



Université Mostefa Benboulaïd Batna 2

Institut d'Hygiène et Sécurité

Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle



# Thèse

Pour obtenir le diplôme de Doctorat LMD 3<sup>ème</sup> cycle en  
Hygiène et Sécurité Industrielle

*Option* : Management des Risques Industriels et Environnementaux

## Titre

---

*CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA SECURITE PORTUAIRE :  
APPROCHE SYSTEMIQUE ET MANAGERIALE*

---

PAR

**SMAIAH MERIEM**

SOUTENUE LE : 01/03/2018

---

**Devant le Jury :**

---

- |                                                                               |               |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| - Pr. NAIT SAID RACHID, Professeur à l'université Mostefa Benboulaïd Batna 2  | Président     |
| - Pr. BAHMED LYLIA , Professeur à l'université Mostefa Benboulaïd Batna 2     | Rapporteur    |
| - Dr. KHAMARI DALILA, M.C.B à l'université Mostefa Benboulaïd Batna 2         | Co-rapporteur |
| - Pr. DJEBABRA MEBAREK , Professeur à l'université Mostefa Benboulaïd Batna 2 | Examineur     |
| - Pr. BACHARI NOUR EL ISLAM , Professeur à l'USTHB Alger                      | Examineur     |
| - Pr. SRAIRI KAMEL, Professeur à l'université de Biskra                       | Examineur     |
| - Dr. BOUZAHER ABDELHAKIM,M.C.B à l' ENSM Bou Ismail                          | Invité        |

---

## Remerciements

---

*Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à une grande femme, qui malgré les difficultés rencontrées, veille toujours à m'encourager et à m'orienter pour que je puisse terminer ce travail, c'est ma directrice de thèse Mme la professeure **BAHMED Lylia**,*

*Un remerciement spécial est également exprimé à Mr. Le professeur **DJEBABRA Mébarek** qui fut pour moi attentif et disponible pour m'aider à réaliser ce modeste travail, malgré ses nombreuses charges. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris. Ils ont été et resteront des moteurs de mon travail de chercheur.*

*J'exprime tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury : **Pr. NAIT SAID RACHI** de l'université de Batna2, **Pr. DJEBABRA MEBAREK** de l'université de Batna2, **Dr. KHAMARI DALILA** de l'université de Batna2, **Pr. BACHARI NOUR EL ISLAM** de l'université d'Alger, **Pr. SRAIRI KAMEL** de l'université de Biskra, et **Dr. BOUZAHER ABDELHAKIM** de l'Ecole Nationale Supérieure Maritime ENSM de Bousmail, qui malgré leur charge de travail ont accepté de juger ce mémoire.*

*Je remercie toutes les personnes que j'ai rencontrées pendant mon stage pratique au port de Bethioua. Merci pour vos supports et encouragements. Je pense particulièrement à Mr. **BOUZAHER** qui n'a jamais hésité à m'aider.*

*J'adresse toute ma gratitude à tous mes ami(e)s et à toutes les personnes volontaires qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail. Je remercie particulièrement mes deux étudiants **GHODBANE Youssouf** et **BARROURA Nidhal**, sans oublier Mr. **MELLAKHSSOU Sif Eddine** (informaticien et prof de mathématique).*

*... que toute personne, ayant contribué de près ou de loin à cette thèse, trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et mon éternelle reconnaissance.*

Mme BOULILA Meriem  
née SMAIAH

**Je dédie ce travail :**

*A MON TRÈS CHER PAPA Abdellah*

*Une spéciale dédicace à celui qui m'a aidé à découvrir le 'savoir', ce trésor inépuisable. De tous les pères, tu as été le meilleur, tu as su m'entourer d'attention, m'inculquer les valeurs nobles de la vie, m'apprendre le sens du travail, de l'honnêteté et de la responsabilité.*

*Merci d'avoir été toujours là pour moi, un grand soutien tout au long de mes études.*

*Tu as été et tu seras toujours un exemple à suivre pour tes qualités humaines, ta persévérance et ton perfectionnisme.*

*Ce travail est ton œuvre, toi qui m'a donné tant de choses et tu continues à le faire... sans jamais te plaindre. J'aimerais pouvoir te rendre tout l'amour que tu nous as offerts, mais une vie entière n'y suffirait pas. J'espère au moins que ce mémoire y contribuera en partie... ✍*

- ✚ A MA TRÈS CHERE MAMAN Zineb à qui je lui souhaite la guérison et qu'elle soit toujours résistante. Malgré sa maladie elle sent toujours mes moments de joies et de tristesse. Grâce à toi j'ai acquis une bonne base d'éducation, de timidité et surtout de responsabilité. Se sont des qualités nobles sur la base desquelles je dois élever mes enfants. Merci chère Maman... ✍*
- ✚ A MON MARI le plus formidable HAMZA, Tu m'as toujours soutenu, compris et réconforté tu es et tu resteras toujours ma source d'inspiration. Merci pour ta tendresse, ton attention, ta patience et tes encouragements ; Merci pour tout... ✍*
- ✚ A MA PETITE PERLE AYA SOPHIA, elle est ma raison de vivre, et la raison pour laquelle je fais tous ces sacrifices... ✍*
- ✚ A mon beau-père AMOR, et ma belle-mère TATA SABAH qui m'ont toujours aidé à affronter les difficultés rencontrées lors de la réalisation de ce travail... ✍*
- ✚ A ma jolie et seul sœur SOUMIA, à mes frères que je suis fière d'eux ABDELKADER, ILYES ET LOTFI... ✍*
- ✚ A ma grande famille, oncles, tantes, cousins et cousines... ✍*

***Je vous aime tous... ✍***

---

## *Lexiques et Abréviations*

---

<b>Add</b>	Arbre de Défaillance
<b>AMDE</b>	Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets
<b>APR</b>	Analyse Préliminaire des Risques
<b>ARAMIS</b>	Méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des risques majeurs
<b>ARIA</b>	Analyse, Recherche et Informations sur les Accidents (base de données)
<b>ATEX</b>	ATmospheres Explosibles (Règlementation)
<b>BLEVE</b>	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
<b>BT</b>	Barrières techniques
<b>BU</b>	Barrières d'Utilisation
<b>Card</b>	Cardinal
<b>CD</b>	Cible de Danger
<b>CMA</b>	Code Maritime Algérien
<b>CSI</b>	Container Security Initiative
<b>DEA</b>	DEA Domino Effect Analysis
<b>DF</b>	Danger Factor
<b>Dg</b>	Dégâts
<b>DS</b>	Dictionnaire des suivants
<b>EB</b>	Effondrement de Bâtiments
<b>ENS</b>	Evènement Non Souhaité
<b>EPA</b>	Entreprise Pétrolière d'Arzew
<b>ESDs</b>	Evènements Source de danger.
<b>EvR</b>	Evènement Redouté
<b>FD</b>	Flux de Danger
<b>FREEDOM</b>	FREquency Estimation of DOMino accidents
<b>FSA</b>	Formal Safety Assesement
<b>GAR</b>	Green Amber et Red
<b>GNL</b>	Gaz Naturel Liquifié
<b>GPL</b>	Gaz de pétrole Liquifié
<b>GT</b>	Glissements de Terrains
<b>HAZMIW</b>	HAZop, risk Matrice, What If
<b>HAZOP</b>	HAZard OPerability
<b>IACS</b>	International Association of Classification Societies
<b>IBC</b>	Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemical in Bulk
<b>Ic</b>	Incendie
<b>IDE</b>	Instrument of Domino Effect
<b>IGC</b>	Construction and Equipment of Ships Carrying gas in Bulk

<b>IJEE</b>	International Journal of Environmental Engineering
<b>IMDG</b>	International Maritime Dangerous Goods
<b>ISM</b>	International Safety Management
<b>ISPS</b>	Ship and Port Facility Security
<b>LSA</b>	Life Saving Appliance
<b>MADS</b>	Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes
<b>MARPOL</b>	MARine POLution
<b>MAXCRED</b>	MAXimum CREDdible accident analysis
<b>MCAS</b>	Maximum-Credible Accident Scenarios
<b>MiniFFECT</b>	MINImization of domino eFFECT
<b>MOSAR</b>	Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques
<b>MPR</b>	Management Préliminaire des Risques
<b>NFPA</b>	National Fire Protection Association
<b>OCDE</b>	Organisation de coopération et de développement économiques
<b>OIT</b>	Organisation Internationale du Travail
<b>OMCI</b>	Organisation Maritime consultatif Intergouvernementale
<b>OMI</b>	Organisation Maritime Internationale
<b>ORA</b>	Optimal Risk Analysis
<b>OSIRIS</b>	Outil de SIMulation des RISques
<b>PPRT</b>	Plans de Prévention des Risques Technologiques
<b>RC</b>	Rupture de Canalisation
<b>SBC</b>	Solid Bulk Cargoes
<b>SD</b>	Source de Danger
<b>SFC</b>	Source, Flux, Cible de danger
<b>SIG</b>	Système Informatique géographique
<b>SMAR</b>	Spirale de MAnagement des Risques
<b>SOLAS</b>	Safety Of Life At Sea
<b>SPE</b>	Severity, Probability, Exposure
<b>SS</b>	Sous-Système
<b>SST</b>	Santé Sécurité au Travail
<b>STCW</b>	Seafarer Training, certification and watchkeeping
<b>TORAP</b>	TOol for Rapid risk Assessment in Petroleum refinery and Petrochemical industries
<b>TT</b>	Tremblement de Terre
<b>VF</b>	Vulnérability Factor

---

## Liste de figures

---

<b>Figure 1.1-</b> Processus de l'analyse et de l'évaluation des risques	35
<b>Figure 1.2-</b> Le modèle SPE	35
<b>Figure 1.3-</b> Echèle d'évaluation de GAR	35
<b>Figure 1.4-</b> Processus de danger du modèle MADS	36
<b>Figure 2.1-</b> Matrice d'évaluation des risques maritimes.	41
<b>Figure 2.2-</b> Processus simplifié d'effet domino	43
<b>Figure 2.3-</b> Représentation du sous-système sous forme de boîte noire	57
<b>Figure 2.4-</b> Scénarios d'autodestruction	57
<b>Figure 2.5-</b> Liens entre les sous-systèmes via les boîtes noires (scénarios longs)	58
<b>Figure 3.1-</b> Etapes du modèle SMAR proposé	63
<b>Figure 3.2-</b> Digraphes des sous-systèmes de l'exemple d'un tremblement de terre	65
<b>Figure 3.3-</b> Digraphe global des effets dominos d'un tremblement de terre	67
<b>Figure 3.4-</b> Arbre des effets dominos d'un tremblement de terre	68
<b>Figure 3.5-</b> Organigramme de la méthode proposée	69
<b>Figure 3.6-</b> Diagramme de VENN	71
<b>Figure 4.1 -</b> Le port de Bethioua	76
<b>Figure 4.2 -</b> Le système étudié	78
<b>Figure 4.3 -</b> Relation matricielle entre les risques et les facteurs	80
<b>Figure 4.4 -</b> Décomposition des sous-systèmes	82
<b>Figure 4.5 -</b> List of DSEs of accident scenarios	84
<b>Figure 4.6 -</b> Digraphe des sous-systèmes de l'exemple d'application	85
<b>Figure 4.7 -</b> Digraphe global des effets dominos de l'exemple d'application	87
<b>Figure 4.8 -</b> L'AdE correspondant au scénario critique	88
<b>Figure 4.9 -</b> L'AdD correspondant au scénario critique	89
<b>Figure 4.10 -</b> Grille de négociation des objectifs de sécurité	90
<b>Figure 4.11 -</b> Diagramme de VENN des intersections des ensembles $V_{SS1}$ , $V_{SS2}$ , et $V_{SS3}$	93
<b>Figure 4.12 -</b> Amplitude des effets dominos dans la raffinerie étudiée	94
<b>Figure 4.13 -</b> Graphe de répartition des EvRP	95

---

## *Liste de tableaux*

---

<i>Tableau 1.1-</i> Développement des ports de commerce dans le monde	18
<i>Tableau 1.2-</i> Top 20 des sociétés de classification	19
<i>Tableau 1.3-</i> Caractéristiques techniques des navires citernes	20
<i>Tableau 1.4-</i> Caractéristiques techniques des ports d'expédition de GNL/GPL en Algérie	22
<i>Tableau 1.5-</i> Chronologie des accidents majeurs	23
<i>Tableau 1.6-</i> Retour d'expérience des accidents	25
<i>Tableau 1.7-</i> Principales conventions et codes de l'OMI	30
<i>Tableau 1.8-</i> Modèles d'analyse des risques appliqués en sécurité maritime	33
<i>Tableau 2.1-</i> Différence entre le FSA et l'approche d'évaluation actuelle de la sécurité maritime	40
<i>Tableau 2.2-</i> Classification des événements initiateurs des effets domino	42
<i>Tableau 2.3-</i> Méthodologie d'étude des effets domino	45
<i>Tableau 2.4-</i> Outils automatisés et logiciels d'étude des effets domino	50
<i>Tableau 2.5-</i> Etude comparative des méthodologies relatives aux effets domino	53
<i>Tableau 2.6-</i> Etude comparative des logiciels relatifs aux effets domino et de leurs limites	54
<i>Tableau 2.7-</i> Modélisation des effets domino par le triptyque SFC du modèle MADS	55
<i>Tableau 3.1-</i> Liaisons de base du triptyque « SD-FD-CD »	65
<i>Tableau 3.2-</i> Dictionnaire des nœuds suivants des digraphes de la figure 3.1	66
<i>Tableau 3.3-</i> Tableau des événements redoutés probables	70
<i>Tableau 4.1 -</i> Liste des ESDs des scénarios d'accident.	83
<i>Tableau 4.2 -</i> Signification des abréviations citées dans la figure 4.6	86
<i>Tableau 4.3 -</i> Scénarios associés au digraphe de la figure 4.7	87
<i>Tableau 4.4 -</i> Synthèse de l'analyse des effets dominos de la figure 4.7	87
<i>Tableau 4.5 -</i> Tableau des événements redoutés probables	91
<i>Tableau 4.6 -</i> Probabilités des effets dominos dans la raffinerie étudiée	96

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Lexiques et Abréviations**

**Liste de figures**

**Liste de tableaux**

**Introduction générale**

**Chapitre 1 – A propos des risques dans les activités portuaires : cas des ports pétroliers Algériens**

<i>Introduction</i>	16
1.1- Intérêts et enjeux du transport des hydrocarbures par voie maritime	17
1.1-1. Le transport maritime des hydrocarbures au niveau international	17
A. Les grands ports maritimes	17
B. Les sociétés de classification	18
C. Les délégations étatiques	20
1.1-2. Le transport maritime des hydrocarbures au niveau national	20
A. La flotte algérienne	20
B. Terminaux d'hydrocarbures Algériens	21
1.2- Problèmes du transport des hydrocarbures par voie maritime	22
1.2-1. Impacts liés au transport maritime des hydrocarbures au niveau international	22
1.2-2. Impacts liés au transport maritime des hydrocarbures au niveau national	24
1.3- Risques majeurs dans les ports pétroliers	26
1.3-1.1. Incendies/Explosions	26
1.3-1.2. Pollutions	27
1.3-1.3. Boil over	27
1.3-1.4. BLEVE	28
1.3-1.5. Effets Domino	28
1.4- Sécurité du transport des hydrocarbures par voie maritime	29
1.4-1. Aspect réglementaire	29
A. Réglementation maritime internationale	29
B. Réglementation maritime nationale	31
1.4-2. Démarches managériales axées sur la gestion des risques	32
Conclusion	37

**Chapitre 2 – Gestion des risques dans les ports pétroliers : cas des risques liés aux effets domino**

<i>Introduction</i>	38
---------------------	----

2.1- Gestion des risques industriels dans les ports	39
-----------------------------------------------------	----



2.1-1.	L'évaluation formelle de la sécurité	39
2.1-2.	Conception d'une matrice d'évaluation des risques et indicateurs	40
2.2-	Gestion des risques liés aux effets domino dans les ports	41
2.2-1.	Caractérisation des effets domino	41
	A. Définitions et caractéristiques de l'effet domino	41
	B. Sources potentielles de l'effet domino	42
	C. Les processus de propagation des effets domino	43
2.2-2.	Approches d'étude des effets dominos	44
	A. Approches théoriques (méthodologiques)	44
	B. Approches pratiques (informatiques)	49
	C. Commentaires et discussion des deux approches	52
	D. Méthodologie MADS-MOSAR	56
	Conclusion	58
<b>Chapitre 3 – Nouvelles propositions d'étude des effets dominos</b>		
	<i>Introduction</i>	59
3.1-	Cadre général de nos contributions : Proposition d'un modèle Dénommé SMAR	60
3.1-1.	Rappels de base	60
3.1-2.	Présentation du modèle SMAR	62
3.1-3.	Nécessité d'agréger certaines étapes du modèle SMAR par des méthodes appropriées	63
3.2-	Contribution à la modélisation du triptyque SFC du modèle MADS-MOSAR par digraphes	64
3.2-1.	Etapes de l'approche proposée (modèle MADS amélioré)	64
	A. Identification des sous-systèmes du système étudié	64
	B. Modélisation graphique des sources de dangers	65
	C. Regroupement des digraphes des sous-systèmes en un seul digraphe	66
	D. Exploitation du digraph global	67
3.2-2.	Apports de l'approche proposée	68
3.3-	Contribution à la modélisation du triptyque SFC du modèle MADS-MOSAR par usage de la théorie des probabilités	68
3.3-1.	Etapes de l'approche proposée	69
	A. Description structurelle et comportementale du système étudié	69
	B. Capitalisation des événements redoutés	70
	C. Elaboration d'un diagramme ensembliste	71
	D. Déduction des amplitudes des effets domino	71
	E. Elaboration de l'espace probabilisable pour la déduction des probabilités des effets domino	71
3.3-2.	Apports de l'approche proposée	72
	<i>Conclusion</i>	73

## **Chapitre 4 – Application des propositions d'étude des effets dominos au port de Bethioua-Algérie**

<i>Introduction</i>	75
4.1- Présentation du port étudié	76
4.1-1. Situation géographique	76
4.1-2. Description de l'activité industrielle du port	77
4.2- Evaluation des risques associés à l'activité industrielle du port étudié	78
4.2-1. Evaluation global des risques liés à la manœuvre portuaire	79
4.2-2. Relation entre les conséquences et les accidents	79
4.2-3. Discussion	80
4.3- Modélisation des effets domino par la méthode digraphes	81
4.3-1. Décomposition du système	81
A. Choix de décomposition	81
B. Contextualisation topologique des sous-systèmes	82
4.3-2. Identification des ESDs et des scénarios d'accident	83
A. Identification des ESDs	83
B. Modélisation des processus de danger	85
C. Fusion des digraphes en un seul digraphe	86
4.3-3. Exploration du digraphe global	88
4.4- Quantification de la probabilité d'occurrence des effets domino	91
4.4-1. Description structurelle et comportementale	91
4.4-2. Capitalisation des évènements redoutés	91
4.4-3. Elaboration d'un digramme ensembliste	92
4.4-4. Dédution des amplitudes des effets dominos	94
4.4-5. Elaboration de l'espace probabilisable	95
4.5- Commentaires et discussions des résultats de l'étude des effets domino du port étudié	97
<i>Conclusion</i>	98
<b>Conclusion générale</b>	100
<b>Références bibliographiques</b>	102
<b>Annexes</b>	111
Annexe 1 – Application de la méthode MADS-MOSAR au port de Bethioua	112
Annexe 2 – Bilans d'accident au niveau du port de Bethioua	117
Annexe 3 – Représentation des plans de danger par le logiciel GéoGebra	120

---

## Introduction générale

---

Dans la gestion des entreprises, la **sécurité industrielle**, au sens large du terme, consiste à garantir la sécurité des biens, des personnes et également la pérennité de l'entreprise. Il s'agit alors de concilier les exigences de rentabilité à court terme, avec les exigences de *sécurité des biens et des personnes* visant à réduire les risques, sur le plan environnemental, social, et économique, générés par l'activité de l'entreprise (Roncalli, 2001).

Dans les entreprises industrielles, dont les activités présentent des dangers et donc des risques technologiques avérés ou plausibles, la *sécurité industrielle* se focalise alors sur l'analyse de ces risques et sur leur maîtrise.

Un aspect très important de la sécurité industrielle est l'usage de statistiques, permettant de mieux comprendre quels sont les secteurs les plus touchés par les accidents afin de prendre des précautions toutes particulières dans ce sens. De toute façon, la sécurité absolue ne peut jamais être garantie.

Par ailleurs, le concept et la pratique du management sont liés directement à la notion de la sécurité industrielle. Ils remplacent progressivement celle et ceux qui caractérisent la notion de gestion. Au fur et à mesure que cette notion de management prend place, nous parlons de plus en plus de management global intégré. Plusieurs facteurs militent, aujourd'hui, pour une approche globale (Lesbats, 2012):

- D'une part, les contraintes économiques et les performances recherchées ne permettent ni le « surdimensionnement », ni la « sur qualité », ni les grandes marges de sécurité, ni l'exhaustivité dans les contrôles et essais.
- D'autre part, l'assurance n'est plus qu'un moyen limité d'obtenir un dédommagement et encore à condition d'avoir correctement évalué les risques.

Faute de quoi le dédommagement se révélera insignifiant par rapport aux pertes. Plus encore, la société s'exprime non plus en terme d'acceptabilité du risque mais de plus en plus en terme de refus de dommage (le dommage à l'homme et le dommage à l'environnement). Ce phénomène s'est affermi de façon rapide et s'est imposé solidement comme l'a montré la réaction de la société française et de communautés avoisinantes à la catastrophe de l'usine AZF à Toulouse.

L'innovation technologique, la substitution des machines, le transport des matières dangereuses, l'aviation, le nucléaire, le militaire, le ferroviaire et le domaine maritime naval et portuaire sont quelques-unes des activités liées à la sécurité industrielle et au management des risques.

Parmi ces domaines d'activité, la mer reste l'un des liens les plus importants de liaison entre les nations (Grech, 2008). Elle tient une place prépondérante dans la globalisation : cent vingt mille (120 000) navires battant cent quatre-vingt-dix-huit (198) pavillons assurent le transport de quatre-vingt-dix (90) % du transit commercial mondial (Coutansais, 2010).

Malgré tous les progrès enregistrés dans le domaine de la navigation maritime, le voyage par mer comporte nécessairement différents risques (incendie, collision, naufrage, échouement...). D'où la volonté de la communauté internationale de créer un organisme onusien dédié au transport maritime appelée Organisation Maritime Internationale (OMI) dont le rôle principal est de chapoter la législation du droit international en référence aux conventions adoptées par les membres relatives à la sécurité maritime.

Dans ce contexte plusieurs travaux ont été réalisés par les chercheurs dans les différents volets de ce domaine de recherche relatif au domaine maritime. A titre d'illustration, nous citons :

- Reconnaissance de comportements de navires dans une zone portuaire sensible par approches probabiliste et événementielle : Application au Grand Port Maritime de Marseille (Zouaoui-Elloumi, 2012).
- Les contentieux en transport maritime de marchandises par conteneurs (Cossi Hervé, 2014) ;
- Contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des risques liés à la manœuvre portuaire (Bouzaher, 2016) ;

Trois mille (3000) navires sillonnent quotidiennement la Méditerranée, et seuls vingt-sept (27) accidents aux côtes algériennes (DMMP, 2013), pour se répartir inégalement entre les dix (10) ports de commerce. Ainsi, sur les deux milliards de tonnes de marchandises circulant en Méditerranée, vingt-six (26) millions de tonnes de marchandise générale sont destinées aux ports algériens, à partir desquels sont chargées à l'exportation cent (100) millions de tonnes d'hydrocarbures. Cette dernière, étant la volonté économique et politique de l'Etat, de vouloir créer une grande zone industrielle à proximité d'Oran, qui a transformé totalement la ville et le port d'Arzew, petit port de pêche, est devenu en quelques années un grand port d'hydrocarbures après l'arrivée du gazoduc puis de l'oléoduc depuis 1960, et après la découverte de Hassi Messaoud en 1956 (Camps, 1989). D'où l'intérêt que nous accordons à ce port dans le présent travail.

### ***1- Problématique***

D'un point de vue systémique, un terminal pétrolier ou méthanier est un univers industriel très sensible constitué de différentes parties appelées « sous-systèmes » qui sont reliées par des actions fonctionnelles très précises qui assurent l'activité économique du terminal. Le type du risque dans les ports est à la fois industriel et environnemental d'où la première question de recherche :

Q1 : Est-il possible de gérer ce risque par une démarche inspirée des systèmes de management et plus précisément sous forme d'une boucle d'amélioration continue ?

Ce risque industriel/environnemental est causé en réalité par des événements redoutés en cascades dénommés effets domino. D'où les deux autres questions de recherche :

Q2 : Quelles sont les approches d'étude de ces effets domino et quelles sont leurs limites ?

Q3 : Est-il possible de surmonter ces limites afin d'intégrer ces approches dans la gestion « spirale » des risques industriels/environnementaux survenus dans les ports ?

## 2- Objectifs

L'objectif de la présente thèse consiste à répondre aux questions clés de notre recherche doctorale. Plus précisément, notre objectif est double :

- i- il consiste, d'une part, en une contribution à l'analyse méthodologique de l'état sécuritaire au niveau des ports algériens par la proposition d'une démarche de management des risques maritimes appelée « Spirale de **MA**nagement des **R**isques –**SMAR**- » basée sur l'approche de l'amélioration continue, afin de bien maîtriser les risques et de juguler leur propagation.

Pour assurer l'amélioration continue du système de management des risques au niveau du port, nous avons opté pour la Roue de Deming fondée sur l'amélioration continue par des mesures préventives et des barrières de sécurité, et par l'application de la réglementation relative au domaine maritime.

Le choix de la spirale est motivé par le fait qu'elle porte en elle-même beaucoup de complexité tout en restant élégante, et elle est infinie dans ses dimensions, ce qui signifie qu'elle peut envelopper par sa grandeur tout phénomène aussi éparé qu'il soit tel que l'effet domino qui constitue le danger le plus complexe et le plus étendu.

- ii- et, d'autre part, en une tentative de modélisation des phénomènes d'effet domino qui peuvent se déclencher dans un terminal méthanier ou pétrolier algérien. La difficulté majeure de ce travail réside dans l'inexistence, à notre connaissance, d'une telle étude dans les travaux de recherches relatifs à la sécurité des terminaux algériens.

L'effet domino n'est signalé que comme phénomène qui peut se produire sans qu'il ne soit soumis à une modélisation qui peut le prévoir. En conséquence, notre stratégie est d'établir un ordre dans notre analyse de ce phénomène, dont le but est d'apporter au moins une nouvelle vision par la théorie des graphes des relations existantes entre les sous-systèmes du système étudié, et de faire une étude probabiliste quant à l'occurrence de ce phénomène complexe.

## 3- Hypothèses de recherche

Partant de ce qui précède, nos hypothèses de recherches sont les suivantes :

*Hypothèse 1* – La capitalisation du management des risques portuaires n'est possible que par l'action d'amélioration continue. Le modèle SMAR proposé est une matérialisation de cette capitalisation.

*Hypothèse 2* – Le modèle SMAR nécessite des approfondissements par des outils appropriés notamment pour l'étude des phénomènes particuliers tels que les effets dominos.

*Hypothèse 2.1* – La théorie des graphes constitue un outil adéquat à la modélisation des effets dominos

*Hypothèse 2.2* – La théorie des ensembles constitue une approche idéale à la quantification des grandeurs du risque (probabilité et gravité) associé aux effets dominos.

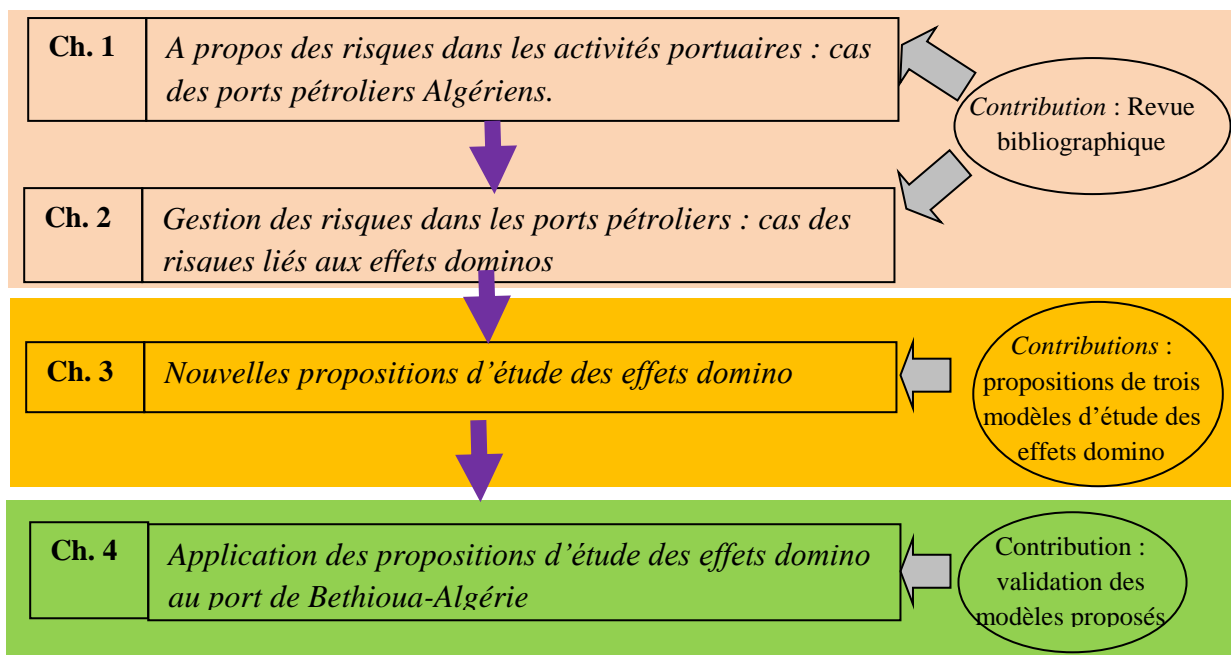
#### **4- Organisation de la thèse**

Pour atteindre les objectifs assignés à notre recherche doctorale, le présent manuscrit est subdivisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, intitulé « *A propos des risques dans les activités portuaires : cas des ports pétroliers Algériens* », nous proposons de donner une image sur : les terminaux d'hydrocarbures en Algérie, la flotte algérienne, la sécurité maritime, les risques liés aux activités portuaires, et l'aspect réglementaire dans le monde et particulièrement en Algérie.
- Le deuxième chapitre est consacré à la « *Gestion des risques dans les ports pétroliers : cas des risques liés aux effets dominos* ». En effet, dans ce chapitre et parmi les risques liés aux activités portuaires, nous nous focalisons en particulier sur les risques d'effets dominos où une revue de la littérature sur les deux tendances théoriques et pratiques de l'analyse des effets dominos sera présentée. Ce chapitre se termine par des commentaires sur les outils d'analyse des effets dominos afin de frayer le chemin à nos principales contributions que nous détaillerons dans les deux chapitre suivants.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude des effets domino où de *nouvelles propositions d'étude des effets domino* feront l'objet de ce chapitre. En effet, le long du troisième chapitre nous présentons nos propositions pour l'analyse des effets dominos. La première contribution sera une proposition d'une nouvelle méthode dite « *Spirale de Management des Risques (SMAR)* ». Cette nouvelle méthode proposée nous conduit à l'approfondir avec deux autres contributions qui traitent directement de la modélisation de l'effet domino par la théorie des graphes, et de la quantification des probabilités d'occurrence de ces effets dominos par la théorie des ensembles et la théorie des probabilités.  
Pour rappel, l'ensemble de nos contributions a fait l'objet de valorisations scientifiques dans des revues internationales de renommée établie.
- Le quatrième chapitre axé sur l'*application des propositions d'étude des effets dominos au port de Bethioua-Algérie* permet d'illustrer les contributions développées dans le chapitre précédent en vue leur validation sur un cas réel qui relève de l'industrie pétrolière.

Cette thèse s'achèvera par une conclusion générale dans laquelle nous repositionnerons l'ensemble de nos développements en regard des objectifs initiaux de l'étude et afin d'affirmer les hypothèses annoncés ci-dessus.

Le schéma préconisé pour la structuration de la présente thèse de doctorat est fourni ci-après.



---

# Chapitre 1

---

## A PROPOS DES RISQUES DANS LES ACTIVITES PORTUAIRES : CAS DES PORTS PETROLIERS ALGERIENS

### *Introduction*

*Les estimations préliminaires indiquent que le volume du commerce mondial a progressé de 3,4% en 2014, c'est le même taux qu'en 2013, les volumes additionnels ont dépassé 300 millions de tonnes, ce qui porte le total à 9.84 milliards de tonnes. On estime que le vrac sec a représenté plus des deux tiers du total, et les cargaisons pétrolières et gazières représente un taux de 28,7% du total du transport maritime mondial en 2014 (CNUCED, 2015).*

*Selon les estimations, le commerce mondial de GNL et du GPL a progressé de 12,7% en 2014 pour atteindre 71 millions de tonnes. Cette croissance s'explique principalement pour les méthaniers et les pétroliers (Clarkson, 2015). Les pays industrialisés et développés participent fortement à l'activité maritime, mais aussi les importations chinoises et indiennes de GNL ont contribué à l'augmentation du transport des produits pétroliers et gaziers et aidé à absorber une grande partie de la capacité des navires gaziers et pétroliers.*

*Vu l'intérêt que présente l'activité maritime portuaire sur le plan économique pour les villes côtières (ou littorales), ce chapitre a pour but de faire le point sur les risques liés aux activités portuaires. C'est un bilan qui doit être précédé, logiquement, par un état de connaissances inhérentes au transport maritime des hydrocarbures à travers le monde et en Algérie. Cet état de connaissance, nous permet de préciser les enjeux de cette activité notamment sur le plan de la sécurité des ports que nous détaillerons dans la dernière partie du présent chapitre.*



## **1.1- Intérêts et enjeux du transport des hydrocarbures par voie maritime**

De nos jours, 80 % des échanges commerciaux planétaires s'effectuent par voie maritime et passent par les ports (CESE, 2016). Commandant la vie économique internationale, les grands ports maritimes mondiaux sont devenus les baromètres de la mondialisation.

Le fret pétrolier représente, presque, près d'un tiers du commerce maritime mondial (CNUCED, 2015). En conséquence, de très importantes quantités de pétrole brut et de produits pétroliers raffinés circulent par bateau entre lieux de production, lieux de raffinage et centres de consommation.

Dans la suite de cette section, nous présentons un bilan de données relatives au transport maritime des hydrocarbures aux niveaux international et national.

### ***1.1-1. Le transport maritime des hydrocarbures au niveau international***

En 2011, le transport de pétrole brut par voie maritime au niveau international s'est élevé à 1,78 milliard de tonnes. Le chiffre pour les produits raffinés et le gaz liquéfié a atteint 1,05 milliard de tonnes dont environ 230 millions de tonnes pour le GNL (Colton 2011).

Le transport de pétrole brut domine donc toujours, mais avec une évolution marquée au cours des dernières années en faveur des produits raffinés. En effet et depuis 2006, le volume de pétrole brut transporté n'a pratiquement pas varié, alors que le tonnage de produits raffinés (et de gaz) a augmenté de 15 % (CNUCED, 2012) Le mouvement devrait se poursuivre dans les années avenir pour causes des bouleversements du monde du raffinage : construction de raffineries géantes dans les pays producteurs (notamment dans le Golfe), nouvelles capacités exportatrices des Etats-Unis, et besoins grandissants des pays émergents.

Dans la suite de cette section nous détaillerons les grands ports maritimes, les sociétés de classification et les délégués étatiques.

#### ***A- Les grands ports maritimes***

En raison des nombreux enjeux économiques, stratégiques, sécuritaires auxquels ils doivent faire face, et en raison également de la multiplicité de leurs activités logistiques et commerciales et de la compétition croissante qu'ils se livrent entre eux, les grands ports maritimes doivent sans cesse adapter leurs modes de gouvernance aux règles et aléas de la mondialisation.

Le tableau 1.1 de la page suivante illustre la chronologie de l'existence des ports de commerce dans le monde.

**Tableau 1.1** : Développement des ports de commerce dans le monde

Source : (CNUCED, 2007)

Période	Commentaires
Fin XIX <sup>e</sup> siècle- début XX <sup>e</sup> siècle	Avec la révolution industrielle, début de la spécialisation entre ports de commerce, de pêche et militaire. La configuration des ports évolue avec l'apparition des grands entrepôts, des lignes de chemin de fer et des grues. Les docks s'étendent et les professions se spécialisent. Le balisage et l'assistance aux navires se développent.
1910	La <i>Royal Navy</i> britannique adopte une alimentation au fioul, et non plus au charbon, pour ses nouveaux navires. Début de l'ère du pétrole dans le domaine du transport maritime.
Années 1950-1960	Premier port du monde depuis la fin du XIX <sup>e</sup> siècle, le port de New York connaît un déclin relatif en raison de l'essor de la façade Pacifique pour le commerce et de la concurrence du transport aérien pour les voyageurs. Il perd son rang de première place portuaire du monde au profit de Rotterdam.
Années 1960-1970	Le développement de l'aviation de ligne amorce un déclin rapide du transport maritime de passagers. Le moteur Diesel devient le standard de motorisation du transport maritime (bateaux armés ou non).
Années 1970-1980	Les deux chocs pétroliers donnent un coup de frein à l'activité du transport et des ports maritimes. Début de la construction du plus grand port artificiel au monde, à Jebel Ali aux Émirats arabes unis.
Début 1980	La généralisation des conteneurs, inventés en 1956 sur le terminal de Newark aux États-Unis, entraîne une baisse significative du coût du fret maritime et une hausse des échanges maritimes. Dans le sillage de la croissance japonaise, les ports nippons dominent les échanges maritimes en Asie.
1986	Singapour devient, pour une vingtaine d'années, le plus grand port mondial en tonnage.
1992	La connexion Rhin-Main-Danube dynamise les ports belges et néerlandais du Range nord-européen ( <i>Northern Range</i> ) qui regroupe les ports situés entre Le Havre et Hambourg.
2001	Dans un livre blanc, l'Union européenne met en avant l'importance du transport maritime et définit le concept d'autoroutes de la mer comme alternative aux autoroutes terrestres.
2002	Au lendemain des attentats du 11 Septembre, les États-Unis adoptent la <i>Container Security Initiative</i> (CSI) destinée à garantir la sécurité de la chaîne logistique en identifiant les conteneurs « à risque » le plus en amont possible.
2005-2010	Shanghai devient le premier port du monde en tonnage et pour les conteneurs.
2015	Effectuant 80 % du trafic commercial mondial, le transport maritime est un marché qui représenterait près de 1 500 milliards d'euros.

## ***B- Les sociétés de classification***

A l'origine de l'activité des sociétés de classification, le secteur maritime a permis à ces dernières d'acquérir des compétences dans le domaine des "contrôles techniques et documentaires" (Gallais, 2012). En règle générale, les sociétés de classification, offrent aux armateurs un accompagnement de référence concernant la gestion et le maintien d'un système de sécurité adéquat à bord de leurs navires (Chung, 2013).

Les sociétés de classification sont chargées de la vérification de la conformité des navires. Cette vérification donne lieu à des inspections ou visites. Elles sont des organismes indépendants qui fixent des normes pour la conception, la maintenance et la réparation des navires (Kristiansen, 2005). Lorsque la visite est satisfaisante, le navire se voit délivrer un certificat qui lui permettra de certifier sa conformité auprès des autorités du monde entier. Aussi, les certificats doivent pouvoir être facilement examinés à bord des navires, à tout moment (SOLAS).

L'association internationale des sociétés de classification (International Association of Classification Societies, IACS) est une organisation professionnelle renforcée. Treize sociétés de classification sur plus d'une cinquantaine, qui revendiquent cette appellation dans le monde, sont regroupées au sein de l'IACS (Tableau 1.2-) (Gallais, 2012). Née en 1968, l'objectif de l'IACS est de promouvoir des normes les plus sûres et de les faire appliquer de manière uniforme. Pour cela, l'IACS édicte des règlements de classe et ses membres doivent s'y référer à la place de leurs propres règlements de classe.

Depuis 1969, venant renforcer cette prérogative normative, l'IACS est membre consultatif de l'OMI. L'IACS exerce une certaine discipline professionnelle dans le sens où elle travaille à l'uniformisation des prescriptions et participe au processus réglementaire de l'OMI.

**Tableau 1.2 :** Top 20 des sociétés de classification.

*Source :* (Gallais, 2012).

<i>Nom</i>	<i>Nom Tonnage classé (tpl)</i>	<i>Nombre de navires</i>
Nippon Kaiji Kyokay	303 763	7 713
American Bureau of Shipping	263 308	9 673
Lloyd's Register	258 912	8 705
Det Norske Veritas	211 119	5 752
Germanischer Lloyd	128 295	7 062
Bureau Veritas	114 272	9 427
China Classification Society	72 870	2 683
Korean Register of Shipping	64 045	2 327
Registro Italiano Navale	30 245	3 055
Russian Maritime Reg. Shipping	14 662	4 091
India Register of Shipping	7 349	822
BiroKlasifikasiIndonesia	7 093	2 999
Vietnam Register	2 768	814
Polski Rejestr of Shipping	1 682	332
International Reg. of Shipping	1 247	128
Panama Maritime Doc. Services	1 130	44

Isthmus Bureau of Shipping	1 093	73
China Corp. of Shipping	953	113
Turku LoyduVakfi	854	372
Croatian Register of Shipping	754	179

### *C- Les délégations étatiques*

Les conventions sont particulièrement importantes car ce sont des instruments juridiques ayant force obligatoire. Tout État qui ratifie une convention ou qui y adhère, est tenu de lui donner effet en incluant dans ses textes juridiques nationaux, les prescriptions énoncées par la dite convention (Adjrahoua, 2010).

Un État peut également intervenir dans la régulation de l'industrie maritime à titre d'État côtier. L'État côtier effectue un suivi du trafic, ce qui peut impliquer une obligation de notification de la part du navire lorsqu'il entre dans les eaux territoriales de l'État côtier (Ringbom, 2008). Ces délégations étatiques ne sont pas généralisées dans les grandes nations maritimes qui peuvent entretenir des corps de fonctionnaires spécialisés pour le contrôle des navires. Ce n'est en fait que l'aspect ingénierie et contrôle de la construction qui est ainsi sous-traité par les experts des sociétés de classification.

#### *1.1-2. Transport maritime des hydrocarbures au niveau national*

A partir des années soixante, la demande sur les navires citernes transporteurs de GNL et GPL a augmenté en fonction de l'augmentation de la consommation des produits pétroliers et de gaz naturel à travers le monde. L'Algérie est un pays producteur et exportateur de GNL et de GPL, donc l'existence d'une flotte maritime c'est imposée pour permettre le transport de ces produits. Depuis octobre 1997, Le groupe pétrolier SONATRACH détient 100% du capital de la société de transport Hyproc Shipping Company.

#### *A- La flotte maritime Algérienne*

L'Algérie dispose d'une flotte maritime composée de plusieurs navires de commerce répartis entre méthaniers et pétroliers (EPA, 2014), avec une capacité totale de 956 000 m<sup>3</sup>. Les caractéristiques techniques de cette flotte sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau 1.3:**Caractéristiques techniques des navires citernes.

*Source : (EPA, 2016).*

	<i>Nom du navire</i>	<i>Vitesse en nœud</i>	<i>Longueur hors tout</i>	<i>Tirant d'eau max</i>	<i>Capacité</i>	<i>Date de démarrage</i>	<i>Age</i>	<i>Type</i>
1	Larbi Ben M'Hidi	19,4	266,7	10,85	129767	1977	40	Méthanier
2	Bachir Chihani	19,4	266,7	10,85	129767	1979	38	
3	Mustapha Ben Boulaïd	19,8	278 ,21	12,8	125260	1976	41	
4	AbaneRamdane	20.2	274,22	13 ,32	126130	1981	36	
5	Didouche	20	274,22	13 ,32	126130	1980	37	

	Mourad							
6	Lala Fatma N'soumer	19	-	-	145500	2004	13	Pétrolier
7	Berge Arzew	19	-	-	13800	2004	13	
8	Cheikh Bouamama	-	-	-	75 000	2007	10	
9	Cheikh El Mokrani	-	-	-	75 500	2009	8	
10	Raoudhelfares	16 ,5	174,2	9,5	35000	2010	7	

Les cargaisons liquides transportées peuvent être classées dans trois catégories:

- Les hydrocarbures : pétrole brut ou produits raffinés. Les navires qui effectuent ces transports sont appelés pétroliers.
- Les produits chimiques transportés sur des navires appelés chimiquiers.
- Les gaz liquéfiés transportés soit à très basse température, soit sous pression sur des navires appelés gaziers (méthanier et les transporteurs de GPL).

### ***B- Terminaux d'hydrocarbures Algériens***

La date de 1964 correspond au lancement de la construction du premier complexe de production de GNL, le GL4Z dénommé alors CAMEL (Compagnie Algérienne du Méthane Liquéfié). Ainsi, les productions cumulées depuis 1964 des quatre complexes de liquéfaction de GNL (GL4Z, GL1K, GL1Z et GL2Z) ont atteint respectivement 83 500 343 m<sup>3</sup>, 218 677 511 m<sup>3</sup>, 331 305 502 m<sup>3</sup> et 366 562 057 m<sup>3</sup> (EPA, 2014).

Pour répondre à une demande de GNL de plus en plus importante, SONATRACH compte consolider sa position dans le bassin méditerranéen et européen, tout en renforçant sa présence sur d'autres marchés internationaux, notamment américains et asiatiques. A cet effet, un programme de développement a été lancé pour la réalisation de deux grands projets de production GNL: Ces deux grands projets sont entrés en production, respectivement en novembre 2011 et novembre 2012.

Il est important de rappeler que tous les terminaux gaziers, qu'ils soient au départ ou à l'arrivée, et pour du GPL ou du GNL, ont une caractéristique commune, à savoir que le transfert du gaz, de terre à navire ou vice versa se fait sous la forme liquide.

Au départ, il y a une usine de liquéfaction du gaz naturel (GNL/GPL), c'est le cas de Skikda et Arzew. Ces usines ont des installations très complexes du point de vue technique et très onéreuses. De plus, leur coût de fonctionnement est très élevé car la liquéfaction du méthane ou du pétrole consomme beaucoup d'énergie : surtout celle du méthane qui consomme 4 à 5 fois plus que n'importe quel autre hydrocarbure. Les terminaux méthaniers sont toujours situés le plus loin possible des autres installations portuaires, pour des raisons de sécurité, et quelque fois à l'entrée immédiate du port (Chameroy et Bourieres, 1977).

La côte algérienne est dotée de plusieurs ports commerciaux parmi lesquels se trouve des terminaux d'hydrocarbures destinés à l'exportation de pétrole et de gaz (Skikda, Bejaia, Arzew et Béthioua). Cependant, si nous nous limitons qu'aux ports d'hydrocarbures il y en a trois dont les caractéristiques sont résumées par le tableau suivant.

**Tableau 1.4 :** Caractéristiques techniques des ports d'expédition de GNL/GPL en Algérie.

*Source : (EPA, 2016).*

	Ports	Nb de quais	Volume de reception (m <sup>3</sup> )	Nb de bras de chargement	Débit chargement ( m <sup>3</sup> /h)	Tirant d'eau (m)	Longueur
1	Béthioua	4	2 réceptions de 40000 à 125000 et 2 pour 50000 à 125000	5	4.103 à 10.103	13.5	Maximum
2	Arzew	1	25000 à 50000	4	Maximum 103	9.8	
3	Skikda	2	25000 à 90000	2	Maximum 103	9.8	

Le tableau ci-dessus montre que les ports de Béthioua et d'Arzew restent les plus importants vue leur capacité d'accueil et de chargement. Par contre, celui de Skikda ne peut réceptionner que des méthaniers de petite taille.

## 1.2- Problèmes du transport des hydrocarbures par voie maritime

Le transport d'hydrocarbure et de gaz liquéfié par voie maritime est une activité majeure pour l'approvisionnement en énergie à travers le monde. Il reste néanmoins un transport à risque aux vues des matières transportées et de leurs contraintes de conditionnement.

### 1.2-1. Impacts liés au transport maritime des hydrocarbures au niveau international

La taille des bateaux ne cesse de croître et implique pour les ports des investissements massifs. En effet et depuis 1997, la capacité moyenne des ports de commerce a été multipliée par trois en 2012 (CNUCED, 2012). Conséquemment, ce développement implique des impacts sur les plans économique, social, et environnemental.

En effet, depuis toujours le coût du transport dépend de la distance à parcourir et de la manière dont les matériaux sont acheminés. Malgré cela, depuis cinquante ans, ce coût du transport n'a cessé de diminuer dans le temps, par exemple le prix de transport du pétrole maintenant amené par pipelines au diamètre et débits jamais atteints auparavant, ou par tankers ayant des capacités de chargement de plus en plus grandes ;aussi, l'exigence de sécurité dans le transport maritime n'a qu'un impact très faible sur le coût du transport.

L'évolution du coût du transport passe aussi par une réduction des coûts de maintenance et par une meilleure gestion des facteurs qui provoquent des frais supplémentaires (gestion administrative, gestion interne,...). À long terme, les facilitations que nous apportent le multimédia et la technologie créent une baisse des coûts mais au profit du facteur humain qui, lui aussi, engendre des frais supplémentaires.

Par ailleurs, l'abandon progressif des pétroliers à simple coque au profit de pétroliers à double coque aura un impact sur les prix. Mais l'impact de cette mesure est estimé à environ 0,10 dollar par baril (CNUCED, 2015), soit un dixième du coût du transport (qui lui-même ne représente que 5 à 10 % du coût total du produit).

Le transport du gaz nécessite des investissements très lourds mais, en termes de coût d'importation par unité d'énergie, le gaz est moins cher que le pétrole. Par ailleurs, le transport des matières dangereuses a un impact négatif sur la population.

Enfin, les préoccupations environnementales constituent un autre défi majeur. Dans un monde qui se destine à vivre en ville et au bord de l'eau, les nuisances portuaires ne sont plus forcément les bienvenues. La contrainte environnementale, liée souvent à des zonages de protection de la nature littorale et estuarienne, est à la base d'une conflictualité nouvelle, relayée par des mobilisations citoyennes de mieux en mieux organisées. Ces problématiques liées à l'usage de l'espace littoral, conjuguées aux recours aux acteurs entrepreneuriaux dans le cadre de la libéralisation des activités, renvoient le port à son territoire (CNUCED, 2007).

Après avoir présenté les différents impacts du transport maritime, dans la suite de ce chapitre, nous nous focalisons sur les impacts d'ordre sécuritaires et environnementaux. Plus précisément, nous présentons un bilan des accidents survenus dans les ports à travers le monde.

Par exemple, en France la base de données ARIA, a identifié 18 469 accidents de Décembre 2008 à Janvier 1992 et 1073 autres de Janvier à Décembre 2008 (Kadri, 2013), dont ces accidents, les incendies et les rejets de matières dangereuses sont les événements les plus fréquents avec 60 % et 44 % respectivement en 2008. A cela s'ajoute, les explosions et la projection de fragments (missiles) qui sont les grands événements qui peuvent générer des effets domino dans les sites industriels, d'où la nécessité de prévenir et d'atténuer ces événements.

Le tableau suivant résume la chronologie des accidents majeurs survenus dans les ports internationaux.

**Tableau 1.5:**Chronologie des accidents majeurs

*Source :*(Réalisé par nos soins).

<i>Date</i>	<i>Localisation</i>	<i>Type d'accident</i>	<i>Victimes et dégâts</i>
1966	Feyzin –France	Incendie d'une industrie pétrochimique	18 morts
1974	Flixborough - Grande Bretagne	Explosion sur un site industriel	28 morts
1976	Seveso –Italie	Fuite de dioxine d'une usine chimique	Pas de mort sur le coup, mais



			37 000 personnes touchées
1983	France	Explosion attentat aéroport d'Orly	8 morts, 60 blessés
1984	Bhopal – Inde	Fuite d'un gaz toxique	Environ 2 500 morts et 250000 blessés
1984	Mexico-Mexique	Explosion d'une citerne de gaz de pétrole liquéfié	Plus de 500 morts et 7 000 blessés
1988	Mer du Nord	Une fuite de gaz suivie d'une explosion sur la plateforme pétrolière Piper-Alpha	167 morts
1992	Stade de Furiani	Effondrement	18 morts, 2300 blessés
1995	Stations de métro Tokyo	Pollution sur sarin	12 morts, 5000 blessés
2001	New-York, World Trade Center	Attentats, Effondrement	3000 morts, 2000 disparus
2001	Toulouse - France	Explosion d'un site industriel	30 morts et plus de 2 500 blessés
2004	Skikda - Algérie	Explosion dans une raffinerie pétrochimique	27 Morts
2005	Buncefield- Angletaire	Un incendie dans un terminal pétrolier	43 blessés
2005	Madrid, gare d'Atocha	Explosion	198 morts, 2000 blessés
2009	Andrézieux-Bouthéon- France	Deux explosions successive dans une usine pétrochimique classée Seveso	2 morts et 6 blessés
2010	Gaulfe du Mexique	La plateforme pétrolière Deepwater Horizon au large de la Louisiane provoque une des plus grave marrées noires	11 morts
2012	Venezuela	Un incendie à la raffinerie d'Amuay au Venezuela fait suite à une explosion causée par une fuite de gaz	48 morts
2013	Qingdao- Chine	Explosion d'un oléoduc dans le port de qingdao	47 morts
2016	Tultepec- Mexique	Le marché aux feux d'artifices subit une série d'explosions dévastatrices	36 morts et 70 blessés

### ***1.2-2. Impacts liés au transport maritime des hydrocarbures au niveau national***

L'Algérie ne fait pas exception par rapport au reste du monde en termes des impacts dus au transport maritime des hydrocarbures. C'est pour cette raison, nous nous focalisons sur les accidents survenus aux niveaux des ports algériens car ces événements ont un lien direct avec la suite de notre travail développé dans cette thèse.



En effet, on se souvient de l'émoi suscité par l'échouage, en 2003 du navire «Batna» et le même jour, le naufrage du navire « Bechar », à quelques mètres du port d'Alger, ce qui a causé la perte de 13 membres de son équipage.

Ce naufrage, n'est malheureusement que le plus apparent des accidents portuaires. Et pour ne citer que les plus importants, nous citerons également: les incendies de 2005 dans le terminal pétrolier de Skikda et dans le terminal à conteneur d'Alger, la pollution de 2007 par les hydrocarbures dans le port de Skikda, et la fuite de gaz ammoniac de 1985 dans le port de Annaba, qui a provoqué une panique générale de la population portuaire et même de la ville.

Ces accidents majeurs ainsi que d'autres (incendie du pétrolier « ACINA » survenu dans le port d'Arzew en 1990) ont les faits marquants suivants : conséquences dévastatrices et lourdes sur les plans humains, environnementaux et matériels, récurrence dans leurs occurrences. D'où la nécessité de les étudier de manière plus profonde afin d'y faire face.

Notons enfin, que les ports algériens ont connus d'autres accidents moins graves. A ce propos et à titre de rappel, le tableau suivant regroupe ce type d'accidents survenus au niveau du port de Béthioua qui sera retenu dans la suite de nos travaux présentés dans cette thèse de doctorat.

**Tableau 1.6:** Retour d'expérience des accidents survenus dans le port de Béthioua.

*Source :* (Bilan EPA, 2014).

	<i>Situation d'accident</i>	<i>Evènement redouté</i>
2006	Fuite d'hydrocarbure (pétrole brut) survenu au niveau du poste B2	Dégagement du produit inflammable sur le site.
	Incendie en rade	Présence du condensat à proximité des travaux à chaud des pipe-lines.
2008	Collision (navire « CERAUSEA » - quais)	Perte d'équilibre du navire CERAUSEA
2009	Incendie à bord du navire « HASSI R'MEL »	Détérioration du câblage et du réseau électrique
	Un colis lourd a tombé de la grue	Détachement du câblage de chargement du colis
2010	Abordage entre 2 remorqueurs	Perte de direction du remorqueur R1
2011	Pollution au niveau du bassin de Bethioua, coté P1/P2/P3.	Mauvais soutage à quai
2012	pollution au niveau du port de Bethioua (poste M2)	Pollution marine
	Collision + incendie Le navire « CAPE BRINDISI »	Fausse manœuvre du pilote
2013	Nappe de pollution d'hydrocarbures mélangés avec du sable, port de Bethioua B2.	Pollution marine

Un examen approfondi du bilan des impacts dus au transport maritime des hydrocarbures à travers le monde (y compris l'Algérie) montre, d'une part, que ce bilan est lourd et, d'autre part, qu'il est nécessaire de ne plus se contenter d'un simple récit d'accidents survenus dans les ports mais d'analyser ces accidents en termes de risques majeurs.

Dans ce contexte, l'analyse quantitative de ces risques maritimes requiert l'identification des dangers et des accidents potentiels et permet ainsi l'évaluation des conséquences, des fréquences, ou de la probabilité d'occurrence des risques (Projet Rabaska, 2006). L'analyse des risques d'accidents technologiques majeurs porte sur les installations dont les risques pourraient causer des impacts, souvent soudains et immédiats, sur la population et les éléments sensibles du milieu. Le cas des incidents survenus au niveau des ports maritimes ou à bord des navires de commerce dont l'impact est parfois très grave sur l'être humain, la marchandise, le navire et l'environnement marin, d'où l'utilité de l'analyse qui permet de connaître ces risques afin d'en planifier la gestion. Selon l'information disponible et le but recherché par la réalisation d'une analyse de risques d'accidents majeurs ; l'analyse de risques peut être qualitative ou quantitative (Theberge, 2002).

De plus, l'analyse (qualitative ou quantitative) des risques d'accidents majeurs est fortement conditionnée par le type même du risque d'accidents majeurs. A ce propos, plusieurs types de risques sont détaillés dans la littérature. Nous les rappelons dans la section suivante.

### **1.3- Risques majeurs dans les ports pétroliers**

Un risque majeur est un événement incertain dont les effets négatifs sont considérables et dont la réalisation est souvent, mais pas toujours, faiblement probable. Les géographes et de nombreux spécialistes découpent cette notion en trois termes (AFNOR, 2002) : *l'aléa*, qui est l'événement incertain lui-même, *les enjeux*, qui sont les valeurs socio-économiques ou écologiques soumises aux effets de l'aléa quand il survient, et *la vulnérabilité*, qui fixe le degré plus ou moins grand auquel ces effets détruisent les enjeux.

Le risque majeur appartient au domaine du risque collectif ou sociétal (SDACR, 2005) et l'accident par lequel il se réalise implique en général non seulement des dommages élevés en valeur, mais aussi des populations importantes qui sont touchées (exemples : en France : *tempête Xynthia* (Hallegatte et Przulski, 2012) en février-mars 2010 sur la côte Atlantique, *inondations de juin 2010 dans le Var* en France (Martin, 2010), et *explosion d'AZF* (Guillaume, 2009) à Toulouse en 2001).

Dans le domaine de transport des hydrocarbures et de leur stockage, les risques majeurs sont de types : incendies/explosions, pollutions (marines ou atmosphériques), Boil-over, BLEVE, et les effets domino. En conséquence, la suite de cette section sera consacrée à la présentation de ces risques.

#### **1.3-1. Incendies/Explosions**

Les risques d'incendie et d'explosion sont des sujets permanents de préoccupation pour de nombreuses entreprises. Un incendie est une combustion qui se développe de manière incontrôlée, en dégageant de fortes quantités de chaleur, des fumées et des gaz polluants et même toxiques (INRS, 2004). Une explosion est une réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression ou les deux simultanément (EN, 2000).

Les causes d'incendies/explosions sont nombreuses, mais la majeure partie des incendies a une origine humaine (imprudence, malveillance, mauvaise préparation aux catastrophes

naturelles telles que tremblements de terre, tsunamis...) ou causes techniques, dont par exemple réactions chimiques très exothermiques, les contextes d'atmosphères explosives (Tazieff, 1988 ; Martin, 2008). En effet, les incendies et les explosions sont à l'origine de blessures graves voire de décès, et de dégâts matériels considérables. Chacun de ces risques fait l'objet d'une démarche de prévention spécifique dont l'objectif prioritaire est d'agir avant que le sinistre ne survienne.

La lutte contre le risque d'incendie impose de mettre en place des mesures techniques et organisationnelles visant à supprimer tout départ de feu ainsi qu'à limiter la propagation et les effets d'un incendie.

Pour prévenir le risque d'explosion, la priorité est d'empêcher la formation d'atmosphères explosive (ATEX). A défaut, il faut éliminer les sources d'inflammation et mettre en œuvre des mesures permettant d'atténuer les effets potentiels d'une explosion.

### **1.3-2. Pollutions**

La pollution industrielle désigne la part de la pollution de l'environnement directement induite par l'industrie quand elle introduit des altéragènes biologiques, physiques (dont les radiations telles que la radioactivité ou dans la lumière artificielle quand elle perturbe l'environnement nocturne), chimiques ou organiques, affectant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de l'écosystème (OCDE, 1974).

Cette pollution correspond à une contamination plus ou moins durable (selon le type de polluant, dégradable, biodégradable ou non-biodégradable) des compartiments des écosystèmes que sont l'air, eau, sol ou le réseau trophique ou de l'être humain. Elle se quantifie souvent par rapport à un seuil, mais il faudrait aussi tenir compte des synergies entre polluants. Dans le domaine maritime on distingue deux types de pollution : pollution marine due au versement d'un produit chimique dans la mer générant une nappe de pollution et pollution atmosphérique due aux rejets des torches dans les raffineries pétrolières.

Pour la prévention, les industriels trouvent que c'est difficile d'éviter ce risque vue l'industrialisation puissante et le développement rapide. Pour cela les industriels veillent toujours à minimiser les dégâts des pollutions en utilisant des moyens techniques et organisationnels pour éviter au maximum la propagation des nappes et des nuages de pollution.

### **1.3-3. Boil-over**

Le NFPA (National Fire Protection Association - USA) propose une définition précise du phénomène (NFPA, 2002) : « *Le terme de Boil-over est attribué à un événement survenant lors d'un incendie de certains hydrocarbures contenus dans un réservoir à ciel ouvert, lorsqu'une soudaine augmentation de l'intensité du feu est observée, accompagnée de l'expulsion de l'hydrocarbure hors du réservoir, après une longue période de combustion régulière. Le Boil-over a lieu lorsque les résidus de combustion, issus de la surface en feu, deviennent plus denses que les hydrocarbures non brûlés et sombrent formant une couche chaude qui progresse vers le fond plus rapidement que la régression de la surface de liquide. Lorsque cette couche chaude, également appelée onde de chaleur, atteint l'eau ou une*

*émulsion d'eau dans l'hydrocarbure située en fond de bac, l'eau est d'abord surchauffée, puis portée à ébullition de façon quasi explosive entraînant le débordement du bac. »*

D'après [Laurant \(2003\)](#), un Boil-over est une transformation d'un liquide en vapeur d'eau dans un réservoir en feu contenant des produits pétroliers. Cette dernière définition montre bien que ce phénomène est à l'origine de violentes projections de combustible, du bouillonnement du contenu du bac, de l'extension des flammes et de la formation d'une boule de feu.

Egalement, cette dernière définition explicite les conditions d'occurrence de ce phénomène qui se résument essentiellement par les deux faits suivants : la surface du liquide est en feu, la présence d'eau dans le fond du réservoir. D'où la création de la boule de feu ainsi que la libération des produits pétroliers dans l'atmosphère.

#### **1.3-4. BLEVE**

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), ou Vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition, peut-être défini comme « *la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique* » ([Leprette, 2002](#)). Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE. En effet, le BLEVE est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion. Aussi, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour parler de BLEVE.

L'occurrence d'un BLEVE est liée à la rupture brutale d'un réservoir de gaz liquéfié, survenant lorsque le réservoir est soumis à une agression thermique ou mécanique. Le phénomène de BLEVE est donc *l'effet domino d'un événement précurseur* tel que l'impact d'un projectile, l'échauffement par un feu de torche impactant, un sur-remplissage, ... .

Les effets d'un BLEVE sur l'environnement se manifestent généralement de trois manières : effets de pression (propagation d'une onde de surpression), effets missiles (projection de fragments à des distances parfois très importantes) et effets thermiques (dans le cas d'un BLEVE de gaz liquéfié inflammable, rayonnement de la boule de feu).

#### **1.3-5. Effets Domino**

Les effets domino consistent en une séquence d'événements interdépendants susceptibles de produire en chaîne des dommages importants voire d'ordre catastrophique dans une installation industrielle et son environnement. Il s'agit plus précisément d'un ou plusieurs événements dits primaires (origines) qui se propagent et provoquent des événements secondaires dont les conséquences se superposent voire amplifient celles du ou des événements primaires.

L'analyse statistique des accidents domino ([Abdolhamidzadeh et al, 2010](#)), montrent que la fréquence des accidents domino est élevée dans les usines des procédés chimiques et de transport. Récemment, l'analyse historique des accidents domino ([Clini et al, 2009](#)) où ils ont étudié 261 accidents impliquant les effets domino, montre que, en plus des causes de

défaillances mécaniques et les événements externes, la fréquence des accidents domino causés par le facteur humain est relativement élevée, d'où l'importance d'intégrer les facteurs humains et organisationnels dans l'étude des chaînes en cascades. Malgré cela, des catastrophes en cascade restent relativement peu étudiés, peu d'attention portée sur l'étude des vecteurs d'intensification des effets domino, les méthodes disponibles dans la littérature sont limitées dans leur capacité à gérer la complexité de ce phénomène (Bahman et al, 2010).

Par ailleurs, un inventaire des accidents domino qui se sont produits sur la période de 1917 jusqu'à 2009 a montré que 30% de ces accidents sont enregistrés dans la période 2000-2009 (Kadri, 2014). Cette étude montre également que les explosions sont les causes les plus fréquentes des effets domino (57%), suivis par les incendies (43%).

Vu l'ampleur des conséquences associées à ce phénomène, d'une part, et ses origines qui correspondent aux autres risques majeurs tels que les incendies/explosions, d'autre part, l'étude et l'analyse approfondies de l'effet domino fera l'objet du prochain chapitre.

#### **1.4- Sécurité du transport des hydrocarbures par voie maritime**

La sécurité a souvent été considérée comme un élément crucial dans presque toutes les opérations maritimes (Jalonen, 2009). Partant de ce constat, l'objectif principal dans le développement de la sécurité maritime est la prévention des accidents. Dans ce contexte, l'examen des facteurs de prévention montre que la sécurité maritime se compose des facteurs culturels et contextuels qui créent des attitudes et des comportements qui influent sur la santé et la sécurité au travail (Håvold, 2007).

Pour rappel, la sécurité maritime est la combinaison de mesures préventives visant à protéger le domaine maritime contre : les effets du danger accidentel ou naturel, les préjudices, les dommages à l'environnement, le risque ou la perte (Fransas et al, 2012).

Selon Hill (2007), la sécurité maritime est l'activité qui cherche à sauver la vie humaine, de garantir la sécurité des navires et des marchandises, de protéger l'environnement marin et de préserver les actifs économiques et sociaux maritimes dont les communautés dépendent.

Les deux définitions précédentes montrent que la sécurité maritime englobe la sécurité de la vie humaine et la protection des biens en mer contre les menaces environnementales et opérationnelles, ainsi que la sécurité de l'environnement maritime contre la pollution par les navires (Urbański et al, 2009).

Un état d'art de la sécurité maritime aux niveaux international et national est rappelé ci-après.

##### ***1.4-1. Approche réglementaire***

###### ***A- Réglementation maritime internationale***

Au niveau international et plus précisément au niveau européen, il y a lieu de citer la directive cadre de juin 1989 qui propose des «mesures pour encourager l'amélioration de la santé et de la sécurité des travailleurs» (directive 89/391/CEE, 1989). Cette directive pose les principes généraux du management de la SST applicables à toute organisation :

intégration de mesures préventives dans toutes les activités ; mise en place de personnes compétentes pour le management de la sécurité ; évaluation des risques et identification des dangers ; consultation des travailleurs ; formation, information, participation du personnel ; surveillance médicale ; premiers secours et évacuation ; documentation en place.

Rappelons également qu'en matière de la réglementation maritime internationale, les organisations internationales jouent depuis des années un rôle considérable dans l'élaboration des normes de la sécurité maritime. Cette concertation a commencé au 19<sup>e</sup> siècle par la recherche d'une certaine uniformisation des règles, usages et coutumes nationales, relatives à la prévention des accidents maritimes. Dans cette coopération interétatique qui devient chaque jour de plus en plus nécessaire, un rôle fondamental est joué par les organisations internationales en général et par l'Organisation Maritime Internationale (OMI) ainsi que l'Organisation Internationale du Travail (OIT) en particulier.

Dans ce que suit, nous nous limitons à l'OMI qu'est créée en 1948 sous le nom d'Organisation Maritime consultatif Intergouvernementale (OMCI). L'OMI est une institution spécialisée des Nations Unies qui compte en 2009, 169 états membres et trois membres associés. Son siège se situe à Londres et l'Algérie a adhéré en 1963.

Les buts de cette l'organisation sont les suivants (OMI, 2011):

- Collaboration entre les états membres dans le domaine de la réglementation maritime ;
- Adoption des normes de sécurité ;
- Prévenir les pollutions du milieu marin par les navires et installations portuaires ;
- Encourager l'abandon des mesures discriminatoires, en vue de mettre les ressources des services maritimes à la disposition du commerce mondial sans discrimination.

L'OMI a accompli une œuvre considérable, principalement à travers l'élaboration de plus de 55 conventions et protocoles, et plus de 25 codes (OMI, 2014). Ces conventions et codes reflètent le rôle fondamental de l'OMI dans la prise en charge de la sécurité maritime.

Le tableau suivant rappelle parmi ces conventions et codes, les plus importants.

**Tableau 1.7:** Principales conventions et codes de l'OMI

**Source :** (Kristiansen, 2005).

Convention sur la sauvegarde de la vie humaine en mer (Safety of Life at Sea - SOLAS 74-),	cette convention a contribué à la construction et à l'équipement de sécurité des navires par l'adoption de normes très strictes. La SOLAS a été amendée par l'OMI à plusieurs reprises jusqu'à sa forme actuelle avec treize chapitres dont chacun d'eux traite un aspect de la sécurité du navire et des équipages.
Convention sur la prévention de la pollution des navires (Prevention of pollution from Ships - MARPOL73/78-).	Instaurée après le naufrage du pétrolier <i>Torrey Canyon</i> en 1967, provoquant une grande pollution maritime. Cette convention a pour but de prévenir la pollution marine par les activités liées au transport maritime sous toutes ces formes (Hydrocarbures, produits chimiques, matières dangereuses, ordures ménagères, eaux usées et la pollution atmosphérique par les gaz d'échappement).
Convention sur la prévention des abordages en mer (Preventing Collisions at Sea -	C'est un véritable code de conduite des navires en mer dans le but d'éviter les collisions des navires en mer.



<i>COLREGS1972-</i> )	
Convention sur les lignes de charges des navires, créée en 1966 : (Load Line 1966 – Loadlines66-)	Elle impose à tout navire de commerce de disposer sur sa coque des marques qui limitent le poids de sa cargaison, car il est reconnu depuis longtemps que les restrictions sur les tirants d'eau, pour lequel un navire peut être chargé, apportent une contribution significative à sa sécurité
Convention sur la formation standard, certificats et la veille des gens de mer (Seafarer Training, certification and watchkeeping - <i>STCW1978-</i> )	Son dernier amendement fut en 2010 à Manille ; cette convention concerne la formation et la certification des équipages des navires, en imposant des formations initiales et continues couvrant tous les aspects techniques de la fonction de chaque membre d'équipage à bord des différents types de navires.
Code ISPS (Ship and Port Facility Security) de 2004	Ce code concerne la sûreté des navires et des installations portuaires (sous l'influence des Etats Unis après les attentats de New York de 2001 et l'attaque contre le navire de guerre 6 « USS Code » qui faisait escale dans le port d'Aden, au Yémen en 2000).
Code ISM (International Safety Management)	L'adoption de ce code, par la résolution A.741 (18) de l'OMI en 1993, est le résultat d'une action entreprise de longue date pour introduire la prise en compte du facteur humain dans la réglementation de la sécurité maritime. Le drame du <i>Herald of free Enterprise</i> aurait pu être évité, si le code ISM était en vigueur. Ce code est un outil international obligatoire de prévention des accidents en mer, constitué essentiellement d'une gestion des ressources humaines de la compagnie maritime tant à terre qu'à bord de chacun de ses navires.
Code LSA (Life Saving Appliance)	Relative aux moyens de sauvetage réglementaires à bord des navires.
Code IMDG (International Maritime Dangerous Goods)	Le classement, le transport, la ségrégation et l'arrimage à bord des navires, des marchandises Dangereuses transportées en colis.
Code IBC (Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemical in Bulk - 1987-)	S'applique aux navires Citernes transportant des produits chimiques en vrac (construction et équipements de ce type de navire).
Code IGC (Construction and Equipment of Ships Carrying gas in Bulk -1987-)	Construction and Equipment of Ships Carrying gas in Bulk (1987). S'applique aux navires Citernes transportant du gaz liquéfié (GPL, GNL, etc..) en vrac (construction et équipements de ce type de navire).
Code SBC (Solid Bulk Cargoes)	pour le transport du vrac solide (Charbon, minerai, etc...)

Parallèlement à ces conventions et codes, l'OMI a développé plus de 700 recommandations et des guides pour une meilleure gestion de la sécurité des navires.

L'approche prescriptive traditionnelle émanant de l'autorité publique impose jusque dans les années 1970-1980 à l'industriel un certain nombre de prescriptions, de normes techniques auxquelles il doit se conformer et d'exigences formulées en terme de moyens. Mais les autorités publiques et industriels prennent collectivement conscience à cette période de la difficulté de l'approche à couvrir l'ensemble des risques et à suivre les évolutions technologiques rapides du monde industrielles. Cette approche traditionnelle conduisait parfois l'industriel à se conformer à des prescriptions techniques inappropriées voire obsolètes (Cambon, 2007). Contribuant alors à une inhomogénéité dans la protection face aux risques, et plus gravement, l'incitait par ailleurs. Se limiter à un simple respect de

la réglementation sans pour autant l'encourager à s'impliquer véritablement en terme de sécurité ni à adopter une démarche préventive d'amélioration continue.

### ***B- Réglementation maritime nationale***

Le dispositif réglementaire Algérien en matière du transport maritime est matérialisé par le Code Maritime Algérien (CMA) qui a fait l'objet de modifications au début des années 90 afin de le mettre en harmonie avec la réalité économique (loi n°98-05, 1998). Ces modifications ont :

- touché le navire, sa nationalité; l'exploitation commerciale,
- touché la libéralisation des transports maritimes et de régime de responsabilité du transporteur,
- apporté une révolution dans le domaine de l'exploitation portuaire en ouvrant les activités de manutention et d'acconage au privé.

Le CMA avec ses 889 articles constitue à lui seul une référence incontournable pour garantir des conditions de vie et de travail normales aux gens de mer à bord des navires de commerce. Le CMA est très clair sur les critères d'engagement d'un navire de commerce pour battre un pavillon national comme il définit avec précision les conditions de recrutement des équipages ainsi que les postes de travail et les mesures à prendre pour assurer un bien-être et une sécurité à bord (Smaiah et Bahmed, 2011).

Le CMA ne s'aligne pas nécessairement sur les conventions internationales les plus «modernes». Par contre, si l'Algérie a adhéré ou ratifié une convention internationale le CMA peut s'inspirer de la concurrente de celle-ci pour organiser sa législation interne. A ce propos, l'Algérie a adhéré à la convention de Bruxelles de 1925 sur les privilèges et hypothèques, mais s'inspire de la convention de Bruxelles de 1967 pour organiser ce domaine. Le CMA renvoie purement et simplement à la convention de Bruxelles du 25 Août 1924 dans sa version originelle pour ce qui concerne les transports maritimes sous connaissement ratifiée par l'Algérie mais il fait référence au protocole modificatif de 1968 (art.805), il renvoie directement à la convention de Bruxelles de 1957 sur la limitation de responsabilité des propriétaires de navires (art.96), à la convention de Bruxelles de 1969 sur la responsabilité civile pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures (art.121), la convention de Bruxelles de 1967 en matière de transport de bagages par mer (art.824).

#### ***1.4-2. Démarches managériales axées sur la gestion des risques***

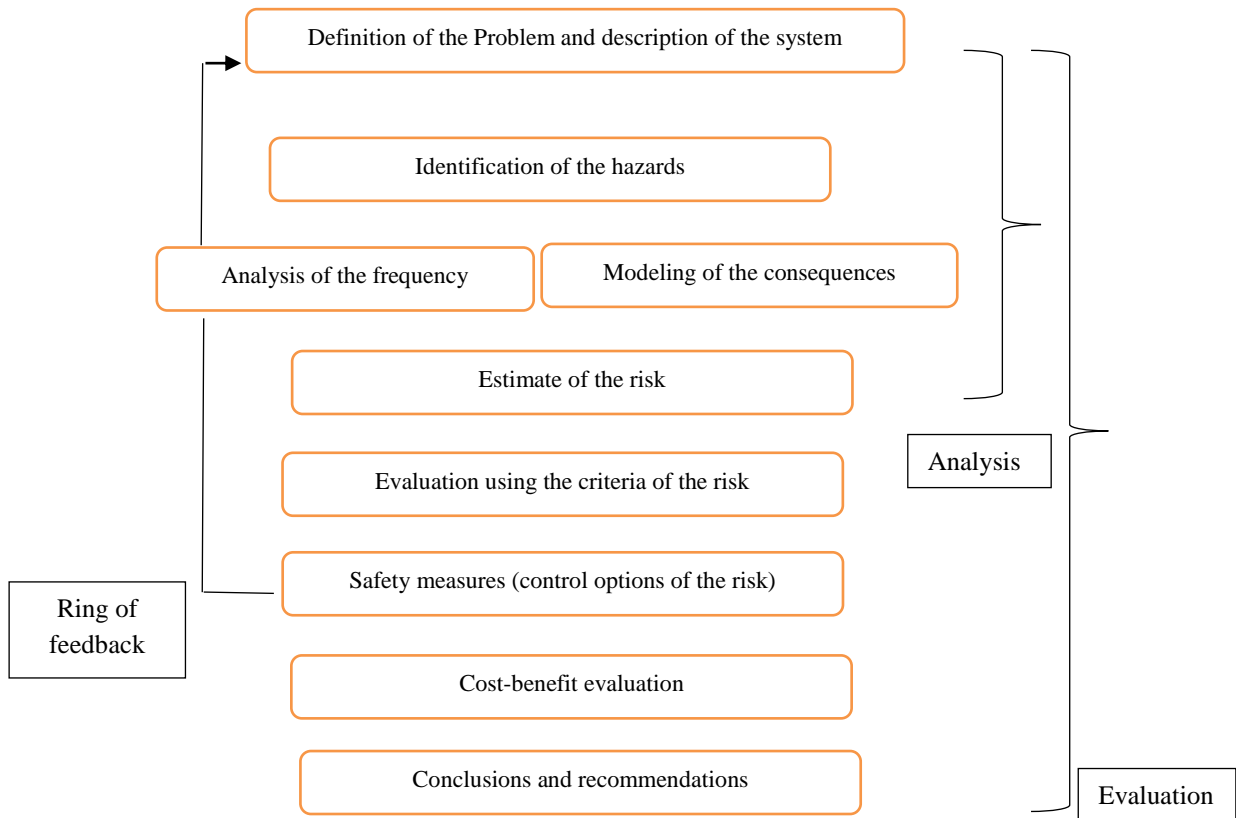
La pratique de la gestion des risques est riche par sa capacité d'adaptabilité à des situations diverses. Afin d'illustrer nos propos, nous rappelons que la littérature spécialisée dans le domaine de la gestion des risques maritimes confirme l'existence de nombreux modèles (tableau 1.8).



**Tableau 1.8** : Modèles d'analyse des risques appliqués en sécurité maritime.

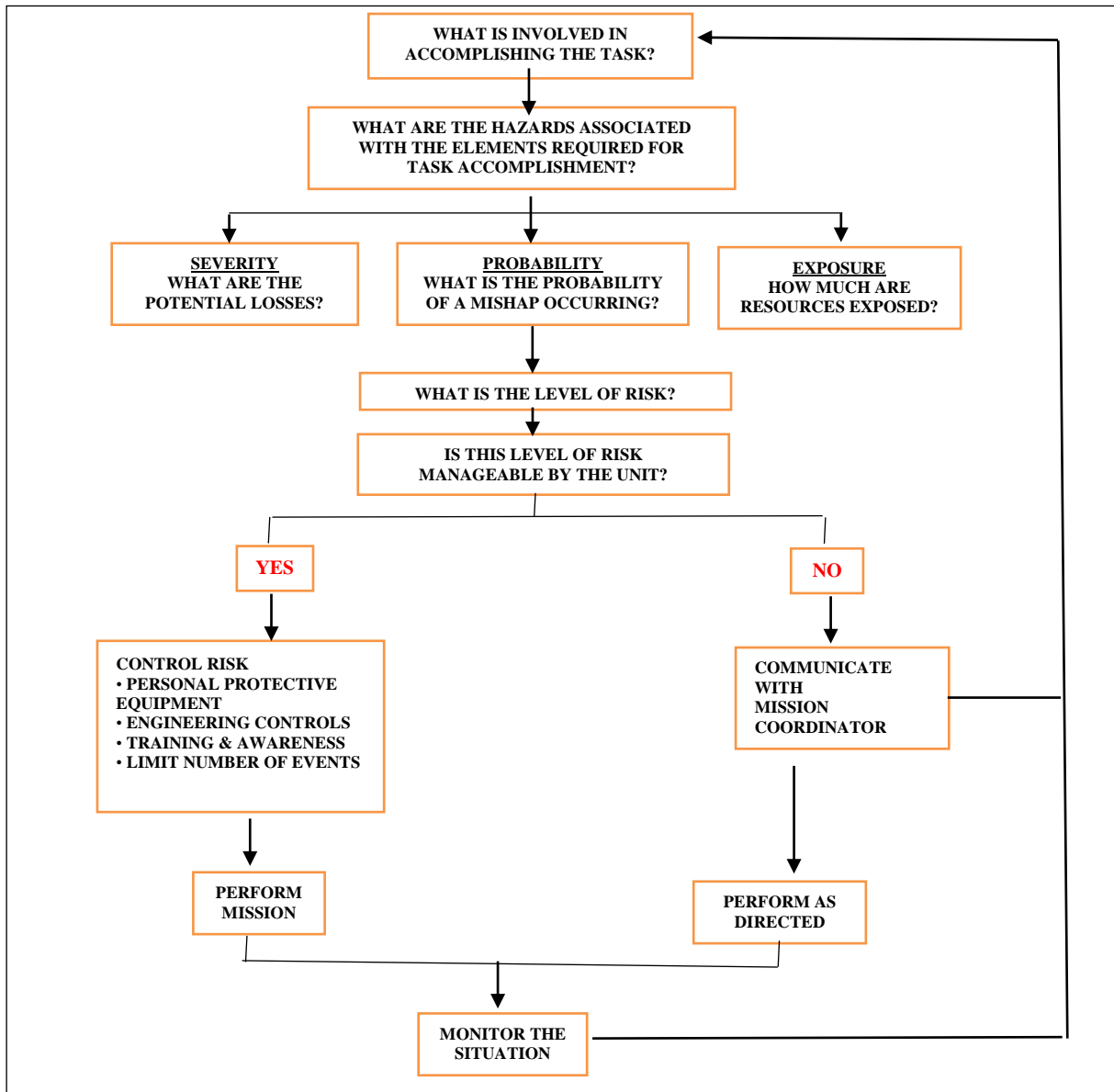
*Source* : (Réalisé par nos soins).

Model INOUE	C'est un modèle quantitatif appliqué en 2000 dans les ports du Japon. Ce modèle évalue la difficulté du navire-manipulation provoquée par un secteur de manœuvre restreint ou par des embouteillages ou par une combinaison de chacun des deux. Il inclut des critères d'acceptation basés sur la perception du marin de la sécurité. Il permet également de fournir des informations sur le degré de difficulté du navire-manipulation et permet, en conséquence, une meilleure conception de l'infrastructure (INOUE, 2000).
<i>Modèle Kristiansen</i>	Ce modèle est appliqué sur la grande zone maritime du détroit de Messine de l'Italie. La sécurité de la navigation dans le détroit de Messine a été analysée avec le soutien d'une approche micro-simulation. Toute la question décrit un système intéressant pour l'évaluation de la sécurité (Gattuso et al, 2009). Le processus de l'analyse et l'évaluation du risque, selon (Kristiansen, 2005), peuvent être articulés dans différentes phases décrites par la figure 1.1.
Modèles SPE(Severity, Probability, Exposure)	Ce modèle développe un processus d'évaluation des risques maritimes selon les étapes synthétisées par la figure 1.2.
Modèle GAR (Green Amber et Red).	Des soucis plus généraux de risque qui comportent la planification d'opérations ou des risques de réévaluation pendant que des étapes importantes sont réalisées peuvent être abordés en utilisant le modèle GAR. Une enquête des accidents de la garde côtière a identifié 6 éléments qui affectent le risque en fonctionnement : surveillance, planification, choix de l'équipe, capacité et qualification de l'équipe, environnement et complexité de tâche. Ces éléments sont incorporés dans le modèle de GAR qui permet l'évaluation des risques. Ce modèle, qui est largement applicable par les officiers de port, est synthétisé par la figure 1.3.



**Source :** (Kristiansen, 2005).

**Figure 1.1 :** Processus de l'analyse et de l'évaluation des risques d'après le modèle Kristiansen.



Source : (TCTSG 8/89, 2010).

Figure 1.2 : Etapes du modèle SPE.

0	23	4060
10	20	30 40
50		
<b>GREEN</b> (Lowrisk)	<b>AMBER</b> (Caution)	<b>RED</b> (HighRisk)

Source : (TCTSG 8 /89).

Figure 1.3 : Echèle d'évaluation de GAR.

Il est important de signaler qu'au niveau des ports algériens, certains modèles du tableau précédent sont d'usage répandu. C'est le cas des deux modèles SPE (Severity, Probability and Exposure) et GAR (Green, Amber and Red) qui sont combinés avec le Référentiel Investigations des Accidents et Incidents du Groupe SONATRACH (Sonatrach, 2009).

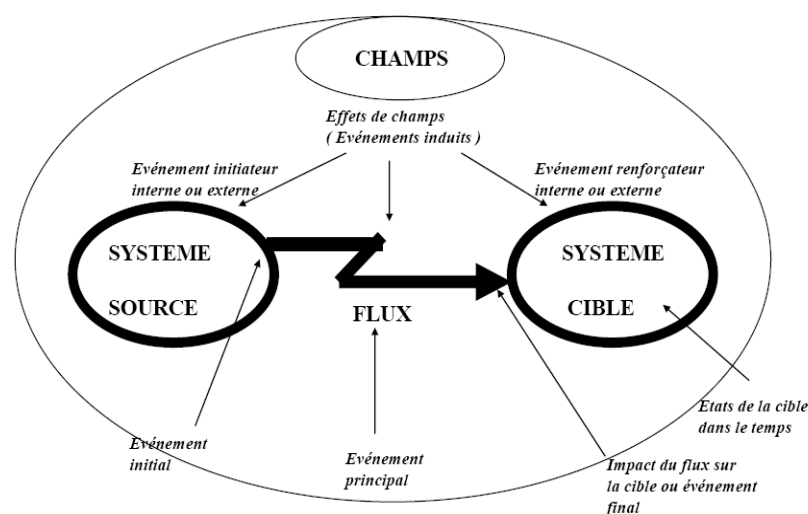
De même, il est à signaler que d'autres démarches de management des risques sont également très utilisées dans le domaine de la sécurité maritime. C'est le cas de MADS que nous rappelons ci-après.

Le modèle MADS (Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes) est une conceptualisation d'une approche systémique du risque d'accident. Le danger est représenté comme un ensemble de processus conduisant à un processus principal représentant le flux de danger pouvant être généré par un système source de danger (Mazouni, 2008).

Selon Saoulé (2002) : « Le flux de danger peut être constitué d'énergie, de matière ou d'information. Il est généré par un événement (ou processus) initiateur d'origine interne ou externe. Ceci se déroule en plusieurs phases, d'abord l'occurrence d'un facteur de déclenchement (événement initiateur) qui génère un flux de danger entre les constituants du système global faisant de l'un d'eux une source et d'un autre une cible de danger. Un Événement Non Souhaité (ENS) se produit alors et peut générer un dommage subi par la ou les cibles, qui peut être de surcroît accru par un processus renforçateur ».

Le modèle MADS, appelé aussi Univers du danger, est un outil initialement à vocation pédagogique qui permet de construire et de comprendre la problématique de l'analyse des risques. Il est construit sur les bases des principes de la modélisation systémique développés par Le Moigne (1977).

Selon ce modèle, l'univers du danger est formé de deux systèmes appelés système **source** de danger et système **cible**, en interaction et immergés dans un environnement dit actif (figure 1.4).



Source : Perilhon.1, 1996).

Figure 1.4: Processus de danger du modèle MADS.

La figure 1.4, suscite les remarques suivantes :

- les interactions entre ces deux systèmes se font sous forme de processus : c'est-à-dire d'échange de flux de matière, d'énergie, d'informations entre les deux systèmes, dans le temps, l'espace et la forme,
- le flux de danger est également appelé l'Événement Non Souhaité (ENS) ou parfois l'Événement Redouté (EvR),
- le flux de danger agit sur le système cible. Sa rupture d'équilibre peut concerner sa structure et/ou son activité et/ou son évolution, et est appelée effet du danger,
- le système source de danger est l'émetteur du flux de danger. Sa rupture d'équilibre peut concerner sa structure et/ou son activité et/ou son évolution et/ou son interaction avec l'environnement, et est appelée source de flux de danger,
- le processus de danger est réversible c'est-à-dire qu'un système source peut devenir système cible et vice-versa. Les systèmes sources et les systèmes cibles pris en compte sont : un ou des individus, une ou des populations, un ou des écosystèmes, un ou des systèmes matériels ou symboliques (savoirs, savoir-faire, données...),
- les « éléments orientés » source-flux-cible sont « immergés » dans un environnement actif appelé champ de danger.

### **Conclusion**

*Le long de la première partie de ce chapitre, nous avons fait une synthèse sur les données relatives au transport maritime (données historiques du trafic maritime, coûts du transport maritime, les projets de développement et leurs incidences sur le transport des hydrocarbures) tant au niveau international que national.*

*Dans la deuxième partie, l'intérêt est porté essentiellement sur les risques et la sécurité maritime. Comme il est signalé dans ce premier chapitre les risques majeurs relatifs aux transports des hydrocarbures et à leur stockage multiples incendies/explosions, pollutions, boil-over, et les effets dominos.*

*Dans le chapitre suivant, nous revenons avec plus de détails sur ce dernier type des risques, les effets dominos. En effet, ce phénomène sera abordé de manière plus concise en termes d'approches d'études.*

## GESTION DES RISQUES DANS LES PORTS PETROLIERS : CAS DES RISQUES LIES AUX EFFETS DOMINO

### **Introduction**

*Dans le domaine des risques liés aux sites industriels, les accidents causés par les effets domino « chaîne d'accidents » sont les plus destructeurs. En effet, ces accidents peuvent causer des conséquences graves à la population, aux structures, à l'environnement et même à la société.*

*En plus de leurs caractères destructifs s'ajoute la fréquence d'occurrence des effets domino qui est de plus en plus élevée en raison (Kadri et al, 2014): du développement croissant des complexes industriels, de la proximité des installations industrielles, du stockage de substances dangereuses, des réseaux de transport et de la croissance de la population.*

*La diversité de ces facteurs est encore plus critique qu'elle est souvent liée à l'émergence de nouvelles menaces qui exploitent les actes de malveillance et les erreurs humaines.*

*Par ailleurs, la littérature aborde dans plusieurs études les effets domino. Nous retrouvons de nombreux exemples d'accidents industriels et de catastrophes bien réelles dans la littérature qui ont causé des séquences (chaînes) d'accidents très graves. Des situations (incendie, explosion, projection de fragments et de rejets toxiques) générées par un accident primaire (naturel ou technologique) peuvent générer des accidents secondaires d'ordre plus élevé et plus grave. Cet enchaînement de processus catastrophiques successifs est appelé chaîne en cascade ou effet domino.*

*L'effet domino est responsable de plusieurs accidents catastrophiques dans les industries chimiques et les zones de stockage. On peut noter aussi que les accidents causés par des chaînes en cascade (cascade d'événements) sont parmi les plus graves accidents relatifs aux*

sites industriels. Par conséquent, le risque de l'effets domino est largement reconnu dans la législation depuis la directive « Seveso I » (European Community Directive (82/501/EEC)), qui exige l'évaluation des effets domino dans l'analyse de la sécurité industrielle. En outre, la deuxième directive « Seveso II » (directive (96/82/CE)) a étendu ses exigences à l'évaluation des effets domino non seulement à l'intérieur du site industriel, mais aussi à proximité de ce dernier. Malgré ces exigences, les effets domino restent relativement peu étudiés comparativement aux autres risques majeurs évoqués dans le chapitre précédent (Laurent, 2003).

Ce chapitre a pour but de faire le point sur l'effet domino afin de cibler les pistes d'exploration qui méritent des approfondissements ultérieurs (chapitres suivants). Cette revue des effets domino dans les ports est, logiquement, précédée par la gestion des risques d'une manière générale dans les ports.

## **2.1- Gestion des risques industriels dans les ports**

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que les activités maritimes sont des activités à hauts risques. D'un point de vue systémique, il s'agit de systèmes à risques technologiques et naturels. Pour chaque système de transport d'hydrocarbures maritime, les risques sont inhérents : aux installations qui définissent le système, aux activités exercées, aux acteurs impliqués (aussi bien ceux qui causent les risques que ceux qui les subissent) et au périmètre d'impacts potentiels de ces risques lorsqu'ils se produisent.

Pour faire face à ces risques, plusieurs orientations ont été développées par les chercheurs qui activent dans le domaine de la sécurité maritime. Nous rappelons dans ce qui suit deux orientations qui illustrent nos propos.

### **2.1.1- L'évaluation formelle de la sécurité**

L'un des objectifs le plus important de l'OMI, dans les années 2000, est l'introduction de l'analyse et de l'évaluation des risques, comme un outil visant à améliorer la sécurité maritime, y compris la protection de la vie humaine, l'environnement marin et les biens.

L'OMI était jusque-là, une institution réactive<sup>1</sup> car elle réagissait suite à des événements et catastrophes maritimes, par des règlements et des directives introduites par les conventions internationales (SOLAS, MARPOL,...).

Afin d'évoluer vers une autre approche proactive de la sécurité maritime, une méthodologie d'Evaluation Formelle de la Sécurité (FSA) a été instaurée comme support au processus de décision à l'OMI afin d'avoir des procédures plus rationnelles basées sur une approche proactive. En effet, la FSA est une nouvelle approche de la sécurité maritime qui combine diverses techniques pour développer des évaluations proactives des risques (Chung, 2013).

Les différences entre les deux visions de la sécurité maritime (visions réactive et proactive) sont résumées dans le tableau suivant.

---

<sup>1</sup>Dans le passé, la gestion de la sécurité par une réglementation adéquate était généralement introduites à la suite d'un accident / incident ou une série d'accidents / incidents (NZMSA, 2004).

**Tableau 2.1** : Différence entre le FSA et l'approche d'évaluation actuelle de la sécurité maritime.

*Source* : (Besse, 2004).

<i>Approche proactive (FSA)</i>	<i>Approche réactive</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proactive, en essayant d'identifier tous les dangers imaginables avant qu'ils ne conduisent à des accidents.</li> <li>- Règlement, conformément aux objectifs de sécurité.</li> <li>- Englobe des aspects techniques, organisationnels et humains.</li> <li>- Coût de la sécurité identifiée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réactive, en réponse aux accidents.</li> <li>- Amendement continu de la réglementation.</li> <li>- Des règlements normatifs.</li> <li>- Contient des exigences essentiellement techniques.</li> </ul>

L'approche FSA est un processus rationnel et systématique d'évaluation des risques et d'évaluation des coûts et avantages des différentes options pour réduire ces risques (Lois et al, 2004). C'est une méthodologie structurée et systématique visant à renforcer la sécurité maritime (Hu et al, 2007) le risque était une question centrale car il est souvent associé à la sécurité (Mabrouki et al, 2013).

Pour l'OMI, l'FSA permet d'évaluer les coûts et les avantages de ces options visant à réduire ces risques. L'FSA est une méthodologie à la fois qualitative et quantitative tenant compte des mesures de gestion du trafic des navires existant dans la zone ou de celles que l'on envisage d'y mettre en œuvre (Trbojevic et Carr, 2000 ; Degré, 2003).

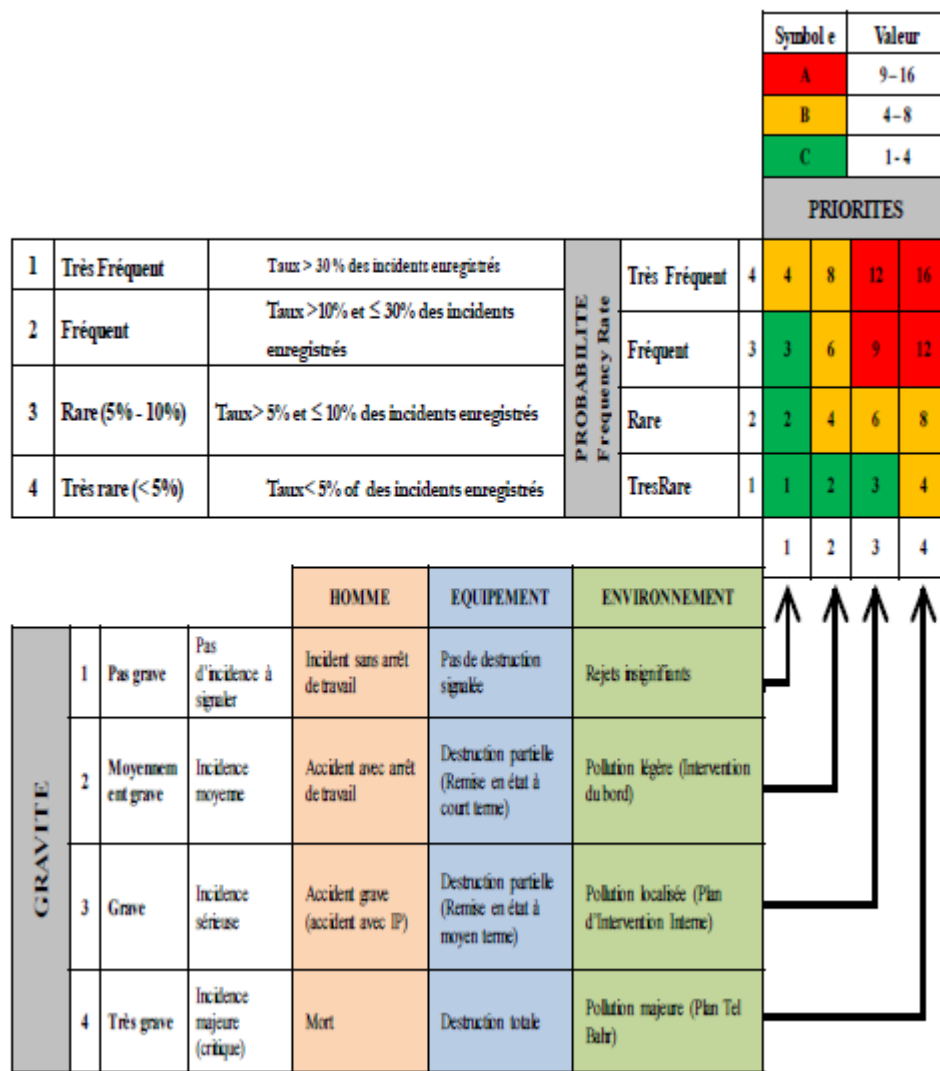
### **2.1.2- Conception d'une matrice d'évaluation des risques et indicateurs**

La seconde tendance concerne l'évaluation des risques maritimes moyennant les matrices des risques (Fumey, 2001). Parmi les travaux récents dans ce contexte, citons la matrice des risques développée par Bouzaher et ses collaborateurs (2015).

C'est une matrice composée de quatre (4) niveaux de probabilité (fréquence) et quatre (4) niveaux de gravité (figure 2.1). Pour chaque catégorie, et selon les incidents signalés, sont affectés par des indicateurs appropriés qui rendent le processus d'évaluation plus clair avec une détermination précise des priorités.

Les principaux risques identifiés sont évalués pour dégager leurs priorités respectives ; et pour chaque groupe de risques est assigné un facteur de risque bien défini. Cette approche nous permet d'évaluer l'impact de chaque facteur de risque, ce qui représente un écart ou lacune dans le processus, et ce, finalement, nous facilite le traitement de chaque risque, en identifiant aisément les réponses appropriées pour son apaisement.





Source : (Bouzaher et al, 2015).

Figure 2.1: Matrice d'évaluation des risques maritimes.

## 2.2. Gestion des risques liés aux effets domino dans les ports

### 2.2-1. Caractérisation des effets domino

#### A- Définitions et caractéristiques de l'effet domino

Les effets domino consistent en une séquence d'événements interdépendants susceptibles de produire en chaîne des dommages importants voire d'ordre catastrophique dans une installation industrielle et son environnement. Il s'agit plus précisément d'un ou plusieurs événements dits primaires (origines) qui se propagent et provoquent des événements secondaires dont les conséquences se superposent voire amplifient celles du ou des événements primaires.

Lees (1980) a donné une première définition des effets domino qui sont considérés comme un facteur pouvant prendre en compte les dangers qui peuvent se produire si les fuites d'une matière dangereuse peuvent conduire à l'escalade de l'incident. Une seconde définition est fournie par le même auteur (Lees, 1996) qui définit un accident de domino comme un événement dont la conséquence provoque un événement distinct dans une unité distincte.

D'autres auteurs ont contribué à leur tour pour définir les effets domino (Bagster et Pitblato, 1991; Delvosalle, 1996; Gledhill et Lines, 1998). Cependant, la définition qui a attiré notre attention est celle de Cozzani et Salzano (2004). En effet, d'après ces deux auteurs, un événement domino accidentel sera considéré comme un accident dans lequel un événement primaire se propage à l'équipement voisin, déclenchant un ou plusieurs événements secondaires ayant des conséquences globales plus graves que celles de l'événement primaire.

A partir de cette définition, quatre éléments fondamentaux caractérisent un effet domino:

- un scénario accidentel primaire qui initie l'effet domino (événement primaire ou initial qui déclenche la séquence accidentelle),
- l'effet de propagation qui suit l'événement principal, dû à l'effet des « vecteurs d'intensification » causés par l'événement primaire,
- un ou plusieurs scénarios d'accident secondaire, affectant la même ou d'autres unités cibles d'une installation industrielle,
- l'intensification des conséquences d'un événement primaire, due aux effets des scénarios secondaires.

La notion d'intensification, évoquée ci-dessus, correspond à un processus qui favorise la dégradation des biens et l'atteinte aux personnes au cours du développement de l'effet domino, *i.e.* qui a tendance à augmenter les dommages.

### ***B- Sources potentielles de l'effet domino***

Les sources potentielles de l'effet domino sont de natures diverses, d'une part, et sont liées à des événements initiateurs variés, d'autre part. Ces sources sont distinguées de manière générale par la nature des risques associés qui peuvent être d'ordre naturel ou anthropique (tableau 2.2) c'est à dire, risques technologiques et organisationnels - non intentionnels- et les risques de malveillances –intentionnels-.

**Tableau 2.2 :** Classification des événements initiateurs des effets domino

Source : (Kadri et al, 2014)

<i>Risques</i>	<i>Origines</i>	<i>Exemples</i>
Naturels	Climatiques	feux de forêt, inondations, crues et ruissellements, avalanches, cyclones et tornades, tempêtes, orages, effets de changements climatiques (Krausmann et Mushtaq, 2008).
	Géologiques	mouvements de terrain et séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et autres émanations naturelles (gaz, ... etc.) (Steinberg et al, 2008).
	Extraterrestre	Meteorites (très rare)
Anthropiques	Technologiques	Défaillances techniques (El Hajj, 2013)
	Organisationnelles	Problèmes de management (El Hajj, 2013)
	Humaines	Erreurs humaines, non-respect des procédures (Mohaghegh et Moseh, 2009)
	Malveillantes	Vols, sabotages actions revendicatives ou de vengeances, dégradations diverses (dont occasionnelles), attentats. Ces actions peuvent viser les matériels, mais aussi les informations sensibles ou les personnels (Piwowar et al., 2009).

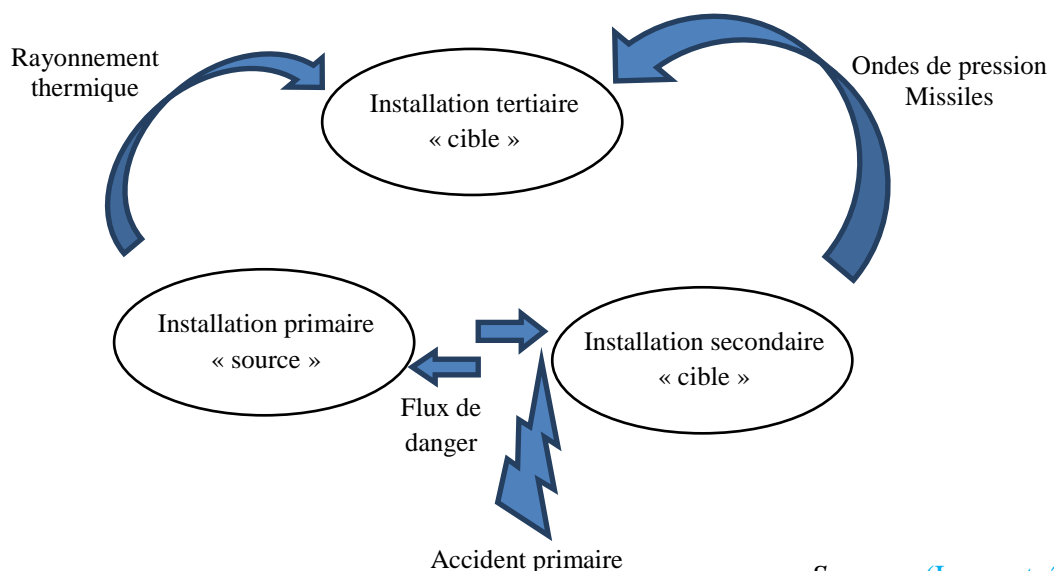
Rappelons que les risques, présentés dans le tableau précédent, peuvent être combinés ce qui complique notablement leurs analyses et ce d'autant que leurs natures parfois très différentes impliquent des processus de propagation variés. Cela conduit également à l'exploitation de méthodes d'analyse de natures également diverses (déterministes, probabilistes voire possibilistes et de natures qualitatives).

### *C- Les processus de propagation des effets domino*

Les processus de propagation sont directement liés à : la source potentielle, l'événement initiateur associé, et à son environnement immédiat appelé aussi « champ de danger ».

D'après Kadri (2014), l'effet domino est décrit par un processus physico-chimique mais aussi informationnel dont les conditions d'évolution sont d'ordre : physiques (atmosphérique, géologique, hydrologique), matérielles (bâtiments, installations, voiries...), écologiques (végétations, animaux), informationnelles (détections et observations, systèmes d'information) et humaines (comportements individuels, organisation et logistique, démographie locale...).

Une illustration schématique du processus de l'effet domino est fournie par la figure 2.1 où un accident dit primaire est déclenché dans une installation appelée également primaire. L'évènement initiateur de l'effet domino est traduit par le flux de danger issu de l'installation primaire. Les conséquences de ce flux de danger sont matérialisées au niveau de l'installation dite secondaire (installation cible). Evidemment, les effets produits par l'accident primaire peuvent se traduire sur les installations voisines et vice-versa car l'accident secondaire d'un premier effet domino devient à son tour un accident primaire d'un second effet domino et ainsi de suite.



Source : (Laurant, 2003)

**Figure 2.2-** Processus simplifié d'effet domino.

La figure ci-dessus montre également que les effets du premier évènement sont généralement de natures (Laurant, 2003) : thermique, mécanique, toxique et de leurs combinaisons.

Par ailleurs, les processus issus des risques naturels sont souvent générateurs de modes communs dès leur origine, comme des défaillances technologiques voire organisationnelles ou humaines simultanément à différents niveaux sans que ceux-ci n'aient de relations physiques ou fonctionnelles directes, et les processus d'origines technologiques et organisationnelles induisent la propagation d'effets domino qui relèvent des phénomènes suivants : incendie, explosion et rejet toxique, ainsi que leurs combinaisons.

Notons enfin que du point de vue des facteurs humains, la propagation des mouvements de panique, de la rumeur, du stress et leurs conséquences organisationnelles sont également des effets notables des accidents primaires générateurs d'effet domino.

### ***2.2-2. Approches d'études des effets domino***

La littérature spécialisée dans l'étude des effets domino montre l'existence de deux approches ([Kadri et Chatelet, 2014](#) ; [INERIS, 2015](#) : l'une est théorique et l'autre est pratique).

[Laurant \(2003\)](#) qualifie la première approche de théorique et en conséquence la seconde dédiée aux outils informatiques est dite pratique.

#### ***A- Approche théorique***

L'approche théorique est composée de méthodes et démarches développées pour l'étude des cas particuliers des effets domino.

Les méthodes les plus répandues, qui sont résumées dans le tableau des pages suivantes, montrent la forte dépendance entre les méthodologies d'étude des effets domino et les codes informatiques. En effet, le tableau des pages suivantes montre que les méthodologies d'étude des effets domino sont souvent supportées par des logiciels informatiques.

**Tableau 2.3** : Méthodologie d'étude des effets domino

*Source* :(Kadri et al, 2014).

<i>Libellé (auteur)</i>	<i>Caractérisation</i>	<i>Principales étapes</i>
Domino Effect Analysis –DEA- (Khan et Abbassi, 2001)	Les caractéristiques à prendre en considération dans cette méthodologie sont: la forme et le matériau de construction de l'unité cible, le procédé industriel et les conditions opératoires, les propriétés et quantités des substances chimiques utilisées, la localisation de l'unité cible en termes de distance et le degré de liaison, la météorologie et surtout la direction dominante du vent. -	Deux niveaux composent cette procédure : - Le niveau « I » est une analyse détaillée permettant d'identifier les unités qui peuvent être considérées comme des cibles d'effets domino. Pour cela les valeurs seuils des différents effets physiques sur les équipements (cibles) sont utilisées (surpression de 0,7 atm, charge thermique de 37 kW/m <sup>2</sup> , et une vitesse de fragment supérieure à 75 m / s à condition qu'il rentre en collision avec une cible). - Le niveau « II » qu'est une analyse complémentaire exigée si les valeurs estimées de ces paramètres sont plus élevées que les valeurs seuils. A ce niveau « II », une analyse détaillée doit être faite pour vérifier l'existence d'effet domino, en utilisant les dommages potentiels de l'événement primaire et les caractéristiques de l'unité secondaire.
Maximum-Credible Accident Scenarios, MCAS, (Khan, 2001)	Cette méthodologie permet d'évaluer tous les scénarios d'accidents crédibles dans une unité industrielle.	Les étapes de cette méthodologie sont les suivantes : Sa première étape consiste à développer tous les scénarios d'accident possibles. Dans la deuxième étape, les rayons de dommage sont calculés pour chaque scénario moyennant deux indices (Khan et Abassi, 1998) : - indice de dommage d'explosion et d'incendie ( <i>FEDI</i> , Fire and Explosion Damage Index) pour les substances inflammables, - indice de dommage toxique ( <i>TDI</i> , Toxic Damage Index) pour les substances toxiques.  Dans la troisième étape, la probabilité de chaque scénario est estimée par le biais des données industrielles spécifiques (taux de défaillance des différents composants (équipements) utilisés dans l'unité concernée ou les données disponibles dans la littérature (fréquence d'occurrence de même événement dans les des conditions similaires).  Si l'accident est jugé crédible, une estimation plus précise de sa probabilité d'occurrence fera l'objet de la quatrième et dernière étape.

<p>Safety, Credible Accidents, and Probabilistic Fault Tree Analysis, SCAP &amp; PFTA, (Khan et al., 2001 ; Khan et al., 2002)</p>	<p>Il s'agit de développer une combinaison méthodologique pour une approche plus réaliste et plus fiable pour l'évaluation efficace des mesures de sécurité et de contrôle des risques.</p>	<p>Chaque étape de cette méthodologie a fait l'objet d'un développement informatique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ l'identification des dangers en utilisant les indices : <i>FEDI</i> (Fire and Explosion Damage Index) et <i>TDI</i> (Toxic Damage Index),</li> <li>○ l'évaluation quantitative des risques par : <i>MCAA</i> et <i>MAXCRED</i>,</li> </ul> <p>l'analyse probabiliste par arbre de défaillance et l'outil automatisé <i>PROFAT</i>.</p>
<p>Méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs, <b>ARAMIS</b>, (Oliviers et Bruno, 2006 ; Christian et al, 2006)</p>	<p>ARAMIS, qui permet l'identification des risques d'accidents majeurs, est fondée principalement sur l'utilisation de diagramme «nœud papillon» composé d'un arbre de défaillance et d'un arbre d'événement. L'apport majeur d'ARAMIS est de définir en précisant la structure de nœud papillon: la liste des équipements, les événements potentiels critiques et leurs conséquences. Les événements critiques ont été définis soit par une perte de confinement pour les fluides ou une perte d'intégrité physique pour les matières solides et la description du site industriel, y compris les substances chimiques utilisées, produites ou stockées.</p>	<p>Les principales étapes de cette méthodologie sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification des scénarios accidents</li> <li>- Evaluation de l'indice S relative à la cartographie de la sévérité du site industriel</li> <li>- Evaluation de l'indice M relatif à l'influence du management de la sécurité.</li> </ul>
<p>Optimal Risk Analysis, ORA, (Abassi et Khan, 2001)</p>	<p>C'est une méthodologie développée pour l'industrie pétrochimique. Les exigences de cette méthodologie sont les suivantes : l'utilisation des réservoirs de petite capacité dans le stockage des substances chimiques, l'inspection régulière et approfondie des équipements des installations, et un espace suffisant devant être maintenu entre les réservoirs de stockage (distance de sécurité), et installés dans les locaux de stockage et les zones sensibles.</p>	<p>Elle est composée de quatre étapes : identification et sélection des dangers, évaluation des risques (qualitative et probabiliste), quantification et estimation des risques.</p>

<p>Méthodologie Analytique pour l'Evaluation Quantitative des Risques industriels dus aux accidents générés par les Evènements Sismiques (Antonioni et al, 2007)</p>	<p>Cette méthodologie utilise :les données disponibles pour l'évaluation de la fréquence et la magnitude des événements sismiques ainsi que les modèles de probabilité de défaillance des équipements disponibles (courbes de vulnérabilité ou de fragilité) pour évaluer la probabilité de dommages causés aux équipements. La méthodologie est supportée par le logiciel SIG (Geographic Information System) pour faciliter l'évaluation des séquences d'événements qui sont susceptibles d'être générées par les dégâts d'un événement sismique dans une installation industrielle. Le logiciel permet également le calcul et la représentation des courbes de risque individuel et social dû aux accidents industriels déclenchés par un événement sismique.</p>	<p>L'objectif de cette méthodologie est de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Identifier les scénarios d'accident (événement secondaire) qui peuvent suivre l'événement sismique,</li> <li>○ Evaluer la crédibilité des événements accidentels,</li> <li>○ Evaluer les conséquences des scénarios possibles.</li> </ul>
<p>Méthode d'évaluation quantitative des risques générés par la foudre (Renni et al, 2009)</p>	<p>La méthodologie est spécifique aux risques générés par la foudre</p>	<p>Les principales étapes de la méthodologie sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la caractérisation des événements externes (fréquence et gravité),</li> <li>- l'identification des équipements cibles, et les scénarios de référence,</li> <li>- l'estimation de la probabilité des dommages, et évaluation des conséquences pour les événements,</li> <li>- l'évaluation de la fréquence / probabilité pour chaque combinaison d'événements.</li> </ul>
<p>Méthodologie d'Analyse Cartographique des Risques –SIGALEA- (INERIS, 2007)</p>	<p>La méthodologie SIGALEA est supportée par le logiciel SIG qui contient deux modules : module de géolocalisation des phénomènes dangereux et module d'analyse spatiale et de cartographie.</p>	<p>Cette méthodologie permet :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de réaliser la cartographie des zones d'effets des phénomènes dangereux, que doit comporter réglementairement l'Étude De Dangers (EDD) ;</li> <li>- d'évaluer l'impact d'une installation ou d'un établissement sur la cartographie des aléas d'un site PPRT.</li> </ul>

<p>Méthodologie HAZMIW (Reniers et al, 2005)</p>	<p>C'est une combinaison de l'analyse Hazop, What-If et Risque Matrix.</p>	<p>Le but de cette combinaison est de constituer un outil de méta-technique pour optimiser l'organisation des performances d'analyse des dangers dans les sites industriels. Ce dernier vise à concevoir un système de prévention des accidents dominos externe (External Domino Accident Prevention–EDAP-). L'objectif de ce dernier est d'identifier les dangers externes ainsi que l'évaluation des risques dominos externes.</p>
<p>Modélisation de la propagation de la panique (Damienne, 2005)</p>	<p>Inspirée de la modélisation de la panique des automobilistes, cette méthodologie permet d'étudier la diffusion de la panique dans une population suite aux effets domino.</p>	<p>La méthodologie s'intéresse à deux groupes de populations : la population susceptible d'être infectée (<math>Sp</math>) et la population infectée (<math>I</math>). La diffusion de la panique est matérialisée par un taux de contact et le flux de contagion qui représente la population atteinte par la panique. Cette population quitte le groupe <math>Sp</math> pour alimenter le groupe <math>I</math>. La panique se développe par effet de contact.</p>
<p>Méthodologie FREEDOM - (FREquency Estimation of DOMino accidents- (Bahman et al, 2006)</p>	<p>Cette méthodologie se focalise sur l'évaluation de la fréquence des effets domino par la simulation comportementale du système étudié.</p>	<p>Ce système est défini comme la combinaison des équipements présents dans site industriel qui sont en interaction. La simulation est basée sur les durées de vie moyenne des équipements.</p>



## ***B- Approches pratiques***

Un retour rapide sur le contenu du tableau 2.3 montre que les méthodologies décrites dans ce tableau sont caractérisées par deux faits marquants : le premier fait est que chaque méthodologie est typique à un cas particulier et le second réside dans le support informatique associé à certaines méthodologies.

En effet, les outils informatiques développés pour l'étude des effets domino sont d'une grande utilité pour la quantification des fréquences ou de la gravité de ces effets. A ce propos, un grand nombre de codes informatiques ont été développés indépendamment des méthodologies précédentes (tableau 2.4).

**Tableau 2.4** : Outils automatisés et logiciels d'étude des effets domino

Source : (Kadri et al, 2014)

Dénomination de l'outil	Caractérisation	Modules et versions améliorées
<p>MAXimumCREDible accident analysis (MAXCRED)(Khan et Abassi, 1996)</p>	<p>Ce logiciel, développé par s'intéresse à l'évaluation rapide des risques dans les industries de transformation chimique.</p>	<p>La première version de ce logiciel permet la simulation des accidents et l'estimation de leurs dommages potentiels. Il s'agit donc d'une analyse quantitative des risques qui permet de générer les différents scénarios d'accidents crédibles et quantifie les dommages qu'ils peuvent causer. Cette information peut alors être utilisée dans le développement des stratégies pour la prévention des accidents et d'atténuation leurs effets d'impacts. Vu l'intérêt du logiciel dans l'étude des effets domino, des versions d'amélioration ont fait l'objet de développements par les mêmes auteurs (MAXCRED-II et III).</p>
<p>DOMIno eFFECT (Nguyen, 2009 ; Khan and abassi, 2009)</p>	<p>Ce logiciel est codé en C++. Il se compose de six modules principaux : données d'entrée, scénario d'accident, analyse, domino, graphiques et l'interface utilisateur.</p>	<p>Chaque module est constitué de plusieurs sous-modules et des fonctions qui permet d'estimer :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Les risques d'incendie, d'explosion, intoxication et la combinaison de ces derniers ;</li> <li>○ La probabilité d'un deuxième accident qui peut être déclenché par un accident primaire ;</li> <li>○ Les scénarios de deuxième accident, leurs dommages potentiels et la probabilité de causer un troisième accident.</li> </ul>
<p>ATLANTIDE (Sabatino et al, 2000)</p>	<p>Pour évaluer les conséquences des événements accidentels qui peuvent se produire dans des sites de stockage, un logiciel ATLANTIDE a été développé.</p>	<p>L'application d'ATLANTIDE est appropriée pour le stockage de GPL et les 8 installations de transformation (les rejets liquides, la dispersion des gaz et d'autres phénomènes tels que le BLEVE et la boule de feu). Ce code utilise des arbres d'événement pour évaluer tous les scénarios possibles, depuis l'événement accidentel initial, en tenant compte des conditions météorologiques, les différentes libérations, le mode et d'autres caractéristiques typiques aux installations du site.</p>

		Le logiciel comprend quatre modules qui sont : module de génération de scénarios, module d'analyse des conséquences, module fichier et module graphique.
TORAP(TOol for Rapid risk Assessment inPetroleum refinery and Petrochemical industries)(Khan et al, 2001)	Ce logiciel peut être appliqué dans l'évaluation des risques d'accidents (incendies, explosions et les rejets toxiques) dans les raffineries pétrolières et les industries pétrochimiques.	Il est composé des modules suivants : génération des scénarios d'accident, analyse des conséquences, vérification des degrés les plus élevés d'accidents et caractérisation du scénario d'accident le plus pénalisant.
DOMINOXL(Delvosalle et al, 2002)	Ce logiciel est développé pour les zones d'équipement dangereux dans un groupe d'installations chimiques d'un site industriel.	Les zones en question sont déterminées en additionnant le nombre des effets domino primaires par installation conduisant à un facteur de dangerosité (DF). De même, les zones les plus vulnérables sont également déterminées en additionnant le nombre des effets dominos d'une installation, puis l'examen d'une installation secondaire d'un niveau de protection donné. Ce calcul aboutit à un facteur de vulnérabilité (VF).
GeOsiris(Tixier et Rault-Doumax, 2002 ;Tixier et al., 2002)	Ce logiciel est un outil de simulation des accidents industriels impliquant des effets dominos.	GeOsiris est un couplage de deux logiciels: <ul style="list-style-type: none"> <li>- OSIRIS est un Outil de SIMulation des RISques relatifs à la libération/ rejet des substances toxiques et gaz, explosions et incendies,</li> <li>- Geoconcept est un système d'information géographique (SIG) qui permet le traitement des informations géographiques.</li> </ul>
MINImization of domino eFFECT (MiniFFECT) (Lee et al,2005)	Ce logiciel permet de déterminer la position des unités ou/et installations chimiques et la position optimale afin de minimiser l'effet domino dans les installations industrielles en utilisant des approches de programmation non linéaire.	Le logiciel MiniFFECT montre la position de chaque unité en coordonnées cartésiennes. Lorsque les unités explosives sont placées dans la première étape, les $n$ unités explosives peuvent être répartir de telle manière à minimiser les effets dominos en tenant compte de taille arbitraire du site. Ce logiciel prend en compte trois principaux facteurs d'effet domino: thermique, surpression effet des missiles.

<p>DomPrevPlanning (Reniers et Dullaert, 2007)</p>	<p>Pour déterminer par ordre de priorité les effets dominos dans une zone industrielle, sur un seul ou bien plusieurs niveaux dans le site, les auteurs ont proposé un outil informatique automatisé DomPrevPlanning</p>	<p>Ce logiciel est basé sur trois documents principaux : Instrument de l'effet Domino (IDE), Manuel des figures de défaillance de la fréquence, et Guide pour l'évaluation quantitative des risques. Cette stratégie permet :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ l'analyse des risques dominos,</li> <li>○ la comparaison des installations d'une zone industrielle, et</li> <li>○ la classification des d'installations chimiques qui sont susceptibles de provoquer les effets d'intensification,</li> </ul> <p>Cette classification peut être alors utilisée pour prendre des décisions dans les zones complexes d'effets dominos et la hiérarchisation des risques.</p>
----------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### C- Commentaires et discussions des deux approches

Malgré leur usage répandu, les méthodologies et les logiciels informatiques décrits précédemment sont spécifiques à des cas particuliers. D'où leur limite majeure qui réside à l'étude partielle des effets domino (Clini et al, 2009 ; Kadri et al, 2014). Une autre limite inhérente aux outils informatiques est leurs coûts d'acquisition qui sont excessifs.

Les tableaux suivants résument les limites des principales méthodologies et logiciels développés dans la littérature.

**Tableau 2.5:** Etude comparative des méthodologies relatives aux effets domino.

**Source :** (Kadri et al, 2013).

Méthode	Domaine d'application	Objet/Principe	Limites
DEA	Industrie chimique	D'une unité à une autre si possible	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reste assujéti à la pertinence du découpage du système en unités,</li> <li>• besoin de valeurs seuils plus génériques,</li> <li>• ne prend pas en considération le facteur humain.</li> </ul>
MCAS	Industrie chimique matières toxiques et inflammables	Local à l'unité Classification des Scénarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne prend pas en considération la propagation d'effet domino inter-unités,</li> <li>• se limite à la classification des scénarios primaires sans étudier les scénarios de degré plus élevés,</li> <li>• ne prend pas en considération le facteur humain comme un paramètre qui peut influencer le processus,</li> <li>• n'explique pas le processus de génération des scénarios.</li> </ul>
SCAP	Industrie	Evaluation des risques et mesure de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• reste dépendant d'autres approches (MCAS, PFTA,...).</li> </ul>
ARAMIS	Industrie chimique et stockage	Identification des risques (nœud papillon)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne traite l'aspect d'effet domino que partiellement,</li> <li>• ne prend pas en considération les risques d'origine naturels,</li> <li>• n'intègre pas le facteur humain.</li> </ul>
Propagation de la panique	Risque naturel (Inondation)	Paniques des Automobilistes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• limitée au module de la panique, sans prendre en considération les autres facteurs qui peuvent favoriser ou modérer l'effet domino.</li> </ul>
Evaluation quantitative des risques sismiques	Risque naturel (sismique)	Evaluation de PGA (Peak Ground Acceleration)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• manque de données pour caractériser l'événement initiateur,</li> <li>• méthode analytique très générale qui n'intègre pas le facteur humain.</li> </ul>
HAZWIM	Industrie	Analyse des dangers	<ul style="list-style-type: none"> <li>• spécifique au traitement des accidents dominos externes au site industriel,</li> <li>• dépendant d'autres approches (Hazop, what-if,...)</li> </ul>
FREEDOM	Industrie	Comportement de système multi-unité, défaillance d'un équipement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• traite les effets domino qu'en interne par rapport au site,</li> <li>• ne prend en considération les autres systèmes environnant,</li> <li>• ne prend comme critère que la défaillance des composants</li> </ul>

**Tableau 2.6:** Etude comparative des logiciels relatifs aux effets domino et de leurs limites.

**Source :** (Kadri et al, 2013).

<i>Logiciel</i>	<i>Domaine d'application</i>	<i>Objet/Fonctionnement</i>	<i>Limites</i>
<i>MAXCRED</i>	Industrie de transformation chimique	Simulation et estimation des dommages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• seule la dernière version (<i>MAXCRED-III</i>) traite partiellement de la cascade d'événements.</li> </ul>
<i>DOMInoeFFECT</i>	Industrie (chimique et pétrochimique)	Simulation et estimation des risques inflammables et toxiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne traite que les scénarios inflammables et toxiques sans prendre en considération les risques naturels,</li> <li>• ne prend pas en considération le facteur humain comme des événements primaires qui peuvent influencer la chaîne d'accident.</li> </ul>
<i>ATLANTIDE</i>	Stockage de GPL et les installations de Transformation	Evènements accidentels dans des sites de stockage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• outil spécifique au risque de stockage,</li> <li>• ne traite pas proprement les effets dominos, se limite à l'étude de danger à l'intérieur de même site.</li> </ul>
TORAP	Raffineries pétrolières et les industries pétrochimiques	Risques dans les installations pétrochimiques et pétrolières	<ul style="list-style-type: none"> <li>• spécifique à l'industrie pétrolière,</li> <li>• prise en compte partielle des accidents dominos,</li> <li>• n'intègre pas les accidents d'origine naturelle et humaine.</li> </ul>
DOMINOXL	Industrie chimique	Zones / installations vulnérables, énumération des effets dominos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• se limite à traiter l'effet domino dans une seule installation,</li> <li>• ne prend pas en considération l'intensification des effets dans d'autres installations environnantes.</li> </ul>
GeOsiris	Industrie chimique et transformation	Simulation des accidents domino	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne traite que les scénarios avec substances inflammables et toxiques,</li> <li>• prend en considération les risques naturels,</li> <li>• ne prend pas en considération les facteurs humains et organisationnels.</li> </ul>
MiniFFECT	Industrie chimique	Minimisation les effets des risques dominos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne prend en compte que les unités d'une installation industrielle,</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>ne prendre pas en compte les structures environnantes et les écosystèmes.</li> </ul>
<i>DomPrevPlanning</i>	Industrie (zones industrielles)	Risques domino, classification des installations	<ul style="list-style-type: none"> <li>évaluation des effets dominos limitée l'intérieur du site industriel,</li> <li>ne prend pas en considération la propagation des effets hors sites,</li> <li>ne prend pas en considération les facteurs humains et organisationnels.</li> </ul>

Les limites évoquées dans les deux derniers tableaux nous incitent à œuvrer dans le choix d'une nouvelle méthodologie permettant l'étude systématique des effets domino. A ce propos, le modèle MADS semble être le plus adéquat. En effet, [Laurant \(2003\)](#) recommande l'usage de ce modèle qui synthétise le processus des effets domino par le triptyque « Source → Flux de Danger → Cible (SFC) » (tableau 2.7).

**Tableau 2.7** : Modélisation des effets domino par le triptyque SFC du modèle MADS

*Source* : ([Laurant, 2003](#))

<i>Source de danger</i>	<i>Flux de danger</i>	<i>Cible de danger</i>
Incendie Feux de flaque Feux de bac Jet enflammé Boilover BLEVE	Rayonnement thermique	Stockage de produits solides Stockage sous pression Stockage atmosphérique
Explosion gaz et vapeurs Explosion de poussières BLEVE	Surpression	Stockage cryogénique Equipements de chargement et de déchargement
Explosion gaz et vapeurs Explosion de poussières BLEVE	Missiles	Equipement de process Réseaux de canalisation
Fuite toxique	Nuage toxique	Opération en salle de contrôle

Vu l'intérêt que présente le modèle MADS pour l'étude des effets domino, nous présentons de manière détaillée ce modèle dans la section suivante.

#### ***D- Méthodologie MADS-MOSAR***

Pour rappel, le modèle MADS est orienté vers la modélisation du processus de danger ([Le Moigne, 1994](#)). Cette modélisation est précédée, dans un premier temps, par une représentation générale des sous-systèmes sources et cibles et, dans un deuxième temps, par une représentation des processus sources de dangers et des processus susceptibles de subir l'effet du danger.

La modélisation du processus de danger est basée sur la trilogie de MADS dénommée « Source-Flux-Cible (SFC) ». Cette modélisation est immergée dans un champ de danger qui peut influencer les sous-systèmes sources et cibles et, donc, le flux de dangers.

L'objectif principal de la méthode MADS-MOSAR est d'identifier les dysfonctionnements issus de l'entité considérée ou de son environnement, et dont les enchaînements peuvent conduire à un Événement non Souhaité, ou ENS, susceptible d'atteindre un système cible. Plus largement, cette méthode cherche à "identifier, évaluer, maîtriser, gérer les processus de danger" (Perilhon, 1996) en mettant en évidence les scénarios possibles d'accidents et en déterminant les barrières de prévention et de protection à mettre en place pour neutraliser les événements initiateurs de ces scénarios (Instn, 1996). A cette fin, la phase de modélisation est la première étape de la méthode où l'analyse des risques débute par la décomposition du système en sous-systèmes. Le découpage le plus courant est le découpage géographique (Instn, 1996), toutefois la décomposition systémique peut également être réalisée sur la base d'un découpage hiérarchique ou fonctionnel (Gardes et al,1999).

L'identification des systèmes sources de dangers est la seconde phase de la méthode où l'on cherche à identifier, pour chaque sous-système et de manière systématique, tous les éléments (matériels, humains, etc.) qui peuvent être source<sup>2</sup> de danger pour l'entité considérée (Instn, 1996).

L'identification des scénarios d'accidents est une phase plus complexe que les précédentes. Elle est composée des étapes suivantes (Perilhon, 1996):

- identification des ENS,
- représentation simplifiée sous forme de boîte noire,
- établissement des scénarios d'enchaînement d'ENS,
- présentation sous forme de pré-arbres logiques. L'identification des ENS et plus largement des processus de danger selon la méthode MADS-MOSAR consiste à identifier, pour chaque source de danger, les flux de danger issus du système source considéré et pouvant affecter un système cible. A cette fin, cette méthode propose un tableau de saisie préétabli permettant de faire figurer le chaînage événement initiateur, événement initial et événement principal.

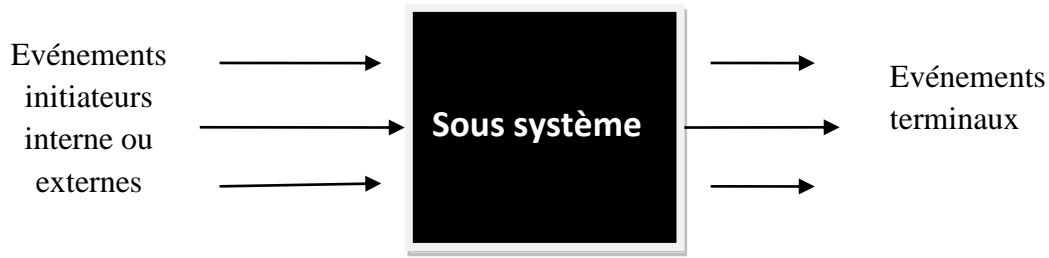
Les processus de danger identifiés sont ensuite représentés sous la forme de boîtes noires (figure 2.3), selon les règles de passage suivantes :

- chaque sous-système donne lieu à une boîte noire,
- chaque événement initiateur donne lieu à un événement en entrée de la boîte noire,
- chaque événement principal donne lieu à un événement en sortie de la boîte noire.

---

<sup>2</sup>Pour aider l'analyste dans l'identification des sources de dangers, la méthode MADS-MOSAR propose une grille de référence, non exhaustive, des types de systèmes sources de dangers.

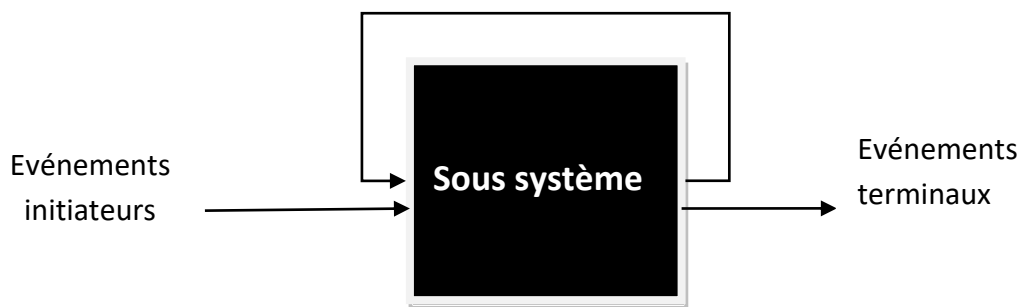




Source : (Perilhon, 1996).

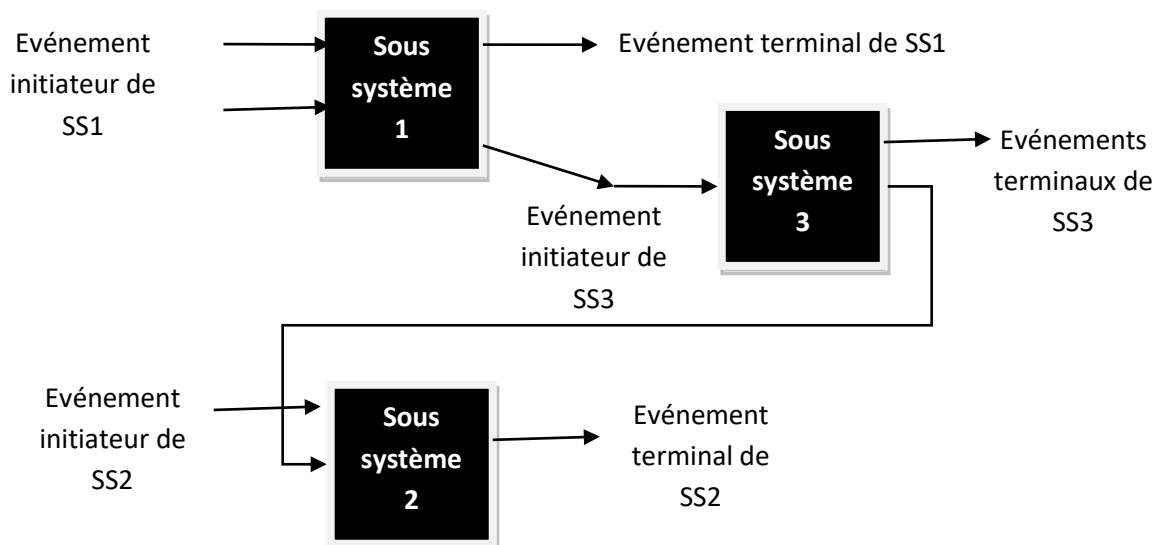
Figure 2.3: Représentation du sous-système sous forme de boîte noire.

L'utilisation de cette représentation schématique permet de visualiser les scénarios d'accidents où l'on distingue deux types de scénarios d'accidents : les scénarios d'autodestruction, également dits "scénarios courts" internes à chaque sous-système (figure 2.4) et les scénarios de destruction, également dits "scénarios longs" représentant les interférences entre plusieurs sous-systèmes (figure 2.5).



Source : (Perilhon, 1996).

Figure 2.4: Scénarios d'autodestruction.



Source : (Perilhon, 1996).

Figure 2.5: Liens entre les sous-systèmes via les boîtes noires (scénarios longs).

Les scénarios d'accidents décrits lors de la phase précédente identifient les principaux risques de l'entité considérée et sont désignés par les ENS finaux. L'objet de la présente phase est d'évaluer l'importance de chaque ENS à l'aide des méthodes d'évaluation des risques (analyse qualitative, analyse quantitative) afin d'estimer leur impact en termes de probabilité et de gravité sur les cibles possibles (INSTN, 1996). Une fois évalués, les scénarios d'accidents sont hiérarchisés par ordre d'importance en référence à une matrice des risques. L'application de cette méthode à un port algérien est fournie en annexe 2.

### **Conclusion**

*Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés en particulier sur les effets domino où la revue de la littérature montre l'existence de quatre vecteurs par lesquels un effet domino peut se propager d'une unité (ou d'un site) à une autre. Ces vecteurs sont : l'incendie, l'explosion, le rejet de matières toxiques et les autres rejets dangereux. De même, cette revue de littérature nous a permis de rappeler les principales méthodes existantes et les logiciels utilisés pour l'étude et l'analyse des effets dominos (chaînes en cascade). Un constat général sur cette revue est que ces méthodes et outils sont spécifiques pour certains types de vecteurs d'intensification. A ce propos et à notre connaissance, il n'existe pas à ce jour, une méthode générale (ou un modèle générique) qui prenne en compte les effets des accidents domino en raison de leurs complexités associées à leur caractère émergent.*

*Le modèle MADS-MOSAR, certes, constitue une alternative prometteuse pour pallier à cette contrainte de la spécificité des méthodes quant à l'étude des effets domino. Cependant, la notion de boîtes noires utilisée dans ce modèle pose également des problèmes de leurs exploitations en vue de déduire les scénarios d'accidents. S'intégrant dans ce contexte, nous avons jugé utile de contribuer modestement à solutionner ce problème de boîtes noires dans un premier temps et de proposer, dans un second temps, une méthode gouvernée par l'approche théorique qui a le mérite d'évaluer à la fois la gravité et la fréquence du risque majeur causé par l'effet domino. Ces deux contributions sont cadrées par un modèle de management dénommé SMAR qui sera détaillé dans le chapitre suivant.*

## NOUVELLES PROPOSITIONS D'ETUDE DES EFFETS DOMINO

### **Introduction**

*L'évolution technologique et la complexité des systèmes techniques du monde industriel semblent prendre une longueur d'avance sur les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques (Orfanos et al, 2011; Zaghi et al, 2005 ). Ceci est vrai surtout dans les pays non producteurs de technologie de pointe où des méthodes obsolètes sont encore utilisées par manque d'actualisation et de modernisation des moyens utilisés (Chiappori, 1996). Par ailleurs, le retour d'expérience sur les accidents survenus dans les pays en voie de développement à l'image de l'Algérie (Chettouh et al, 2016) montre que les enquêtes qui se déclenchent ne remettent pas en cause la pertinence des méthodes d'analyse des risques mais soulignent souvent des défaillances techniques et/ou humaines (Young, 2013; Vallée et al, 2012 ).*

*Certes, des enquêtes poussées sur les accidents survenus montrent que les causes profondes sont d'ordre managérial et organisationnel et donc du niveau décisionnel (Arena et al, 2010). Et pourtant ce sont les informations fournies par les méthodes d'analyse des risques qui ont servi de base à la décision (Demichela and Camuncoli, 2014).*

*L'analyse historique des accidents domino où 261 accidents impliquant les effets dominos, montre que, en plus des causes de défaillances mécaniques et des événements externes, la fréquence des accidents dominos causés par le facteur humain est relativement élevée, d'où l'importance d'intégrer ces facteurs dans l'étude des chaînes en série (Clini et al, 2009). Les méthodes disponibles dans la littérature sont limitées dans leur capacité à proposer des solutions pour gérer la complexité de ce phénomène (Bahman et al. 2010).*

*A ce propos, une nouvelle méthode de Management des risques de type « effets domino » dite Spirale de Management des Risques SMAR (Smaiah and Bahmed, 2017) proposée. Cette*

*méthode vise deux objectifs : la modélisation de l'effet domino par la théorie des graphes et le calcul des probabilités d'occurrences des effets dominos.*

### **3.1- Cadre général de nos contributions : Proposition d'un modèle dénommé SMAR**

Rappelons que la problématique inhérente aux méthodes d'analyse des risques est sa capacité à répondre aux exigences simultanées de l'identification des dangers et de l'évaluation des risques qui leurs sont associés. En effet, cette problématique émerge plus dans les domaines industriels les plus complexes (c'est le cas par exemple de la pétrochimie et le transport maritime) où les méthodes d'analyse des risques telles que l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Risques et d'Exploitation ou HAZard and OPerability (HAZOP), l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE), l'Arbre de Défaillance (AdD) se trouvent dissociées les unes des autres ; ceci nuit considérablement à l'efficacité du processus de management des risques. En outre, il existe un clivage entre les analyses des risques qualitatives et les analyses quantitatives ([Kremljak and Kafol, 2014](#)). C'est ce qui a conduit les industriels à adopter des démarches systémiques et managériales à l'image de la méthode MADS-MOSAR et Management Préliminaire des Risques (MPR).

A ce propos, nous rappelons que la méthode MPR est basée sur un processus accidentel générique permettant de canaliser les mécanismes de capitalisation et d'exploitation des connaissances relatives aux scénarios d'accident ([Mazouni, 2007](#)). Par contre, la méthode MADS-MOSAR est du type méthode intégrée ([INERIS, 2002](#)) dans le sens où elle permet de canaliser l'usage simultané des méthodes d'analyse des risques évoquées ci-dessus.

A notre avis, le mérite que possède la méthode MADS-MOSAR par rapport à la MPR réside dans sa capacité à réussir l'articulation des méthodes d'analyse des risques ce qui permet de solutionner en grande partie le problème de ces méthodes évoqué précédemment qui réside dans le déploiement de ces méthodes de manière fragmentaire et sans démarche guide ([Perilhon, 1996](#)).

Par ailleurs, signalons que cet avantage de la méthode MADS-MOSAR risque d'être masqué par la complexité et la lourdeur du déploiement de cette méthode. Afin de surmonter cette contrainte, un modèle de la Spirale de MAnagement des Risques (SMAR) appliquée aux risques des effets dominos est proposé dans cette étude ([Smaiah and Bahmed, 2017](#)).

#### **3.1-1. Rappels de base**

Il est important de rappeler auparavant que le but du modèle SMAR est d'apporter aux décideurs les éléments leur permettant de prendre la bonne décision quant à la maîtrise des risques industriels. Or, cette maîtrise dépend en grande partie de la capacité du modèle proposé à intégrer les évaluations qualitatives et quantitatives des risques ainsi que sa capacité à intégrer le facteur humain.

Avant de découvrir ces capacités du modèle SMAR, il est opportun de rappeler que le qualificatif risque d'après [Desroches \(2005\)](#) est généralement associé à la potentialité d'occurrence d'un Evènement Non-Souhaitable (ENS). Plus précisément, cette potentialité est consécutive au dépassement d'un seuil de criticité d'un risque ([Bassetto et al, 2011](#)).

La concrétisation du risque sous forme de pertes humaines, matérielles ou financières illustre les conséquences d'un accident lui-même. Ce dernier est décrit par la présence de trois événements séquentiels (OIT, 1991) : un danger, une situation dangereuse et un accident. Ce séquençement montre qu'en l'absence du danger il ne peut être identifié les événements conduisant aux situations dangereuses ; car, une situation dangereuse n'est qu'un état d'un système en présence de dangers.

Partant de ces définitions, nous pouvons déduire que le risque est la mesure de l'instabilité de la situation dangereuse et de la potentialité d'accident (Desroches, 2005).

Au mot risque sont associés des vocables divers mais les plus répondus sont les suivants (Flanagan and Norman, 1993) : analyse, évaluation et maîtrise.

Bien que ces trois termes soient associés au risque, ils traduisent en réalité les actions associées au triptyque : danger → risque → sécurité. En effet, ce triptyque illustre deux faits marquants : d'une part, la distinction entre danger et risque dans le sens où le risque est la mesure du danger et, d'autre part, le rôle primordial que joue le risque en tant que trait d'union entre les termes « danger » et « sécurité ».

Un examen plus approfondie de ce triptyque montre qu'au terme :

- « danger » est associé l'action d'identification des dangers. Cette action n'est autre qu'une analyse des risques moyennant des méthodes d'analyse des risques déjà évoquées dans la section précédente (cf. §3.4) ;
- « risque » on effectue une évaluation des risques dans le but de les hiérarchiser en fonction de leur criticité ;
- « sécurité » est logiquement associée l'action de maîtrise des risques par ordre de priorité compte tenu de leurs criticités respectives.

Le séquençement des actions (analyse → évaluation → maîtrise) montre la place importante qu'occupe l'analyse des risques dans toute étude de sécurité des installations et des sites industriels. En effet, l'exhaustivité d'analyse des risques conditionne en grande partie la pertinence de l'évaluation des risques considérée comme étant l'aide à la prise de décision. De même, la pertinence de l'évaluation des risques conditionne l'efficacité de la maîtrise des risques par le biais des barrières de sécurité matérielles et organisationnelles. En conséquence l'exhaustivité de l'analyse des risques dépend de la capacité des méthodes d'analyse des risques à réussir des évaluations qualitatives et/ou quantitatives.

Une autre importance de l'analyse des risques est également confirmée par la littérature spécialisée dans le domaine du management des risques où l'analyse des risques occupe une place de choix (Bjegra and Aven, 2015). A ce propos, nous rappelons que le management des risque est un processus de définition, d'évaluation et de la mise en œuvre des actions préventives et correctives afin d'éviter ou de corriger les conséquences du risque (Berg et al, 2008).

D'après cette définition, nous constatons que le processus de management des risques démarre avec l'analyse des risques qui permet d'identifier les dangers présents dans une organisation. Cette étape est donc capitale car elle permet au management de s'assurer que les

dépenses réalisées sont nécessaires à l'atteinte des objectifs de l'organisation par rapport à sa stratégie globale capitalisée par des « besoins de sécurité » (Smaiah and Bahmed, 2017).

Afin de confirmer l'intérêt de l'analyse des risques en management des risques en se basant sur le référentiel « besoin de sécurité », nous signalons que les activités du management des risques se résument en (Kirchsteiger, 2002) :

- une *analyse* des risques qui permet, non seulement, d'identifier les risques mais également les besoins de sécurité.
- une *conception* permettant de produire une architecture en fonction des besoins précédemment identifiés.
- un *développement* permettant d'implémenter les contrôles de sécurité pour satisfaire aux besoins exprimés.
- un *test* qui permet de tester les contrôles et de s'assurer que les décisions prises en fonction de ceux-ci réduisent effectivement les risques identifiées à un niveau acceptable.
- une *maintenance* qui permet de réexaminer les contrôles lorsqu'il y a un changement, une mise à jour ou une irrégularité.

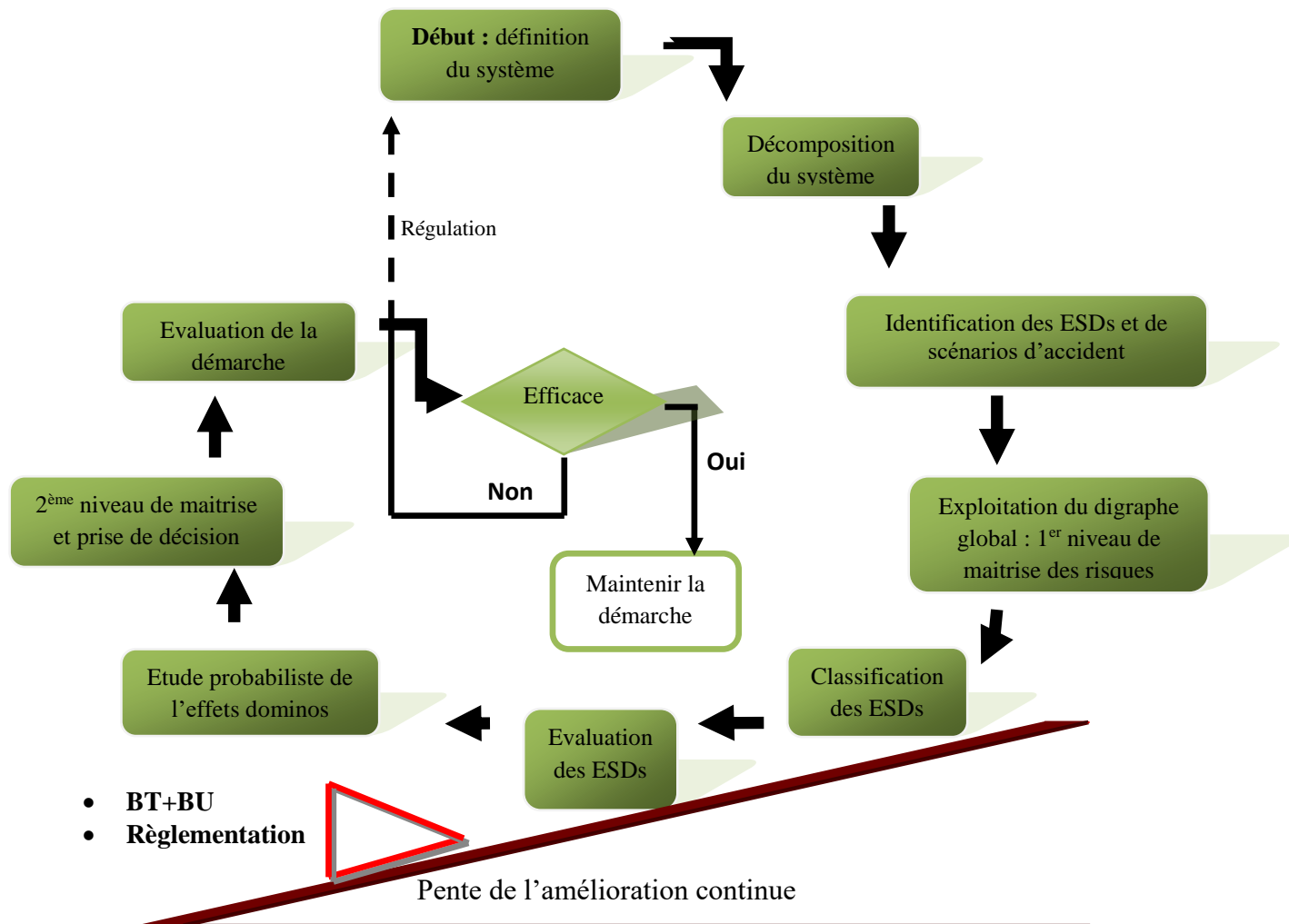
Le modèle SMAR présenté dans la section suivante permet, non seulement, de surmonter les contraintes relatives aux méthodes d'analyse des risques évoquées ci-haut mais également il s'inspire des principales activités du management des risques rappelés ci-dessus.

### **3.1-2. Présentation du modèle SMAR**

Le modèle de la Spirale de **MA**nagement des **R**isques (SMAR) reprend les activités du management des risques d'une manière plus conviviale en référence à la roue de Deming (Deming, 1993). En effet, SMAR procède d'abord à l'analyse d'un site ou une installation industrielle considéré comme étant un système. Lors de cette analyse, l'intérêt est porté sur le diagnostic des points faibles et des points forts des sous-systèmes retenus dans la décomposition du système étudié pour, ensuite, établir une approche managériale qui prenne en considération le contexte du système étudié.

Le choix de la spirale est motivé par le fait qu'elle permet de mieux structurer les différentes activités du management des risques tout en veillant à leur interdépendance sous forme de boucle, d'une part et elle permet de repérer avec simplicité les étapes à suivre dans le management des risques, d'autre part. Autrement dit, le recours à la forme spirale de management des risques est d'attirer l'attention des managers sur la nécessité d'améliorer sans cesse le plan d'action matérialisé par les barrières de sécurité.

Dans le modèle SMAR que nous proposons, la spirale symbolise le cheminement vers la solution. Nous commençons notre spirale à partir d'un point choisi sur le contour pour nous acheminer vers le centre, c.-à-d. nous procédons de l'extérieur vers l'intérieur (figure 3.1).



Source : (Smaiah and Bahmed, 2017).

Figure 3.1 : Etapes du modèle SMAR proposé.

### 3.1-3. Nécessité d'agréger certaines étapes du modèle SMAR par des méthodes appropriées

Rappelons que le modèle SMAR peut être décomposée en 3 parties :

- une première partie<sup>3</sup> relative à : la définition du système et sa décomposition, l'identification des ESDs « évènements sources de danger » et exploitation du digraphe global (1<sup>er</sup> niveau de maîtrise des risques).
- Une deuxième partie<sup>4</sup> axée sur : la classification des ESDs, l'évaluation des ESDs et étude de l'effet domino.
- Une troisième et dernière partie dédiée : au 2<sup>ème</sup> niveau de maîtrise des risques et évaluation<sup>5</sup> de la démarche.

<sup>3</sup>Cette partie est abordée par la théorie des graphes pour définir les scénarios courts et longs. Dans cette partie et après l'identification des ESDs, une modélisation graphique des scénarios courts et longs est réalisée à l'aide de la « théorie des graphes ».

<sup>4</sup>Cette partie est détaillée par une méthode inspirée de la théorie des probabilités.

<sup>5</sup>Après la prise de décision en matière de maîtrise et de contrôle des risques, une vérification de l'adaptabilité de la méthode proposée dans le domaine d'application doit être réalisée.



### 3.2- Contribution à la modélisation du triptyque SFC du modèle MADS-MOSAR par usage de la théorie des graphes

L'étape importante dans le processus de contrôle des risques et de sécurité industrielle est d'identifier les mesures de contrôle des risques. Par conséquent, l'analyse des risques doit tenir compte de la complexité du système qu'est exposé à des accidents causés par des interactions dysfonctionnelles entre les composants du système (Leverson, 2004). Dans ce contexte, l'approche systémique est la démarche qui permet d'analyser le système et de formaliser les interactions entre ses composantes.

Pour rappel, le modèle MADS-MOSAR est orienté vers la modélisation du processus de danger (Le Moigne, 1994). Cette modélisation est précédée, dans un premier temps, par une représentation générale des sous-systèmes sources et cibles et, dans un deuxième temps, par une représentation des processus sources de dangers et des processus susceptibles de subir l'effet du danger.

La modélisation du processus de danger est basée sur la trilogie de MADS-MOSAR dénommée « Source-Flux-Cible (SFC) ». Cette modélisation est immergée dans un champ de danger qui peut influencer les sous-systèmes sources et cibles et, donc, le flux de danger.

La méthode MADS-MOSAR permet de schématiser le processus des effets domino sous forme de boîtes noires. L'exploitation de ces boîtes pour la déduction des scénarii courts et longs est basée sur l'expérience des usagers de ce modèle. D'où la difficulté rencontrée par certains praticiens du modèle MADS-MOSAR non expérimentés pour la modélisation des effets dominos. Pour surmonter cette difficulté, notre proposition présente une modélisation de boîtes noires du modèle de dangers MADS-MOSAR sous forme de réseaux qui permettent une meilleure exploration du triptyque « Source-Flux-Cible (SFC) » qui interviennent dans le processus des effets dominos (Smaiah et al, 2017).

#### 3.2-1. Etapes de l'approche proposée (Modèle MADS amélioré)

L'adaptation du modèle MADS-MOSAR aux effets domino que nous proposons est matérialisée par quatre étapes explicitées ci-après.

##### A- Identification des sous-systèmes du système étudié

Cette première étape débute par une identification des sous-systèmes:

$$S = \{SS_1, SS_2, \dots, SS_n\} \quad (1)$$

Cette détermination des sous-systèmes est ensuite affinée sous forme d'une description relationnelle :

$$R_{SS_i} = \{SS_j, SS_k, \dots, SS_m\} ; \quad j \neq k \neq m \neq i \quad (2)$$

Pour illustrer cette étape, nous considérons l'exemple d'un effet domino d'un tremblement de terre où l'on retient les deux sous-systèmes :

$$S = \{SS_1 = \text{milieu urbain} ; SS_2 = \text{milieu environnant}\} \quad (3)$$



La description relationnelle de ces deux sous-systèmes est représentée par les relations suivantes :

$$R_{SS1} = \{SS_2\} ; R_{SS2} = \{SS_1\} \quad (4)$$

### B- Modélisation graphique des processus de dangers

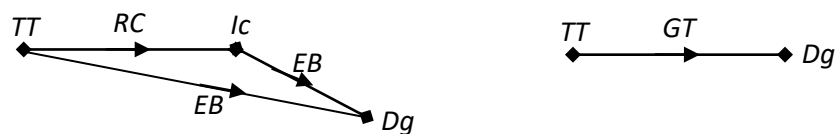
Au cours de cette étape, l'intérêt est porté sur la modélisation des processus de danger par sous-systèmes. A ce propos, dans chaque sous-système, le processus de danger est modélisé par le biais du triptyque SFC où l'on distingue trois cas de base résumés par le tableau 3.1. Pour une meilleure exploitation de ces cas de liaisons, nous proposons de représenter les trois types de liaisons sous forme de digraphes où les nœuds correspondent soit aux sources ou bien et/ou aux cibles de dangers. Les arcs orientés représentent les flux de dangers.

Tableau 3.1 : Liaisons de base du triptyque « SD-FD-CD ».

Source : (Smaiah et al, 2017).

Type de liaison	Modélisation	Digraphe correspondant
Linéarisation	$SD \rightarrow FD \rightarrow CD$	
Conjonction	$SD_i \rightarrow DF \rightarrow CD$ $SD_j \nearrow$	
Disjonction	$SD \rightarrow FD \rightarrow CD_i$ $\searrow CD_j$	

L'illustration de cette étape sur l'exemple du tremblement de terre nous permet d'obtenir les digraphes de la figure 3.2.



(a) Digraphe  $SS_1$  : « Milieu urbain »      (b) Digraphe  $SS_2$  : « Milieu environnant »

**Légende** : TT = Tremblement de Terre ; RC = Rupture de Canalisation ; Ic = Incendie ;

EB = Effondrement de Bâtiments ; GT = Glissements de Terrains ; Dg = Dégâts

Source : (Smaiah et al, 2017).

Figure 3.2 : Digraphes des sous-systèmes de l'exemple d'un tremblement de terre.

Il est important de rappeler que les digraphes de la figure 3.2 sont du type r-appliqué où r indique le nombre maximal des arcs ayant les mêmes extrémités initiale et finale (Diestel, 2005). Conséquemment, les digraphes  $SS_1$  et  $SS_2$  de la figure 3.2 sont du type 1-appliqué et

ils sont formés : de nœuds (3 pour le digraphe SS<sub>1</sub> et 2 pour celui de SS<sub>2</sub>) et d'arcs (2 pour le digraphe SS<sub>1</sub> et 1 pour celui de SS<sub>2</sub>).

Les digraphes des sous-systèmes peuvent être capitalisés sous forme de dictionnaire des nœuds suivants. Le tableau suivant illustre le cas du digraphe de la figure 3.2.

**Tableau 3.2 :** Dictionnaire des nœuds suivants des digraphes de la figure 3.2.

*Source :* (Smaiah et al, 2017).

		Nœud ( $N_{ij}$ )		Dictionnaire des suivants	
				Liste ( $DS-N_{ij}$ )	Cardinal ( $C_{ij}$ )
i = 1	Digraph SS <sub>1</sub>	j = 1	TT	Ic ; Dg	2
		j = 2	Ic	Dg	1
		j = 3	Dg	-	0
i = 2	Digraph SS <sub>2</sub>	j = 1	TT	Dg	1
		j = 2	Dg	-	0

### C- Regroupement des digraphes des sous-systèmes en un seul digraphe

Le but de cette étape est l'élaboration d'un digraphe global des effets domino. Evidemment, la fusion des différents digraphes associés aux sous-systèmes en un seul digraphe est effectuée dans le respect des relations structurelles de la figure 3.2.

Pour illustrer nos propos, cette fusion s'effectue en deux temps :

- i) Dans un premier temps, aux niveaux des nœuds des digraphes des sous-systèmes qui partagent la même dénomination des sources et/ou des cibles de dangers (cas des nœuds TT et Dg dans les digraphes de la figure 3.2).

L'algorithme de cette fusion est le suivant :

*Pour l'ensemble des digraphes des différents sous-systèmes (à répéter pour l'ensemble des nœuds de chaque digraphe) :*

- Identifier les nœuds ayant la même dénomination (cas des nœuds  $N_{11}$  et  $N_{21}$  dans le tableau 3.2 où  $N_{11}=TT$  et  $N_{21}=Dg$ ).
- Pour chacun de ces nœuds, déduire :
  - Le nombre de fois qu'il se trouve dans les sous-systèmes (2 fois pour les deux nœuds TT et Dg)
  - Le cardinal de la liste des nœuds suivants dans le digraphe global :

$$C_{Noeud}^g = \text{Max (Cardinaux des } DS-N_{ij} \text{ dans les sous-systèmes)} \quad (5)$$

- La liste des nœuds suivants dans le digraphe global :

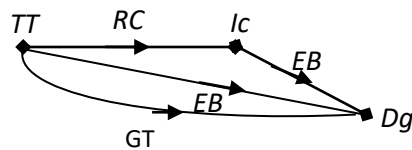
$$DS-N_{Noeud}^g = \bigcup_{C_{Noeud}^g} DS-N_{ij} \quad (6)$$

L'illustration de ces deux formules sur les nœuds TT et Dg nous permet d'obtenir :  $C_{TT}^g = 3$  ;  $C_{Dg}^g = 0$  ;  $DS-N_{TT}^g = \{Ic, Dg, Dg\}$  et  $DS-N_{Dg}^g = \{\phi\}$

Signalons qu'en référence à la théorie des graphes, le digraphe global de la figure 3.2 est du type biparti. En conséquence, les digraphes des différents sous-systèmes sont donc partiels. De même, nous remarquons que le digraphe global de la figure 2 est du type 2-appliqué car les arcs EB et GT ont les mêmes extrémités initiale et finale. Nous pouvons, d'ailleurs, déduire de l'algorithme précédent le type du digraphe global moyennant l'expression suivante :

$$r = \text{Max} (\text{cardinaux des DS-N}_i^g) ; i = 1.. \text{Nombre de nœuds fusionnés} \quad (7)$$

L'illustration de cette fusion des nœuds identiques permet d'obtenir le digraphe global représenté par la figure 3.2.



*Source : (Smaiah et al, 2017).*

**Figure 3.3 :** Digraphe global des effets dominos d'un tremblement de terre.

- ii) Dans un second temps, le digraphe global est finalisé en se référant aux relations entre les différents sous-systèmes. Afin de mieux finaliser le digraphe global, nous pouvons s'inspirer également de la théorie des graphes où l'intérêt sera porté sur la saturation des nœuds pour finaliser le digraphe global. Dans le cas de la figure 3.3, le couplage est maximum voir même parfait.

Rappelons que dans la figure 3.3, TT est une source de danger, Dg est une cible de danger tandis que Ic est à la fois source et cible de danger.

#### ***D- Exploitation du digraphe global***

Cette étape consiste en une exploitation des scénarios issus du réseau global moyennant la caractérisation des effets dominos (Kadri et Châtelet, 2013) :

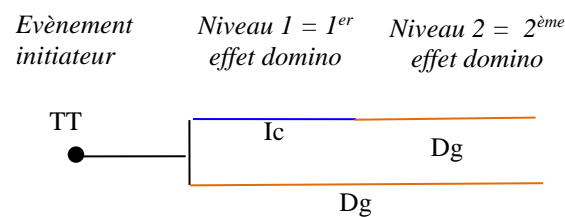
- nature de l'évènement primaire à l'origine des séquences accidentelles,
- évènements résultants qui définissent les effets dominos primaire, secondaire, ... etc.,
- sous-systèmes affectés par les effets dominos et (iv) intensification des conséquences dues aux effets dominos.

Notons que la finalité de l'analyse et la modélisation des effets dominos est bien leurs maîtrises par des mesures de sécurité appropriées. Ces mesures sont cadrées par des objectifs de sécurité. Pour une meilleure détermination du niveau de sécurité requis, nous proposons au cours de cette dernière étape de représenter le digraphe global sous forme d'arbre à plusieurs niveaux et où chaque niveau correspond aux effets dominos. C'est à ce niveau que le 1<sup>er</sup> niveau de maîtrise des risques doit être réalisé par l'allocation des barrières de sécurité nécessaires.

Pour illustrer nos propos, nous nous intéressons à l'arborescence du nœud TT (cf. figure 3.3) qui n'est pas l'extrémité d'aucun nœud. Tous les nœuds de l'arborescence sont répartis en niveaux :

$$\text{Niveau } i = \text{Distance (nœud de départ, nœuds suivants)} = i ; i \in \mathbb{N} \quad (8)$$

Afin d'illustrer nos propos, la figure 3.4 représente l'arbre correspondant au digraphe de la figure 3.3.



*Source* : (Smaiah et al, 2017).

**Figure 3.4** : Arbre des effets dominos d'un tremblement de terre.

### 3.2-2. Apports de l'approche proposée

A l'instar des résultats issus de l'exemple d'illustration, nous constatons que le modèle MADS adapté aux effets domino permet de décrire la succession des effets domino. L'usage du digraphe comme support graphique nous a permis de mieux distinguer entre les sources et les cibles de dangers, d'une part, et les flux de dangers d'autre part.

La représentation des boîtes noires sous forme de réseaux permet d'identifier les scénarios courts d'une manière plus fine et plus courte. La fusion des digraphes pour l'obtention d'un digraphe global a permis d'identifier les scénarios longs, ainsi que l'intersection des sous-systèmes, cela nous permet de déduire les chemins décrivant un effet domino.

Un autre apport de la méthode déployée dans cette étude est la prise en considération du facteur humain. A ce propos, il est important de rappeler que les recherches et études réalisées sur les effets dominos ont souvent tendance à négliger ce facteur (Zi-jian et al, 2016; Robert and Morabito, 2013; Abdolhamidzadeh et al 2010; Esteban, 2013). D'où le mérite de notre contribution.

Le digraphe global obtenu nous a permis de déduire les scénarii longs de manière aisée. L'analyse multicritères des scénarios caractérisant les effets dominos nous a permis de : déduire le scénario critique, faciliter le choix du type des barrières de sécurité, ainsi le nombre nécessaire en fonction de la criticité de chaque chemin.

D'autres intérêts de cette modélisation est la possibilité de déduire les modèles classiques d'analyse des risques (fault tree and event tree) et par voie de conséquence, la possibilité d'effectuer des traitements quantitatifs (calculs probabilistes des ENS). Mais l'intérêt majeur réside dans l'usage de ces arbres pour l'allocation des barrières de sécurité.

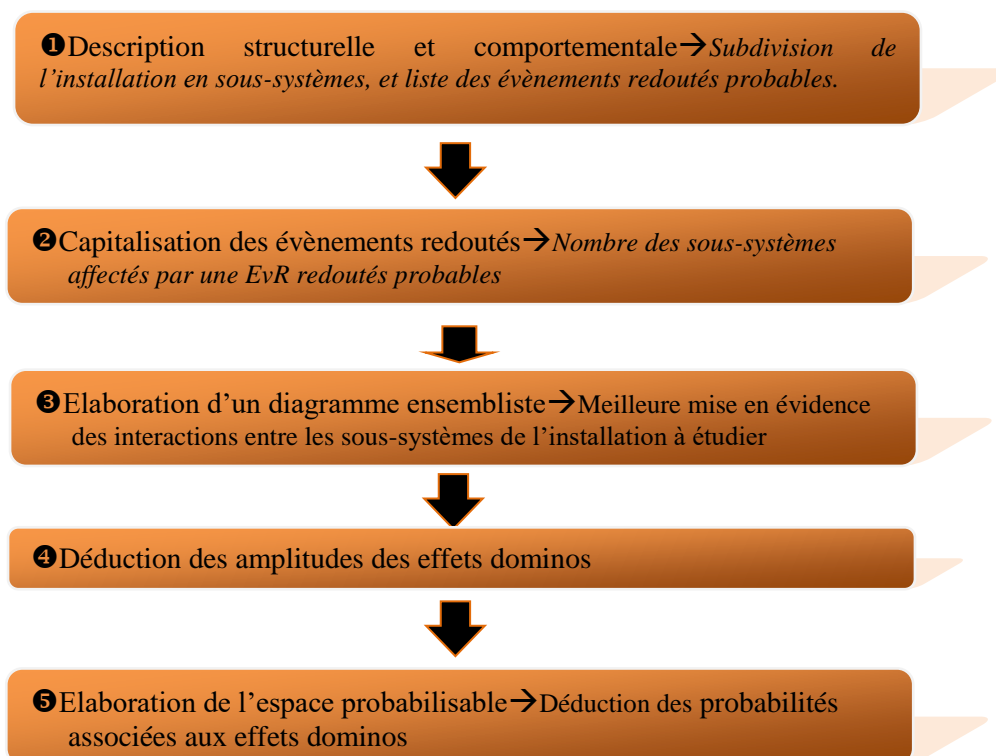
### 3.3- Contribution à la modélisation du triptyque SFC du modèle MADS-MOSAR par usage de la théorie des probabilités

Malgré l'ampleur des effets domino, ces derniers restent relativement peu étudiés par des approches purement théoriques. A ce propos, Lees (1996) évoque deux approches théoriques d'analyse des effets dominos : (i) une première approche à probabilités fixes et à conséquences aggravées (Latha et al, 1992) et (ii) une seconde à dommages fixes et à probabilités augmentées (Bagster and Pitblado, 1991).

S'intégrant dans ce contexte, l'objet de cette contribution est de tenter de gérer la complexité des effets dominos par le biais d'une approche théoriques mixte et plus précisément analytique. C'est une approche rationaliste qui a le mérite de nous fournir les moyens de relier avec clarté les interactions entre les événements causaux de l'effet domino ; ce qui nous permet de proposer une classification de ces événements considérés comme redoutés. L'usage de la théorie des ensembles ainsi que celle des graphes nous permet également de déduire les probabilités d'occurrences des effets dominos.

#### 3.3-1. Etapes de l'approche proposée

La méthode proposée est composée de six étapes synthétisées par la figure 3.5.



Source : (Réalisé par nos soins).

Figure 3.5 : Organigramme de la méthode proposée.

#### A- Description structurelle et comportementale du système étudié

Dans la figure 3.5, la première étape est une description structurelle de l'installation étudiée, considérée comme étant un système, sous forme de sous-systèmes. Ainsi, toute installation étudiée sera exprimée sous forme :

$$S = \{SS_1, SS_2, \dots, SS_n\} \quad (9)$$

Cette subdivision de l'installation est ensuite complétée par une description comportementale du système étudié sous forme d'Evènements Redoutés (EvR<sub>i</sub>) où chaque EvR est décrit, à son tour en termes d'affection des différents sous-systèmes de l'installation.

Pour cela, ces EvRs constituent un ensemble V que nous détaillerons en sous-ensembles fournis par la relation suivante :

$$V = \{V_{SS1}, V_{SS2}, \dots, V_{SSn}\} ; i = 1..n \quad (10)$$

Avec : n est le nombre de sous-systèmes de l'installation à étudier.

### B- Capitalisation des évènements redoutés

Notons que pour des raisons de forme, cette description relationnelle des EvRs est capitalisée dans cette étape par un tableau (tableau 3.3) des EvRs probables dont la dernière colonne totalise le nombre d'affection des sous-systèmes de l'installation par une EvR

$$\alpha \in [1 .. n] ; n \text{ est le nombre de sous-systèmes de l'installation à étudier} \quad (11)$$

**Tableau 3.3** : Tableau des évènements redoutés probables.

*Source : (Réalisé par nos soins).*

Symbole	Dénomination	V <sub>SS1</sub>	V <sub>SS2</sub>	V <sub>SSi</sub>	V <sub>SSi+1</sub>	Notation α
EvR <sub>1</sub>						
EvR <sub>2</sub>						
EvR <sub>3</sub>						
EvR <sub>n</sub>						

Signalons que SS<sub>i+1</sub> représente le sous-système « environnement » qui doit apparaître dans n'importe quelle installation.

L'intérêt des notes obtenues de ces différentes affections des sous-systèmes de l'installation à étudier est évident. En effet, une note de valeur « i » correspond à l'affection de « i » sous-systèmes (avec i = 1.. nombre de sous-systèmes de l'installation). Evidemment, si i=1, l'EvR en question ne déclenche pas d'effet domino. Par contre, à partir de deux affections, l'EvR en question est susceptible de déclencher un effet domino avec une gravité proportionnelle au nombre d'affection. Conséquemment, cette gravité est maximale si la majorité des sous-systèmes sont affectés par un EvR.

Conformément aux étapes de la méthode proposée, le tableau 3.3 est représenté sous forme d'un diagramme ensembliste. L'univers complet est constitué de différentes parties que nous divisons en deux ensembles :

$$V = V_{SS1} \cup V_{SS2} \cup \dots \cup V_{SSi} \cup V_{SSi+1} \quad (12)$$

$$V_G = V_{SS1} \cup V_{SS2} \cup \dots \cup V_{SSi} \quad (13)$$

L'équation (13) permet d'écrire :

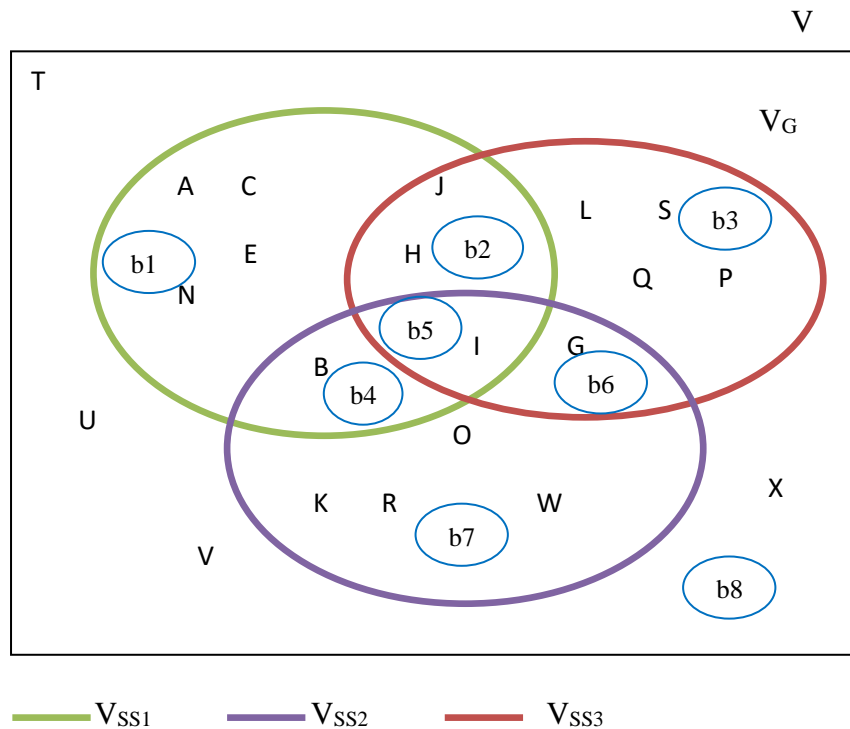
$$G = \{SS_1, SS_2, \dots, SS_i\} \quad (14)$$

Dans la suite de cette étude nous nous limitons à l'ensemble  $V_G$  afin d'exclure les EvRs d'ordre naturel ou autres qui nécessitent une recherche plurisectorielle (services de : météorologie, marine, la sûreté, ...).

La représentation du tableau 3.3 sous forme d'un diagramme ensembliste est fourni par la figure 3.6 où les sous-ensembles  $V_{SS_1}$ ,  $V_{SS_2}, \dots, V_{SS_i}$  et  $V_{SS_{i+1}}$  sont mis sous forme de diagramme de VENN.

### C- Elaboration d'un diagramme ensembliste

L'étape 3 de la méthode proposée consiste en une élaboration d'un diagramme ensembliste de VENN (Vissio, 1972) qui permet de faire ressortir les intersections possibles entre tous les sous-ensembles  $V_{SS_i}$  (où  $i = 1..$  nombre de sous-systèmes de l'installation) constituant les EvRs pouvant apparaître dans les différents sites de l'installation.



Source : (Vissio, 1972).

Figure 3.6 : Diagramme de VENN.

### D- Dédution des amplitudes des effets domino

L'étape 4 permet d'affiner la notation des EvRs en quantifiant les effets dominos possibles sur l'installation à étudier dans une échelle de 4 amplitudes de degrés 1, 2, 3, et 4. Les EvRs en décroissant d'une amplitude à une autre augmentent la gravité de l'effet domino probable.

***E- Elaboration de l'espace probabilisé pour la déduction des probabilités des effets dominos***

La dernière étape de la méthode proposée consiste en une élaboration de l'espace probabilisable  $(V, \mathcal{F}(V))$  qui permet de déduire les probabilités des effets domino. Au cours de cette étape, certaines opérations s'avèrent nécessaires : élaboration de l'univers des EvRs, calcul de la tribu  $\mathcal{F}$  engendrée par l'ensemble de ces EvRs, et enfin la construction d'une mesure pour obtenir l'espace probabilisable, ensuite c'est la déduction des probabilités d'occurrence des effets domino.

- i- *Elaboration de l'univers des EvRs* : pour cela, nous considérons l'ensemble  $V$  des EvRs probables. Notons que pour réduire le cardinal de l'univers  $V$ , nous considérons uniquement les EvR de  $V_G$  avec l'hypothèse que les EvRs affectant le  $SS_{i+1}$  (l'environnement) ne sont pas pris en considération parce que  $SS_{i+1}$  est considéré comme absorbant de tous les EvRs apparaissant dans  $G$ . Autrement dit, le sous-système environnement apparaît comme le réceptacle de tous les EvRs. En conséquence, nous aurons :

$$\text{Card } \mathcal{P}(V) = 2^{\text{card}(V_G)} \quad (15)$$

- ii- *Diagramme de VENN représentant  $V_G$*  : nous rappelons qu'un arc reliant deux sommets  $SS_i$  et  $SS_j$  signifie que  $V_{SS_i} \cap V_{SS_j} \neq \emptyset$ . La pondération des arcs par un coefficient  $k$  tel que  $k = \text{Card}(V_{SS_i} \cap V_{SS_j})$  nous permet d'obtenir le graphe de la figure 3.6.
- iii- *Tribu engendrée par  $V_G$*  : dans le diagramme de VENN de la figure 3.6, les sous-ensembles  $b_i$  ( $i = 1..n$ ) permettent d'écrire :

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(b)} \text{Card}(b_i) = \text{Card}(V_G) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{\text{card}(b')} \text{Card}(b_i) = \text{Card}(V) \quad (17)$$

Avec :  $b' = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8\}$  constitue une partition de  $V$

$b = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7\}$  constitue une partition  $V_G$

Avec l'hypothèse du non prise en compte des EvRs du sous-système environnement ( $SS_{i+1}$ ), on se limite au calcul de la tribu engendrée par  $b$ .

Cette tribu contient alors,  $2^{\text{card}(b)}$  évènements, et l'espace probabilisable est le suivant :

$$E = (V_G, \mathcal{F}(b)) \quad (18)$$

- iv- *Construction d'une mesure* permettant la déduction des probabilités d'occurrence des effets dominos par le biais des relations suivantes :

$$\mathcal{T}(B) \xrightarrow{\mathcal{P}} [0,1] \quad (19)$$



$$A \rightarrow \mathcal{P}(A) = \frac{\text{card}A}{\text{card}V_G} \quad (20)$$

### 3.3-2. Apports de l'approche proposée

La complexité du phénomène d'effet domino, d'une part, et l'ampleur de ses conséquences, d'autre part, nous ont incités à proposer sa modélisation par un outil mathématique des ensembles.

L'outil mathématique proposé permet d'illustrer son efficacité notamment le diagramme de VENN dont l'intersection doit être vide, la tribu  $\mathcal{F}$  engendrée par les EvRs et l'espace probabilisable qui permet de calculer les probabilités de l'effet domino.

Cette représentation ensembliste nous a permis d'étudier l'intersection, la réunion et les partitions de tous les diagrammes du triptyque « source de danger  $\rightarrow$  flux de dangers  $\rightarrow$  cible de danger » qui caractérisent le système étudié, ce qui permet de dégager les EvRs communs à tous les sous-systèmes qui constituent à notre point de vue une première facilité de prévoir d'où peut démarrer un effet domino sans aucune étude additive, cela signifie que l'utilisation du langage des ensembles permet une classification plus précise des EvRs quel que soit leurs nature. Cet outil mathématique constitue une approche globale mais précise de l'effet domino.

L'ensemble des résultats présentés dans la section précédente montre que la méthode proposée basée sur le couplage de la théorie des ensembles et la théorie des graphes permet de procéder de manière plus fine à l'étude des intersections entre les éléments des sous-ensembles de chaque ensemble  $V_{SSi}$ . Dans ce contexte, une seconde représentation de chaque ensemble  $V_{SSi}$  sous forme d'un digraphe, où les sommets sont les événements et les liaisons entre eux signifient le déclenchement d'un événement par un autre, permet de faire apparaître les sommets les plus critiques grâce à la notion des degrés. Ce qui nous permet de trier à l'intérieur de ces ensembles  $V_{SSi}$  les EvRs les plus dangereux sources d'effet domino. Conséquemment, l'utilisation simultanée des intersections et des degrés permet de dégager la liste réduite des EvRs pouvant déclencher les effets dominos d'amplitude plus au moins grande.

Enfin l'utilisation de la théorie des probabilités nous a permis de construire un espace probabilisé sur l'installation étudiée constitué de  $2^6 = 64$  événements déclencheurs d'effet domino et les événements générateurs des 64 événements par la base des atomes événementielles  $B = \{b_1, b_2, b_3, b_5, b_6, b_7\}$ . A ce propos, nous signalons que la notation d'atomes se justifie par le fait que l'intersection de deux quelconques des 6 événements est vide, et leur réunion donne  $V_G$ .

### Conclusion

*Dans ce chapitre, nous avons abordé le problème de la modélisation de l'effet domino. Pour solutionner ce problème, nous avons proposé une adaptation du modèle de danger MADS cadré par le triptyque SFC.*

*Le mérite de cette adaptation est la prise en considération des facteurs humains et organisationnels comme des paramètres qui peuvent initier, influencer ou aggraver les effets domino. Les supports graphiques retenus permettent de mieux capitaliser cette prise en considération de ces paramètres.*

*Les apports multiples de la méthodologie suggérée pour la modélisation des effets domino sont discutés dans cette étude et d'autres apports peuvent être envisagés. C'est le cas, d'ailleurs, de la transformation du digraphe global sous forme d'un réseau probabiliste où chaque flux de danger est quantifié par un couple de probabilité et de durée : sa probabilité d'occurrence et la durée de déclenchement de l'effet domino au niveau des cibles qui lui sont associées dans le réseau.*

*Ceci nous permet de déduire d'une autre manière le scénario critique et de valider, par voie de conséquence, l'approche multicritères utilisée dans cette étude.*

*Par ailleurs, l'approche théorique abordée dans la deuxième partie de ce chapitre a le mérite d'étudier l'effet domino avec une vision inspirée de la théorie des ensembles et des graphes qui sont complémentaires. Indépendamment des résultats obtenus et des apports incontestables de notre approche, des efforts de recherche sont encore nécessaires pour enrichir cette approche notamment par la prise en considération du facteur temps où le phénomène d'effet domino peut être modélisé comme un système dynamique qui prenne en compte, non seulement, la dépendance des paramètres physiques mais aussi d'autres réalités caractérisant le phénomène telles que : le système d'intervention/mitigation, le facteur humain et organisationnel, la logistique, et aussi, l'intervention (matérielles et humaines) en temps réel.*

## *APPLICATION DES PROPOSITIONS D'ETUDE DES EFFETS DOMINOS AU PORT DE BETHIOUA- ALGERIE*

### ***Introduction***

*Dans notre étude, l'évaluation des risques est un processus qui consiste à évaluer les risques pesant sur la sécurité des personnes, les installations portuaires, les navires et l'environnement marin. Le port est un lieu de travail complexe où se croisent plusieurs types d'activités qui engendrent, à leur tour, plusieurs risques en dehors de ceux provenant des accidents majeurs et par la suite des effets domino dont les conséquences seront dévastatrices.*

*En Algérie, et au niveau des terminaux, les risques sont de type incendie, explosion, pollution marine et/ou atmosphérique, dégâts humaines, échouage des navires, risque de pilotage, risque de collision... La combinaison entre au moins deux accident provoque début d'un effet domino.*

*Alors, dans ce chapitre, il sera question de l'application des contributions proposées dans le chapitre précédent. Cette application est faite au niveau du port de commerce algérien Bethioua dont son activité principale est le chargement, le déchargement et le transport des hydrocarbures. Les résultats obtenus seront les réponses de la problématique principale de recherche posée au niveau de l'introduction générale.*

*Rappelons que'en Algérie, les ports de commerce sont ceux de Skikda , Béjaya, Alger, et Bethioua. Ce dernier reste toujours le plus grand et la source principale de l'économie nationale, d'où réside notre choix d'application, avec perspective de généralisation sur les autres ports Algériens.*

## 4.1- Présentation du port étudié

### 4.1-1. Situation géographique

Situé à sept kilomètres à l'Est du port d'Arzew, le port de Bethioua est une construction récente (1975-1978). Il constitue un élément essentiel dans la chaîne d'expédition de GPL et il a connu les premiers chargements en 1978. A vocation essentiellement gazière, ce port n'en assure pas moins des transbordements d'autres produits tels que le GNL, le Condensât et les produits raffinés du pétrole.

Le port est protégé par un brise-lames de 2,2 kilomètres et de deux jetées de 01 kilomètre chacune, totalisant un plan d'eau de 192,5 hectares. Il dispose d'un terre-plein de 36 hectares et de 10 postes de chargement totalisant 4520 mètres avec des profondeurs de 13,5 à 23,5 mètres adaptés aux gros tonnages.

L'ensemble de ces installations est complété par trois postes en mer ouverte et de deux bouées S.P.M pour les V.L.C.C chargeant jusqu'à 300 000 tonnes. La figure 4.1 montre le grand port de Bethioua.



Source : (Google Earth, 2016).

Figure 4.1: Le port de Bethioua.

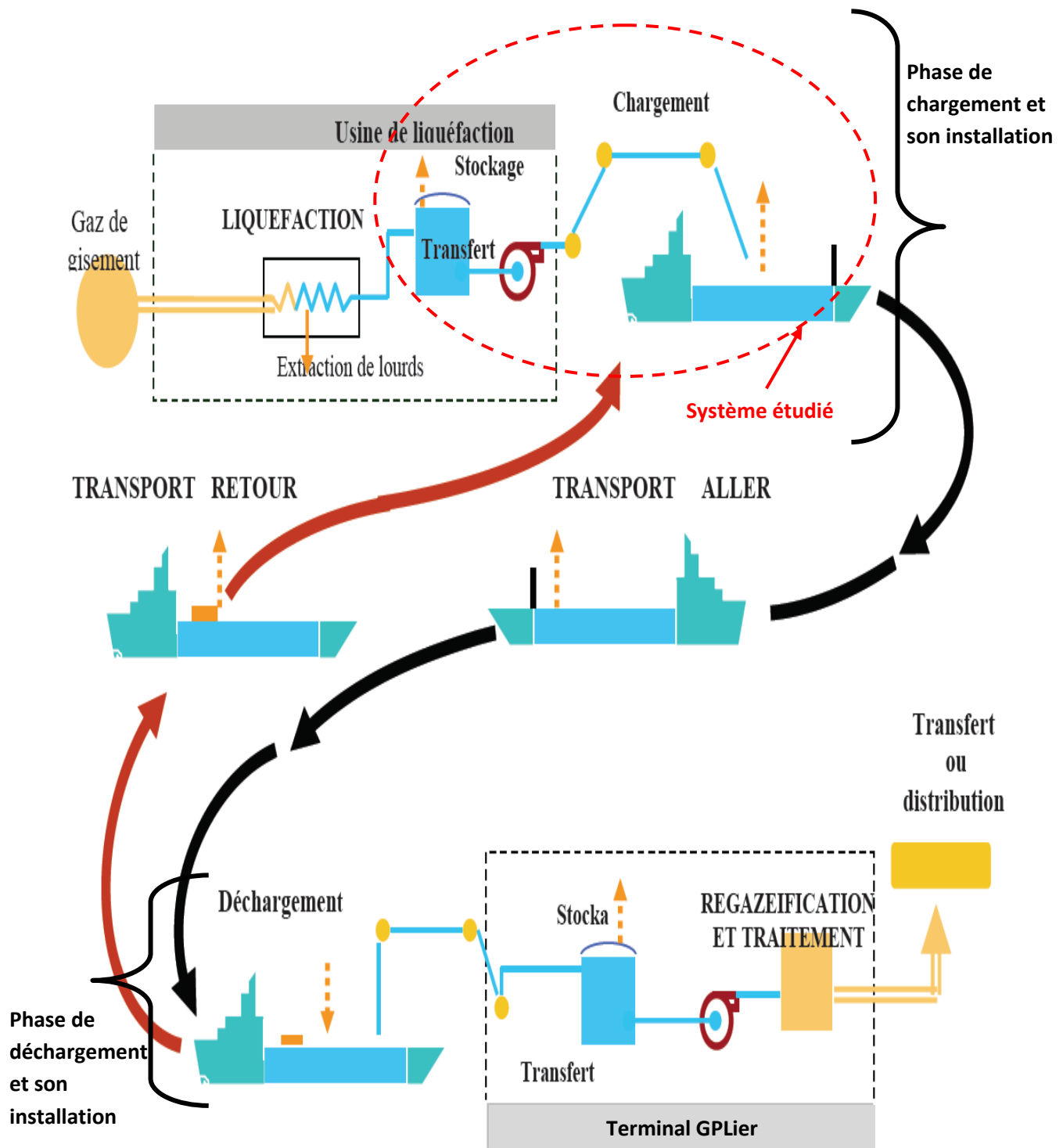
#### ***4.1-2. Description de l'activité industrielle du port***

Notre étude est appliquée à un terminal au niveau du port de Bethioua. Le fonctionnement principal de ce terminal est de charger les produits GNL/GPL, des bacs de stockage vers les navires citernes par le biais des bras de chargement.

Les manières de segmenter le contexte sont multiples mais il faut remarquer que pour un découpage donné définissant le système à analyser, le reste du contexte se trouve dans l'environnement du système. Ainsi, quelque soit la situation de la frontière retenue entre le système et son environnement, la somme des deux redonne toujours l'ensemble du contexte.

Le système le plus dangereux dans ce contexte est l'installation de chargement de GPL/GNL, elle sera donc le système sur lequel va porter l'analyse.

La figure 4.2 montre la procédure complète de l'opération, c'est-à-dire le chargement, le transport et puis le déchargement du produit GPL/GNL.



Source : (EPA, 2015).

Figure 4.2 : Le système étudié.

#### 4.2- Evaluation des risques associés à l'activité industrielle du port étudié

Dans le but de la réalisation d'une évaluation efficace des risques, quatre (4) niveaux de probabilité (fréquence) ont été mis en place avec quatre (4) niveaux de gravité (Bouzaher



et al, 2015). Pour chaque catégorie, et selon les incidents signalés, sont affectés par des indicateurs appropriés qui rendent le processus d'évaluation plus clair avec une détermination précise des priorités.

#### **4.2-1. Evaluation globale des risques liés à la manœuvre portuaire**

La réalisation d'une telle matrice d'évaluation se fait à travers 2 étapes principales (Bouzaher et al, 2015):

- **1<sup>ère</sup> étape** : Les priorités sont identifiées et mises par rapport à la synthèse des évaluations individuelles de chaque risque.
- **2<sup>ème</sup> étape** : L'impact (conséquence) de chaque facteur de risque sur chaque risque est analysé et évalué en conséquence afin de modéliser la relation entre chaque facteur de risque et les risques identifiés. Cela, aidera à apporter une méthode facile pour montrer clairement et facilement, d'une première vue, où sont les grandes priorités en fonction de l'atténuation du risque lié à la manœuvre dans les ports.

La criticité des risques est calculé sur la base de la probabilité d'occurrence (P) et la gravité (G) qui sont évaluées sur la base du jugement d'experts par rapport au retour d'expériences (REX) sur les 136 incidents survenus, dans les ports algériens, lors des manœuvres des navires, entre 1988 et 2014 (DMMP,2014).

#### **4.2-2. Relation entre les conséquences et les accidents**

La fréquence et les conséquences possibles de tels événements, justifie une analyse préliminaire, y compris un examen de ces 136 événements qui se sont produits lors de la manœuvre d'accostage des navires dans les ports algériens. Pour chaque événement, nous avons identifié le facteur le plus important.

La figure 4.3 ci-dessous, montre la relation matricielle entre les facteurs et les risques. Cette répartition est effectuée sur la base de quatre facteurs principaux, qui sont directement impliqués dans l'exploitation des navires dans les ports à savoir : « Humain », « Moyens », « Environnement » et « Management ».

		RISQUES				
		Heurts / Collision	Incendie/ Explosion	Echouement	Décès/ Blessures	Pollution
FACTEURS	Erreurs de pilotage	A	B	C	A	C
	Défaillances remorqueurs / pilotines	B	C	C	B	C
	Défaillances des équipements et installations portuaires	A	B	B	C	C
	Avaries du navire/ Erreurs des équipages	B	B	B	A	B
	Conditions météorologiques	A	C	B	B	A
	Lacunes organisationnelles	B	C	B	B	A

Source : (Bouzaher et al., 2015).

Figure 4.3 : Relation matricielle entre les risques et les facteurs.

Il est clair, à partir de cette évaluation que le facteur humain a une grande influence sur la manœuvre d'accostage des navires dans des conditions de sécurité optimale.

En raison de la configuration de la coque, la nature et la puissance de la machine et de l'efficacité de l'appareil à gouverner, chaque navire possède des caractéristiques de manipulation manœuvrière uniques. Le temps de réaction de la machine et du gouvernail sont directement associés à la taille du navire. En général, plus le navire est grand, plus la distance d'arrêt, la distance pour modifier le cap ou le temps pour stabiliser le navire seront plus considérables. Chaque action doit être planifiée à l'avance et pleinement prise en compte pour obtenir les résultats escomptés.

La rentabilité d'un navire exige de le faire fonctionner à pleine charge ou aussi près que possible de sa capacité maximale de chargement.

D'autre part, les caractéristiques limitées des ports algériens par rapport aux profondeurs des plans d'eau, ainsi que la taille des quais disponibles, sont un véritable obstacle pour l'accostage de certains navires.

#### 4.2-3. Discussion

La conception d'une matrice d'évaluation des risques liés à la manœuvre portuaire efficace nécessite des indicateurs clairs, appropriés et harmonisés (Bouzaher, 2016). Ces indicateurs sont étroitement liés avec les scénarios d'accidents. Ils sont également appropriés aux caractéristiques des ports algériens et les profils spécifiques des principaux acteurs. Ceci est important, car des solutions et des recommandations efficaces dépendent fortement sur ces aspects.



Prenant l'aspect des scénarios d'accident, les risques de manœuvre listés dans le tableau 2.2 (chap2) peuvent être considérés comme des événements initiaux qui conduisent à un enchaînement des événements résultant des conséquences catastrophiques. Pour cela une étude complémentaire qui analyse des effets dominos au niveau des ports algériens est suggérée dans la suite de ce chapitre.

#### **4.3- Modélisation des effets domino par la théorie des graphes**

Pour rappel parmi les méthodes utilisées pour les études des effets dominos le modèle de danger MADS qui permet de schématiser le processus des effets dominos sous forme de boîtes noires. L'exploitation de ces boîtes pour la déduction des scénarii courts et longs est basée sur l'expérience des usagers de ce modèle. D'où la difficulté rencontrée par certains praticiens du modèle MADS non expérimentés pour la modélisation des effets dominos. Pour surmonter cette difficulté, notre contribution est basée sur une modélisation de boîtes noires du modèle de dangers MADS sous forme de réseaux qui permettent une meilleure exploration du triptyque « Source-Flux-Cible (SFC) » qui interviennent dans le processus des effets domino.

L'amélioration du modèle MADS proposée porte justement sur ses boîtes noires qui doivent être substitués par une représentation graphique plus pertinente : par réseaux où les nœuds correspondent soit aux sources ou bien aux cibles de dangers et les arcs qui les séparent correspondent aux flux de dangers.

La modélisation par réseaux des scénarii courts et longs dans le port pétrolier de BETHIOUA est réalisée en quatre étapes détaillées ci-après.

##### ***4.3-1. Décomposition du système***

###### ***A. Choix de décomposition***

Dans le cas de l'installation de chargement du GPL, ceci conduit à 3 sous-systèmes plus les deux sous-systèmes de l'Environnement et de l'Opérateur :

- **SS 1** : Bac de stockage et ses équipements
- **SS 2** : La pompe et le poste de chargement
- **SS 3** : Navire citernes et ses équipements.
- **SS 4** : Opérateur.
- **SS 5** : Environnement.

Pour l'environnement spécifique directement lié à l'installation on trouve, la plateforme industrielle comprend une concentration élevée de complexes pétrochimiques et de raffinage à haut risque (05 complexes de liquéfaction, une raffinerie, un complexe de production de méthanol et résines, un complexe d'ammoniac, etc.), une centrale électrique de capacité 960MV, six unités de production (Hélium, Azote, engrais liquides, gaz industriel, emballage...), un réseau de pipe provenant des champs pétrolifères de Hassi Messaoud et Hassi Rmel et un ensemble d'unités de prestation de service dans les domaines de maintenance industrielle, de génie civil et de formation de personnel.

### B. Contextualisation topologique des Sous-systèmes:

Les relations entre ces sous-systèmes sont les suivantes :

$$\begin{cases} R_{SS_1} = \{SS_2, SS_3, SS_4, SS_5\} \\ R_{SS_2} = \{SS_1, SS_3, SS_4, SS_5\} \\ R_{SS_3} = \{SS_1, SS_2, SS_4, SS_5\} \\ R_{SS_4} = \{SS_1, SS_2, SS_3, SS_5\} \\ R_{SS_5} = \{SS_1, SS_2, SS_3, SS_4\} \end{cases}$$

Notre espace topologique est constitué par les données de la figure 4.4 (le port de Béthioua), dans ce port nous isolons pour les besoins de la décomposition la jetée n°1, où a accosté le navire Rhoudh Elfares, le 12 mai 2011 vers 9h pour un chargement de GPL :

- le SS<sub>1</sub> est en terre ferme à savoir les bacs de stockage,
- es trois autres sous-systèmes (SS<sub>2</sub>, SS<sub>3</sub>, SS<sub>4</sub>) baignent dans la jetée avec la remarque très importante qu'ils sont typologiquement dans un espace très réduis, et il y a même plus, le SS<sub>4</sub> à l'intérieur du SS<sub>3</sub>.



Source : (Google Earth, 2016).

Figure 4.4 : Décomposition des sous-systèmes.

#### 4.3-2. Identification des ESDs et des scénarios d'accident

##### A. Identification des ESDs

Pour rappel, les accidents probables dans un port à hydrocarbures sont : Incendie, Explosion, Pollution, et Dégâts humaines. L'évaluation des risques débute avec le repérage des Evènements Sources de Dangers (ESDs) dans les scénarios d'accident retirés avec l'assistance du personnel spécialisé au niveau du port de Bethioua. Le tableau ci-dessous a été établi à partir des données de bilan d'accidents durant 3 ans (de 2011 à 2013).

**Tableau 4.1:** Liste des ESDs des scénarios d'accident.

*Source:* (EPA, 2015).

N°	DSEs	Accident scenarios			
		Pollution	Fire	Explosion	Human Casualties
01	Shock	✓	✓	✓	
02	Human error	✓	✓	✓	✓
03	Corrosion	✓	✓	✓	
04	Wear	✓			
05	Break of the loading arms	✓	✓		
06	Connection error	✓	✓	✓	
07	Sabotage	✓	✓	✓	
08	Level detectors failure		✓	✓	✓
09	Faulty electric grounding		✓	✓	✓
10	Product leak	✓	✓		
11	Leakage	✓	✓	✓	
12	Fire nearby			✓	
13	Valves failure			✓	
14	Suppression			✓	
15	Faulty degassing	✓		✓	
16	Earthquake, storm, thunderstorm	✓	✓		
17	Worn or rigid mooring line				✓
18	Wear of scales				✓
19	Tiredness				✓
20	Lack of training				✓
21	Dangerous context				✓
22	MR diminution	✓	✓	✓	
23	Thermal flow		✓	✓	
24	Vessel movement	✓			
25	Filling error	✓			

Pour le risque de pollution, les résultats ci-dessus montrent que sur un total de 25 ESDs, 14 ESDs générant la pollution. Si l'on considère l'équiprobabilité d'occurrence des ESDs, le pourcentage d'occurrence du risque de pollution est de 56%. Cette valeur est considérée comme non tolérable car à long terme le port étudié sera exposé à une pollution dont les conséquences sont irréversibles à la fois sur les milieux écologiques que l'environnement marin.

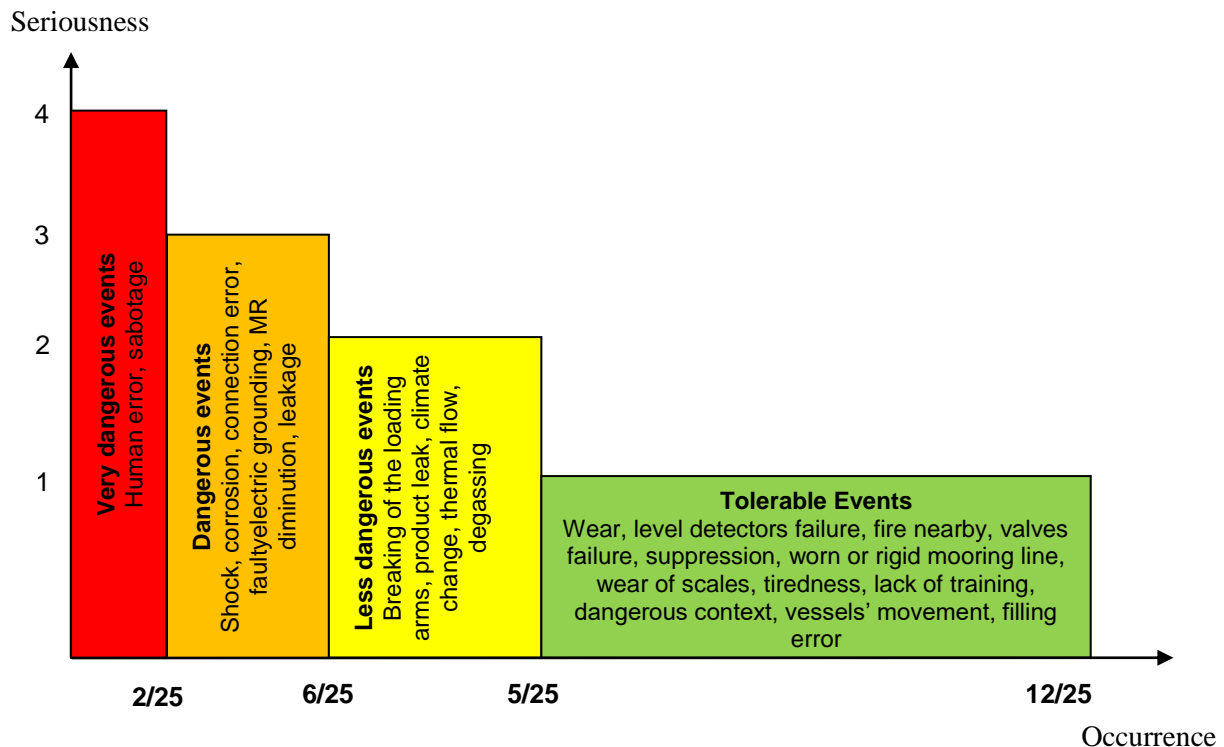
Les risques d'incendie et d'explosion viennent en seconde position en termes de pourcentage d'occurrence (52%). A l'origine de l'occurrence de ces deux risques figurent 13 ESDs (cf. tableau 4.1). Ce pourcentage montre le lien étroit entre les occurrences des incendies et les explosions. En effet, souvent un incendie dans un site industriel provoque une explosion et vice-versa.

Enfin, le tableau 4.1 montre que pour le risque de dégâts humains, le personnel du port étudié est exposé à des accidents dont l'occurrence est plus réduite que les risques précédents (32%).

Ces ESDs sont ensuite hiérarchisés en ordre croissant de leur criticité. Cette hiérarchisation est matérialisée grâce à une grille de criticité des risques à quatre niveaux (Figure 4.5).

Dans cette grille, l'axe vertical représente la gravité occasionnée par l'avènement des ESDs. L'échelle de cette gravité est échelonné du tolérable ( $G = 1$ ) au catastrophique ( $G = 4$ ).

L'axe horizontal représente les fréquences d'occurrences des ESDs. Pour rappel, ces occurrences sont aléatoires mais les fréquences d'apparition de certains d'entre eux sont plus grandes que d'autres. La hiérarchisation des ESDs selon leurs fréquences d'occurrence est réalisée dans cette étude en référence au retour d'expérience sur les accidents majeurs survenus dans les ports algériens et dans le monde.



Source : (Smaiah and Bahmed, 2017).

Figure 4.5 : Amplitudes des effets domino de l'exemple d'application.

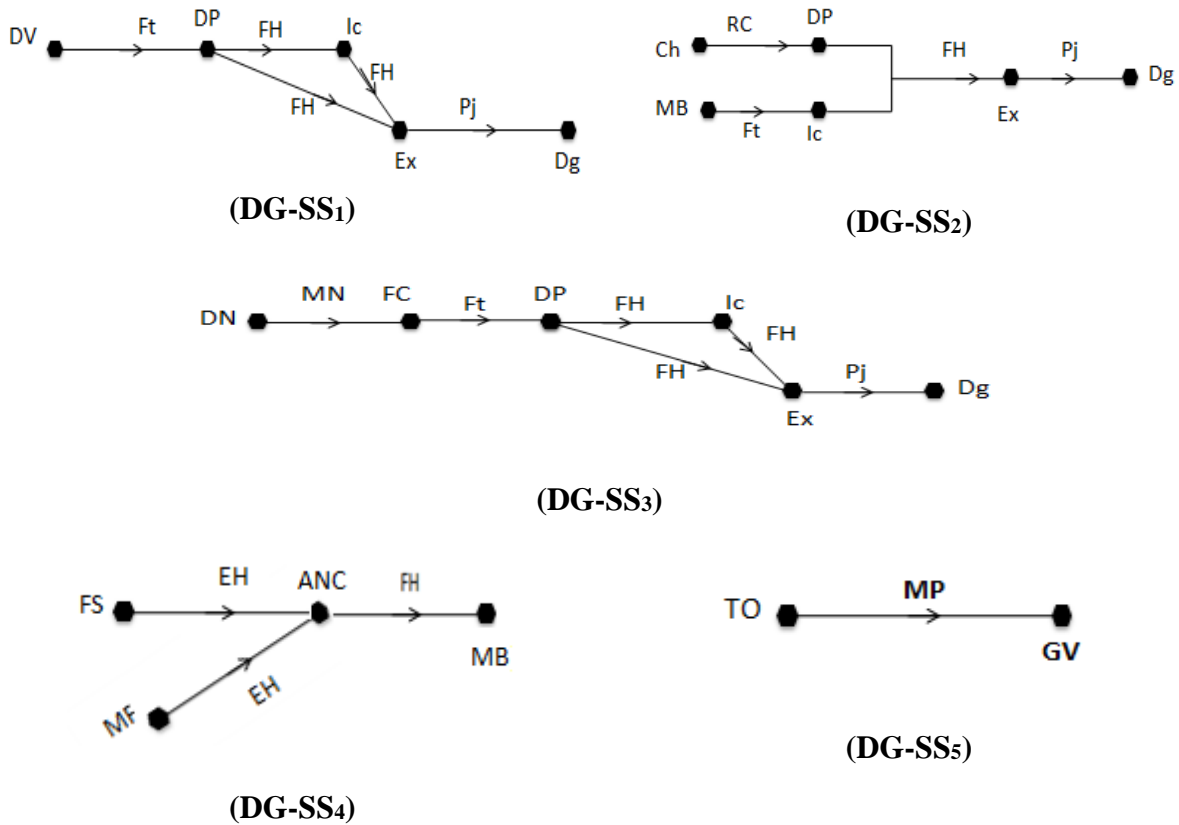
D'après la figure 4.5 on distingue 4 catégories de classification des ESDs (Smaiah and Bahmed, 2017) :

- Catégorie 1 dite *tolérable* caractérisée par la facilité d'endiguer les effets des ESDs du fait qu'ils ne causent qu'un seul accident (pollution, incendie, explosion, ou dégâts humains).
- Catégorie 2 dite *dangereuse* matérialisée par l'occurrence des couples d'accidents. Dans ce contexte, trois couples d'accidents ont été identifiés :
  - o Couple (Pollution, Incendie) identifié trois fois et dont les causes sont : rupture des bras de branchement, écoulement de produit et catastrophes naturelles ;
  - o Couple (Pollution, Explosion) identifié une fois pour cause d'un mauvais dégazage ;
  - o Couple (Incendie, Explosion) identifié également une fois pour cause d'un flux thermique.

- Catégorie 3 qualifiée de *très dangereuse* matérialisée par l'occurrence séquentielle de trois d'accidents. Dans ce contexte, deux triplets d'accidents ont été identifié :
  - o Triplet (Pollution, Incendie, Explosion) identifié cinq fois et dont les causes sont : choc, corrosion, erreur de branchement, fuite de toute nature et diminution des résistances des matériaux ;
  - o Triplet (Incendie, Explosion, Dégâts humains) identifié une seule fois pour cause de la mauvaise mise à terre.
- Catégorie 4 considérée comme *catastrophique* pour cause d'occurrence séquentielle de quatre accidents. Dans ce contexte, un quadruplet d'accidents (Pollution, Incendie, Explosion, Dégâts humains) est identifié pour causes : de sabotage et d'erreurs humaines.

**B. Modélisation des processus de dangers**

La modélisation des processus de dangers permet d'obtenir les digraphes des cinq sous-systèmes qui sont fournis par la figure 4.6.



Source : (Smaiah et al, 2017).

Figure 4.6 : Digraphe des sous-systèmes de l'exemple d'application.

Cette représentation graphique remplace les 5 boîtes noires des mêmes 5 sous-système étudiés par la méthode MADS-MOSAR dans son étape « identification des scénarios d'accident » - module A- (Smaiah et Benharket, 2011), c'est dans cette représentation graphique que réside l'intérêt d'améliorer la méthode MADS-MOSAR par la substitution des boîtes noires par des graphes orientés inspirés de la théorie des graphes.

Un autre intérêt de cette représentation graphique, c'est de donner une spécificité à tous les ESDs probables cités dans le tableau 4.1, alors ces ESDs devront ensuite répartis en trois types : Source, Flux et Cible de danger.

D'autres évènements sont rajoutés dans la figure 4.6 selon le besoin de notre étude de cas et en fonction de notre décomposition systémique.

Toutes les abréviations citées dans la figure 4.6 sont résumées par le tableau 4.2.

**Tableau 4.2** : Signification des abréviations citées dans la figure 4.6.

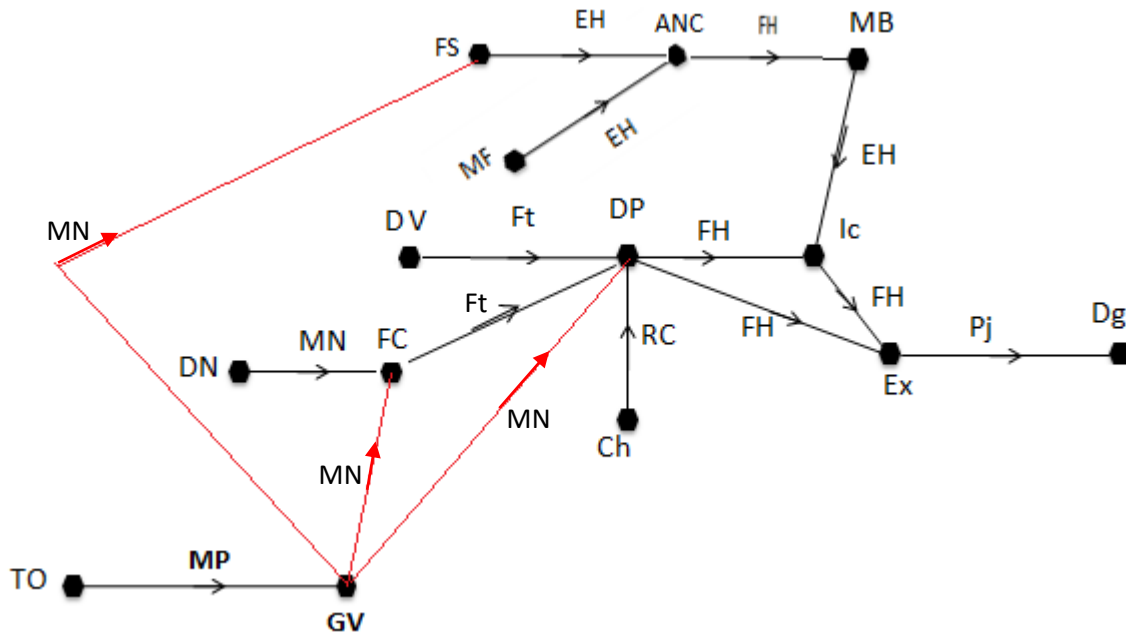
*Source* : (Smaiah et al, 2017).

<i>Sous-système</i>	<i>Source et/ou cible de danger</i>	<i>Flux de danger</i>
SS <sub>1</sub>	<b>DV</b> = Dysfonctionnement des Vannes <b>DP</b> = Diversement de Produit <b>Ic</b> = Incendie <b>Ex</b> = Explosion <b>Dg</b> = Dégâts	<b>Ft</b> = Fuite <b>FH</b> = Flux tHermique <b>Pj</b> = Projectiles
SS <sub>2</sub>	<b>Ch</b> = Choc <b>MB</b> = Mauvais Branchement <b>DP</b> = Diversement de Produit <b>Ic</b> = Incendie <b>Ex</b> = Explosion <b>Dg</b> = Dégâts	<b>RC</b> = Rupture de Canalisation <b>FH</b> = Flux tHermique <b>Pj</b> = Projectiles
SS <sub>3</sub>	<b>DN</b> = Déséquilibre du Navire <b>FC</b> = Fissure de la coque <b>DP</b> = Diversement de Produit <b>Ic</b> = Incendie <b>Ex</b> = Explosion <b>Dg</b> = Dégâts	<b>MN</b> = Mouvement du Navire <b>Ft</b> = Fuite <b>FH</b> = Flux tHermique <b>Pj</b> = Projectiles
SS <sub>4</sub>	<b>MF</b> = Manque de Formation <b>FS</b> = Fatigue & stresse <b>ANC</b> = Action Non Conforme <b>MB</b> = Mauvais Branchement	<b>EH</b> = Erreur Humaine <b>FH</b> = Flux tHermique
SS <sub>5</sub>	<b>TO</b> = Tempête&Orage <b>GV</b> =Grandes Vagues	<b>MP</b> = Mer Perturbée

### *C. Fusion des digraphes en un seul digraphe*

L'application de l'algorithme présenté dans la section 3.2-1-C du chapitre3 permet de fusionner tous les nœuds dits identiques (figure 4.7).

Le digraphe global est ensuite complété par action sur le nœud GV qui n'est pas saturé compte tenu des relations entre les différents sous-systèmes (cf. l'expression  $R_{SS5}$  dans la relation 9).



Source: (Smaiah et al, 2017).

Figure 4.7 : Digraphe global des effets dominos de l'exemple d'application.

Par application de la relation (7), nous remarquons que le digraphe global de la figure 4.7 est du type 3-appliqué car le cardinal du dictionnaire des nœuds suivants du nœud GV est égal à trois.

A partir de ce digraphe global, nous déduisons les scénarios regroupés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Scénarios associés au digraphe de la figure 4.7.

Source: (Smaiah et al, 2017).

Scenario 1 = MF-ANC-MB-Ic- Ex-Dg	Scenario 7 = DN-FC-DP- Ex-Dg
Scenario 2 = DV-DP-Ic- Ex-Dg	Scenario 8 = TO-GV- FC-DP-Ic- Ex-Dg
Scenario 3 = DV-DP-Ex-Dg	Scenario 9 = TO-GV- FC-DP-Ex-Dg
Scenario 4 = Ch-DP-Ic- Ex-Dg	Scenario 10 = TO-GV-DP-Ic- Ex-Dg
Scenario 5 = Ch-DP-Ex-Dg	Scenario 11 = TO-GV-DP-Ex-Dg
Scenario 6 = DN-FC-DP-Ic- Ex-Dg	Scenario 12 = TO-GV-FS- ANC-MB-Ic- Ex-Dg

En se basant sur les caractéristiques des effets dominos, l'analyse de ces scénarios est résumée par le tableau suivant.

Tableau 4.4 : Synthèse de l'analyse des effets dominos de la figure 4.7.

Source: (Smaiah et al, 2017).

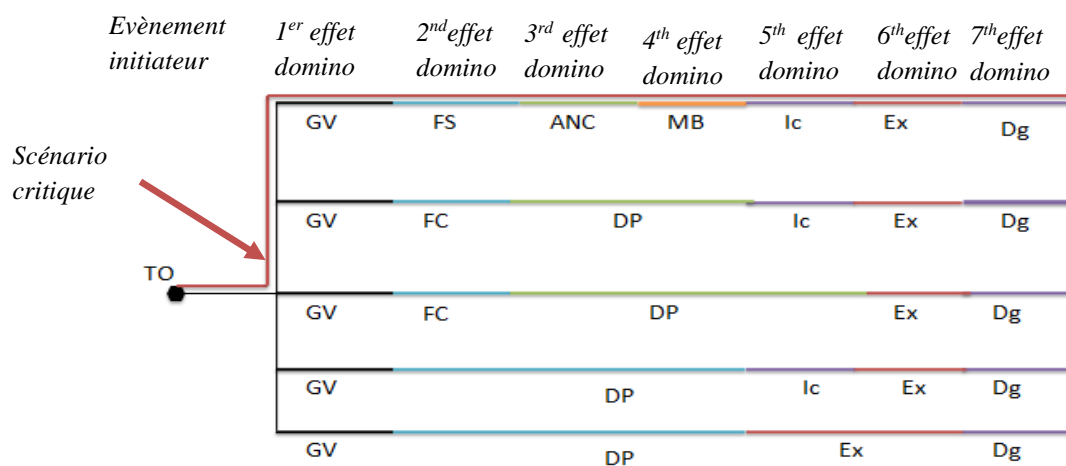
Scénario	Nature de l'évnt. I <sup>aire</sup>	Nb. d'effets dominos	SS <sub>i</sub> impactés	Intensification des conséquences des effets dominos
1	Humain	5	4	Intense
2	Technique	4	2	Moins intense
3	Technique	3	2	Moins intense
4	Technique	4	4	Intense
5	Technique	3	4	Intense
6	Technique/	5	4	Intense



	organisationnel			
7	Technique/ organisationnel	4	4	Intense
8	Naturel	6	5	très intense
9	Naturel	5	5	très intense
10	Naturel	5	5	très intense
11	Naturel	4	5	très intense
12	Naturel	7	5	très intense

### 3.3-3. Exploration du digraphe global

D'après le tableau précédent, nous déduisons le scénario le plus critique qu'est le scénario 12 où l'effet domino est de niveau 7 et il touche les 5 sous-systèmes avec des conséquences très intenses. L'AdE correspondant à ce scénario d'accident est représentée par la figure 4.8.

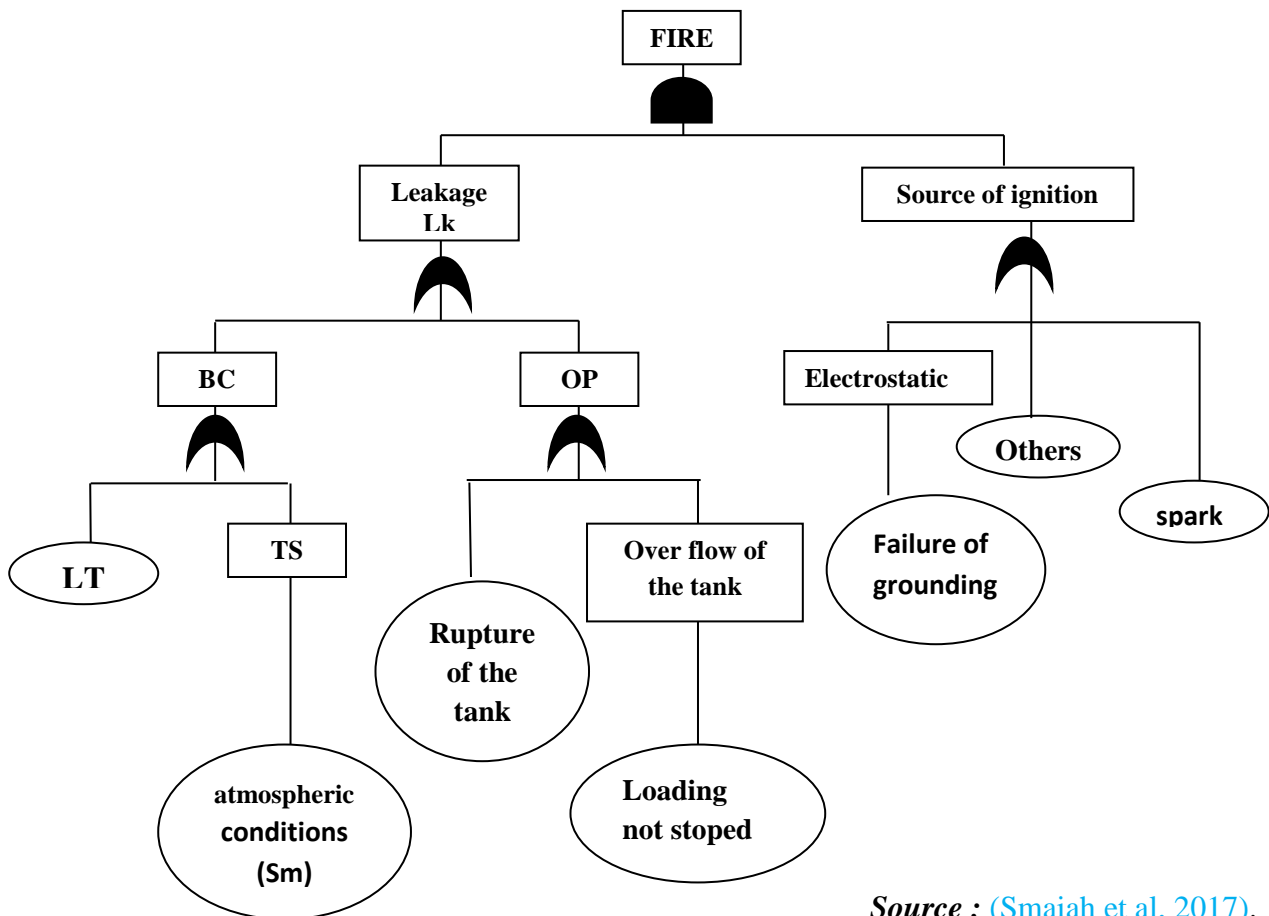


Source : (Smaiah et al, 2017).

Figure 4.8 : L'AdE correspondant au scénario critique.

L'AdD correspondant à ce scénario critique est représentée par la figure 4.9.



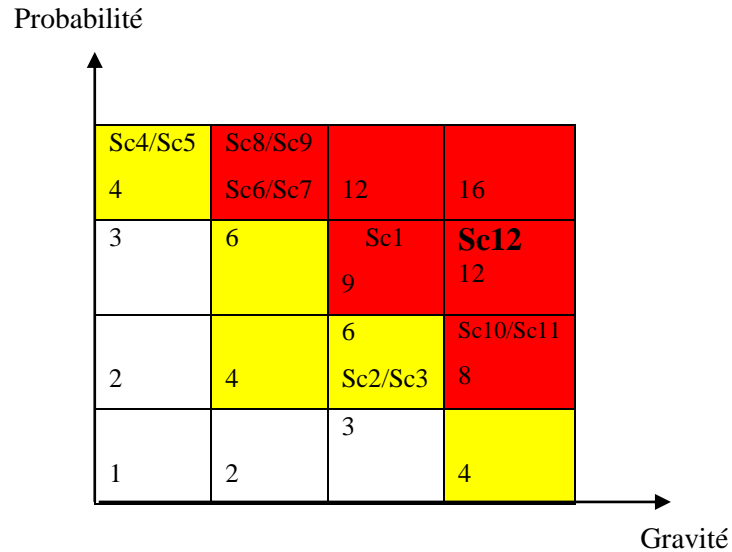


Source : (Smaiah et al, 2017).

Figure 4.9 : L'AdD correspondant au scénario critique.

L'analyse multicritères des scénarios caractérisant les effets dominos nous a permis de déduire le scénario critique (n°12, dans notre cas) dont la nature de l'évènement initiateur est humaine ; ce qui confirme l'intérêt de considérer les erreurs humaines dans l'analyse des effets dominos. Compte tenu de ce constat, il est nécessaire de renforcer les Barrières de sécurité Techniques (BT) dédiés aux flux Ft et FH (dont les sources de dangers correspondent aux dysfonctionnements matériels) par des Barrières d'Utilisation (BU) destinées à maîtriser les erreurs humaines.

Le choix entre ces deux types de barrières de sécurité s'effectue en se référant aux objectifs de sécurité et de la criticité des scénarios. Pour le cas du scénario critique, nous retenons : 7BU et 5 BT.



Source : (Smaiah et al, 2017).

Figure 4.10 : Grille de négociation des objectifs de sécurité.

La capitalisation du digraphe global par l'arbre d'évènements permet de représenter de manière concise les effets dominos. Mieux encore, une exploration horizontale de l'AdE permet d'allouer les barrières retenues sur les différents effets dominos moyennant l'usage de la stratégie suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} SC_i = ED_1 \cap ED_2 \cap \dots \cap ED_i \\ N_{BS} = P_{BS} + Q_{BS} + \dots + Z_{BS} \end{array} \right.$$

Tel que:  $N = P + Q + \dots + Z$ .

Avec:  $SC_i$  est le  $i^{\text{ème}}$  scénario,  $ED_i$  est le  $i^{\text{ème}}$  effet domino et  $N_{BS}$  est le nombre des barrières de sécurité.

Pour le cas du scénario 12, on obtien:

$$\left\{ \begin{array}{l} SC_{12} = ED_1 \cap ED_2 \cap ED_3 \cap ED_4 \cap ED_5 \cap ED_6 \cap ED_7 \\ 8 = 2_{TB} + 1_{UB} + 1_{UB} + 1_{UB} + 1_{TB} + 1_{TB} + 1_{TB} \end{array} \right.$$

Un autre apport de la méthode proposée dans cette étude est la possibilité d'affiner un effet domino par exploration verticale des différents niveaux de l'AdE. En effet, il suffit de considérer un effet domino d'un niveau donné sous forme d'un évènement redouté (ENS) et d'élaborer son Arbre de Défaillances.

Cette double exploration de l'AdE à l'horizontal et à la verticale permet de réussir l'allocation des barrières de protection (sur les effets dominos) et les barrières de prévention (sur les causes d'un effet domino).

## 4.4- Quantification de la probabilité d'occurrence des effets domino

### 4.4-1. Description structurelle et comportementale

Pour rappel, la raffinerie étudiée constitue un système industriel S composés de cinq sous-systèmes suivants :SS<sub>1</sub>= Bacs de stockage; SS<sub>2</sub>=Bras de chargement; SS<sub>3-4</sub> : Navire citernes (3) et opérateur (4);SS<sub>5</sub> = Environnement (mer et terre ferme).

Les EvRs constituent un ensemble V que nous détaillons en sous- ensembles (V<sub>SS1</sub>, V<sub>SS2</sub>, V<sub>SS3-4</sub>, et V<sub>SS5</sub>) dont les intersections peuvent ne pas être vides.

### 4.4-2. Capitalisation des évènements redoutés

La liste des EvRs probables qui peuvent se déclencher dans les sous-systèmes de la raffinerie est représentée par le tableau 4.4.

**Tableau 4.5:** Tableau des évènements redoutés probables.

Source : (EPA, 2015).

Symbole	Dénomination	V <sub>SS1</sub>	V <sub>SS2</sub>	V <sub>SS3-4</sub>	V <sub>SS5</sub>	Notation α
d <sub>1</sub>	Flux thermique	✓	✓	✓		3
d <sub>2</sub>	Entré d'air	✓				1
d <sub>3</sub>	Sabotage	✓	✓	✓		3
d <sub>4</sub>	Givrage	✓				1
d <sub>5</sub>	Disfonctionnement des vannes	✓		✓		2
d <sub>6</sub>	Défaillance des détecteurs	✓		✓		2
d <sub>7</sub>	Malveillance	✓		✓		1
d <sub>8</sub>	Usure de l'échelle	✓		✓		2
d <sub>9</sub>	Erreur de remplissage	✓	✓	✓		3
d <sub>10</sub>	Mauvaise mise à froid	✓		✓		2
d <sub>11</sub>	Incendie à proximité	✓				1
d <sub>12</sub>	Diminution des RDM	✓				1
d <sub>13</sub>	Choc	✓	✓	✓		3
c <sub>1</sub>	Explosion	✓	✓	✓	✓	4
c <sub>2</sub>	Fuite GPL	✓	✓	✓	✓	4
c <sub>3</sub>	Fuite enflammée	✓		✓		2
c <sub>4</sub>	Energie cinétique	✓				1
c <sub>5</sub>	Surpression	✓	✓	✓		3
c <sub>7</sub>	Accès en hauteur	✓				1
c <sub>8</sub>	Surcharge des bacs	✓	✓	✓		3
c <sub>9</sub>	Vaporisation rapide	✓		✓		2
c <sub>10</sub>	Ecoulement du produit	✓	✓	✓		3
q <sub>2</sub>	Erreur humaine		✓	✓		2
q <sub>3</sub>	Mauvais branchement		✓			1
q <sub>4</sub>	Mouvement du navire		✓	✓		2
r <sub>1</sub>	Rupture		✓			1
r <sub>2</sub>	Développement d'un incendie		✓	✓		2
t <sub>3</sub>	Conditions atmosphériques			✓		1
t <sub>4</sub>	Citerne non dégazée			✓		1
h <sub>1</sub>	Blessure			✓		1
i <sub>1</sub>	Manque de formation					
i <sub>2</sub>	Respect des consignes					
i <sub>3</sub>	Inattention					
i <sub>4</sub>	Evènement extérieur inhabituel					

i <sub>5</sub>	Fatigue& stress					
i <sub>6</sub>	Contexte dangereux					
k <sub>1</sub>	Action non conforme					
k <sub>2</sub>	Perte de contrôle					
k <sub>3</sub>	Geste maladroit					
f <sub>1</sub>	Inondation				✓	1
f <sub>2</sub>	Séisme				✓	1
f <sub>3</sub>	Tempête et orage				✓	1
f <sub>4</sub>	Foudre				✓	1
m <sub>1</sub>	Débit d'eau				✓	1
m <sub>2</sub>	Déstabilisation du navire				✓	1
m <sub>3</sub>	Destruction, submersion				✓	1
m <sub>4</sub>	Electricité statique				✓	1
<b>Total (%)</b>		22(56)	14(37)	21(55)	10	

Signalons que les EvRs du tableau 4.5 nous ont été communiqués par les responsables de la sécurité de la raffinerie lors de notre stage pratique dans cette raffinerie en 2014. Notons également que les symboles adoptés dans ce tableau sont personnels et résument les EvRs associés aux sous-systèmes de l'installation. Pour rappel, ces EvRs ont été déduit d'une étude antérieure du même système par la méthode MADS-MOSAR (Smaiah et Benharket, 2011).

Signalons également que neuf EvRs(de i<sub>1</sub> à i<sub>6</sub> et de k<sub>1</sub> à k<sub>3</sub>) du tableau 1 ne sont pris en considération car ils sont reliés aux opérateurs SS<sub>4</sub> inclus dans le navire (SS<sub>3</sub>). En conséquence, tout EvR de cette catégorie est considéré comme évènement de SS<sub>3-4</sub> et sont, donc, agrégés en un seul EvR qu'est q<sub>2</sub> relatif à l'erreur humaine.

Par ailleurs, un examen des EvRs du tableau 1 montre qu'ils sont en nombre de **38** et qui peuvent être répartis en quatre classes :

- Ceux qui ne touchent qu'un seul sous-système ( $\alpha = 1$ ) et éventuellement ne déclenchent pas d'effet domino. Les EvR de cette classe, qui sont en nombre de 20, représente 53% des EvRs probables dans la raffinerie étudiée ;
- Ceux qui touchent deux sous-systèmes ( $\alpha = 2$ ) et sont susceptibles de déclencher un effet domino. Le nombre des EvR de cette classe est égal à 9 soit 24% des EvRs probables identifiés ;
- Ceux qui touchent trois sous-systèmes ( $\alpha = 3$ ) et déclenche un effet domino dangereux au niveau des 3 sous-systèmes. Le nombre des EvR de cette classe est égal à 7 soit 18% des EvRs probables identifiés ;
- Ceux qui touchent tous les sous-systèmes et déclenchent un effet domino catastrophique. Le nombre des EvR de cette classe est égal à 2 soit 5% des EvRs probables identifiés.

#### 4.4-3. *Elaboration d'un diagramme ensembliste*

Conformément aux étapes de la méthode proposée, le tableau 4.5 est représenté sous forme d'un diagramme ensembliste. L'univers complet est constitué de 4 parties que nous divisons en deux ensembles :

$$V = V_{SS1} \cup V_{SS2} \cup V_{SS3} \cup V_{SS5}$$

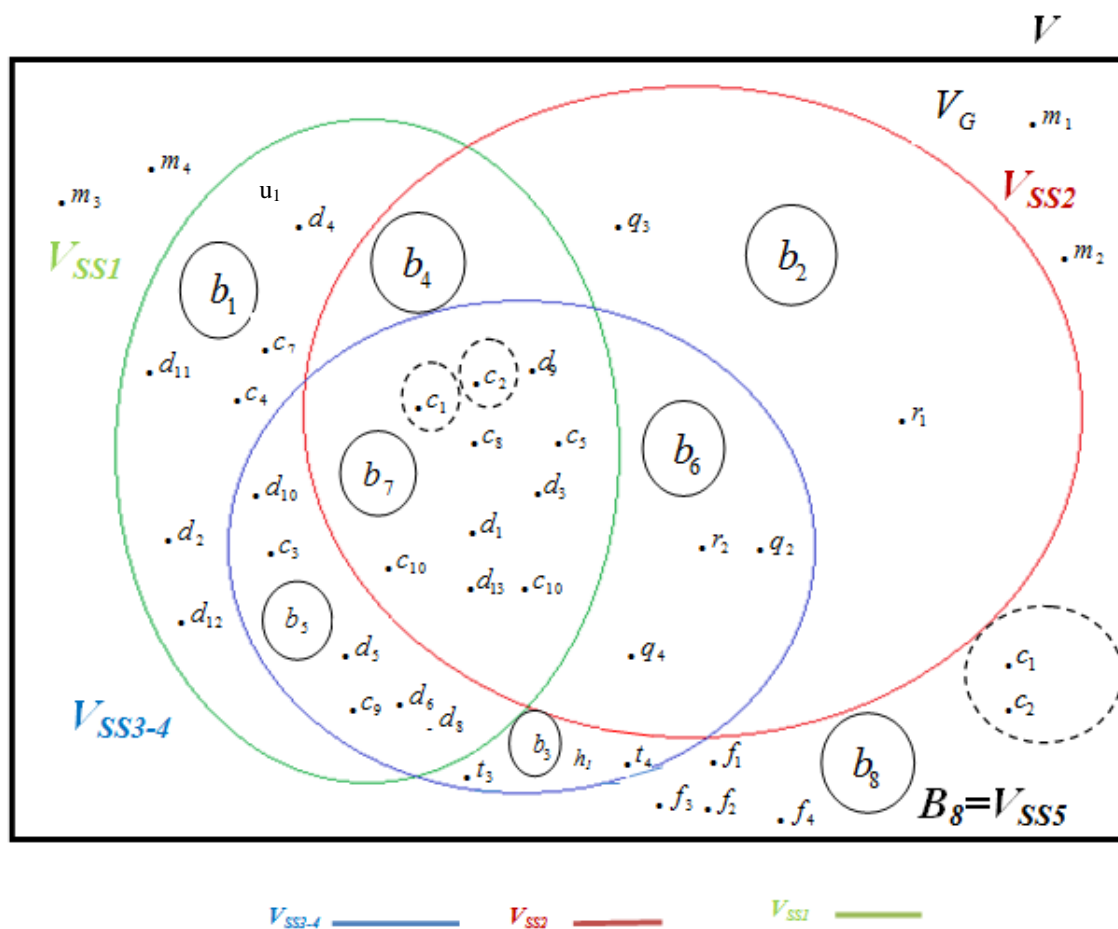
$$V_G = V_{SS1} \cup V_{SS2} \cup V_{SS3}$$

L'équation (5) permet d'écrire :

$$G = \{SS_1, SS_2, SS_3\}$$

Dans la suite de cette étude nous nous limitons à l'ensemble  $V_G$  afin d'exclure les EvRs d'ordre naturel ou autres qui nécessitent une recherche plurisectorielle (services de : météorologie, marine, la sûreté, ...).

La représentation du tableau 4.5 sous forme d'un diagramme ensembliste est fourni par la figure 4.11 où les sous-ensembles  $V_{SS1}$ ,  $V_{SS2}$ ,  $V_{SS3-4}$  et  $V_{SS5}$  sont mis sous forme de diagramme de VENN.



Source : (Réalisé par nos soins).

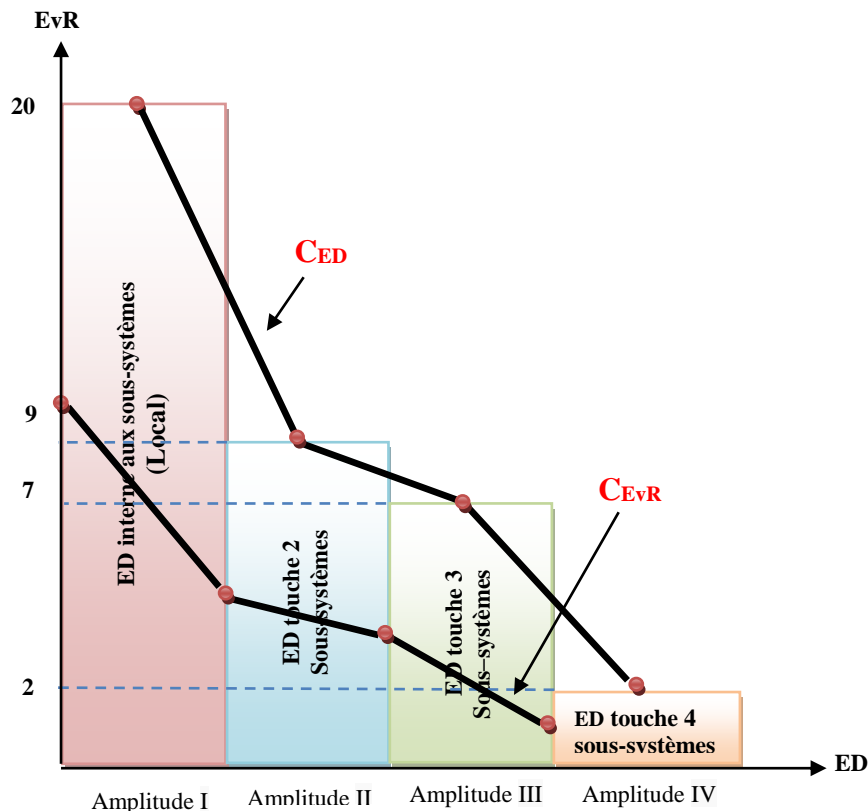
Figure 4.11 : Diagramme de VENN des intersections des ensembles  $V_{SS1}$ ,  $V_{SS2}$ , et  $V_{SS3}$ .

Dans le diagramme de la figure 4.11, les trente EvRs de l'ensemble  $V_G$  sont délimités par le rectangle et les trois patatoïdes représentent  $V_{SS1}$ ,  $V_{SS2}$  et  $V_{SS3}$ .

#### 4.4-4. Dédution des amplitudes des effets dominos

Pour la déduction des amplitudes des effets dominos, nous appuyons sur les valeurs  $\alpha$  caractérisant les EvRP du tableau 4.5 qui permettent de quantifier les effets dominos

possibles sur la raffinerie étudiée dans une échelle de quatre amplitudes de degrés 1, 2, 3, et 4 (figure 4.12).



Source : (Réalisé par nos soins).

**Figure 4.12 :** Amplitude des effets dominos dans la raffinerie étudiée.

Dans la figure 4.12 nous remarquons que les évènements redoutés en décroissant d'une amplitude à une autre augmentent la gravité de l'effet domino probable. Cette décroissance signifie que l'occurrence de l'effet domino est très rare car théoriquement il est très possible de contrôler les EvRs causant l'effet domino de degré 3 et 4 vue leur nombre réduit.

Dans le cas de la raffinerie étudiée, ils sont au nombre de neuf et leur liste est fournie ci-après par ordre décroissant de gravité : amplitude 4 (explosion, et fuite de GPL) et amplitude 3 (flux thermique, sabotage, erreur de remplissage, choc, surpression, surcharge des bacs, et écoulement de produit).

Pour une meilleure exploitation de la figure 4.12 et afin d'assurer une meilleure lecture des courbes  $C_{ED}$  et  $C_{EvR}$  nous retenons l'unité de mesure  $u=1$  cm et la largeur des rectangles  $l = 2$  cm. Les longueurs sont proportionnelles au nombre des EvRs apparaissant dans chaque amplitude sachant qu'un EvR est égale à 0.4 cm, d'où les longueurs des quatre amplitudes :  $L_{amp1}=0.4 \times 20=8$ cm ;  $L_{amp2}=0.4 \times 9=3.6$ cm ;  $L_{amp3} = 0.4 \times 7=2.8$ cm et  $L_{amp4} = 0.4 \times 2=0.8$ cm.

La surface totale des quatre rectangles est  $S = (16 + 7.2 + 5.6 + 1.6) \text{ cm}^2 = 30.4 \text{ cm}^2$ .

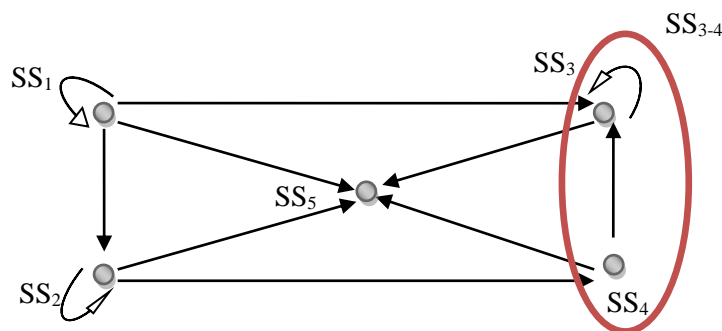
A partir de la valeur de cette surface, il est possible de déduire le coefficient multiplicateur pour déduire les pourcentages des surfaces des rectangles des quatre amplitudes ( $\gamma$ ). En effet,

si la surface S représente 100% de la surface alors  $1\text{cm}^2 =$  correspond à  $100/30.4$  soit 3.29% de la surface totale. D'où les pourcentages recherchés :

- $\%_{\text{amp1}} = 16 \times 3.29 = 52,64\%$  ;
- $\%_{\text{amp2}} = 7.2 \times 3.29 = 23,68\%$  ;
- $\%_{\text{amp3}} = 5.6 \times 3.29 = 18,42\%$  et
- $\%_{\text{amp4}} = 1.6 \times 3.29 = 05,26\%$ .

#### 4.4-5. Elaboration de l'espace probabilisable

Enfin l'application de la dernière étape de la méthode proposée afin d'élaborer l'espace probabilisable  $(V, \mathcal{F}(V))$  débute par la partition du site de la raffinerie étudiée en quatre sous-ensembles ( $SS_1, SS_2, SS_{3+4}$  et  $SS_5$ ) dont les connections sont représentées par la figure 4.13 où l'arête  $(SS_i, SS_j)$  signifie que ces sous-systèmes ont en commun le même évènement redouté probable.



Source : (Réalisé par nos soins).

Figure 4.13 : Graphe de répartition des EvRP.

Cette dernière étape est ensuite complétée par les opérations suivantes :

- Elaboration de l'univers des EvRs* : pour cela, nous considérons l'ensemble  $V$  des EvRs probables. Notons que pour réduire le cardinal de l'univers  $V$ , nous considérons uniquement les EvR de  $SS_3$  avec l'hypothèse que  $SS_4$  est constitué de ressources humaines assez compétentes pour éviter les EvRs pouvant se déclencher au niveau du  $SS_4$ .

Nous rappelons également que dans le tableau 1 relatif aux EvRs, le cardinal de l'ensemble  $V$  est égal à 38. En conséquence, nous aurons : Car  $d\mathcal{P}(V) = 2^{38}$ .

Ce résultat signifie que le travail avec la tribu  $\mathcal{P}(V)$  est quelque peu fastidieux. Pour remédier à cette valeur très grande, nous supprimons les EvRs relatifs à  $SS_4$ . De même, les EvR affectant le  $SS_5$  ne sont pas pris en considération parce que  $SS_5$  est considéré comme absorbant de tous les EvRs apparaissant dans  $G$ . Autrement dit, le sous-système  $SS_5$  apparaît comme le réceptacle de tous les EvRs.

Avec ces nouvelles hypothèses, nous obtenons :

$$V_G = V_{SS1} \cup V_{SS2} \cup V_{SS3}$$

Avec Card  $(V_G) = 30$ .

- ii- *Diagramme de VENN représentant  $V_G$*  : nous rappelons que dans la figure 4.13, un arc reliant deux sommets  $SS_i$  et  $SS_j$  signifie que  $V_{SS_i} \cap V_{SS_j} \neq \emptyset$ . La pondération des arcs par un coefficient  $k$  tel que  $k = \text{Card}(V_{SS_i} \cap V_{SS_j})$  nous permet d'obtenir le graphe de la figure 4.13 où les variables  $i$  et  $j$  varient dans l'intervalle  $[1, 2, 3]$ .
- iii- *Tribu engendrée par  $V_G$*  : dans le diagramme de VENN de la figure 4.11, les sous-ensembles  $b_i$  ( $i = 1..8$ ) permettent d'écrire :

$$\sum_{i=1}^7 \text{Card}(b_i) = \text{Card}(V_G) = 30$$

$$\sum_{i=1}^7 \text{Card}(b_i) + \text{Card}(b_8) = \text{Card}(V) = 38$$

Avec :  $b_1 = \{d_2, d_4, d_7, d_{11}, d_{12}, c_4, c_7\}$  ;  $b_2 = \{r_1, q_3\}$  ;  $b_3 = \{t, t_4, h_1\}$  ,  $b_4 = \emptyset$  ;  
 $b_5 = \{d_5, d_6, d_8, d_{10}, c_3, c_9\}$  ;  $b_6 = \{q_2, q_4, r_2\}$  ;  $b_7 = \{d_1, d_3, d_9, d_{13}, c_1, c_2, c_5, c_8, c_{10}\}$  ;  
 $b_8 = \{f_1, f_2, f_3, f_4, m_1, m_2, m_3, m_4\}$ .

De plus,  $\forall i \in I \text{ CN}^*, \forall j \in I \text{ CN}^* (I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\})$ , et avec  $i \neq j$ , nous avons :  $b_i \cap b_j = \emptyset$ .

Donc:  $B' = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8\}$  constitue une partition de  $V$

$B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7\}$  constitue une partition  $V_G$

Etant donné que  $b_4 = \emptyset$ , alors  $B = \{b_1, b_2, b_3, b_5, b_6, b_7\}$  est la tribu  $\mathcal{F}$  engendrée par  $V_G$  qu'est la même tribu  $\mathcal{F}$  engendrée par  $B$ . Cette tribu contient  $2^6 = 64$  évènements et l'espace probabilisable est le suivant :

$$E = (V_G, \mathcal{F}(B))$$

- iv- *Construction d'une mesure* permettant la déduction des probabilités d'occurrence des effets dominos par le biais des relations suivantes :

$$\mathcal{T}(B) \xrightarrow{\mathcal{P}} [0, 1]$$

$$A \longrightarrow \mathcal{P}(A) = \frac{\text{card}A}{\text{card}V_G} = \frac{\text{card}A}{30}$$

D'où les probabilités recherchées (Tableau 4.6).

**Tableau 4.6** : Probabilités des effets domino dans la raffinerie étudiée.

*Source : (Réalisé par nos soins).*

<i>EvR</i>	<i>Occurrence de l'effet domino ED</i>	<i>Probabilité</i>	<i>Taux</i>
<b>B1</b>	ED à l'intérieur de $SS_1$	$7/30 \approx 0.23$	23%
<b>B2</b>	ED à l'intérieur de $SS_2$	$2/30 \approx 0.07$	7%
<b>B3</b>	ED à l'intérieur de $SS_3$	$3/30 \approx 0.10$	10%
<b>B5</b>	ED entre $SS_1$ et $SS_3$	$6/30 \approx 0.20$	20%
<b>B6</b>	ED entre $SS_2$ et $SS_3$	$3/30 \approx 0.10$	10%
<b>B7</b>	ED entre $SS_1$ , $SS_2$ et $SS_3$	$8/30 \approx 0.30$	30%
Total			100%

#### 4.5- Commentaires et discussions des résultats de l'étude des effets dominos du port étudié

La complexité du phénomène d'effet domino, d'une part, et l'ampleur de ses conséquences, d'autre part, nous ont incités à proposer sa modélisation par un outil mathématique des ensembles.



Les résultats obtenus permettent d'illustrer l'efficacité de l'outil proposé notamment le diagramme de VENN partitionné en 2 sous-ensembles A (ensembles des ESDs) et B (ensemble des EvRs) dont l'intersection est vide.

Cette représentation ensembliste nous a permis d'étudier l'intersection, la réunion et les partitions de tous les diagrammes du triptyque « source de danger → flux de dangers → cible de danger » qui caractérisent la raffinerie étudiée ce qui a permis de dégager les EvRs communs à tous les sous-sites qui constituent à notre point de vue une première facilité de prévoir d'où peut démarrer un effet domino sans aucune étude additive, cela signifie que l'utilisation du langage des ensembles a permis une classification plus précise des EvRs quel que soit leur nature. Cet outil mathématique a permis une approche globale mais précise de l'effet domino.

A ce propos, nous signalons que les EvRP de notation 1 sont technologiquement gérables au niveau des sous-systèmes SS<sub>1</sub>, SS<sub>2</sub>, et SS<sub>3-4</sub>, mais ils sont de caractère imprévisible s'ils se déclenchent au niveau du SS<sub>5</sub>, car difficilement gérables et provoquent souvent la panique qui est une forme d'effet domino très catastrophique.

Nous signalons également qu'au niveau de l'amplitude 4 (cf. figure 4.12) malgré le nombre réduit des EvRP les conséquences de destruction de l'effet domino sont dévastatrices. Heureusement que la probabilité de l'avènement d'un effet domino d'amplitude 4 est très réduite par rapport aux amplitudes des effets dominos.

Les résultats présentés dans la section précédente montrent que le nombre des EvRPs déclenchant un effet domino d'amplitude 2 est 9. Ils sont répartis comme suit : 6 EvRP qui touchent le couple « SS<sub>1</sub> et SS<sub>3-4</sub> » (c.-à-d., ils concernent le navire et les bacs de la raffinerie étudiée) et 3 EvRPs qui touchent le couple « SS<sub>2</sub>, SS<sub>3-4</sub> » (c.-à-d., ils concernent le navire et les bras de chargement de la raffinerie étudiée).

Dans les deux cas nous retrouvons le navire qui constitue, en conséquence, la partie la plus vulnérable exposée aux effets dominos.

Dans ce contexte, les résultats obtenus montrent que la partie névralgique de la raffinerie étudiée est la partie relative aux sous-systèmes qui partagent le plus grand nombre d'EvRs qui sont les bacs de stockage (SS<sub>1</sub>) et le navire (SS<sub>3</sub>) pour la simple raison qu'ils sont tous les deux des réceptacles de matières dangereuses : l'un en terre ferme et l'autre en mer.

De même et malgré la connexité technique entre ces deux sous-systèmes SS<sub>1</sub> et SS<sub>2</sub> ils ne sont pas le lieu du même EvR, c'est ce qui explique la relation suivante :

$$V_{SS1} \cap V_{SS2} = \emptyset$$

Une autre remarque importante relative au couple « SS<sub>1</sub>, SS<sub>2</sub> » est que l'effet domino d'amplitude 2 n'apparaît pas dans ce couple de sous-systèmes et en cas de son occurrence, il se propage au sous-système SS<sub>3-4</sub> et devient, par voie de conséquence, un effet domino d'amplitude 3, car le sous-système SS<sub>2</sub> assure la connexion des sous-systèmes SS<sub>1</sub> et SS<sub>3-4</sub>.

Par ailleurs, une analyse du diagramme de la figure 4.11 permet de retenir huit intersections ( $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, \text{ et } b_8$ ) que nous construisons comme suit :

- L'intervalle d'indexation est  $I = \{1,2,3\}$  ;
- L'intersection est donc  $V_{SS1} \cap V_{SS2} \cap V_{SS3}$  ;
- $\mathcal{P}(I) = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1,2\}, \{1,3\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\}$  ;
- $I$  est partitionné en 2 sous-ensembles  $J$  et son complémentaire  $C_I J$  ;
- Dans l'intersection des 3 ensembles si l'index est dans «  $J$  », nous prenons l'ensemble en question, mais si l'index est dans «  $C_I J$  », nous prenons les complémentaires dans  $V$ .

Ainsi, nous aurons les cas suivants :

- si  $J = \{1\}$ , et  $C_I J = \{2,3\}$ ,  $b_1 = V_{SS1} \cap C_V SS_2 \cap C_V SS_3$
- si  $J = \{2\}$ , et  $C_I J = \{1,3\}$ ,  $b_2 = V_{SS2} \cap C_V SS_1 \cap C_V SS_3$
- si  $J = \{3\}$ , et  $C_I J = \{1,2\}$ ,  $b_3 = V_{SS3} \cap C_V SS_1 \cap C_V SS_2$
- si  $J = \{1,2\}$ , et  $C_I J = \{3\}$ ,  $b_4 = V_{SS1} \cap V_{SS2} \cap C_V SS_3$ .

Et ainsi de suite jusqu'à  $b_8$ , sachant que certaines intersections peuvent être vides.

### **Conclusion**

*D'un point de vue pratique, le modèle SMAR présenté dans les chapitres 3 et 4 a le mérite d'intégrer l'analyse des risques ainsi que leurs évaluations qualitatives et semi-quantitatives. Son application au terminal Bethioua-Algérie a permis d'identifier les événements sources des effets domino ainsi que leurs natures. Le séquençage des effets dominos présentés dans cette étude a fait l'objet d'une exploration de manière anticipative afin de s'opposer dans la mesure du possible aux propagations et à l'amplification des événements initiateurs des effets dominos.*

*D'un point de vue contextuel, le management des risques cadré par SMAR permet de gérer le système étudié dans son ensemble pour assurer sa performance et sa pérennité. L'idée de s'intéresser aux effets domino est d'illustrer la nécessité de prendre en compte que la défaillance d'un processus est capable d'amplifier le danger et de provoquer des événements non souhaités parmi les autres processus du système. Dans ce contexte, la performance d'une organisation doit être perçue comme une spirale. Ainsi, une action sur une étape du processus de management des risques permet d'améliorer, en partie, cette performance.*

*Les apports multiples de la méthodologie suggérée pour la modélisation des effets domino sont discutés dans cette étude et d'autres apports peuvent être envisagés. C'est le cas, d'ailleurs, de la transformation du digraphe global sous forme d'un réseau probabiliste où chaque flux de danger est quantifié par un couple de probabilité et de durée : sa probabilité d'occurrence et la durée de déclenchement de l'effet domino au niveau des cibles qui lui sont associées dans le réseau.*

*Autre perspective projetée au modèle SMAR, c'est de se focaliser sur la pérennisation de la spirale du management des risques en termes d'efforts fournis par les acteurs du terrain. L'évaluation des efforts de pérennisation est, à notre avis, un bon indicateur de performance du SMAR.*

---

## *Conclusion générale*

---

L'Algérie exploite, transforme, et transporte les produits du secteur pétrochimique, produits très dangereux, et il est temps que les responsables de ce secteur adopte une vision éco-sensible (Boubaker et al, 2012). De même, il est opportun de renforcer les liens avec tous les acteurs qui activent dans le domaine de la prévention industrielle notamment les universitaires pour une meilleure conception des protocoles de sécurité, c'est-à-dire un ensemble de règles établies managérialement par des experts dans la gestion et la prévention des risques industriels (Bahmed et Smaiah, 2012).

Ces orientations s'imposent car les constructions navales, leurs perfectionnements et l'apport des nouvelles technologies rendent la navigation maritime plus dense et plus rapide. En effet, les bateaux à grande vitesse, malgré leur gros tonnage, sont devenus des moyens de commerce très efficaces, ces grandes vitesses sont à l'origine de nouveau facteur de risques qu'il faut prendre en considération dans la sécurité maritime.

A propos de cette sécurité maritime, il est à signaler que beaucoup de travaux portant sur l'analyse des risques et les systèmes de management ont vu le jour ces deux dernières décennies dont le but est d'assurer une sécurité maritime maximale, parce que le souci sécuritaire est devenu une préoccupation internationale.

Parmi les méthodes d'analyse des risques maritimes qui ont connu une large utilisation dans le domaine maritime, citons MADS-MOSAR que nous avons retenu comme un cadre de nos contributions présentées dans ce manuscrit de thèse de doctorat.

L'apport de la théorie des graphes est une suite logique de l'apport global de la théorie des ensembles, en ce sens qu'il procède d'une manière plus fine en étudiant plus précisément les intersections entre les éléments des sous-ensembles A et B de chaque boîte noire  $V_{SSi}$ , ainsi une 2<sup>ème</sup> représentation de la boîte noire sous forme d'un digraphe où les sommets sont les événements et les liaisons entre eux signifient le déclenchement d'un événement par un autre. Ainsi apparaît les sommets les plus critiques grâce à la notion des degrés, ceci nous permet de trier à l'intérieur de la boîte noire les EvRs les plus dangereux sources d'effet domino.

L'ensemble des résultats présentés dans les chapitres précédents montre que la méthode MADS-MOSAR constitue, en plus de son usage répandu dans tous les domaines industriels, un champ d'exploration et d'investigation très pertinent.

En conséquence, la suite de nos travaux de recherche que nous projetons comme perspective de ce modeste travail s'annonce encore plus pertinente dans le sens où nous projetons à titre d'indication de quantifier les cheminements des effets dominos par des approches déterministes (durées des effets dominos) et probabilistes (probabilités d'occurrences de ces effets).

Dans ce contexte, nous envisageons d'explorer encore plus profondément la théorie des graphes notamment les algorithmes du chemin le plus court pour quantifier les effets domino et une autre piste de recherche concerne les réseaux bayésiens qui permettent également de modéliser ce phénomène complexe d'effets domino.

Toujours dans le contexte de la théorie des graphes, nous pouvons proposer une nouvelle réflexion basée sur l'étude de récupération représentée par le retour du flux de danger dans les arcs.

Une autre perspective peut être envisagée, c'est la prendre en considération du facteur humain comme étude spécifique, par exemple l'étude de panique causée par un effet domino qui peut surement augmenter l'ampleur de ce phénomène catastrophique.

Une dernière perspective qui réside dans une autre approche de calcul des taux des effets domino pour valider les résultats obtenus lors de la première approche, par exemple l'approche fréquentielle pour le calcul des probabilité.

**Articles :**

- Abdolhamidzadeh B., Abbasi T., Rashtchian D. and Abbasi S. A., (2010), «*A new method for assessing domino effect in chemical process industry*», Journal of Hazardous Materials, 182(1-3), pp.416-426.
- Antonioni G., Spadoni G. and Cozzani V., (2007), «*A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events*», Journal of Hazardous Materials, 147, pp 48-59.
- Arena M., Arnaboldi M. and Azzone G., (2010), «*The organizational dynamics of Enterprise Risk Management*», Journal of Accounting, Organizations and Society, Elsevier Group Publishing, 7(35), pp 659–675.
- Bagster D.F. and Pitblado R.M., (1991), «*The Estimation of Domino Incident Frequencies- An Approach*», Journal of TransI ChemE,69, pp:195-199.
- Bahman A., Tasneem A., Rashtchian D. and Abbasi S., (2010), «*A new method for assessing Domino effect in chemical process industry*», Journal of Hazardous Materials 182, pp 416-426.
- Bassetto S., Siadat A. and Tollenaere M., (2011), «*The management of process control deployment using interactions in risk analyses* », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier Groupe Publishing, 24(4), pp 458-465.
- Berg E., Knudsen D. and Norrman A., (2008) «*Assessing performance of supply chain risk management programmes: a tentative approach*», Journal of Risk Assessment and Management, Inderscience publishers, 9(3), pp 288-310.
- Bjegra T. and Aven T. (2015), «*Adaptive riskmanagement using new risk perspectives – an example from the oil and gas industry*», Journal of Reliability Engineering and System Safety, 134(1), pp 75-82.
- Bouzaher A., Bahmed L., Furusho M. and Fedila M., (2015), «*Designing a Risk Assessment Matrix for Algerian Port Operations*», Journal of Failure Analysis and Prevention .Springer. ISSN 1547-7029, 15(6), pp 860-867.
- Chettouh S., Hamzi R. and Benaroua K., (2016) «*Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002–2013*», Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 4(5), pp 186-193.
- Christian D., Cécile F., Aurore P. and Bruno D., (2006), «*ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries*», Journal of Hazardous Materials 130, pp 200-219.
- Chung C.C. and Her M.T., (2013), « *Port State Control Perception of the Safe Management of Bulk Carriers* », International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2013: Trade, Supply Chain Activities and Transport: Contemporary Logistics and Maritime, Hong Kong Polytechnic University, China. pp.2- 3.
- Claude M., (2010), « *les inondations du 15 juin 2010 dans le centre var : Réflexion sur un épisode exceptionnel* », Études de Géographie Physique, p. 41-76.

- Cozzani V., Antonioni G. and Spadoni G., (2006), «*Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool*», Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19, pp 463-477.
- Cozzani V. and Salzano E., (2004), «*Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment*», Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17(6), pp 437- 447.
- Damienne P., (2005), «*Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines* », Tech. rep., Cybergeo :European Journal of Geography Systèmes Modélisation Géostatistiques, document 328.
- Demichela M. and Camuncoli G., (2014), «*Risk based decision making. Discussion on two methodological milestones* », Journal of Loss Prevention in the Process Industries,28(4), pp101-108.
- Esteban J.B., Vílchez J.A. and Arnaldos J., (2013), «*A model for estimating the impact of the domino effect on accident frequencies in quantitative risk assessments of storage facilities*», Journal of Process Safety and Environmental Protection, 91(6), pp 423–437.
- Fransas, A., Nieminen, E., Salokorpi, M. and Rytönen, J., (2012), «*Maritime safety and security; Literature review* », Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. University of Applied Sciences. Nro: 77.ISSN: 1239-9094, p12.
- Gattuso D., Napoli S. and Meduri G., (2009), «*Safety of the navigation in congested maritime area*», Journal of European Transport, 42, pp 83-101.
- Hu S., Fang Q., Xia H. and Xi Y., (2007), «*Formal safety assessment based on relative risks model in ship navigation*», Journal of Reliability Engineering and System Safety, 92, pp 369–377.
- INOUE. K., (2000), «*Evaluation method of ship-handling difficulty for navigation in restricted and congested waterways* », Journal of Navigation 53(1), pp 167-180.
- Kadri F., (2014), «*Modèles dynamiques probabilistes pour l'étude des séquences d'accidents sur site industriel*». <hal-01054304>.
- Kadri F., Birregah B. and Châtelet E., (2014), «*Natural Disaster Impacts on Critical Infrastructures: A domino effect-based study*», Journal of Homel. Secur. Emerg. Manag., 11(2), pp 217-241.
- Kadri F., Chatelet E. and Birregah B., (2011), «*Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils*», Workshop interdisciplinaire sur la sécurité globale, pp.1-15.
- Khan F. I. and Abbasi S. A., (1998), «*DOMIno eFFECT (domino effect): A new software for domino effect analysis in chemical process industries*», Journal of Environment Modelling and Software 13, pp 163-177.
- Khan F. I. and Abbasi S. A., (2001), «*An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries*», Journal of Loss Prevention in the Process Industries 14, pp 283-306.
- Khan F. I., and Abbasi S. A., (1998), «*Models for domino effect analysis in chemical process industries*», Journal of Process Safety Progress-AIChE 17(2), pp 107-113.
- Khan F. I., Asad I., Ramesh N. and Abbasi S. A., (2001), «*SCAP: a new methodology for safety management based on feedback from credible accident probabilistic fault tree analysis system*», Journal of Hazardous Materials A87, pp 23-56.



- Khan F. I., Husain T. and Abbasi S. A., (2002), «*Design and evaluation of safety measures using a newly proposed methodology "SCAP"*», Journal of Loss Prevention in the Process Industries 15, pp 129-146.
- Khan F. I., Iqbal A. and Abbasi S. A., (2001) ,«*Rapid risk assessment of a fertilizer industry using recently developed computer automated tool torap*», Journal of Loss Prevention 14, pp 413-427.
- Khan F.I. and Abbasi S.A., (1998), «*Models for domino effect analysis in chemical process industries*», Journal of Process Safety Progress-AIChE, 17(2), pp.107-113.
- Khan F.I. and Abbasi S.A., (1998), «*Hazard identification and ranking (HIRA): A multiattribute technique for hazard identification*», Journal of Process Safety Progress 17 (3), pp 16.
- Kirchsteiger C., (2002), «*Review of International Industrial Safety Management Frameworks*», Journal of Process Safety and Environmental Protection, 80(5), pp 235-244.
- Krausmann E. and Mushtaq F., (2008), «*A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities*», Journal of Natural Hazards, 46(2), pp 179-197.
- Kremljak Z. and Kafol C., (2014), «*Types of Risk in a System Engineering Environment and Software Tools for Risk Analysis*», Journal of Procedia Engineering, Elsevier, 69(1), pp 177-183.
- Kristiansen S., (2005), «*Maritime Transportation Safety Management and Risk Analysis*», Journal of Elsevier Butterworth-Heinemann, ISBN 07506 59998. pp.56 - 75.
- Lee J.Y., Lee J.W., Ko J. and En Sup Yoon, (2005), «*Optimization for allocating the explosive facilities in order to minimize the domino effect using nonlinear programming*», Korean Journal of Chemical Engineering, 22(5), pp 649-656.
- Leveson N.A., (2004), «*New Accident Model for Engineering Safer Systems*», Journal of Safety Science, 42(4), pp 237-270.
- Lois P., Wang J., Wall A. and Ruxton T., (2004), «*Formal safety assessment of cruise ships*», Tourism Management, Journal of Food and Nutrition Sciences, 5(15), pp 93-109.
- Mohaghegh Z. and Mosleh A., (2009), «*Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment of complex socio-technical systems: Principles and theoretical foundations*», Journal of Safety Science, 47, pp 1139-1158.
- Olivier S. and Bruno D., (2006), «*A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the seveso-II directive*», Journal of Hazardous Materials 130, pp 187-199.
- Orfanos V., Evripiotis M. and Tsatsanis D., (2011), «*Risk management methodological approach in the EU co-funded projects: the case of Greece*», Journal of Decision Sciences, Risk and Management, Inderscience Group Publishing, 3 (1/2), pp 129 - 152.
- Ouddai R., Chabane H., Boughaba A. and Frah F., (2012), «*The Skikda LNG accident: losses, lessons learned and safety climate assessment* », Journal of Global Energy 35(6), pp. 518 - 533.
- Pietersen C.M., (1988), «*Analysis of the LPG disaster in Mexico City* », Journal of Hazardous Materials, pp.85- 107.

- Piowowar J., Châtelet E. and Laclémence P., (2009). « *An efficient process to reduce infrastructure vulnerabilities facing malevolence* », Journal of Reliability Engineering and System Safety, 94, pp 1869-1877.
- Reniers G. and Dullaert W., (2007), « *DomPrevPlanning : User-friendly software for planning domino effects prevention* », Journal of Safety Science, 45, pp 1060-1081.
- Reniers G., Dullaert W., Soudan K. and Ale B., (2005), « *The use of current risk analysis tools evaluated towards preventing external domino accidents* », Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, pp 119-126.
- Ringbom H., (2008), « *The EU maritime safety policy and international law* ». Leiden: Martinus Nijhoff Pub, P.391
- Sabatino D., Massimiliano C., Gianluca M. and Simberto S., (2000), « *Consequence analysis in LPG installation using an integrated computer package* », Journal of Hazardous Materials 71, 159-177.
- Saoulé B., (2002), « *Les risques en station de ski alpin : d'une explication monocausale à une perspective d'analyse systémique* », Journal of Annales des Ponts et des Chaussées, pp 65-74.
- Smaiah M. and Bahmed L., (2017), « *For an environmental risk management approach applied in Algerian ports: the case of Bethioua port (Algeria)* », Journal of Environmental Engineering, 8(2/3), pp 213-224.
- Smaiah M., et Bahmed L., (2011), « *Réglementation algérienne en matière de sécurité et de bien être à bord des navires de commerce* », Revue Algérienne du Travail, N° 36, ISSN 1111-5815, pp 43-54.
- Smaiah M., Djebabra M. and Bahmed L., (2017), « *Contribution to the improvement of the MADS-MOSAR method for the modeling of Domino Effects* », Journal of Failure Analysis and Prevention, 17(3), pp 440- 449.
- Steinberg LJ., Sengul H. and Cruz AM., (2008), « *Natech risk and management: an assessment of the state of the art* », Journal of Natural Hazards, 46(2), pp143-152.
- Tixier J., Dusserre G., Rault-Doumax S., Ollivier J. and Bourely C., (2002), « *Orisis: Software for the consequence evaluation of transportation of dangerous goods accidents* », Journal of Environmental modeling & software ,17 , pp 627-637.
- Trbojevic VM. and Carr B J., (2000), « *Risk based methodology for safety improvements in ports* », Journal of Hazardous Materials, 71, pp.467-480.
- Urbański J., Morgaś W. and Mięsikowski M., (2009) « *The present and expected changes in maritime safety, security and defense functions* » Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transportation – Weinrit (ed.) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-80479-0.p.3
- Young D.T., (2013), « *Consideration of human factors in investigations of structural failures* », Journal of Forensic Engineering, Inderscience Group Publishers, 1(3/4), pp 227-237.
- Zaghi C., Cecchetti G., Fontana J. and Conti ME., (2005), « *Science and precaution in the risk analysis of chemicals* », Journal of Risk Assessment and Management, Inderscience Group Publishers, 5(2/3/4), pp 271 – 285.



## Mémoires :

- Adjrahoua A. P., (2010), « *La régulation du trafic maritime par le VTS: cas du port d'Abidjan* », Académie régionale des sciences et techniques de la mer (ARSTM) d'Abidjan - Mémoire de Capitaine au long cours de la marine marchande. p4.
- Bouzaher A., (2016), « *Contribution à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des risques liés à la manoeuvre portuaire en Algérie* », thèse de Doctorat, université Batna 2- Algérie.
- Cambon J., (2007), « *Vers une nouvelle méthodologie de mesure de la performance des systèmes de management de la sante-sécurité au travail* », thèse de Doctorat, université de Paris, page 25.
- Cossi H.A., (2014), « *Les contentieux en transport maritime de marchandises par conteneurs* », thèse de doctorat, Université du Droit et de la Santé - Lille II. Français.
- El Hajj C., (2013), « *Méthodologie pour l'analyse et la prévention du risque d'accidents technologiques induits par l'inondation (Natech) d'un site industriel* ». thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne-France .
- Fumey M., (2001), « *Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations*», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Spécialité : Systèmes Industriels, pp 63.
- Håvold, J.I., (2007), « *From Safety Culture to Safety Orientation ; Developing a tool to measure safety in shipping* » Thesis for the degree of doctor, Norwegian University of Science and Technology. ISBN 978-82-471-3957-8.p44.
- Heraut A., (2004), « *de la maitrise de l'urbanisation et des risques industriels : une impossible équation ?* », diplôme d'études approfondies « droit de l'environnement et urbanisme », universite de limoges - faculté de droit et de sciences économiques C.R.I.D.E.A.U. – UMR 60/62 – CNRS/INRA.
- Lahidji R., (2012), « *Incertitude, causalité et décision : le cas des risques sociaux et du risque nucléaire en particulier* », thèse de doctorat Ecole des hautes études commerciales de paris, Ecole Doctorale « Sciences du Management/GODI » - ED 533, Gestion Organisation Décision Information.
- Mazouni M.H., (2008), « *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 Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Nguyen Q., (2009), « *Fiabilité des installations industrielles sous impacts de fragments de structures-effet domino* », Ph.D. thesis, Université de Paris-Est Laboratoire MSME (FRE3160 CNRS). Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
- Zouaoui-Elloumi S., (2012), « *Reconnaissance de comportements de navires dans une zone portuaire sensible par approches probabiliste et événementielle : Application au Grand Port Maritime de Marseille* », thèse de doctorat, l' École Nationale Supérieure des Mines de Paris Spécialité « Contrôle, Optimisation et Prospective », France.

## Normes :

- Directive 89/391/CEE*, directive 89/391/cee du conseil de l'union européenne, 1989.
- Loi n°98-05 du 25 juin 1998 modifiant et complétant l'ordonnance n° 76/80 du 23 octobre 1976 portant code maritime.

- NF EN 50126, (2000), « *Applications ferroviaires : Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS)* », AFNOR.
- NFPA 68 – Guide for Venting of Deflagrations – 2002 Edition.
- OIT, (1991), « *Prévention des accidents industriels majeurs* », BIT Editions.
- OMI, (2011), « *Bilan des travaux de l'Organisation Maritime Internationale* », pp5-6.
- OMI, (2014), « *La journée mondiale de la mer : sensibiliser l'opinion publique* » SUEZ environnement, Article publié le 30.09.14
- SOLAS, (2004), « *Texte récapitulatif de la Convention internationale de 1974 pour la sauvegarde de la vie humaine en mer et du Protocole de 1988 : articles, annexes et certificats* », Publié par L'organisation Maritime Internationale, 4 Albert Embankment, Londres SE1 7SR, édition récapitulative de, p714.

### Ouvrages :

- Adapté de la définition de l'OCDE, 1974, « *Transboundary transfer of potentially hazardous substances* ».
- AFNOR, (2002), « *Management du risque, approche globale* », (ISBN 2-12-169211-8).
- Chameroy J., et Bourieres P., (1977), « *Ports et navigation moderne* », édition EYROLLES 61, bd Saint Germain – paris.
- CNUCED, (2012), « *Liability and compensation for ship-source Oil Pollution*», An overview of the international Legal Framework for Oil Pollution Damage from Tankers.
- Colton T., (2011), « *Growth of the world fleet since XXII* », chapter3, edition OCDE, pp 70-77.
- Degre T., (2003), « *L'importance d'une approche de la sécurité maritime fondée sur les modèles d'évaluation des risques* », Recherche Transports Sécurité 7.8 21–32. Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.W
- Deming W.E., (1993), « *The New Economics* », MIT Press. Cambridge, MA.
- Desroches A., Lerroy A. and Vallée F., (2005), « *La gestion des risques : principes et pratiques* », Hermès-Lavoisier Editions, France.
- Diestel R., (2005), « *Graph Theory* », 3<sup>rd</sup> edition, Graduate Texts in Mathematics GTM», a book published by Springer.
- Guillaume Alessandro, (2009), « *AZF : Une vérité foudroyante - une affaire d'état* », Éditions Jean-Claude Gawsewitch, Paris, (ISBN 978-2-35013-165-8)
- Hallegatte S. et Przulski V., (2012), « *Gestion des risques naturels. Leçons de la tempête Xynthia* », Éditions Quae, 264 p.
- INSTN, (1996), « *L'analyse de risques, méthode MOSAR, fascicule à usage interne* » EDF, éditions Prévention Active n° HE-54/96/35 A.
- Laurent P., (2003), *Sécurité des procédés chimiques*. TEC&DOC Editions (in french).
- LE MOIGNE JL., (1977), « *La théorie du système général : théorie de la modélisation* », éditions Presses Universitaires de France, 241 pages.
- Lees F.P., (1980), « *Loss Prevention in the Process Industries* », Volume 1-2, Butterworths.
- Lees F.P., (1996), « *Loss prevention in the process industries* », (2<sup>nd</sup> Edition), Butterworth-Heinemann.

- Leibniz G. F. W., (1972), « *Principes de la nature et de la grâce fondés en raison* », *Œuvres*, éditions L. Prenant, Paris.
- Martin J.C., (2008), « *Incendies et explosions d'atmosphère* », ouvrage de PPUR presses polytechniques, 574 pages.
- Perilhon P. (1999), « Du risque à l'analyse des risques », développement d'une méthode MOSAR.
- Projet Rabaska, (2006), « *Étude d'impact sur l'environnement* ». Projet d'implantation d'un terminal méthanier. Tome 3, volume 1, chapitre 7. Canada. pp 7-1
- SDACR, (2005), « risques particuliers, risques sociétaux », SDACR du Rhone.
- Vissio P., (1972), « *aujourd'hui les mathématiques* », ouvrage pour un nouvel enseignement mathématique, page 68.

### Rapports, bilans et guides scientifiques:

- Châtelet E., Kadri F., Laclémence P., Lallement P., Aubert Ph., Eid M., and Gilibert P., (2010), « Détermination des Impacts de Sinistres en Cascade: état de l'art et méthodes d'analyse », WISG report, Troyes, France, pp : 26-27.
- Chiappori P.A . (1996), « *Risque et assurance*», Guide pratique et mémento , ISSN 1248-7570, Dominos (Paris), pp 116
- Clini F., Darbra R. M., and Casal J., (2009), «*Historical analysis of accidents involving domino effect*», in: Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali. Universit di Bologna.Via Terracini, 28. 40126. Bologna (Italy). Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC). Department of Chemical Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya. Diagonal 647, 08028-Barcelona. Spain.
- CNUCED, (2015), « *Etudes sur les transports maritimes 2015* », rapport du secrétariat de la conférence des nations unies sur le commerce et le développement CNUCED, Nations Unies, New York et Genève, 2015.
- Coutansais C., (2010), « *Transport maritime entre globalisation et développement durable* » <http://www.revuetudes.com/International>.
- Gledhill J. and Lines I., (1998), «*Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites*», CR Report 183, Health and Safety Executive.
- Grech M.R., Horberry,T.J. and Koester T., (2008), «Human Factors in the Maritime Domain». Taylor & Francis Group, LLC.CRC Press.p.8.
- INNOVATION MARITIME, (2014), « bilan de connaissances », transport maritime des hydrocarbures, institut maritime du Québec.
- INRS, (2004), « Prévention des incendies sur les lieux de travail », Institut National de Recherche et Sécurité (INRS), TJ 20.
- Khan F. I., (2001), «*Use Maximum-Credible Accident Scenarios for realistic and reliable risk assessment*», Cep magazine.org, pp 50-63.
- Khan F. I., and Abbasi S. A., (1996), «*MAXCRED-II: An advanced version of MAXCRED*», report n. cpce/r&d 14/96, Tech. rep., Pondicherry University, Pondicherry.
- Leprette E., (2002), « *Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques* », Rapport INERIS - W5, téléchargeable sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).

- Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement. «*Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT)* », Guide méthodologique, 160 pages.
- Perilhon P., (1996), « *Sécurité des installations – Méthode MADS-MOSAR* », support de cours, IUT Département Hygiène, Sécurité, Environnement, Université Bordeaux I.
- SONATRACH , (2009), « *Référentiel Investigations des Accidents et Incidents du Groupe SONATRACH* », direction générale santé, sécurité et environnement, p8-27.
- Theberge, M-C. (2002), «*Analyse de risques d'accidents technologiques majeurs* », guide document de travail, Direction des Évaluations environnementales, Québec. p4

Vallée A., Reimeringer M. and Fontaine F., (2012) « *les impacts sur les installations industrielles à risque, Préventive & Sécurité* », Document INERIS.

### Colloques, séminaires et conférences :

- CNUCED, (2007), « *Etude sur les transports maritime* », conférence des nations unies sur le commerce et le développement, Genève.
- Delvosalle C., Fievez C., and Brohez S., (2002), «*A methodology and a software (DOMINOXL) for studying domino effects, in: Chisa*», (2002), 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, Praha, Czech Republic, 25-29.
- Delvosalle CH., (1996), «*Domino effects phenomena: Definition, Overview and Classification*», *European Seminar on Domino Effects*, Leuven, Belgium, Federal Ministry of Employment, Safety Administration. Direction Chemical Risks, Brussels, Belgium, pp. 5-15.
- Gardes L., Debray B., et Londiche H., (1999), «*Méthodologie d'analyse des risques dans les PME/PMI*», Qualita 99, 3ème congrès international pluridisciplinaire qualité et sûreté de fonctionnement, pp 165-176.
- Tixier J., Rault-Doumax S., Dandrieux A., Dimbour J.P. and Dusserre G., (2002), «*Geosiris : Domino effects software. gosiris :Logiciel de gestion des effets domino*», in: λμ13 - ESREL European Conference.

### Autres :

- Besse P., (2004), «*Research Challenges in Maritime Safety*». SORTA 2004, Plitvice, Croatia.
- Camps G., (1989), « *Arzew (Arzeu)* », *Encyclopédie berbère, 6, Antilopes – Arzuges*, Aix-en-Provence, Edisud, pp 943-948.
- Conseil économique, social et environnemental CESE, (2016), *Les ports ultramarins au carrefour des échanges mondiaux*, ouvrage de 216 pages, ISBN 978-2-11-138681-5.
- DMMP (2013/2014) Direction de la marine Marchande et des Ports, Ministère des Transports algérien.
- EPA, (2016), *Entreprise Portuaire d'Arzew*, consultée en avril 2014.
- Flanagan R., and Norman G., (1993), «*Risk Management and Construction*», Blackwell Science Ltd, Oxford, United Kingdom.
- Gallais B. A., (2012), « *Les sociétés de classification : Acteurs de l'ombre? Acteurs de premier plan!* », ISEMAR, Note de Synthèse n°142. ISSN: 1282-3910 Février, pp.1, 2.

- Hill R., (2007), « *Transnational Maritime Safety Projects within European Maritime Policy* ». Maritime Safety Umbrella Operation (MSUO). Maritime Safety Co-ordinator. [Www.maritime-safety.org](http://www.maritime-safety.org). Denmark. Consulté le 04.06.2015.
- Leprets M., (2005), « *Gestion des risques* », Dunod, (ISBN 978-2-10-057740-8).
- Roncalli T., (2001), « *Introduction à la gestion des risques* », cours de ENSAI, Groupe de Recherche Opérationnelle Crédit Lyonnais, 2001.
- Tazieff H., (1988), « *Catastrophes naturelles* », Entretien avec Roland Bechmann et Dominique Baricheff.
- TCTSG 8 /89, (2010), Team Coordination Training Student Guide (8/98), « *Effective mission analysis* », pp14-20.

---

## *Annexes*

---

---

## *Annexe 1-*

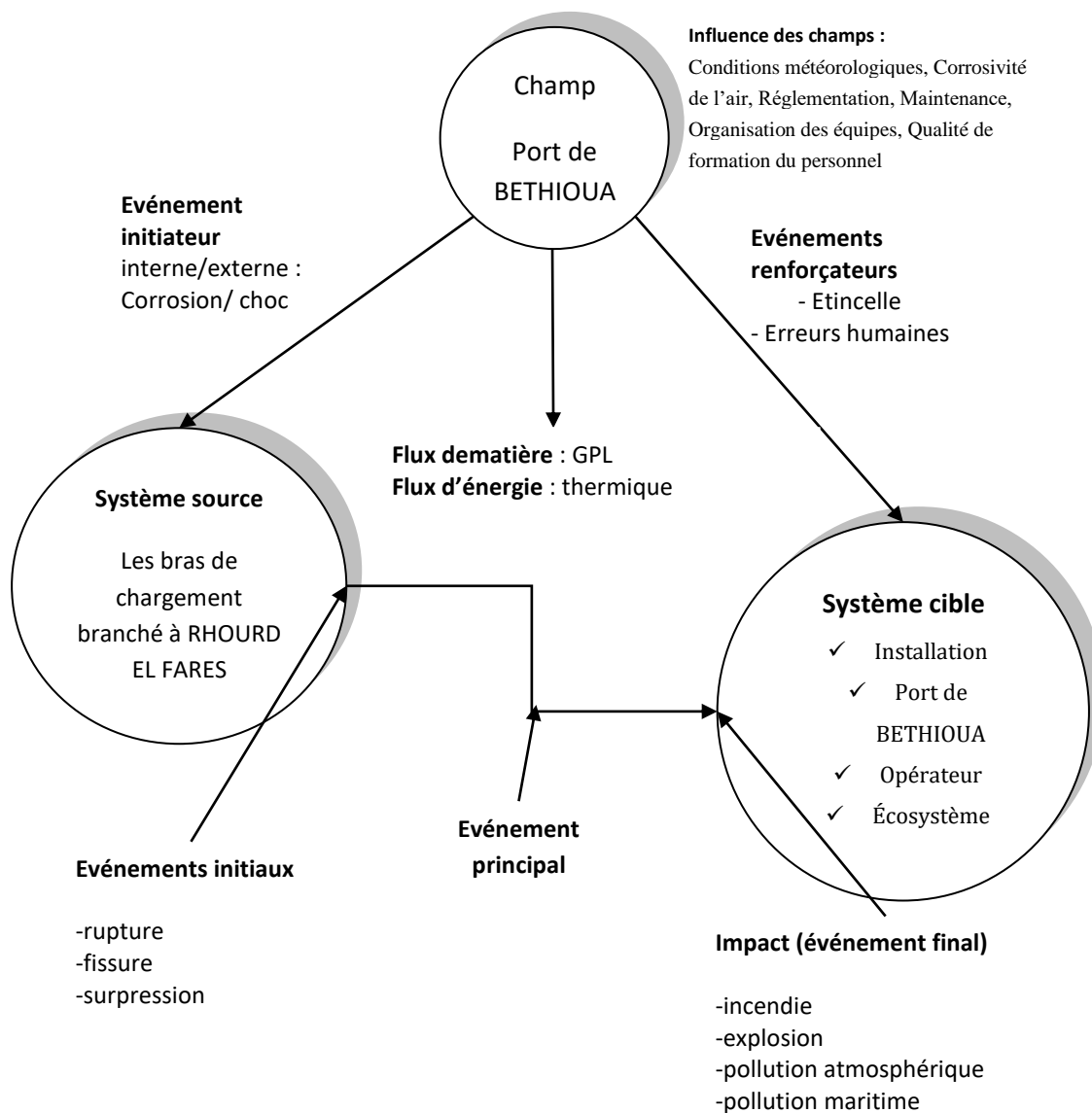
### *Application de la méthode MADS-MOSAR au port de Bethioua*

---

L'application de la méthode MADS/MOSAR a été réalisée par (Smaiah et Benharket, 2011) au niveau du port de BETHIOUA situé à l'ouest de l'Algérie. Cette application donne les résultats suivants :

La modélisation de l'installation se fait par le modèle MADS qui est un outil pratique définissant un modèle général de danger.

MADS est alors une étude du processus des dangers où sont mis en relation une source de danger et une cible à travers le flux de danger comme la présente figure le montre.



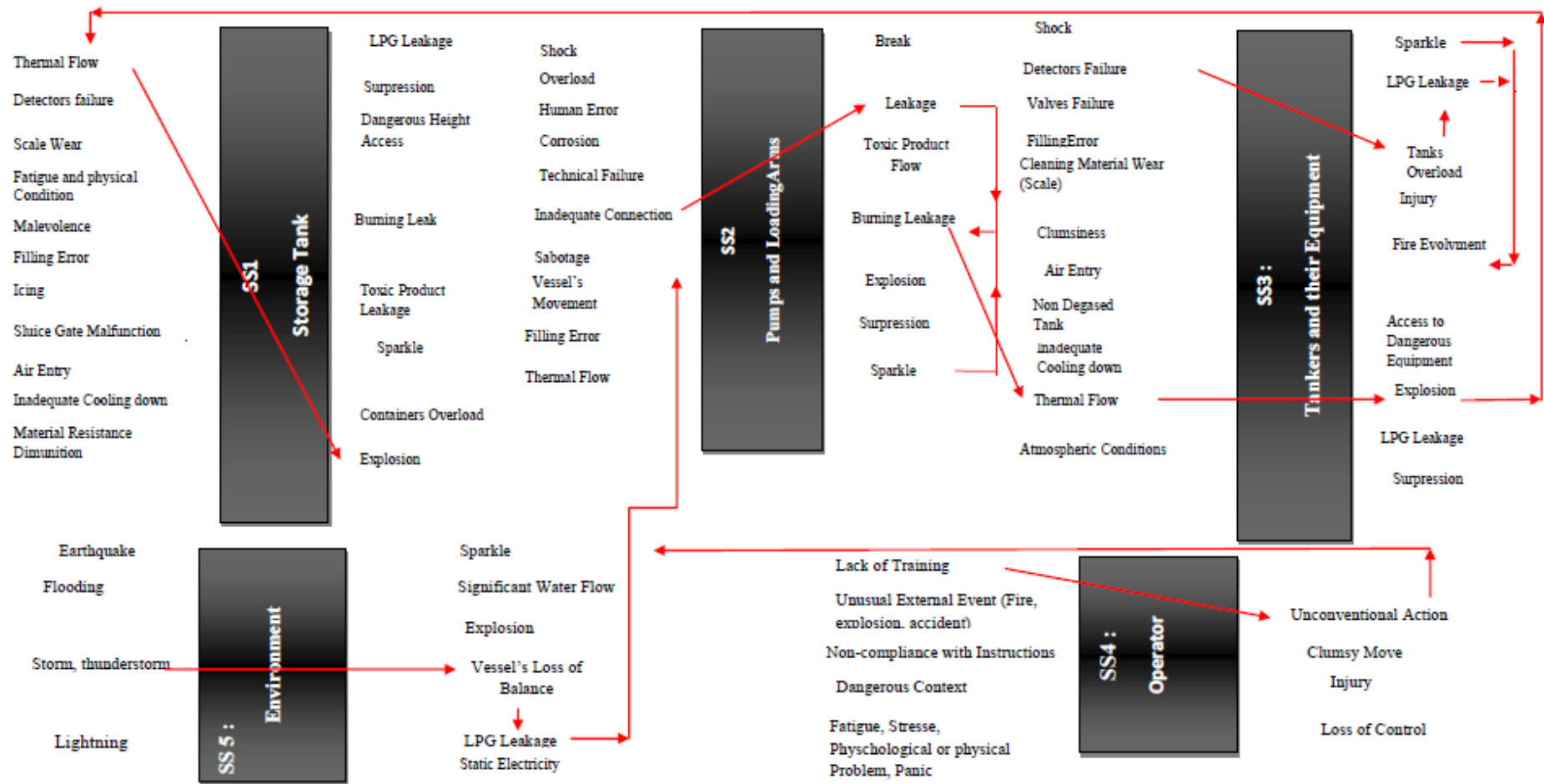
Source : (Smaiah et Benharket, 2011).

**Figure 1:** Modélisation de l'installation de chargement du port de BETHIOUA selon le modèle MADS.

Après la décomposition systémique de l'installation étudiée, chaque sous-système est transformé sous forme de boîte noire pour élaborer les scénarios courts des sous-systèmes.

Si l'on met toutes les boîtes noires sur une même page, il est possible de relier les sorties de certaines boîtes qui sont de même nature (repérées en principe par les mêmes mots) que les entrées d'autres boîtes, on montre les relations entre les différents sous-systèmes à travers l'occurrence des ENS. Ce lien nous permet de déduire les scénarios longs (Smaiah et Benharket, 2011) possibles (effet domino).

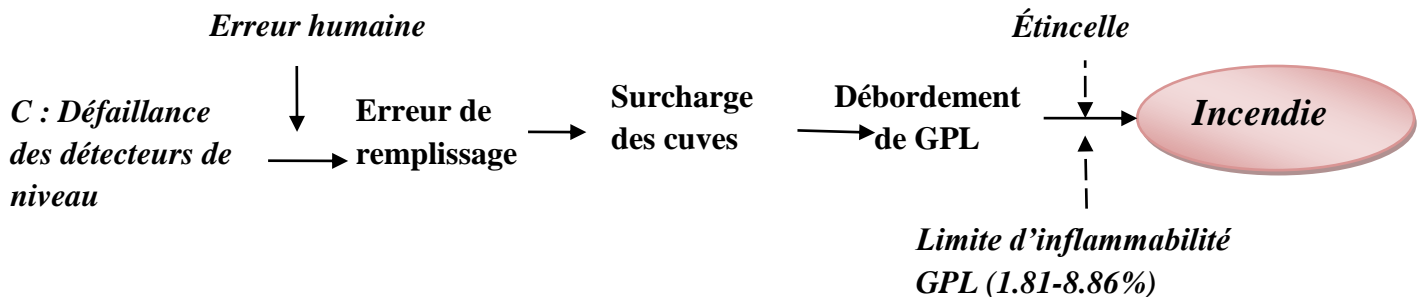
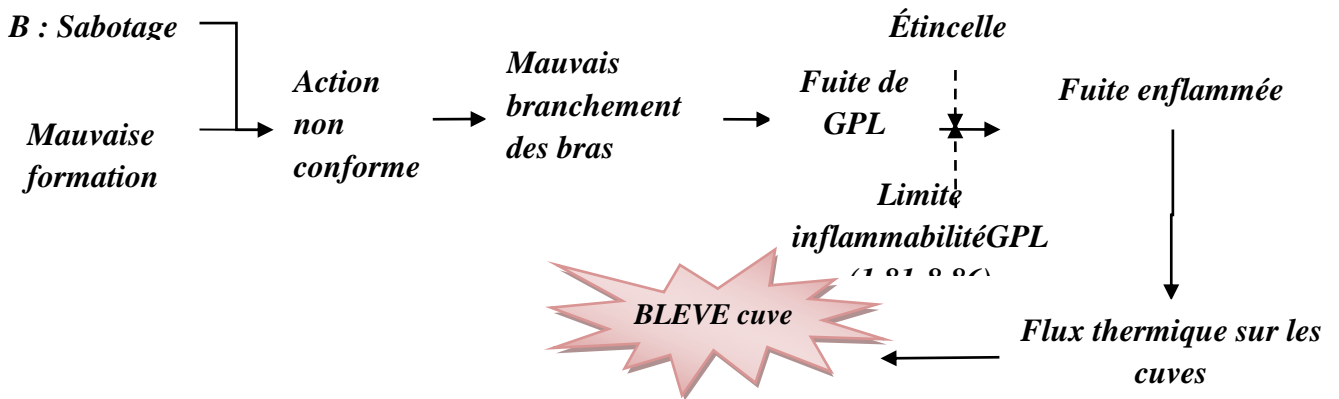
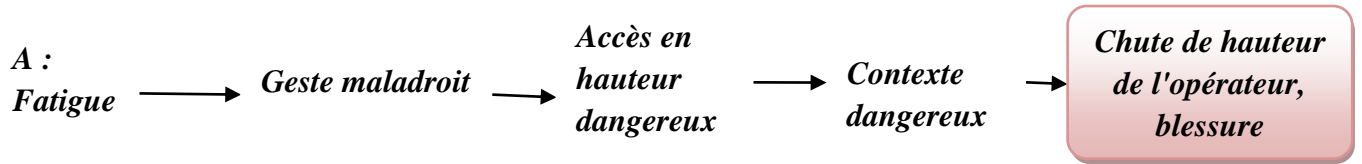


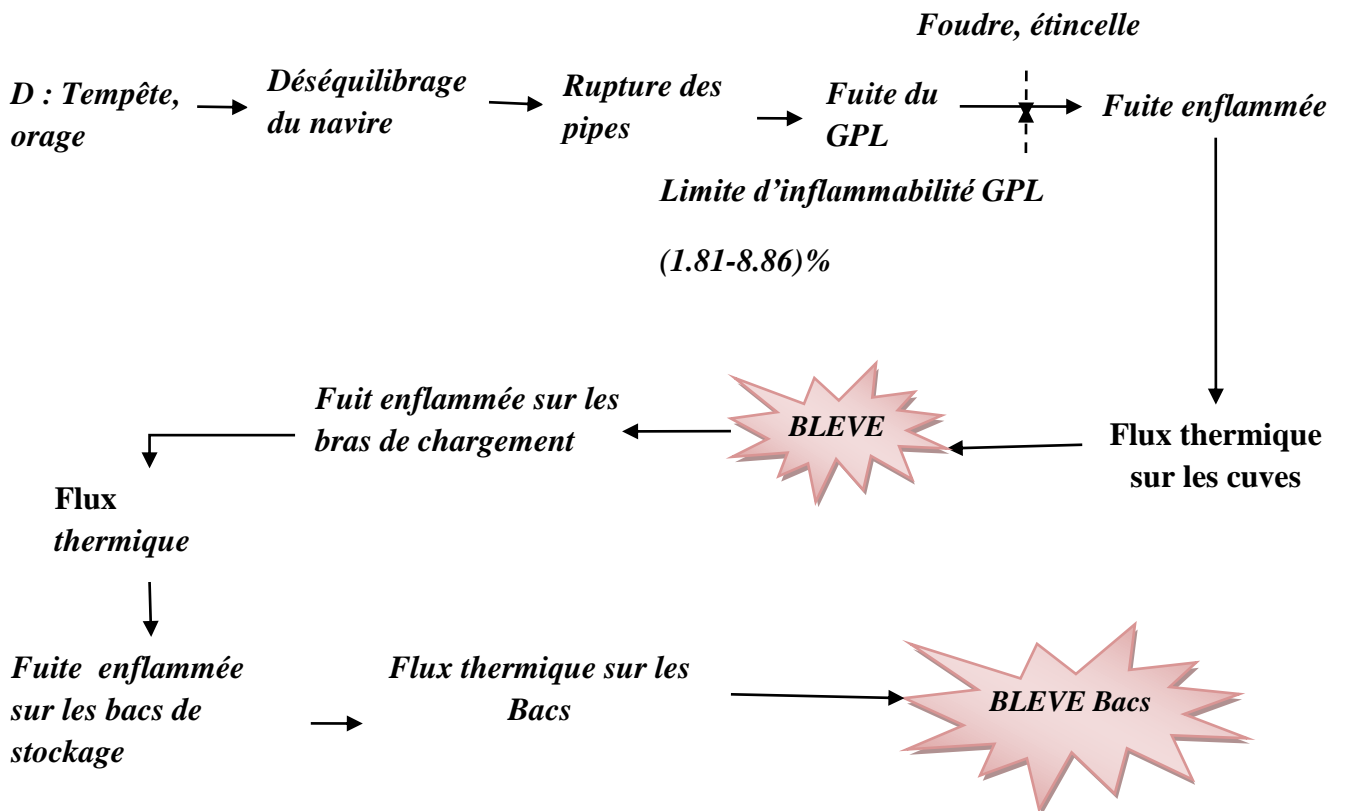


Source : (Smaiah et Benharklet, 2011).

Figure 2 :Les scénarios longs les plus plausibles et les plus critiques.

Pour l'installation chargement de GPL, nous avons représenté toutes les boîtes noires sur la figure.2.5 ce qui permet de générer quelques exemples des scénarios. Pour faciliter l'étude, nous citons quatre scénarios longs.





## Annexe 2

### Bilans d'accident au niveau du port de Bethioua



شركة تسيير و استغلال طرفيات موانئ المحروقات (ش.ت.ط.م.)  
 SOCIETE DE GESTION ET D'EXPLOITATION DES TERMINAUX  
 MARINS A HYDROCARBURES  
 STH Spa AU CAPITAL SOCIAL DE 1.000.000.000,00 D



#### Bilan 2011 de la pollution accidentelle.

Date de l'incident	Lieu de l'incident	Constatations et nature du polluant	Mesures prises
01/04/2011 à 07:45	Signalé par le PIC-11 au niveau du Sca-1na	-pétrole brulé en décomposition.	/
05/02/2011 à 10:00	Une légère pollution constatée au niveau du PO-01-02	-hydrocarbure non identifié	/
05/04/2011 à 08:30	Tout le long du quai Bethioua de service	-produit lourd.	/
05/04/2011	Au niveau du S1	-Légère fuite d'huile provoquée par l'éclatement d'un flexible du bras.	Intervention de l'équipe antipollution avec la vedette SEPICUNE
11/04/2011 à 08:40	La passe du port d'Arzew	-produit non identifié. Sonde de débarrasage	/
15/04/2011 à 17:30	Entre le canal de rejet GNL et les ports S1, S2.	-nappe de couleur rouge à marée.	/
21/04/2011	pollution signalée au l'environ du port de Bethioua- (KARAVIA)		Intervention de l'équipe antipollution et vedette SEPICUNE -R.A.C sauf quelques lignes irrigations sur le bassin. Nettoyage et assainissement de cette irrigation avec du papier absorbant (1 rouleau)
01/05/2011	Au niveau de KARAVIA.	Non identifié	Intervention de l'équipe antipollution Quelques lignes utilisation sur le plan d'eau de O1-M5-M5 utilisation du papier absorbant autour du barge antipollution de KARAVIA.
10/05/2011 à 05:10	bras de chargement au port(S1)	-Fuite de gaz.	/
10/05/2011 à 12:30	La prise d'eau Mer « KARAVIA »	-une nappe de pollution.	/
05/01/2011 à 08:45	Le port S2.	- dégazage à l'atmosphère.	Arrêt de chargement dans le port S2.



Bilan 2011 de la pollution accidentelle.

Date de l'incident	Lieu de l'incident	Constatations et nature du polluant	Mesures prises
06/07/2011 à 17:24	Arrêt du déchargement au niveau du collier du bras de chargement au niveau S1 (JANUK).	- Une légère fuite.	/
06/07/2011 à 19:30	Au niveau du S2	- Une fuite d'essence	-200 litres la fuite maltraitée
11/07/2011 à 08:30	Une nappe assez épaisse signalée par le MAZ II.	- nappe à produit non identifié.	/
14/07/2011 à 11:00	- Nappe importante aux longeurs des SRM1 et SRM2.  - Quelques nappes éparpillées aux longes du SRM2.	- des nappes d'un produit lourd.	/
21/07/2011 à 17:30	La ligne de chargement du GNL1	-Fuite GNL.	-Le navire a continué de charger avec seulement deux bras au lieu de trois bras.
20/07/2011 à 12:30	La bouée rouge de la passe-ouest- venant de large.	- la présence d'une nappe de pollution peu importante.	Garde-côte avisé
04/08/2011	Station KAHARMA.	Pollution légère	Intégration aux l'entour de la prise d'eau de mer de la station KAHARMA.
09/08/2011 à 08:30	Depuis la passe ouest jusqu'aux environs d'un mille vers le large.	- Présence d'une nappe de pollution, Produit léger et source non identifiée	/
11/08/2011	KAHARMA(02)	Produit noir	/
15/08/2011 à 11:00	La prise d'eau Mer à KAHARMA a	nappe assez importante de pétrole brute.	-Vite En Alarme  -Intervention de l'équipe antipollution (utilisation de trois rouleaux papier absorbant de 5h :30 à 15h :30



Bilan 2011 de la pollution accidentelle.

Date de l'incident	Lieu de l'incident	Constatations et nature du polluant	Mesures prises
18/09/2011 à 12:30	-Pollution au niveau du bassin du Bethloua -Côté P1/P2/P3	-Nappes épaisses d'hydrocarbure.	-Utilisation de la barge SETHOLINE -Véto à KARRAMA avec le directeur de l'environnement de la wilaya d'Oran.
19/09/2011 à 11:30	La plage à l'entrée du port de Bethloua à proximité d'ORASCOM	-Nappes d'hydrocarbure	Garde-côte avisé RAF avisé
22/09/2011	Intervention sur demande de STH sur la SPV2 pour vidange et rinçage de bouée.		Intervention de l'équipe antipollution et l'utilisation de la barge TORADA avec la présence du niveau anti-incendie du groupe STH (l'opération a été durée 2 jours, récupération de 20m <sup>3</sup> de pétrole brute)
01/09/2011	Au niveau P2 (navire de chargement)	Pétrole brute	-Intervention de l'équipe antipollution -Garde-côte : saisi des documents du navire pollueur.
04/09/2011	SPV2	Pétrole brute	-Opération de vidange de la SPV2 par la vedette « OUSD TORADA », la quantité récupérée 2 m <sup>3</sup> . -le 05/09/2011 : vidange de la « TORADA » 02m sur camion NAFTAL
07/09/2011 à 19:00	La vanne principale au M2	-Une fuite GNL	-la fuite est colmatée durant le chargement.
08/09/2011		Pétrole brute	Récupération d'une pollution entre SPV1 et SPV2 rinçage et récupération de la pollution 2m <sup>3</sup> utilisation du papier absorbant (TORADA) 2m <sup>3</sup> .
29/10/2011 à 09:00	Au niveau du « sea-line »	Nappe de pollution	/
10/11/2011 à 14:30	Signalé par la structure HSE de SP2	Odeur des gaz non identifiées	La durée du dégagement de ce gaz été limité une demi heure, et le signalé été le 12/11/2011 par fax.  Réunion a été faite (voies PV).
07/11/2011 à 16:15	Signalé par la structure HSE de SP2	Odeur des gaz non identifiées	La durée du dégagement de ce gaz été limité une demi heure, et le signalé été le lendemain par fax

---

## Annexe 3-

### Représentation des plans de danger par le logiciel GéoGebra

---

**GeoGebra** est un logiciel de géométrie dynamique en 2D/3D c'est-à-dire qu'il permet de manipuler des objets géométriques (cercle, droite et angle, par exemple) et de voir immédiatement le résultat. Il vient aussi avec un ensemble de fonctions algébriques.

Le logiciel a été créé par Markus Hohenwarter, professeur autrichien travaillant à l'Université de Linz et est développé par une équipe internationale de programmeurs.

À partir de la version 3.0, sortie le 23 mars 2008, l'utilisateur peut créer ses propres outils.

Avec la version 3.2, sortie le 3 juin 2009, un tableur est disponible.

Avec la version 4.0, sortie le 20 octobre 2011, apparaît GeoGebraPrim, une interface spéciale pour les jeunes chercheurs.

Depuis la version 4.2, sortie le 1<sup>er</sup> décembre 2012, il est possible de faire du calcul formel.

GeoGebra permet d'explorer la géométrie affine : l'utilisateur peut manipuler les différents objets géométriques de base dans un plan : cercle, droite, angle, etc.

Il est principalement utilisé par des enseignants, mais toute personne souhaitant explorer de façon visuelle les transformations géométriques dans le plan en tirera profit. Des chercheurs en géométrie peuvent l'utiliser pour valider de nouvelles constructions faisant appel aux propriétés d'incidence du plan, telles le parallélisme.

La possibilité d'adapter les unités du repère au problème en cours en fait un excellent grapheur, d'autant plus qu'il est immédiat (grâce à la fenêtre de saisie) d'entrer la fonction, et qu'une fois que c'est fait, on peut lui appliquer du calcul formel (recherche de zéros, d'un extremum...).

C'est aussi un logiciel pour expérimenter en probabilités et en Statistique (statistiques descriptives, distributions, tests d'hypothèse et intervalles de confiance). Il intègre un tableur et il bénéficie aussi d'une bonne intégration dans le langage html.

Entièrement développé en Java, ce logiciel fonctionne sur tous les systèmes d'exploitations qui incluent Java : Windows, Linux, Mac OS, etc. Il suffit de le lancer via une page web ou de télécharger le logiciel.

✓ *Adaptation du logiciel Géogebra à notre cas*

*A l'aide de boites noires des sous-systèmes, et au tableau de l'occurrence des ESDs, on introduit les données dans le logiciel pour obtenir les points contours des plans de danger.*

*Dans notre cas on obtiendra 3 plans de danger :*

- *Plan de danger Pollution*
- *Plan de danger Incendie*
- *Plan de danger Explosion*

*L'axe des « x », c'est l'axe vert représente les 5 sous-systèmes :*

- S<sub>1</sub>** = bac de stockage et ses équipements ;
- S<sub>2</sub>** = la pompe et le poste de chargement ;
- S<sub>3</sub>** = navire citernes et ses équipements ;
- S<sub>4</sub>** = opérateur ;
- S<sub>5</sub>** = environnement.

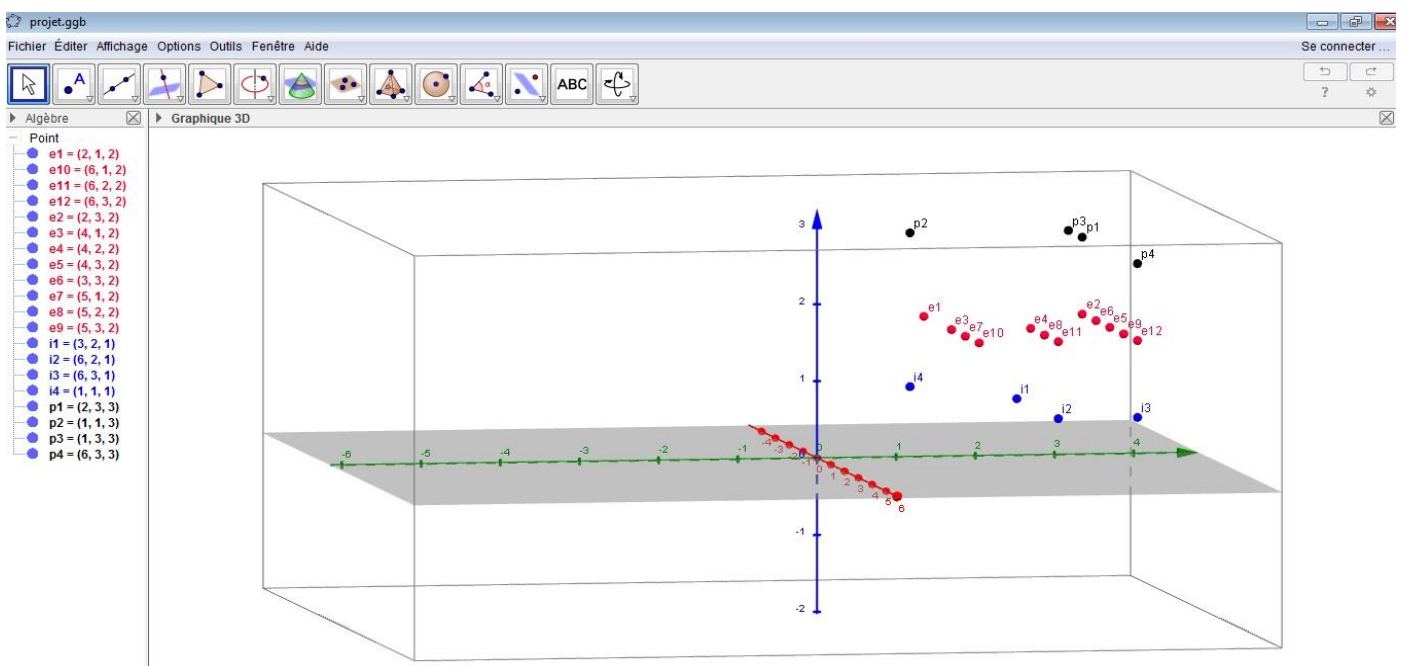
*L'axe des « y », c'est l'axe bleu, représente les 3 ENSs :*

- E<sub>1</sub>** = pollution ;
- E<sub>2</sub>** = incendie ;
- E<sub>3</sub>** = explosion.

*L'axe des « z », c'est l'axe rouge, représente les 6 ESDs les plus fréquents dans la liste de 25 ESDs :*

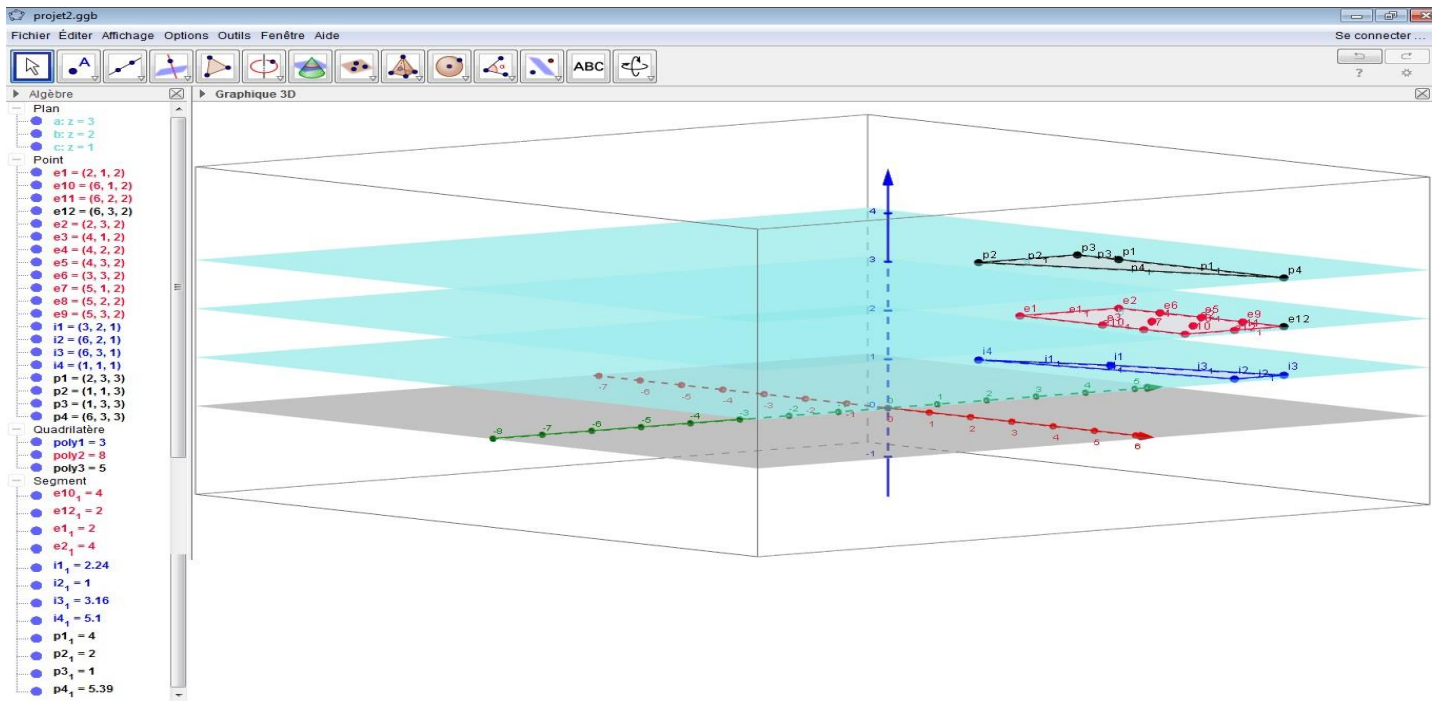
- U<sub>1</sub>** = erreur de remplissage ;
- U<sub>2</sub>** = défaillance des détecteurs et des soupapes ;
- U<sub>3</sub>** = choc ;
- U<sub>4</sub>** = flux thermique ;
- U<sub>5</sub>** = erreur humaine ;
- U<sub>6</sub>** = sabotage.

*Après l'insertion des points dans le logiciel, obtiendra la figure suivante (Fig.III.14) :*





L'étape suivante c'est faire enchaîner les points de chaque ENS pour obtenir des plans qu'on appelle plans de danger, comme la figure suivante (Fig.III.15) le montre :



## ملخص-

التأثيرات المتسلسلة ليست فقط ظاهرة معقدة، ولكن أيضا مسؤولة عن وقوع عدة حوادث كارثية خاصة في صناعة البتروكيماويات وكذلك في مجالات تخزين المنتجات البترولية. ونتيجة لذلك، يتم التعرف على المخاطر المحتملة من هذه السيناريوهات على نطاق واسع في التشريع الذي يتطلب النظر في عواقب وقوع حادث على المنشآت المجاورة (مفهوم التأثيرات المتسلسلة) من خلال التفاعل بين مرافق نفس المؤسسة أو عن طريق التفاعل بين المرافق القريبة. وعلى الرغم من ضخامة العواقب المرتبطة بالتأثيرات المتسلسلة، فإن الأدب في تحليل هذه الآثار فقيرة من حيث المناهج النظرية لتحليل هذه الظاهرة. في هذا السياق، تقدم هذه الأطروحة مقترحات لدراسة التأثيرات المتسلسلة عن طريق استخدام نظريات المجموعات والرسوم البيانية. تطبيق هذه النظريات المبتكرة على ميناء بطيوية هو عبارة على توضيح العديد من مساهماتنا في مجال الأمن البحري في الموانئ الجزائرية.

**الكلمات الرئيسية-** التأثيرات المتسلسلة، الرسم البياني، المجموعات، النظرية، السلامة البحرية، ميناء بطيوية.

**Résumé -** *L'effet domino est, non seulement un phénomène complexe, mais également responsable de plusieurs accidents catastrophiques notamment dans l'industrie pétrochimique ainsi que dans les zones de stockage des produits pétroliers. Conséquemment, le risque potentiel de ces scénarios d'accidents est largement reconnu dans la législation qui exige d'examiner les conséquences d'un accident sur des installations voisines (concept d'effet domino) soit par interaction entre les installations d'un même établissement soit par interaction entre les établissements proches.*

*Malgré l'ampleur des conséquences associées aux effets dominos, la littérature spécialisée dans l'analyse des effets dominos est pauvre en matière d'approches théoriques d'analyse de ce phénomène. S'intégrant dans ce contexte, la présente thèse de doctorat présente des propositions d'étude des effets domino par usage des théories des ensembles et des graphes.*

*L'application de ces études innovantes au cas du port de Bertioua est également présentée afin d'illustrer les multiples apports de nos contributions en matière de la sécurité maritime au niveau des ports algériens.*

**Mots-clés :** *Effet domino, graphe, ensemble, théorie, sécurité maritime, port Bertioua*

### **Abstract –**

*The domino effect is not only a complex phenomenon but also responsible for several catastrophic accidents, notably in the petrochemical industry as well as in the storage areas for petroleum products. Consequently, the potential risk of these accident scenarios is widely recognized in legislation requiring that the consequences of an accident be examined on neighboring facilities (concept of domino effect), either by interaction between installations of the same establishment, or by interaction between nearby institutions.*

*Despite the magnitude of the consequences associated with domino effects, the literature that specializes in the analysis of domino effects is poor in theoretical approaches to the analysis of this phenomenon. Integrating in this context, the present doctoral thesis presents different proposals for studying domino effects by using theories of sets and graphs.*

*The application of these innovative studies to the case of the port of Bertioua is also presented in order to illustrate the multiple contributions of our contributions to maritime safety at the level of the Algerian ports.*

**Keywords-** *domino effect, graph, set, theory, maritime safety, Bertioua port*