publisher: Emerald Group Publishing Ltd WOS:000392178800004, p. 859-884 (cf. p. 19).
- (Parolas, 2016) I. Parolas. “[ETA Prediction for Containerships at the Port of Rotterdam Using Machine Learning Techniques](#)”. Thèse de doct. 2016 (cf. p. 49, 51).
- (Patwardhan *et al.*, 2003) Siddharth Patwardhan, Satanjeev Banerjee et Ted Pedersen. “[Using Measures of Semantic Relatedness for Word Sense Disambiguation](#)”. *Computational Linguistics and Intelligent Text Processing*. Sous la dir. Alexander Gelbukh. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003, p. 241-257 (cf. p. 128).
- (Petasis *et al.*, 2000) Georgios Petasis, Alessandro Cucchiarelli, Paola Velardi, Georgios Paliouras, Vangelis Karkaletsis et Constantine D. Spyropoulos. “[Automatic Adaptation of Proper Noun Dictionaries through Cooperation of Machine Learning and Probabilistic Methods](#)”. *Proceedings of the 23rd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. SIGIR ’00. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, juill. 2000, p. 128-135 (cf. p. 59).
- (Pham *et al.*, 2022) Thuan Pham, Xiaohui Tao, Ji Zhang, Jianming Yong, Yuefeng Li et Haoran Xie. “[Graph-Based Multi-Label Disease Prediction Model Learning from Medical Data and Domain Knowledge](#)”. *Knowledge-Based Systems* 235 (10 jan. 2022), p. 107662 (cf. p. 56, 76, 99).

- 
- (Pinakpani *et al.*, 2020) P. Pinakpani, A. Polisetty, G.B. N Rao, D. Harrison Sunil, B.M. Kumar, D. Deepthi et A. Sidhireddy. “[An Algorithmic Approach for Maritime Transportation](#)”. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 2 (2020), p. 764-775 (cf. p. 52).
- (Piskorski *et al.*, 2007) Jakub Piskorski, Hristo Tanev et Pinar Oezden Wennerberg. “[Extracting Violent Events From On-Line News for Ontology Population](#)”. *Business Information Systems*. Sous la dir. Witold Abramowicz. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, p. 287-300 (cf. p. 59, 65).
- (Qazi *et al.*, 2020) Abroon Qazi et Pervaiz Akhtar. “[Risk Matrix Driven Supply Chain Risk Management: Adapting Risk Matrix Based Tools to Modelling Interdependent Risks and Risk Appetite](#)”. *Computers & Industrial Engineering* 139 (1<sup>er</sup> jan. 2020), p. 105351 (cf. p. 45, 47).
- (Qiao *et al.*, 2013) Wenxin Qiao, Ali Haghani et Masoud Hamedi. “[A Nonparametric Model for Short-Term Travel Time Prediction Using Bluetooth Data](#)”. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 17.2 (avr. 2013), p. 165-175 (cf. p. 53).
- (Quaresma *et al.*, 2019) Paulo Quaresma, Vítor Beires Nogueira, Kashyap Raiyani et Roy Bayot. “[Event Extraction and Representation: A Case Study for the Portuguese Language](#)”. *Information* 10.6 (juin 2019). Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 205 (cf. p. 59).
- (Raychaudhuri, 2008) Samik Raychaudhuri. “[Introduction to Monte Carlo Simulation](#)”. *2008 Winter Simulation Conference*. 2008 Winter Simulation Conference. Déc. 2008, p. 91-100 (cf. p. 44).
- (Resnik, 1995) Philip Resnik. *Using Information Content to Evaluate Semantic Similarity in a Taxonomy*. 29 nov. 1995. arXiv: [cmp-1g/9511007](#) (cf. p. 127).
- (Riloff, 1993) Ellen Riloff. “[Automatically Constructing a Dictionary for Information Extraction Tasks](#)”. *Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence*. AAAI'93. Washington, D.C.: AAAI Press, juill. 1993, p. 811-816 (cf. p. 64).
- (Romanenko *et al.*, 2019) V. E. Romanenko, V. A. Mokhov et E. K. Yarkin. “[System Analysis and the Task of Ontological Modeling of Multimodal Transportation](#)”. en. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 272.2 (juin 2019). Publisher: IOP Publishing, p. 022231 (cf. p. 90, 91).
- (Roussel *et al.*, 2008) P. Roussel, P. Guez et M. -C. Moll. « [Méthodes et outils de la gestion des risques dans les organisations de santé](#) ». *Transfusion Clinique et Biologique*. VIIIe congrès national d'hémovigilance et de sécurité transfusionnelle 19–21 novembre 2008 – Perpignan Livre des actes et des résumés 15.5 (1<sup>er</sup> nov. 2008), p. 223-227 (cf. p. 39).
- (Ruan *et al.*, 2015) Xin Ruan, Zhiyi Yin et Dan M. Frangopol. “[Risk Matrix Integrating Risk Attitudes Based on Utility Theory](#)”. *Risk Analysis* 35.8 (2015), p. 1437-1447 (cf. p. 45).
- (Rus, 2002) Ioana Rus. “[Guest Editors' Introduction: Knowledge Management in Software Engineering](#)”. *IEEE Software* 19 (1<sup>er</sup> mai 2002), p. 26-38 (cf. p. 112, 113).
- (R. W. Saaty, 1987) R. W. Saaty. “[The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used](#)”. *Mathematical Modelling* 9.3 (1<sup>er</sup> jan. 1987), p. 161-176 (cf. p. 41).
- (T. Saaty *et al.*, 2011) Thomas Saaty et Luis Vargas. “[The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process](#)”. *Int. Ser. Oper. Res. Manage. Sci.* T. 175. 2 juill. 2011, p. 27-46 (cf. p. 47).
- (Sahin *et al.*, 2020) B. Sahin et A. Soylyu. “[Multi-Layer, Multi-Segment Iterative Optimization for Maritime Supply Chain Operations in a Dynamic Fuzzy Environment](#)”. *IEEE Access* 8 (2020), p. 144993-145005 (cf. p. 49, 53).
- (Sahnoun *et al.*, 2020) Sihem Sahnoun, Samir Elloumi et Sadok Ben Yahia. “[Event detection based on open information extraction and ontology](#)”. *Journal of Information and Telecommunication* 4.3 (2 juill. 2020), p. 383-403 (cf. p. 59, 63, 65).



- (Sakli *et al.*, 2014) Leila Sakli, Jean-Claude Hennet et Jean-Marc Mercantini. “An Analysis of Risks and Vulnerabilities in Supply Networks”. *IFAC Proceedings Volumes*. 19th IFAC World Congress 47.3 (1<sup>er</sup> jan. 2014), p. 8933-8938 (cf. p. 29, 30).
- (Samuel, 1960) Arthur L. Samuel. “Programming Computers to Play Games”. *Advances in Computers*. Sous la dir. Franz L. Alt. T. 1. Elsevier, 1<sup>er</sup> jan. 1960, p. 165-192 (cf. p. 58).
- (Schoen *et al.*, 2018) Quentin Schoen, Diana Pinon-Baca, Matthieu Lauras, Franck Fontanili et Sébastien Truptil. “A new transport management system design considering the upcoming logistics environment and the sensitive products supply chains”. *ILS 2018 - 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*. Lyon, France, juin 2018, p.286-295 (cf. p. 22).
- (Seffih, 2020) Hosni Seffih. “Détection d'événements Géo-Chrono-Localisés Dans Les Tweets”. These de doctorat. Paris 8, 17 déc. 2020 (cf. p. 75, 150).
- (2023). *Semantic Web - W3C*. <https://www.w3.org/standards/semanticweb/> (cf. p. 77).
- (2022). « *Semantic Web Stack* ». *Wikipédia* (mars 2022) (cf. p. 76).
- (Sghaier *et al.*, 2015) W. Sghaier, E. Hergon et A. Desroches. « *Gestion globale des risques* ». *Transfusion clinique et biologique* 3.22 (2015), p. 158-167 (cf. p. 39, 47).
- (Sharma *et al.*, 2021) Satyendra Kumar Sharma, Praveen Ranjan Srivastava, Ajay Kumar, Anil Jindal et Shivam Gupta. “Supply Chain Vulnerability Assessment for Manufacturing Industry”. *Annals of Operations Research* (12 juin 2021) (cf. p. 41, 43, 47).
- (Sherwin *et al.*, 2016) Michael D. Sherwin, Hugh Medal et Steven A. Lapp. “Proactive Cost-Effective Identification and Mitigation of Supply Delay Risks in a Low Volume High Value Supply Chain Using Fault-Tree Analysis”. *International Journal of Production Economics* 175 (mai 2016), p. 153-163 (cf. p. 45, 47).
- (Sii *et al.*, 2001) How Sing Sii, Tom Ruxton et Jin Wang. “A fuzzy-logic-based approach to qualitative safety modelling for marine systems”. *Reliability Engineering & System Safety* 73.1 (1<sup>er</sup> juill. 2001), p. 19-34 (cf. p. 21).
- (R. S. Smith *et al.*, 2010) Raymond S. Smith et Terry Windeatt. “Facial Expression Detection using Filtered Local Binary Pattern Features with ECOC Classifiers and Platt Scaling”. *Proceedings of the First Workshop on Applications of Pattern Analysis*. Sous la dir. Tom Diethe, Nello Cristianini et John Shawe-Taylor. T. 11. Proceedings of Machine Learning Research. Cumberland Lodge, Windsor, UK: PMLR, jan. 2010, p. 111-118 (cf. p. 149).
- (S. F. Smith *et al.*, 1996) Stephen F Smith, Ora Lassila et Marcel Becker. “Configurable, mixed-initiative systems for planning and scheduling”. *Advanced Planning Technology* (1996), p. 235-241 (cf. p. 90).
- (SteadieSeifi *et al.*, 2014) M. SteadieSeifi, N. P. Dellaert, W. Nuijten, T. Van Woensel et R. Raoufi. “Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature Review”. *European Journal of Operational Research* 233.1 (16 fév. 2014), p. 1-15 (cf. p. 14).
- (Suárez-Figueroa *et al.*, 2012) Mari Carmen Suárez-Figueroa, Asunción Gómez-Pérez et Mariano Fernández-López. “The NeOn Methodology for Ontology Engineering”. *Ontology Engineering in a Networked World*. Sous la dir. Mari Carmen Suárez-Figueroa, Asunción Gómez-Pérez, Enrico Motta et Aldo Gangemi. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, p. 9-34 (cf. p. 73).
- (Sure *et al.*, 2004) York Sure, Steffen Staab et Rudi Studer. “On-To-Knowledge Methodology (OTKM)”. *Handbook on Ontologies*. Sous la dir. Steffen Staab et Rudi Studer. International Handbooks on Information Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, p. 117-132 (cf. p. 73).
- (Suryawanshi *et al.*, 2021) Pravin Suryawanshi, Pankaj Dutta, Varun L et Deepak G. “Sustainable and Resilience Planning for the Supply Chain of Online Hyperlocal Grocery Services”. *Sustainable Production and Consumption* 28 (1<sup>er</sup> oct. 2021), p. 496-518 (cf. p. 44).

- 
- (Swartout *et al.*, 1996) Bill Swartout, Ramesh Patil, Kevin Knight et Tom Russ. “[Toward Distributed Use of Large-Scale Ontologies](#)”. *Tenth Workshop on Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems*. T. 138. 1996, p. 25 (cf. p. 73).
- (Tang *et al.*, 2011) Ou Tang et S. Nurmaya Musa. “[Identifying Risk Issues and Research Advancements in Supply Chain Risk Management](#)”. *International Journal of Production Economics* 133.1 (sept. 2011), p. 25-34 (cf. p. 35, 37, 39, 47, 79).
- (Tao *et al.*, 2021) Xuezhong Tao et Qin Wu. “[Energy consumption and CO2 emissions in hinterland container transport](#)”. en. *Journal of Cleaner Production* 279 (jan. 2021), p. 123394 (cf. p. 52).
- (Tu *et al.*, 2020) Enmei Tu, Guanghao Zhang, Shangbo Mao, Lily Rachmawati et Guang-Bin Huang. “[Modeling Historical AIS Data For Vessel Path Prediction: A Comprehensive Treatment](#)”. 30 mars 2020. arXiv: [2001.01592 \[cs\]](#) (cf. p. 49, 53).
- (Urciuoli, 2018) Luca Urciuoli. “[An Algorithm for Improved ETAs Estimations and Potential Impacts on Supply Chain Decision Making](#)”. *Procedia Manufacturing* 25 (2018), p. 185-193 (cf. p. 48, 51, 53).
- (Uschold *et al.*, 1995) Mike Uschold et Martin King. “[Towards a Methodology for Building Ontologies](#)” (1995), p. 15 (cf. p. 73, 75).
- (Usuga cadavid, 2021) Juan Pablo Usuga cadavid. “[Contribution à La Définition d’une Méthodologie Couplant Le Traitement Automatique Du Langage Naturel et l’apprentissage Automatique Pour Réagir Aux Perturbations de Production](#)”. These de doctorat. Paris, HESAM, 13 oct. 2021 (cf. p. 58).
- (Usuga Cadavid *et al.*, 2021) Juan Pablo Usuga Cadavid, Samir Lamouri, Bernard Grabot et Arnaud Fortin. “[Using deep learning to value free-form text data for predictive maintenance](#)”. *International Journal of Production Research* (23 juill. 2021), p. 1-28 (cf. p. 120).
- (Vabalas *et al.*, 2019) Andrius Vabalas, Emma Gowen, Ellen Poliakoff et Alexander J. Casson. “[Machine Learning Algorithm Validation with a Limited Sample Size](#)”. *PLOS ONE* 14.11 (nov. 2019), e0224365 (cf. p. 124).
- (Vandecasteele, 2012) Arnaud Vandecasteele. « [Expert knowledge ontological modeling for the analyse of abnormal behaviour : application for maritime surveillance](#) ». Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, oct. 2012 (cf. p. 71-73, 75, 76).
- (Vaswani *et al.*, 2017) Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N Gomez, Łukasz Kaiser et Illia Polosukhin. “[Attention Is All You Need](#)”. *Advances in Neural Information Processing Systems*. T. 30. Curran Associates, Inc., 2017 (cf. p. 63, 64, 119-121).
- (Venkat, 2018) Naveen Venkat. *The Curse of Dimensionality: Inside Out*. Sept. 2018 (cf. p. 150).
- (de VENTURELLI *et al.*, 2007) Nadine VENTURELLI et Patrick MIANI. *Transport logistique*. Les Mémentos. Chambery : Le génie des glaciers, 2007 (cf. p. 10).
- (Viani *et al.*, 2017) Natalia Viani, Timothy A. Miller, Dmitriy Dligach, Steven Bethard, Carlo Napolitano, Silvia G. Priori, Riccardo Bellazzi, Lucia Sacchi et Guergana K. Savova. “[Recurrent Neural Network Architectures for Event Extraction from Italian Medical Reports](#)”. *Artificial Intelligence in Medicine*. Sous la dir. Annette ten Teije, Christian Popow, John H. Holmes et Lucia Sacchi. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 198-202 (cf. p. 62).
- (J. Vilko *et al.*, 2019) Jyri Vilko, Paavo Ritala et Jukka Hallikas. “[Risk management abilities in multimodal maritime supply chains: Visibility and control perspectives](#)”. *Accident Analysis & Prevention* 123 (2019), p. 469-481 (cf. p. 2, 19, 20, 30, 37, 46, 47).

- (J. P. P. Vilko *et al.*, 2012) Jyri P. P. Vilko et Jukka M. Hallikas. “[Risk Assessment in Multimodal Supply Chains](#)”. *International Journal of Production Economics* 140.2 (2012), p. 586-595 (cf. p. 2, 19, 20, 30, 31, 35-37, 40, 42, 46, 47, 70, 79).
- (Wadden *et al.*, 2019) David Wadden, Ulme Wennberg, Yi Luan et Hannaneh Hajishirzi. [Entity, Relation, and Event Extraction with Contextualized Span Representations](#). 9 sept. 2019. arXiv: [1909.03546\[cs\]](#) (cf. p. 59, 62, 63, 119).
- (Wan *et al.*, 2019) C. Wan, X. Yan, D. Zhang, Z. Qu et Z. Yang. “[An Advanced Fuzzy Bayesian-based FMEA Approach for Assessing Maritime Supply Chain Risks](#)”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 125 (2019), p. 222-240 (cf. p. 36, 44-47).
- (X. Wang *et al.*, 2012) Xiaojun Wang, Dong Li et Xianliang Shi. “[A Fuzzy Model for Aggregative Food Safety Risk Assessment in Food Supply Chains](#)”. *Production Planning & Control* 23.5 (2012), p. 377-395 (cf. p. 45).
- (Z. Wang *et al.*, 2021) Zuoguang Wang, Hongsong Zhu, Peipei Liu et Limin Sun. “[Social engineering in cybersecurity: a domain ontology and knowledge graph application examples](#)”. *Cybersecurity* 4.1 (2 août 2021), p. 31 (cf. p. 76, 99).
- (Wątróbski, 2019) Jarosław Wątróbski. “[Ontology Supporting Green Supplier Selection Process](#)”. *Procedia Computer Science*. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 23rd International Conference KES2019 159 (1<sup>er</sup> jan. 2019), p. 1602-1613 (cf. p. 57).
- (Wattanakul *et al.*, 2018) Siraprapa Wattanakul, Sébastien Henry, Mohand Lounes Bentaha, Napaporn Reeveerakul et Yacine Ouzrout. “[Improvement of the Containerized Logistics Performance Using the Unitary Traceability of Smart Logistics Units](#)”. *15th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM 2018)*. Torino, Italy, juill. 2018 (cf. p. 2, 20, 21, 49).
- (Wendler-Bosco *et al.*, 2019) Vera Wendler-Bosco et Charles Nicholson. “[Port disruption impact on the maritime supply chain: a literature review](#)”. *Sustainable and Resilient Infrastructure* 0.0 (13 mai 2019), p. 1-17 (cf. p. 1, 10).
- (Wiedemann *et al.*, 2019) Gregor Wiedemann, Steffen Remus, Avi Chawla et Chris Biemann. [Does BERT Make Any Sense? Interpretable Word Sense Disambiguation with Contextualized Embeddings](#). 1<sup>er</sup> oct. 2019. arXiv: [1909.10430\[cs\]](#) (cf. p. 119).
- (Wong *et al.*, 2015) Eugene Y. C. Wong, Allen H. Tai, Henry Y. K. Lau et Mardjuki Raman. “[An Utility-Based Decision Support Sustainability Model in Slow Steaming Maritime Operations](#)”. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 78 (juin 2015), p. 57-69 (cf. p. 52).
- (Y.-c. Wu *et al.*, 2018) Yu-chen Wu et Jun-wen Feng. “[Development and Application of Artificial Neural Network](#)”. *Wireless Personal Communications* 102.2 (1<sup>er</sup> sept. 2018), p. 1645-1656 (cf. p. 58).
- (T. Wu *et al.*, 2006) T. Wu, J. Backhurst et V. Chidambaram. “[A Model for Inbound Supply Risk Analysis](#)”. *Computers in Industry* 57.4 (mai 2006), p. 350-365 (cf. p. 2, 41).
- (Xiang *et al.*, 2019) Wei Xiang et Bang Wang. “[A Survey of Event Extraction From Text](#)”. *IEEE Access* 7 (2019), p. 173111-173137 (cf. p. 61-64).
- (Xing *et al.*, 2017) Jiangbo Xing et Ming Zhong. “[A Reactive Container Rerouting Model for Container Flow Recovery in a Hub-and-Spoke Liner Shipping Network](#)”. *Maritime Policy & Management* 44.6 (2017), p. 744-760 (cf. p. 36).
- (You *et al.*, 2012) Xiaomin You et Fulvio Tonon. “[Event-Tree Analysis with Imprecise Probabilities: Event-Tree Analysis with Imprecise Probabilities](#)”. *Risk Analysis* 32.2 (fév. 2012), p. 330-344 (cf. p. 45).

- 
- (Yuan *et al.*, 2016) Jun Yuan, Szu Hui Ng et Weng Sut Sou. “[Uncertainty quantification of CO2 emission reduction for maritime shipping](#)”. en. *Energy Policy* 88 (jan. 2016), p. 113-130 (cf. p. 53).
- (Yun *et al.*, 2021) Wei Yun, Xuan Zhang, Zhudong Li, Hui Liu et Mengting Han. “[Knowledge Modeling: A Survey of Processes and Techniques](#)”. *International Journal of Intelligent Systems* 36.4 (2021), p. 1686-1720 (cf. p. 53, 55, 56).
- (Zadeh, 1965) L. A. Zadeh. “[Electrical Engineering at the Crossroads](#)”. *IEEE Transactions on Education* 8.2 (1965), p. 30-33 (cf. p. 44).
- (Zhang *et al.*, 2020) Chengkai Zhang, Junchi Bin, Wells Wang, Xiang Peng, Rui Wang, Richard Haldearn et Zheng Liu. “[AIS Data Driven General Vessel Destination Prediction: A Random Forest Based Approach](#)”. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 118 (1<sup>er</sup> sept. 2020), p. 102729 (cf. p. 49, 51, 53).
- (Y. Zhao *et al.*, 2020) Yuzhe Zhao, Jingmiao Zhou, Yujun Fan et Haibo Kuang. “[An Expected Utility-Based Optimization of Slow Steaming in Sulphur Emission Control Areas by Applying Big Data Analytics](#)”. *Ieee Access* 8 (2020), p. 3646-3655 (cf. p. 52).
- (Z. Zhao *et al.*, 2016) Zhiwei Zhao et Youzheng Wu. “[Attention-Based Convolutional Neural Networks for Sentence Classification](#)”. *Interspeech 2016*. Interspeech 2016. ISCA, 8 sept. 2016, p. 705-709 (cf. p. 62).
- (Zhen *et al.*, 2019) Lu Zhen, Dan Zhuge, Liwen Murong, Ran Yan et Shuaian Wang. “[Operation management of green ports and shipping networks: overview and research opportunities](#)”. English. *Frontiers of Engineering Management* 6.2 (juin 2019). Place: Beijing Publisher: Higher Education Press WOS:000470326000002, p. 152-162 (cf. p. 53).
- (Zheng *et al.*, 2017) Wei Zheng, Bo Li et Dong-Ping Song. “[Effects of Risk-Aversion on Competing Shipping Lines’ Pricing Strategies with Uncertain Demands](#)”. *Transportation Research Part B-Methodological* 104 (oct. 2017), p. 337-356 (cf. p. 36).
- (Zhou *et al.*, 2019) Xinyi Zhou, Reza Zafarani, Kai Shu et Huan Liu. “[Fake News: Fundamental Theories, Detection Strategies and Challenges](#)”. *Proceedings of the Twelfth Acm International Conference on Web Search and Data Mining (wsdm’19)*. WOS:000482120400115. New York: Assoc Computing Machinery, 2019, p. 836-837 (cf. p. 150).



# Table des matières

<i>Sommaire</i> .....	iii
<i>Remerciements</i> .....	v
<hr/>	
<b>Introduction générale</b> .....	1
Énoncé du problème et intérêt pratique .....	1
Intérêt scientifique .....	2
Contexte de la thèse .....	2
Questions de recherche et structure du mémoire .....	3
<b>1 Transport intermodal : Contexte et problématique</b> .....	7
Introduction .....	7
1.1 Le transport intermodal des conteneurs: généralités et concepts .....	9
1.1.1 Les modes de transport .....	9
1.1.2 Le transport multimodal .....	13
1.1.3 Le processus de transport intermodal .....	15
1.1.4 Les acteurs du transport intermodal .....	16
1.2 Les difficultés dans le transport intermodal .....	17
1.2.1 Définition de la traçabilité dans le transport intermodal .....	19
1.2.2 Définition de la visibilité dans le transport intermodal .....	19
1.2.3 Les difficultés rencontrées durant le transport intermodal des marchan- dises .....	19
1.3 La nécessaire maîtrise des aléas pour une optimisation du transport intermodal .....	20
1.3.1 Les besoins des acteurs du transport intermodal .....	20
1.3.2 Les outils de gestion des aléas dans le transport intermodal .....	21
1.4 Problématique générale .....	23
1.4.1 Les opportunités engendrées par les outils de gestion des aléas .....	23
1.4.2 La problématique et les questions de recherche .....	23
Conclusion .....	25
<b>2 État de l'art</b> .....	27
Introduction .....	27
2.1 État de l'art sur le risque et la gestion des risques .....	28
2.1.1 Généralités sur les notions du risque : concept de danger, risque et événements .....	28
2.1.2 Le processus de gestion des risques .....	30
2.2 Analyse des risques dans la chaîne de transport intermodal .....	32
2.2.1 Méthodologie de recherche .....	33

2.2.2	Identification des risques dans la chaîne de transport intermodal . . .	33
2.2.3	Évaluation des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	39
2.2.4	Bilan des méthodes d'analyse des risques dans le transport intermodal	46
2.3	Traitement du risque dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	46
2.3.1	Méthodologie de la recherche . . . . .	47
2.3.2	Les fonctionnalités pour le traitement des risques dans la chaîne de transport intermodal . . . . .	48
2.4	Modélisation et exploitation des connaissances du risque . . . . .	53
2.4.1	Définition de la connaissance . . . . .	54
2.4.2	Les systèmes à base de connaissances pour le traitement des risques .	54
2.4.3	Modélisation de la connaissance du risque . . . . .	55
2.4.4	Base de connaissance et exploitation de la connaissance du risque . .	57
2.5	Détection des risques à travers l'extraction d'évènements . . . . .	57
2.5.1	L'apprentissage automatique et le traitement automatique du langage naturel . . . . .	58
2.5.2	Extraction d'évènements à partir des données textuelles . . . . .	59
2.6	Bilan de l'état de l'art et positionnement de nos travaux . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Modélisation des risques dans le transport intermodal . . . . .</b>	<b>69</b>
	Introduction . . . . .	69
3.1	Les principes pour la mise en place d'une ontologie . . . . .	70
3.1.1	Les composants d'une ontologie . . . . .	71
3.1.2	Méthodologie pour la mise en place d'une ontologie . . . . .	71
3.2	Acquisition des connaissances . . . . .	76
3.2.1	La revue de la littérature . . . . .	77
3.2.2	Les interviews . . . . .	79
3.2.3	Le questionnaire . . . . .	85
3.2.4	Bilan et limites des méthodes d'acquisition de la connaissance . . . . .	87
3.3	Spécification et conceptualisation des connaissances dans le transport intermodal . . . . .	89
3.3.1	Spécification de l'ontologie . . . . .	89
3.3.2	Conceptualisation de l'ontologie . . . . .	90
3.4	Formalisation des connaissances dans le transport intermodal . . . . .	97
3.4.1	Formalisation des connaissances sur le processus de transport intermodal	97
3.4.2	Formalisation des connaissances sur les risques dans le transport intermodal . . . . .	97
3.4.3	Modèle de connaissances global . . . . .	97
3.5	Implémentation et population de l'ontologie . . . . .	98
3.5.1	Implémentation de l'ontologie . . . . .	99
3.5.2	Population de l'ontologie . . . . .	101
3.5.3	Cas d'illustration . . . . .	102
	Conclusion . . . . .	108
<b>4</b>	<b>Système de détection des risques temps réel . . . . .</b>	<b>111</b>
	Introduction . . . . .	111
4.1	Description du système de détection temps réel des risques . . . . .	112
4.2	Module de collecte des données . . . . .	114
4.2.1	Les sources de données . . . . .	114
4.2.2	Processus de collecte des données . . . . .	114
4.2.3	Implémentation du module de collecte des données . . . . .	116
4.3	Traitement de l'information . . . . .	116
4.3.1	Le pré-traitement des données . . . . .	117

---

4.3.2	Création des « <i>word embeddings</i> » . . . . .	119
4.3.3	Modèle d'identification des symptômes . . . . .	120
4.3.4	Modèle de détection des événements . . . . .	127
4.4	Module d'exploitation de la connaissance . . . . .	132
	Conclusion . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Mise en œuvre du système de détection temps réel des risques</b>	
<b>: Cas d'application</b>	. . . . .	<b>137</b>
	Introduction . . . . .	137
5.1	Description du cas d'application pour la détection d'un climat extrême . . . . .	138
5.2	Détection des événements et prévision du retard . . . . .	139
5.2.1	Les données d'entrée du système de détection temps réel des risques . . . . .	139
5.2.2	Détection des événements . . . . .	140
5.2.3	Prévision du retard . . . . .	142
5.2.4	Présentation du service de détection des événements aléatoires . . . . .	142
5.3	Discussion et évaluation du système de détection temps réel des risques . . . . .	144
	Conclusion et généralisation du système de détection temps réel des risques . . . . .	145
<b>Conclusion et perspectives</b>	. . . . .	<b>147</b>
	Synthèse des travaux et bilan des contributions . . . . .	147
	Les limites et perspectives de nos travaux . . . . .	148
	Les limites et les perspectives à court terme . . . . .	149
	Les limites et les perspectives à moyen-long termes . . . . .	150
<hr/>		
<b>A</b>	<b>Grille d'entretien</b> . . . . .	<b>153</b>
<b>B</b>	<b>Rapport d'entretien</b> . . . . .	<b>157</b>
<b>C</b>	<b>Structure du questionnaire</b> . . . . .	<b>161</b>
<b>D</b>	<b>Implémentation et population de la base de connaissances</b> . . . . .	<b>163</b>
	<b>Liste des publications</b> . . . . .	<b>171</b>
<hr/>		
	<i>Table des figures</i> . . . . .	173
	<i>Liste des tableaux</i> . . . . .	177
	<i>Acronymes</i> . . . . .	179
	<i>Bibliographie</i> . . . . .	183
	<i>Table des matières</i> . . . . .	199







## Résumé

### Conception d'un système de détection des risques piloté par les données de suivi temps-réel des flux logistiques

Dans le contexte de mondialisation actuel, le transport intermodal des conteneurs joue un rôle important dans l'efficacité et l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement. En effet la conteneurisation induit une forte productivité lors des manutentions portuaires et une réduction des coûts de transport grâce au groupage. Elle assure également l'intégrité et la sécurité des marchandises transportées. Néanmoins, le grand nombre d'acteurs impliqués dans le processus de transport des conteneurs le complexifie énormément et induit une perte de visibilité et de traçabilité lors du transit des marchandises. De plus, ce dernier est très souvent soumis à des événements aléatoires qui entraînent des retards de livraison et une augmentation des coûts de transport. Au regard de toutes ces difficultés, cette thèse adresse la problématique suivante : comment détecter les causes de retard et quantifier leurs impacts sur les délais d'acheminement des marchandises en transport conteneurisé dans un contexte intermodal ?

Un système basé sur une approche hybride est proposé pour répondre à cette problématique. Nous proposons premièrement un modèle de connaissances des risques dans le transport intermodal sous forme d'une ontologie de domaine. Ensuite, en utilisant cette connaissance, puis en nous appuyant sur les données de traçabilité/visibilité des conteneurs et des données provenant des sources d'informations textuelles, nous extrayons en temps réel les événements aléatoires susceptibles de perturber le flux de transport. Nous nous intéressons ici à l'aide à la décision pour supporter les activités des acteurs impliqués dans la chaîne de transport intermodal (exportateurs, consignataires, transporteurs, compagnie maritime, etc). Les recherches sont menées en collaboration avec un partenaire industriel qui développe une solution de tracking temps réel des conteneurs.

MOTS-CLÉS : Transport intermodal, Gestion de risque, Apprentissage automatique, Extraction d'évènement, Modélisation de la connaissance

---

## Abstract

### Design of a risk detection system driven by real-time logistics flow monitoring data

In the current context of globalization, intermodal container transport plays an important role in the efficiency and effectiveness of the supply chain. Indeed, containerization induces a high productivity during port handling and a reduction of transport costs thanks to groupage. It also ensures the integrity and security of the goods transported. However, the large number of actors involved in the container transport process makes it extremely complex and leads to a loss of visibility and traceability during the transit of goods. In addition, the transit process is very often subject to random events that lead to delivery delays and increased transport costs. In view of all these difficulties, this thesis addresses the following problem: How to detect the causes of delays and quantify their impact on the time of containerized transports in an intermodal context?

A system based on a hybrid approach is proposed to address this issue. First, we propose a knowledge model of risks in intermodal transport in the form of a domain ontology. Then, by using this knowledge, and relying on container traceability/visibility data and data from textual information sources, we extract in real time the random events that may disrupt the transport flow. We are interested in decision support for the activities of the actors involved in the intermodal transport chain (exporters, consignees, carriers, shipping companies, etc.). The research is conducted in collaboration with an industrial partner which develops a real-time tracking solution for containers.

KEYWORDS: Intermodal transport, Risk management, Machine learning, Event extraction, Knowledge modeling