



HAL
open science

Etude des effets dominos sur une zone industrielle

Nassim Alileche

► **To cite this version:**

Nassim Alileche. Etude des effets dominos sur une zone industrielle. Génie des procédés. INSA de Rouen; Università degli studi (Bologne, Italie), 2015. Français. NNT : 2015ISAM0013 . tel-02614383

HAL Id: tel-02614383

<https://theses.hal.science/tel-02614383v1>

Submitted on 20 May 2020

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

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

THÈSE EN COTUTELLE INTERNATIONALE

Présentée à :

L'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen

En vue de l'obtention du grade de :

Docteur en Génie des Procédés

**Dottorato di Ricerca in Ingegneria chimica, dell'ambiente e
della sicurezza**

Par

Nassim ALILECHE

« Étude des effets dominos sur une zone industrielle »

Le 14 décembre 2015

Devant le jury composé de :

Pr André LAURENT

Professeur des Universités émérite, LRGP Nancy (*rapporteur*)

Pr Patrick COGNET

Professeur des Universités, LGC Toulouse (*rapporteur*)

Dr Jean-Christophe BUVAT

Directeur du département MRIE, INSA de Rouen

Pr Valerio COZZANI

Professore ordinario, Università di Bologna

Pr Lionel ESTEL

Professeur des Universités, INSA de Rouen

Dr Mohamed EID

Expert senior, CEA Saclay

Dr Edith LECOMTE-NORRANT

Director Innovation, Technology and Sciences, UCB BioPharma

Pr Damien OLIVIER

Professeur des Universités, Université du Havre

Pr Ernesto SALZANO

Professore Associato, IRC-CNR, Napoli

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été développés dans le cadre d'une thèse préparée en cotutelle internationale au Laboratoire de Sécurité des Procédés Chimiques (LSPC) de l'INSA de Rouen, en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes (LITIS) et au Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) de l'Université de Bologne (Italie). En France, sous la direction de monsieur Lionel ESTEL et la codirection de monsieur Damien OLIVIER, en Italie, sous la direction de monsieur Valerio COZZANI.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail, en particulier mes directeurs, qui m'ont accordé leur confiance et donné l'opportunité d'exprimer mes compétences dans un domaine qui me passionne et de développer de nouvelles connaissances. Je les remercie pour leurs temps, leurs patiences et leurs soutiens scientifiques, techniques, financiers et moraux.

Je remercie le professeur Cozzani pour l'accueil qu'il m'a réservé lors de mes séjours en Italie.

Egalement, je remercie vivement :

- Madame Edith LECOMTE-NORRANT d'avoir acceptée de présider le jury
- Messieurs André LAURENT et Patrick COGNET, rapporteurs, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail
- Messieurs Ernesto SALZANO, Mohamed EID et Jean-Christophe BUVAT pour avoir accepté d'être membre de mon jury de thèse
- Le Conseil régional de Haute-Normandie pour leur soutien financier au réseau Maîtrise des Risques Technologiques (MRT) et le financement de ma thèse
- Les membres du laboratoire LSPC et du département DICAM pour leurs soutiens et conseils

J'adresse un grand merci à mes collègues doctorants français et italiens pour l'agréable et chaleureuse ambiance de travail et à toutes les personnes qui m'ont encouragé au cours de ces trois années, et plus particulièrement mes collègues de bureau en France et en Italie.

Enfin et surtout, je tiens à remercier ma femme, loulou, mes parents et mes deux sœurs qui m'ont toujours soutenu et aidé.

RÉSUMÉ

Les effets dominos ou cascade d'événements dans les industries et particulièrement dans les industries chimiques et de transformation, sont reconnus comme des scénarios d'accidents possibles depuis environ trois décennies. Ils représentent une préoccupation croissante, car ils ont le potentiel de provoquer des conséquences dévastatrices. L'effet domino, comme phénomène, est un sujet controversé lorsque son évaluation est nécessaire. L'examen de la bibliographie a démontré l'absence d'une définition commune et d'une procédure simple d'utilisation et précise pour son appréciation. C'est pourquoi l'un des objectifs de cette recherche est de formaliser les connaissances relatives aux effets dominos afin de comprendre les mécanismes de leurs occurrences. Pour ce faire nous avons étudié les paramètres à examiner pour déterminer la possibilité de cascade et être en mesure d'identifier les scénarios dominos. L'enjeu étant de permettre l'amélioration de la prévention du risque d'effet domino. L'autre objectif est donc de produire une méthode pour l'identification et l'analyse des effets dominos.

Nous avons développé une méthodologie globale pour l'étude des effets dominos en chaîne initiés par des pertes de confinement. Elle permet l'identification et la hiérarchisation des chemins de propagation des accidents. Cette méthode facilite la prise de décision pour la prévention des effets dominos, tout en proposant un outil efficace et simple d'utilisation.

Les résultats de l'étude sont fournis sous forme d'une hiérarchisation quantitative des équipements impliqués dans les scénarios dominos, en tenant compte des effets des conditions météorologiques et des mesures de maîtrise des risques existantes ou proposées.

Cette hiérarchisation donne une idée claire des dangers que représentent les équipements par rapport aux accidents en cascade, en précisant si la dangerosité de l'équipement provient de sa capacité à initier ou à propager un effet de cascade.

La méthode est basée sur une description topographique de la zone étudiée, incluant les caractéristiques de chaque équipement, et prend en compte les mesures de maîtrise des risques mises en œuvre par l'industriel. Elle repose sur deux phases principales : La première, est l'identification des chemins de propagation des accidents. Pour ce faire, la méthode d'analyse

par arbre d'événements est utilisée. Les cibles potentielles sont déterminées en combinant les valeurs seuils d'escalade et les modèles de vulnérabilité (pour l'estimation de la probabilité d'endommagement). Cette première phase est implémentée sous MATLAB® et Visual Basic for Applications (VBA) afin de faciliter l'entrée des données, et l'analyse des résultats dans Microsoft Excel®.

La deuxième phase est l'identification des équipements les plus dangereux vis-à-vis des effets dominos. Elle consiste à hiérarchiser les équipements impliqués dans les chemins de propagation, en fonction de leur vraisemblance à causer ou à propager un effet domino. L'algorithme qui effectue cette phase est codé sous VBA.

La méthode a été conçue de façon à ce qu'elle puisse être utilisée sans qu'il soit nécessaire de s'appuyer sur les résultats des études de dangers. Néanmoins, si ces résultats sont disponibles, il est alors possible d'alléger certaines étapes de la méthode. Elle s'est révélée facile à utiliser, cela a été constaté lors de son application dans le cadre de projets et stages d'étudiants.

ASTRATTO

Gli effetti domino, in cui un primo incidente causa in cascata altri scenari incidentali, sono tra gli scenari incidentali più severi che avvengono nell'industria chimica. Nonostante l'attenzione che anche la normativa dedica a tali scenari, la valutazione dell'effetto domino è un soggetto controverso. L'analisi della letteratura tecnica e scientifica ha mostrato l'assenza di una definizione comune di « effetto domino » e di una semplice procedura per l'identificazione di tali scenari. È per tale motivo che uno degli obiettivi di questo lavoro di ricerca è di formalizzare le conoscenze relative agli effetti domino al fine di meglio comprendere i meccanismi che possono provocarli. A tal proposito sono stati studiati i parametri necessari per determinare la possibilità dell'insorgere di cascate di eventi e per essere in grado di identificare i possibili scenari incidentali dovuti ad effetto domino. L'obiettivo finale del lavoro è stato di sviluppare un metodo per l'identificazione e l'analisi quantitativa della propagazione di incidenti primari nell'ambito di scenari dovuti ad effetto domino.

E' stata sviluppata una metodologia generale per l'analisi degli effetti domino causati da perdite di confinamento. Tale metodologia permette l'identificazione e la classificazione dei percorsi di propagazione degli incidenti. Tale metodo facilita inoltre la prevenzione degli effetti domino, proponendo uno strumento efficace e semplice da utilizzare.

I risultati di questo studio sono forniti in forma di una classificazione delle apparecchiature coinvolte in scenari dovuti ad effetto domino, tenendo conto degli effetti delle condizioni meteorologiche e delle misure esistenti per la gestione del rischio. Tale classificazione fornisce anche un chiara idea dei pericoli rappresentati dalle singole apparecchiature nel caso di incidenti in cascata, in quanto precisando se la pericolosità delle attrezzature proviene dalla loro capacità di innescare o propagare un reazione a catena.

Il metodo è basato su una descrizione topografica del sito studiato, che comprende anche le caratteristiche di ogni attrezzatura, che tiene conto delle misure di gestione dei rischi e delle barriere di sicurezza presenti, basato su due fasi principali. La prima è l'identificazione dei percorsi di propagazione degli incidenti. A tale scopo è stato utilizzato un metodo basato

sull'albero degli eventi. I potenziali bersagli vengono determinati combinando i valori di soglia per la propagazione degli eventi ed i modelli di vulnerabilità delle apparecchiature. Questa prima fase è implementata in MATLAB[®] e Visual Basic for Applications (VBA) in modo da facilitare la gestione dei dati e l'analisi dei risultati in Microsoft Excel[®].

La seconda fase è l'identificazione delle apparecchiature più pericolose per gli effetti domino. Tale fase consiste nel classificare le apparecchiature coinvolte nei percorsi di propagazione in funzione della loro capacità di causare o propagare un effetto domino. L'algoritmo dedicato in questa fase è eseguito su VBA.

I risultati ottenuti anche nell'applicazione ad un caso di studio hanno evidenziato le potenzialità del metodo, che rappresenta un significativo progresso nell'analisi quantitativa dell'effetto domino.

ABSTRACT

Domino effects or cascading events in the chemical and process industries are recognized as credible accident scenarios since three decades. They are raising a growing concern, as they have the potential to cause catastrophic consequences. Domino effect, as phenomenon, is still a controversial topic when coming to its assessment. There is still a poor agreement on the definition of domino effect and its assessment procedures. A number of different definitions and approaches are proposed in technical standards and in the scientific literature.

Therefore, one of this research objectives is to formalize domino effects knowledges in order to comprehend their occurrence mechanisms. Thus, the parameters that should be looked at so as to understand the escalation possibility and in order to identify domino scenarios, were analyzed. The aim is to improve domino effect hazards prevention, through the development of a methodology for the identification and the analysis of domino effects.

We developed a method for the analysis of domino accident chain caused by loss of containments. It allow the identification and prioritization of accident propagation paths. The method is user-friendly and help decision making regarding the prevention of cascading events. The final outcomes of the model are given in form of quantitative rankings of equipment involved in domino scenarios, taking into account the effect of meteorological conditions and safety barriers.

The rankings give a clear idea of equipment hazard for initiating or continuing cascading events.

The methodology is based on a topography of the industrial area of concern, including the characteristics of each unit and accounting for protection and mitigation barriers. It is based on two main stages. The first is the identification of accident propagation paths. For this, the event tree method is used. The possible targets are identified combining the escalation thresholds and vulnerability models (to estimate damage probability). This first stage was implemented using the MATLAB[®] software and Visual Basic for Applications (VBA) to enable an easy input procedure and output analysis in Microsoft Excel[®].

The second stage is the identification of the most dangerous equipment. It consists in prioritizing equipment involved in the propagation paths according to their likelihood to cause/propagate domino effect. The algorithm that performs this phase was coded in VBA.

The method was designed so as it can be used without the need to rely on the results of safety reports. However, if such results are available, it is possible to lighten some steps of the method. It revealed easy to apply, this was confirmed through projects and student internships.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1 EFFETS DOMINOS ET ANALYSE DES RISQUES : MISE EN CONTEXTE.....	7
1.1 Notions de base	7
1.1.1 Définitions.....	7
1.1.2 Installations classées & étude de dangers	10
1.1.3 Méthodes d'analyse des risques	11
1.2 Effets dominos	14
1.2.1 Définitions.....	14
1.2.2 Législation française : aperçu historique	17
1.3 Exemples d'accidents passés impliquant les effets dominos	20
1.3.1 Accident de Mexico, 19 novembre 1984	20
1.3.2 Accident de Buncefield, Royaume-Uni, 11 décembre 2005	23
1.4 Approches scientifiques et méthodologies existantes	27
1.4.1 Analyse des accidents passés	29
1.4.2 Approche qualitative	39
1.4.3 Approche quantitative	40
1.4.3.1 Vulnérabilité des équipements aux effets de suppression.....	43
1.4.3.2 Vulnérabilité des équipements aux effets thermiques	44
1.4.3.3 Vulnérabilité des équipements aux impacts de fragments	46
1.4.4 Outils d'aide à la décision existants	47
1.4.4.1 DOMIFFECT (DOMIno eFFECT), 1998	47
1.4.4.2 STARS Domino, 2001	48
1.4.4.3 Domino XL 2.0, 2002	49
1.4.4.4 Version domino du logiciel Aripar-GIS, 2006	51
1.4.4.5 DomPrevPlanning, 2007	52
1.5 Conclusion	54
CHAPITRE 2 ÉTUDE DES RISQUES DE PROPAGATION D'ACCIDENTS EN EUROPE : SEUILS POUR LES EFFETS DOMINOS ET DISTANCES DE SÉCURITÉ.....	57
2.1 Introduction.....	57
2.2 Cadre législatif et réglementaire	58
2.3 Définitions de l'effet domino	61
2.4 Seuils d'endommagement et seuils d'escalade (aggravation)	66
2.5 L'escalade, extension des dommages : distance de sécurité	72
2.6 Analyse des effets dominos.....	75
2.6.1 Royaume-Uni.....	79
2.6.2 Pologne.....	81
2.6.3 Pays-Bas.....	81

2.6.4	Allemagne	84
2.6.5	Belgique	84
2.6.6	France, Italie, Grèce et Catalogne (Espagne).....	85
2.7	Conclusion	88

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE POUR LA PRÉVENTION DES ACCIDENTS À EFFETS DOMINOS		90
3.1	Introduction.....	90
3.2	Démarche mise en œuvre pour le développement de la méthode proposée	91
3.2.1	Étude du retour d'expérience	92
3.2.2	Analyse des méthodes et outils existants	94
3.2.3	Conception d'une base de connaissances.....	95
3.2.4	Choix de l'approche à adopter et des techniques à utiliser	96
3.2.4.1	Approche probabiliste	96
3.2.4.2	Méthode de l'arbre d'événements.....	97
3.3	Méthodologie	98
3.3.1	Phase 1 : Identification des chemins de propagation	98
3.3.1.1	Description de la zone industrielle étudiée	99
3.3.1.2	Sélection des équipements sources	103
3.3.1.3	Sélection et caractérisation des pertes de confinement.....	105
3.3.1.4	Définition d'un arbre d'événements pour chaque scénario	107
	Pollution de l'environnement.....	108
3.3.1.5	Calcul des effets physiques des phénomènes dangereux	114
3.3.1.6	Identification des cibles et appréciation de la fréquence de l'effet domino	115
3.3.2	Phase 2 : Identification des équipements critiques	119
3.3.2.1	Estimation de la criticité de chaque scénario domino	121
3.3.2.2	Attribution d'un facteur de danger pour chaque séquence domino	123
3.3.2.3	Hierarchisation des équipements	123
3.4	Conclusion	124

CHAPITRE 4 APPLICATIONS À DES ÉTUDES DE CAS		125
4.1	Cas d'étude simplifié	125
4.1.1	Description de l'exemple d'application	125
4.1.2	Application de la méthode	128
4.1.2.1	Description de la zone industrielle étudiée	128
4.1.2.2	Sélection des équipements sources	130
4.1.2.3	Sélection et caractérisation des pertes de confinement.....	131
4.1.2.4	Affectation d'un arbre d'événements pour chaque ERC	133
4.1.2.5	Calcul des effets physiques générés par les phénomènes dangereux.....	136
4.1.2.6	Identification des cibles et calcul des fréquences de l'effet domino	138
4.1.2.7	Hierarchisation des séquences accidentelles.....	147

4.1.3	Discussion	150
4.2	Application de la méthode sur le parc de réservoirs de l'entreprise X (étude d'un cas réel)	151
4.2.1	Description du parc de réservoir de l'entreprise X	152
4.2.2	Choix des équipements sources	155
4.2.3	Fréquences d'occurrence des accidents primaires et évaluation des probabilités d'escalade	156
4.2.4	Identification des scénarios dominos (chemins de propagation)	157
4.2.5	Hierarchisation des séquences dominos, des équipements sources et des cibles primaires	160
4.3	Discussion	162
4.4	Conclusion	165
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	167
	ANNEXE I.....	171
	ANNEXE II.....	175
	ANNEXE III.....	177
	ANNEXE IV.....	178
	ANNEXE V.....	179
	ANNEXE VI.....	180
	ANNEXE VII.....	190
	ANNEXE VIII.....	194
	BIBLIOGRAPHIE.....	199

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Processus d'appréciation des risques	12
Tableau 1.2 Définitions de l'Effet Domino proposées dans la littérature	15
Tableau 1.3 Catégorisations de l'effet domino	17
Tableau 1.4 Coefficients des fonctions Probit pour le calcul de la probabilité d'endommagement, proposés par différents auteurs.....	44
Tableau 2.1 Exigences de l'article 9 de la directive 2012/18 /UE concernant l'effet domino.	59
Tableau 2.2 Récapitulatif des informations liées aux effets dominos, requises par les questionnaires d'application des directives Seveso.	61
Tableau 2.3 Définitions de l'effet domino	64
Tableau 2.4 Effet domino direct : vecteurs d'escalade générés par différents accidents primaires.....	67
Tableau 2.5 Estimation des dommages causés par la surpression/ flux thermique, proposée par OGP.....	68
Tableau 2.6 Seuils d'endommagement, seuils d'escalade et distances de sécurité pour l'escalade.....	71
Tableau 2.7 Récapitulatif des valeurs seuils pour les effets dominos utilisées dans huit États membres de l'UE.	78
Tableau 2.8 Procédure appliquée pour l'identification des groupes dominos au Royaume- Uni.....	80
Tableau 2.9 Distances de sécurité pour les installations vulnérables, à partir des stockages sous pression/procédés sous pression impliquant des gaz inflammables ..	83
Tableau 2.10 Type de dommages observés pour le seuil de surpression et le seuil thermique pour les effets dominos.	87
Tableau 3.1 Caractérisation des LOCs suggérées par le Purple Book	99
Tableau 3.2 Les informations requises pour l'application de la méthode	102

Tableau 3.3 Équipements considérés par le modèle et leurs fréquences annuelles de LOCs	103
Tableau 3.4 Les phénomènes dangereux possibles suite à une LOC et leurs gravités	105
Tableau 3.5 Probabilité d'inflammation directe des rejets gazeux	110
Tableau 3.6 Réactivité de certaines substances	110
Tableau 3.7 Probabilité d'allumage direct des liquides.	111
Tableau 3.8 Probabilité d'inflammation retardée en fonction des zones	112
Tableau 3.9 Coût moyens des différentes catégories d'incapacité pour les industries de la chimie, du caoutchouc et de la plasturgie	120
Tableau 3.10 Coefficients attribués pour chaque LOC	120
Tableau 3.11 Seuil d'endommagement des structures	121
Tableau 4.1 Coordonnées des équipements considérés dans le cas d'étude	126
Tableau 4.2 Données relatives aux capacités considérées pour le cas d'étude	126
Tableau 4.3 Conditions météorologiques utilisées pour le cas d'étude	127
Tableau 4.4 Résumé des données d'entrée utilisées.	129
Tableau 4.5 Caractéristiques des rejets continus de classe G2	133
Tableau 4.6 Phénomènes dangereux à associer aux ERC considérés pour les équipements T1 et T2 et leurs fréquences d'occurrence	134
Tableau 4.7 Phénomènes dangereux à associer aux ERC considérés pour les équipements T4 et leurs fréquences d'occurrence	134
Tableau 4.8 Effets thermiques générés par le jet enflammé survenu sur les équipements T1 et T2	137
Tableau 4.9 Distances des effets de la Boule de feu, BLEVE survenus sur les équipements T1, T2	137
Tableau 4.10 Distances des effets de l'éclatement de la capacité T4 et du feu de nappe qui en résulte	137
Tableau 4.11 Modèles de vulnérabilité	138
Tableau 4.12 Scénarios dominos de 1 ^{er} niveau avec prise en compte des MMR	139

Tableau 4.13 Scénarios dominos de 1 ^{er} niveau sans prise en compte des MMR.	141
Tableau 4.14 Scénarios dominos de 2 ^{ème} niveau avec prise en compte des MMR.	143
Tableau 4.15 Scénarios dominos de 2 ^{ème} niveau sans prise en compte des MMR.	145
Tableau 4.16 Hiérarchisation des séquences dominos de 1 ^{er} niveau en considérant les mesures de maîtrise des risques.	148
Tableau 4.17 Hiérarchisation séquences dominos de 1 ^{er} niveau sans considération des mesures de maîtrise des risques.	148
Tableau 4.18 Hiérarchisation séquences dominos de 2 ^{ème} niveau en considérant les mesures de maîtrise des risques.	149
Tableau 4.19 Hiérarchisation séquences dominos de 2 ^{ème} niveau sans considération des MMR.	149
Tableau 4.20 Informations relatives aux équipements et aux matières contenues	154
Tableau 4.21 Conditions météorologiques.	154
Tableau 4.22 Modèles de vulnérabilité	155
Tableau 4.23 Scénarios dominos de 2 ^{ème} niveau, engendrés par les équipements de la cuve N°2	158
Tableau 4.24 Exemple d'hiérarchisation séquences dominos de 2 ^{ème} niveau	161
Tableau 4.25 Hiérarchisation des équipements sources et cibles primaires	162

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Composantes du risque	8
Figure 1.2 (a) Détails du site de stockage. (b) Les réservoirs de stockages avant la catastrophe.....	21
Figure 1.3 Schéma du dépôt de Buncefield	24
Figure 1.4 Instruments de contrôles présents sur le bac 912	25
Figure 1.5 Comparaison des pourcentages d'accidents à effet domino dans différentes parties du monde.....	34
Figure 1.6 Nombre d'accidents à effet domino au 21 ^{ème} siècle en fonction des causes.	34
Figure 1.7 Arbre de fréquences relatives montrant les diverses séquences d'effet domino ...	36
Figure 2.1 Seuils pour les effets dominos causés par les effets thermiques, proposés par différents auteurs.....	69
Figure 2.2 Seuils pour les effets dominos causés par la surpression, proposés par différents auteurs	69
Figure 2.3 (a) Seuils de surpression pour les effets dominos dans différents EM de l'UE sans spécification des cibles. (b) Seuils thermiques pour les effets dominos dans différents EM de l'UE.	77
Figure 2.4 Seuils des effets de surpression pour la définition des zones dans quatre États membres.....	85
Figure 3.1 Démarche suivie pour le développement de la méthode proposée.....	91
Figure 3.2 Organigramme de la méthodologie développée	101
Figure 3.3 Arbre d'événements simplifié d'un rejet continu de matière liquéfiée sous pression, extrêmement inflammable et hautement réactive	108
Figure 4.1 Topographie de la zone de stockage considérée pour l'étude du cas simple	126
Figure 4.2 Comparaison des valeurs seuils pour la classe de danger liquides inflammables	130
Figure 4.3 Arbre d'événements représentant l'évolution d'une perte de confinement de classe G1 sur les équipements T1 et T2	135

Figure 4.4 Topographie du parc de réservoirs analysé153

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
AMDE	Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets
ARAMIS	Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS
ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
BEVI	Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLP	Classification, Labelling, Packaging
COMAH	COntrol of Major Accident Hazard
EM	État membre
ERC	Événement redouté central
FREEDOM	FREquency Estimation of DOMino accidents
HAZOP	HAZard and OPerability study
HSE	Health and Safety Executive
ICPE	Installation Classée Pour l'Environnement
IDE	Instrument Domino-Effecten
INERIS	Institut National de l'EnviRonnement industriel et des rISques
ISO	International Standard Organisation
JRC	Joint Research Center
LOC	Loss Of Containment
LOPA	Layer Of Protection Analysis

MIMAH	Methodology for the Identification of Major Accident Hazards
MMR	Mesure de Maîtrise de Risque
MOSAR	Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques
Na-Tech	Contraction de NATurel et Technologique
OGP	The international Oil and Gas Producers association
PFD	Probability of Failure on Demand
PhD	Phénomène Dangereux
PPRT	Plan de Prévention du Risque Technologique
QRA	Quantitative Risk Assessment
REX	Retour d'EXpérience
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SIG	Système d'Informations Géographiques
STARS	Software Toolkit for Advanced Reliability and Safety analysis
TNO	Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TTF	Time To Failure
UE	Union Européenne
VCE/UVCE	Vapor Cloud Explosion/Unconfined Vapor Cloud Explosion
VBA	Visual Basic for Applications

GLOSSAIRE

Cinétique : vitesse d'enchaînement des événements constituant une séquence accidentelle, de l'événement initiateur aux conséquences sur les éléments vulnérables. Cf. articles 5 à 8 de l'arrêté du 29/09/2005 (circulaire du 10 mai 2010).

Événement redouté central (ERC) : événement conventionnellement défini, dans le cadre d'une analyse de risque, au centre de l'enchaînement accidentel. Généralement, il s'agit d'une perte de confinement (LOC) pour les fluides et d'une perte d'intégrité physique pour les solides. Les événements situés en amont sont conventionnellement appelés « phase pré-accidentelle » et les événements situés en aval « phase post-accidentelle » (circulaire du 10 mai 2010).

Phénomène Dangereux (PhD) : libération d'énergie ou de substance produisant des effets, au sens de l'arrêté du 29/09/2005, susceptibles d'infliger un dommage à des cibles (ou éléments vulnérables) vivantes ou matérielles, sans préjuger l'existence de ces dernières (circulaire du 10 mai 2010). C'est une « Source potentielle de dommages » (ISO/CEI 51).

Effets d'un phénomène dangereux : ce terme décrit les caractéristiques des phénomènes physiques, chimiques,... associés à un phénomène dangereux concerné : flux thermique, concentration toxique, surpression, *etc.* (circulaire du 10 mai 2010).

Intensité des effets d'un phénomène dangereux : mesure physique de l'intensité du phénomène (thermique, toxique, surpression, projections). Les échelles d'évaluation de l'intensité se réfèrent à des seuils d'effets moyens conventionnels sur des types d'éléments vulnérables (ou cibles) tels que « homme », « structures ». Elles sont définies, pour les installations classées, dans l'arrêté du 29/09/2005. L'intensité ne tient pas compte de l'existence ou non de cibles exposées. Elle est cartographiée sous la forme de zones d'effets pour les différents seuils (circulaire du 10 mai 2010).

Accident : événement non désiré, tel qu'une émission de substance toxique, un incendie ou une explosion résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement qui entraîne des conséquences/ dommages vis-à-vis des personnes, des biens ou de l'environnement et de l'entreprise en général. C'est la réalisation d'un phénomène dangereux, combinée à la présence de cibles vulnérables exposées aux effets de ce phénomène (circulaire du 10 mai 2010).

Accident majeur : un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant de développements incontrôlés survenus au cours de l'exploitation d'un établissement couvert par la présente directive, entraînant pour la santé humaine ou pour l'environnement un danger grave, immédiat ou différé, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses (directive 2012/18/UE).

Scénario d'accident (majeur) : enchaînement d'événements conduisant d'un événement initiateur à un accident (majeur), dont la séquence et les liens logiques découlent de l'analyse de risque. En général, plusieurs scénarios peuvent mener à un même phénomène dangereux pouvant conduire à un accident (majeur) : on dénombre autant de scénarios qu'il existe de combinaisons possibles d'événements y aboutissant. Les scénarios d'accident obtenus dépendent du choix des méthodes d'analyse de risque utilisées et des éléments disponibles (circulaire du 10 mai 2010).

Gravité : on distingue l'intensité des effets d'un phénomène dangereux de la gravité des conséquences découlant de l'exposition de cibles de vulnérabilités données à ces effets.

La gravité des conséquences potentielles prévisibles sur les personnes, prises parmi les intérêts visés à l'article L. 511-1 du Code de l'environnement, résulte de la combinaison en un point de l'espace de l'intensité des effets d'un phénomène dangereux et de la vulnérabilité des cibles potentiellement exposées (circulaire du 10 mai 2010).

Vraisemblance : possibilité que quelque chose se produise «*likelihood*» (ISO CEI 73).

Établissement : l'ensemble du site placé sous le contrôle d'un exploitant où des substances dangereuses se trouvent dans une ou plusieurs installations, y compris les infrastructures ou les activités communes ou connexes; les établissements sont soit des établissements seuil bas, soit des établissements seuil haut (directive 2012/18/UE).

Établissement seuil bas : un établissement dans lequel des substances dangereuses sont présentes dans des quantités égales ou supérieures aux quantités indiquées dans la colonne 2 de l'annexe I, partie 1 ou partie 2, mais inférieures aux quantités indiquées dans la colonne 3 de l'annexe I, partie 1 ou partie 2, le cas échéant en appliquant la règle de cumul exposée à la note 4 relative à l'annexe I (directive 2012/18/UE).

Établissement seuil haut : un établissement dans lequel des substances dangereuses sont présentes dans des quantités égales ou supérieures aux quantités figurant dans la colonne 3 de l'annexe I, partie 1 ou partie 2, le cas échéant en appliquant la règle de cumul exposée à la note 4 relative à l'annexe I (directive 2012/18/UE).

Installation : une unité technique au sein d'un établissement et en surface ou sous le sol, dans laquelle des substances dangereuses sont produites, utilisées, manipulées ou stockées; elle comprend tous les équipements, structures, tuyauteries, machines, outils, embranchements ferroviaires privés, quais de chargement et de déchargement, appontements desservant l'installation, jetées, dépôts ou structures analogues, flottantes ou non, nécessaires pour le fonctionnement de cette installation (directive 2012/18/UE).

Exploitant : toute personne physique ou morale qui exploite ou détient un établissement ou une installation, ou, si cela est prévu par la législation nationale, toute personne qui s'est vu déléguer à l'égard du fonctionnement technique de l'établissement ou de l'installation le pouvoir économique ou décisionnel déterminant (directive 2012/18/UE).

INTRODUCTION

Contexte et cadre de la thèse

La directive 2012/18/UE du parlement européen et du conseil du 4 juillet 2012 (directive Seveso III) dont la transposition en droit français est entre autres assurée par la loi DDADUE¹ du 16 juillet 2013, le décret n° 2014-284 du 3 mars 2014 et l'arrêté du 26 mai 2014, impose aux exploitants industriels de prendre en compte le danger d'**effet domino** dans la prévention des accidents majeurs dans les sites Seveso. En France, les exigences réglementaires relatives aux effets dominos sont bien antérieures à la directive Seveso III et même à la directive Seveso II (directive 96/82/CE) où, pour la première fois un article fût spécialement dédié aux effets dominos (article 8). La nécessité d'identifier et de prévenir la propagation des accidents par effet domino remonte à 1976 avec la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées.

Toutefois, la complexité des scénarios dominos est à l'origine de l'inexistence d'une procédure commune systématique et simple pour leur appréciation. En effet, en raison des difficultés à la fois techniques et managériales rencontrées lors de l'identification et l'analyse de tels risques, plusieurs outils et mêmes valeurs de distances de sécurité sont adoptés dans chaque pays.

La Normandie compte plus de 2300 installations industrielles à risques, 88 classées SEVESO dont 38 se trouvent en Seine-Maritime. Elle est la troisième région industrielle métropolitaine avec des savoir-faire particuliers concernant les secteurs des énergies, de la chimie, de la plasturgie mais aussi de l'automobile. Jusqu'à présent, cinq Grands Réseaux de Recherche – GRR donnent une image forte et lisible du potentiel scientifique et technologique de la région Haute-Normandie. Le GRR TERA – Territoire, Environnement, Risque, Agronomie a une forte interdisciplinarité, en cohérence avec les spécificités environnementales touchant le territoire régional. Le réseau MRT – Maîtrise des Risques Technologiques est l'une des composantes de ce GRR, il a pour vocation principale la prévention des accidents et la gestion de crise.

¹ Loi DDADUE : Dispositions D'Adaptation de la législation au Droit de l'Union Européenne dans le domaine du développement durable

Ce travail de recherche est réalisé dans le cadre d'une thèse financée par la région Haute-Normandie. Le projet de thèse autour des effets dominos est né d'une décision du comité de pilotage du réseau MRT avec la collaboration entre deux axes de recherche du réseau qui sont : l'axe maîtrise des émissions et rejets (MER) et l'axe protection des populations (PROTECT). Dès le début de la thèse en octobre 2012, un partenariat à l'échelle européenne a été créé. Il s'est développée au cours de la thèse et a abouti à la signature d'une convention de cotutelle avec l'Université de Bologne, Italie. Le travail s'est déroulé en France et en Italie : 24 mois à l'INSA de Rouen au sein du Laboratoire de Sécurité des Procédés Chimiques (LSPC EA 4704) avec la collaboration du Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes (LITIS EA 4108) et 12 mois à l'Université de Bologne au sein du département DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali).

Enjeu et objectif de la recherche

Ce travail de thèse porte sur l'étude des effets dominos à l'échelle industrielle (dans une zone industrielle). Par effet domino on désigne souvent une cascade d'accidents où les conséquences du premier accident sont accrues par l'accident suivant. Néanmoins, on peut rencontrer plusieurs définitions de ce terme dans la littérature, à l'heure actuelle aucune n'a été unanimement retenue par les spécialistes du domaine. C'est pourquoi l'un des objectifs de cette recherche est de formaliser les connaissances relatives aux effets dominos afin de comprendre les mécanismes de leurs occurrences. Pour ce faire nous avons étudié les paramètres à examiner pour déterminer la possibilité de cascade et être en mesure d'identifier les scénarios dominos. L'enjeu étant de permettre l'amélioration de la prévention du risque d'effet domino. L'autre objectif est donc de produire une méthode pour l'identification et l'analyse des effets dominos.

Une approche pour l'étude des accidents en chaîne provoqués par des pertes de confinement est proposée. Celle-ci permet l'identification et la hiérarchisation des chemins de propagation des accidents. Elle est basée sur une description topographique de la zone étudiée, incluant les caractéristiques de chaque équipement, et prend en compte les mesures de maîtrise des risques mises en œuvre par l'industriel. Elle repose sur deux phases principales :

La première, est l'identification des chemins de propagation des accidents. Pour ce faire, la méthode d'analyse par arbre d'événements est utilisée. Les cibles potentielles sont déterminées en combinant les valeurs seuils d'escalade et les modèles de vulnérabilité (pour l'estimation de la probabilité d'endommagement). Cette première phase est implémentée sous MATLAB® et Visual Basic for Applications (VBA) afin de faciliter l'entrée des données, et l'analyse des résultats dans Microsoft Excel®.

La deuxième phase est l'identification des équipements les plus dangereux vis-à-vis des effets dominos. Elle consiste à hiérarchiser les équipements impliqués dans les chemins de propagation, en fonction de leur vraisemblance à causer ou à propager un effet domino. L'algorithme qui effectue cette phase est codé sous VBA.

Ce document est structuré en quatre chapitres :

Le chapitre 1. **Effets dominos et analyse des risques : mise en contexte** contextualise l'étude des effets dominos et présente son état de l'art. Il permet d'explicitier le besoin d'une méthode simple d'utilisation pour l'identification et l'analyse des effets dominos qui peut servir comme outil d'aide à la décision et pose les hypothèses de recherche.

Le chapitre 2. **Étude des risques de propagation d'accidents en Europe : seuils pour les effets dominos et distances de sécurité** en plus de lever l'ambiguïté sur certains concepts liés à l'analyse des effets dominos notamment les seuils d'endommagement et les seuils d'escalade, il expose les résultats d'une étude menée à l'échelle européenne, avec en particulier :

- Les définitions d'effets dominos adoptées dans certains États Membres de l'Union Européenne ;
- Les outils (logiciels, guides) et les méthodes utilisés pour l'analyse des effets dominos ;
- Les valeurs seuils et les distances de sécurité utilisées, ainsi que les différentes réglementations qui régissent ces dernières.

Le chapitre 3. **Méthodologie pour la prévention des accidents à effets dominos** explique la démarche mise en œuvre pour le développement de la méthode présentée pour l'identification et l'analyse des accidents dominos, à savoir : (i) étude du Retour d'EXpérience « REX »;

(ii) analyse des méthodes et outils existants; (iii) conception d'une base de connaissances et formalisation du savoir-faire; (iv) choix de l'approche à adopter et des techniques à utiliser. Puis, il illustre les différentes étapes de la procédure proposée.

Le chapitre 4. **Applications à des études de cas** présente deux exemples d'application de la méthodologie exposée au chapitre 3. Dans un premiers temps, une expérimentation de l'outil est proposée, elle est réalisée sur un cas d'étude simple, afin de faciliter la compréhension du fonctionnement de l'outil. Dans un second temps une simulation d'accidents sur le parc de réservoirs de l'entreprise X permet d'illustrer les apports opérationnels de l'outil, de vérifier la pertinence et la cohérence des résultats mais aussi de découvrir les inconvénients et repérer les points à améliorer.

Enfin, des conclusions et des perspectives sont présentées à la fin de ce document.

CHAPITRE 1

EFFETS DOMINOS ET ANALYSE DES RISQUES : MISE EN CONTEXTE

L'objectif de ce chapitre est de contextualiser les effets dominos. Nous essaierons donc dans un premier temps de fixer le vocabulaire lié au risque, puis nous nous focaliserons dans un second temps sur la problématique centrale de cette thèse qui est l'étude des effets dominos en abordant la législation, mais également des exemples caractéristiques. Pour terminer, nous développerons les différentes approches d'analyse et les outils existants.

1.1 Notions de base

1.1.1 Définitions

Étant donné que le vocabulaire de management de risques souffre de certaines divergences, le recours au Guide ISO CEI 73 (Management du risque –Vocabulaire) et le glossaire de la circulaire du 10 mai 2010 est indispensable pour éviter toute ambiguïté. Par conséquent, certaines définitions sont indiquées dans le glossaire, les notions les plus importantes sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Danger : cette notion définit une propriété intrinsèque à une substance (butane, chlore,...), à un système technique (mise sous pression d'un gaz,...), à une disposition (élévation d'une charge),..., à un organisme (microbes), *etc.*, de nature à entraîner un dommage sur un « élément vulnérable » [sont ainsi rattachées à la notion de « danger » les notions d'inflammabilité ou d'explosivité, de toxicité, de caractère infectieux, *etc.* inhérentes à un produit et celle d'énergie disponible (pneumatique ou potentielle) qui caractérisent le danger]. (Circulaire du 10 mai 2010).

Aléa : probabilité qu'un phénomène accidentel produise en un point donné des effets d'une intensité donnée, au cours d'une période déterminée. L'aléa est donc l'expression, pour un type

d'accident donné, du couple (Probabilité d'occurrence \otimes Intensité des effets). Il est spatialisé et peut être cartographié.

Cette notion est relativement récente dans le domaine des risques technologiques. En effet, elle est apparue dans les textes réglementaires qui ont suivi l'apparition de la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

Risque : possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une exposition aux effets d'un phénomène dangereux. Dans le contexte propre au risque technologique, le risque est, pour un accident donné, la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté/final considéré (incident ou accident) et la gravité de ses conséquences sur des éléments vulnérables (Circulaire du 10 mai 2010).

Les composantes principales du risque sont la probabilité, l'intensité et la vulnérabilité, leur regroupement (combinaison) permet de caractériser le risque de deux façons différentes mais équivalentes. Effectivement, lorsque le regroupement des composantes est effectué, on peut dire que le risque est la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité ou de la probabilité et de la gravité des dommages, et cela revient au même (*Voir figure 1.1*).

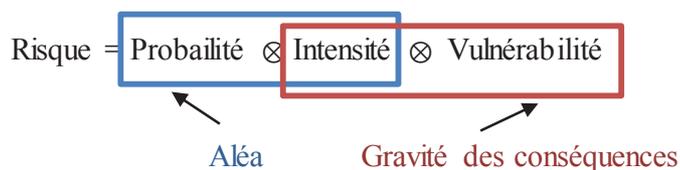


Figure 1.1 Composantes du risque (adaptée de Debray *et al.*, 2006)

La notion d'aléa est utilisée principalement dans le cadre de la maîtrise de l'urbanisation ou de l'aménagement autour des établissements à risque, et des plans de prévention des risques technologiques. Il est indispensable de connaître l'aléa afin de supprimer ou tout au moins diminuer la vulnérabilité.

Réduction du risque : actions entreprises en vue de diminuer la probabilité, les conséquences négatives (ou dommages), associés à un risque, ou les deux (ISO/CEI Guide 73). Cela peut

être réalisé au travers de chacune des trois composantes du risque, la *probabilité*, l'*intensité* et la *vulnérabilité*.

Vulnérabilité (ou sensibilité) : facteur de proportionnalité entre les effets auxquels est exposé un élément vulnérable (ou cible) et les dommages qu'il subit.

Élément vulnérable (cible) : personnes, biens ou composantes de l'environnement susceptibles, du fait de l'exposition au danger, de subir des dommages. Un élément vulnérable est aussi appelé « cible ». Dans le cadre de ce mémoire c'est le terme « cible » qui est employé.

Probabilité d'occurrence : au sens de l'article L. 512-1 du Code de l'environnement, la probabilité d'occurrence d'un accident est assimilée à sa fréquence d'occurrence future estimée sur l'installation considérée. Elle est en général différente de la fréquence historique et peut s'écarter, pour une installation donnée, de la probabilité d'occurrence moyenne évaluée sur un ensemble d'installations similaires. Attention aux confusions possibles :

- *assimilation entre probabilité d'un accident et celle du phénomène dangereux correspondant*, la première intégrant déjà la probabilité conditionnelle d'exposition des cibles. L'assimilation sous-entend que les cibles sont effectivement exposées, ce qui n'est pas toujours le cas, notamment si la cinétique permet une mise à l'abri.
- *probabilité d'occurrence d'un accident x sur un site donné et probabilité d'occurrence de l'accident x , en moyenne, dans l'une des N installations du même type* (approche statistique) (circulaire du 10 mai 2010).

Probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux (Circulaire n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 7 octobre 2005) : cette probabilité est obtenue par agrégation des probabilités des scénarios conduisant à un même phénomène, ce qui correspond à la combinaison des probabilités de ces scénarios selon les règles logiques (ET/OU). Elle correspond à la probabilité d'avoir des effets d'une intensité donnée (et non des conséquences).

Sécurité-Sûreté : dans le cadre des installations classées, on parle de sécurité des installations vis-à-vis des accidents et de sûreté vis-à-vis des attaques externes volontaires (type malveillance ou attentat) des intrusions malveillantes et de la malveillance interne.

Attention, en anglais, les termes utilisés sont de *faux amis*, inversés, puisque «safety» signifie sécurité et «security» signifie sûreté (circulaire du 10 mai 2010).

Mesure de maîtrise des risques (ou barrière de sécurité) : ensemble d'éléments techniques et/ou organisationnels nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On distingue :

- les mesures de prévention qui visent à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux ;
- les mesures de limitation qui visent à limiter l'intensité des effets d'un phénomène dangereux ;
- les mesures de protection qui visent à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité (circulaire du 10 mai 2010).

1.1.2 Installations classées & étude de dangers

En France, la législation des installations classées remonte à 1810 et a pour origine l'explosion de la poudrerie de Grenelle (Paris, 1794). Depuis, cette législation a été modifiée à plusieurs reprises et rendue conforme aux directives européennes. Actuellement, la politique de prévention des risques technologiques repose principalement sur cette législation.

La législation des installations classées définit ces dernières comme : « *Toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains* ». En fonction des risques ou des inconvénients que les établissements peuvent générer, ils sont soumis à un régime de déclaration ou d'autorisation. Les exigences réglementaires relatives à la délivrance d'une autorisation d'exploiter dans le cas des établissements qui relèvent du régime d'autorisation ou du régime d'autorisation avec servitudes sont déterminées par le régime de classement.

Ainsi, dans le cadre des études de dangers qui représentent l'élément central de la démarche sécurité, le degré d'analyse est ajusté en fonction de la complexité et du niveau du risque de l'installation concernée. L'étude de dangers a été introduite par le décret du 21/09/1977, elle s'est vue redéfinir ses objectifs afin qu'ils soient conformes aux directives européennes. En effet, les directives Seveso ont inspiré les législations relatives à la sécurité industrielle, elles ont renforcé entre autres, la nécessité de démontrer que les risques d'accidents majeurs sont maîtrisés au mieux dans les établissements concernés.

L'étude de dangers expose les dangers présentés par l'installation et son exploitation : l'exploitant doit caractériser, analyser, évaluer et réduire les risques de ses installations. En plus, elle doit identifier les mesures de maîtrise des risques mises en place dans le but de réduire le risque.

À présent, la circulaire du 10 mai 2010 récapitule les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003.

1.1.3 Méthodes d'analyse des risques

Dans une démarche de management de risques, avant d'arriver à l'étape d'évaluation des risques et donc de décider de leur acceptabilité ou non en les comparant aux critères d'acceptabilité, on doit passer par leur analyse, afin d'avoir la base nécessaire pour l'évaluation. Cette base est une estimation des données concernant le niveau du risque, qu'on peut résumer à sa probabilité d'occurrence et la gravité de ses conséquences.

Comme cité auparavant les concepts de base relatifs à la sécurité et à sa gestion souffrent d'une fluctuation d'usage (Debray *et al.*, 2006 ; Mazouni, 2008 ; Laurent, 2011). En effet, les mêmes termes peuvent avoir des sens différents, selon le contexte dans lequel ils sont utilisés. Il convient de préciser que le terme analyse de risques est utilisé pour désigner l'ensemble des phases d'appréciation du risque illustrées dans le tableau 1.1 lorsque il s'agit de méthodes d'analyse de risques dites intégrés (Ex. : ARAMIS, LOPA) alors que pour les méthodes

classiques (HAZOP, Arbre d'évènements, *etc.*), celle-ci fait partie du processus d'appréciation des risques.

Tableau 1.1 Processus d'appréciation des risques (Guide ISO/CEI 73 Management du risque –Vocabulaire, 2009)

Étape d'appréciation des risques	Description
Identification des risques	Identifier les sources de dangers et leurs cibles
Analyse des risques	Comprendre leurs natures et déterminer leurs niveaux, inclut leurs estimations : <ul style="list-style-type: none"> • Estimation de la probabilité d'occurrence • Estimation de la gravité des conséquences
Évaluation des risques	Comparer leurs estimations à des critères d'acceptabilité

Dans le rapport de l'INERIS intitulé : « Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle » (Debray *et al.*, 2006), on retrouve une explication des méthodes de base d'analyse de risques et des méthodes intégrées. Le rapport aborde les méthodes les plus utilisées. Concernant les méthodes classiques, il s'agit de l'analyse préliminaire des risques, l'AMDE et l'AMDEC, l'HAZOP, What-if, l'arbre des défaillances, l'arbre des événements et enfin le nœud papillon. Pour chacune des méthodes précitées, les auteurs présentent l'historique et domaine d'application, principe, déroulement, limites et avantages.

Pour les méthodes dites intégrées, le rapport traite (avec moins de détails) les méthodes ARAMIS, LOPA, MOSAR et le QRA. De plus, une synthèse est fournie où l'on retrouve les points forts et les limites de chaque type de méthode (classique et intégrée). Pour plus de détails, voir Laurent (2011).

Une autre comparaison des outils d'analyse de risques peut être trouvée dans Mazouni (2008). Il ressort de l'analyse des différentes méthodes qu'il n'existe pas de méthode d'analyse bonne ou mauvaise et que le choix de la méthode la plus adaptée dépend du contexte de l'installation étudiée et des objectifs à attendre.

Mazouni (2008) indique l'essentiel des critères de choix d'une méthode d'analyse de risques qui peuvent être résumés comme suit :

- Domaine de l'étude ;
- Stade de l'étude (spécification, conception, ou démantèlement) ;
- Perception du risque dans ce domaine ;
- Culture de sécurité de l'organisation ;
- Caractéristiques du problème à analyser ;
- Niveau envisagé de la démonstration de la sécurité ;
- Savoir-faire des intervenants ;
- Nature des informations disponibles (spécifications du système et de ses interfaces, contraintes, *etc.*) ;
- Retour d'expérience et base de données disponibles ;
- Moyens humains, logistiques et autres ;
- Délais et autres contraintes de management de projet.

Il est important de noter que l'utilisation séparée d'un seul outil classique d'analyse de risques ne peut pas assurer une exhaustivité totale de l'identification des causes potentielles des phénomènes dangereux. C'est pourquoi, il est parfois nécessaire de combiner plusieurs méthodes pour assurer une meilleure exhaustivité et atteindre les objectifs de sécurité attendus. C'est dans ce sens que les méthodes intégrées ont été développées, **en combinant plusieurs méthodes classiques**, pour permettre une analyse plus fine. Cependant il faut rappeler le principe de proportionnalité qui permet d'ajuster le degré d'analyse en fonction de la complexité et du niveau de risque d'une installation. Il est donc conseillé d'utiliser des méthodes simples pour une première estimation du niveau du risque. Si ce dernier est élevé, alors, une analyse détaillée à l'aide de méthodes plus complexes se justifie.

1.2 Effets dominos

1.2.1 Définitions

Le terme « Effet Domino », est utilisé dans son sens le plus simple dans plusieurs domaines, pour décrire un événement qui en cause un autre. L'origine du terme provient du jeu de renversement des dominos. Basée sur cette analogie, le terme effet domino décrit un phénomène, habituellement indésirable, qui est à l'origine de l'occurrence d'autres événements indésirables. Il est aussi communément employé par les politologues et les économistes, pour décrire l'impact d'une action qui a la propension de causer ou qui cause une crise après une autre (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011). Plusieurs définitions sont disponibles dans la littérature scientifique pour décrire l'effet domino dans le contexte de l'appréciation des risques industriels. Aucune d'entre elles n'est actuellement unanimement retenue par les scientifiques pour décrire ce phénomène malgré l'intérêt d'une formalisation non polysémique. Toutefois la plupart d'entre elles se rejoignent sur le principe de base, qui est la propagation d'un accident et l'aggravation de ses conséquences.

Le tableau 1.2 récapitule quelques définitions, parmi les plus courantes dans la littérature, notamment en ce qui concerne l'industrie chimique. Si l'on retient la définition donnée par le *Center for Chemical Process Safety* (CCPS 2000) et celle de Kourniotis *et al.*, 2000 pour une analyse approfondie, on s'aperçoit que pour Kourniotis *et al.* l'aggravation des conséquences causée par l'effet domino ne concerne que l'extérieur du site. Il faut remarquer que cette définition est restrictive, et que cette restriction, apparaît parfois au sein de l'union européenne, elle est due à l'article 8 de la directive européenne 96/82/CE (cette problématique est traitée au chapitre suivant, *Voir* section 2.3). Elle entraîne une compréhension erronée du phénomène en le limitant aux accidents qui se propagent en dehors de l'établissement où l'accident initiateur a eu lieu. Tandis que le CCPS, sans évoquer les conséquences de l'effet domino, le définit comme étant une propagation d'accidents d'une unité à une autre.

On peut aussi remarquer que certaines définitions (HSE, 1984 ; Bagster et Pitblado, 1991 ; RIVM, 2003) se limitent aux accidents majeurs et cela est restrictif, puisqu'un accident

initiateur non majeur peut engendrer un accident secondaire sur une installation ou un établissement voisin.

D'autres définitions proposées au sein de l'union européenne pour pallier aux limites de la définition donnée par les directives Seveso, sont rapportées au chapitre suivant. Ainsi qu'une discussion concernant les limites de cette dernière (section 2.3).

Tableau 1.2 Définitions de l'Effet Domino proposées dans la littérature

Auteur(s)	Définitions
<i>Health and Safety Executive</i> (HSE, 1984)	Effets des accidents majeurs sur d'autres unités sur le site ou sur des sites voisins.
Bagster et Pitblado (1991)	Perte de confinement sur un équipement d'une installation, engendrée par un accident majeur sur une installation voisine.
Lees (1996)	Événement sur une unité qui cause un autre événement sur une autre unité.
Khan <i>et al.</i> (1998)	Chaîne d'accidents; une situation, où une explosion, un projectile, un incendie ou encore un nuage toxique, généré par un accident dans une unité, cause d'autres accidents plus sévères dans d'autres unités.
Kourniotis <i>et al.</i> (2000)	Situation, où un accident chimique devient la cause d'un ou de plusieurs autres accidents, ce qui mène à l'aggravation des conséquences en dehors du site.
<i>Center for Chemical Process Safety</i> (CCPS, 2000)	Accident qui survient dans une unité et qui affecte les unités voisines par effets thermiques, surpression, projectiles.
<i>Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu</i> (RIVM, 2003)	Accident majeur dans un établissement appelé « établissement cible » résultant d'un accident majeur dans un établissement appelé « établissement source ». L'effet domino est l'événement subséquent qui se produit comme conséquence d'un accident domino.
Cozzani <i>et al.</i> (2006a)	Séquences accidentelles ayant au moins trois caractéristiques communes : <ul style="list-style-type: none"> • un événement primaire initiateur ; • l'événement primaire se propage à cause d'un vecteur d'escalade (flux physique), qui entraîne des préjudices pour une ou plusieurs cibles secondaires ; • un ou plusieurs scénarios secondaires d'accidents, impliquant des unités similaires ou différentes se déroulent éventuellement sur le même schéma.

Toutes ces définitions sont correctes, car elles reposent sur des bases scientifiques et techniques, mais incomplètes. En effet, la plupart des définitions indiquées au tableau 1.2 sont complémentaires et soulignent une des caractéristiques de l'effet domino. Une définition complète, qui englobe à la fois l'aspect **propagation** et **aggravation des conséquences**, choisie par la communauté scientifique afin d'uniformiser l'effet domino, est d'une importance cruciale pour l'étude de ce phénomène.

La complexité de ce phénomène affecte fortement sa définition et sa caractérisation, d'autant plus que l'analyse des accidents passés, montre que l'effet domino peut surgir sous plusieurs formes différentes.

En effet, on s'aperçoit que la **propagation** de l'accident peut être simple (uniquement d'une installation à une autre), en chaîne (se développe au-delà de la deuxième unité), en parallèle (plusieurs installations sont touchées par un même accident). Il peut même y avoir interaction des événements (effet de synergie qui peut engendrer l'endommagement d'une installation suite à deux effets cumulés, émanant de deux accidents ayant lieu sur deux installations différentes).

De même pour l'**aggravation des conséquences**, selon la nature des séquences accidentelles, on distingue deux types de processus : (i) la séquence peut être initiée par un accident mineur (feu de nappe/jet enflammé mineur) qui s'aggravera au fur et à mesure de sa propagation ; (ii) l'accident initiateur peut être grave au départ (explosion/feu de nappe), ce qui mènera à une propagation dans l'espace et causera d'autres accidents graves.

Reniers (2010) a également fait le constat de l'absence d'une définition largement acceptée et a proposé de catégoriser l'effet domino, en quatre catégories, chacune comptant deux sous-catégories, comme indiqué dans le tableau 1.3.

Un concept, nommé « effet domino local », a été proposé par Abdolhamidzadeh *et al.* (2011), pour désigner plusieurs accidents distincts, séparés par un intervalle de temps, d'une minute ou plus, au sein d'une même unité.

Tableau 1.3 Catégorisations de l'effet domino (adaptées de Reniers, 2010)

Catégorie	Sous-catégorie	Définitions
1	Interne	Début et fin de l'escalade caractérisant l'effet domino, au sein d'un même établissement.
	Externe	L'effet domino se propage au-delà des frontières de l'établissement où a eu lieu l'événement initiateur.
2	Direct	L'événement domino apparaît comme conséquence directe de l'événement domino précédent.
	Indirect	L'événement domino se produit comme une conséquence indirecte d'un événement domino antérieur, n'étant pas le précédent.
3	Temporel	L'événement domino se produit au sein de la même zone que l'événement précédent, mais avec un retard (propagation dans le temps).
	Spatiale	L'événement domino se produit en dehors de la zone où l'événement précédent a eu lieu (propagation dans l'espace).
4	En série	L'événement domino survient comme une conséquence d'une chaîne d'accident unique causée par l'événement précédent.
	Parallèle	L'événement domino apparaît comme l'une des nombreuses conséquences qui découlent simultanément des chaînes d'accidents causés par l'événement précédent.

Une définition a été récemment proposée par Reniers et Cozzani (2013), elle est présentée au chapitre suivant (section 2.3) vu qu'elle fait partie des définitions proposées au sein de l'Union Européenne pour remédier aux limites de la définition donnée par les directives Seveso. Cette dernière est actuellement la plus complète, car elle englobe tous les aspects spécifiques trouvés dans la plupart des définitions, y compris les quatre catégories citées ci-dessus (Reniers, 2010) et le concept d'effet domino local (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011).

1.2.2 Législation française : aperçu historique

En France, les exigences réglementaires relatives aux effets dominos sont bien antérieures à la directive Seveso II (directive 96/82/CE). La nécessité d'identifier et de prévenir la propagation des accidents par effets dominos remonte à 1976 avec la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées. En effet, il a été précisé dans son décret d'application (décret

n° 77-1133 du 21 septembre 1977) que les exploitants des installations classées doivent fournir : « *Une étude de dangers qui, d'une part, expose les dangers que peut présenter l'installation en cas d'accident, en présentant une description des accidents susceptibles d'intervenir, que leur cause soit d'origine interne ou **externe**, et en décrivant la nature et l'**extension des conséquences** que peut avoir un accident éventuel, d'autre part, justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets d'un accident, déterminées sous la responsabilité du demandeur* » (Article 3, paragraphe 5° du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977).

Après l'entrée en vigueur en juin 2001 de la directive 96/82/CE du 9 décembre 1996 (Seveso II) qui a clairement insisté sur la nécessité d'analyser les interactions entre les établissements voisins, celle-ci a été transposée en droit français via notamment l'arrêté du 10 mai 2000. Ce dernier précise que les exploitants sont tenus d'informer les exploitants des installations classées voisines des conséquences des accidents majeurs qui peuvent les impacter :

« *l'exploitant tient les exploitants d'installations classées voisines informés des risques d'accidents majeurs identifiés dans l'étude des dangers définie à l'article 3-5 du décret du 21 septembre 1977 susvisé, dès lors que les conséquences de ces accidents majeurs sont susceptibles d'affecter les dites installations. Il transmet une copie de cette information au préfet.* » (Article 5 de l'arrêté du 10 mai 2000).

La circulaire du 10 mai 2000 a aussi abordé le problème des effets dominos en précisant que les interactions entre les établissements proches et les interactions entre installations d'un même établissement doivent être étudiées. Toutefois, comme il s'agit de la transcription de la directive Seveso II, le terme « effets dominos » a été réservé aux interactions entre établissements voisins : « *Les interactions entre établissements proches (effets "dominos"), les interactions entre installations d'un même établissement : les interactions entre les installations d'un même établissement, action d'un premier phénomène (émission de débris par explosion, par exemple) qui pourrait en déclencher un second (fuite d'un réservoir perforé par un équipement, par exemple), ainsi que le caractère approprié d'une mesure de sécurité dans le cas où plusieurs phénomènes se conjuguent, doivent également faire l'objet d'un*

examen. Il en est de même en ce qui concerne l'examen des possibilités d'interactions entre les établissements proches (examen des effets dominos).» (Paragraphe III.2.3 de la circulaire du 10 mai 2000).

Les seuils réglementaires à partir desquels les effets dominos doivent être examinés dans le cadre des études de dangers sont précisés par la circulaire du 29 septembre 2005. Ces derniers ainsi que les seuils utilisés dans d'autres États membres de l'Union Européenne sont expliqués dans le chapitre suivant.

La circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, définit l'effet domino comme suit : « *Effets dominos : action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène. [effet domino = " accident " initié par un " accident "]. Ex. : explosion d'une bouteille de gaz suite à un incendie d'entrepôt de papier ».*

Actuellement, la transposition de la directive 2012/18/UE du parlement européen et du conseil du 4 juillet 2012 (**directive Seveso III**) est portée par la loi DDADUE (Dispositions D'Adaptation de la législation au Droit de l'Union Européenne dans le domaine du développement durable) du 16 juillet 2013 au niveau des articles 10 et 11 [articles L515-32 à L515-42 du code de l'environnement (partie L comme **légitimative**)]. Le décret n° 2014-284 du 3 mars 2014 transpose en droit Français les dispositions de **niveau réglementaire** de la directive SEVESO III (modifiant le titre I du livre V du code de l'environnement).

L'arrêté du 26 mai 2014 complète la transposition de la directive Seveso III et abroge l'arrêté du 10 mai 2000. Il précise les modalités d'application des dispositions du Code de l'environnement relatives à la prévention des accidents majeurs et éclaireit celles concernant le contenu des études de dangers. Il indique que l'exploitant qui n'a pas remis une étude de

dangers et qui ne la remettrait pas simultanément à la notification de recensement, doit préciser : « ... *par ailleurs par écrit au préfet la description sommaire de l'environnement immédiat du site, en particulier les éléments susceptibles d'être à l'origine ou d'aggraver un accident majeur par **effet domino**, ainsi que les informations disponibles sur les sites industriels et établissements voisins, zones et aménagements pouvant être impliqués dans de tels **effets domino**.* » (Article 3, Arrêté du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement).

Les exigences de la directive européenne Seveso III concernant les effets dominos (Article 9) sont données à la section 2.2 du chapitre suivant.

1.3 Exemples d'accidents passés impliquant les effets dominos

Dans cette section, deux accidents ayant impliqués des effets dominos sont décrits.

1.3.1 Accident de Mexico, 19 novembre 1984

Le terminal PEMEX GPL à San Juan Ixhuatepec (Mexico) Mexique (*Voir* figure 1.2), comptait 6 sphères de GPL (4 sphères avec un volume unitaire de 1600 m³, et deux sphères de 2400 m³ chacune) et 48 réservoirs cylindriques horizontaux de diverses capacités (36 à 270 m³). La partie la plus vieille du site datait de 1961-1962 (Mannan, 2014). Ensuite des constructions ont eu lieu et en 1984 on pouvait faire le constat que le site était très mal aménagé. En effet, les distances entre les réservoirs étaient trop faibles et les habitations trop proches puisque certaines maisons se trouvaient à 130 m du site.

Le terminal distribuait du GPL qu'il recevait de trois raffineries. Au moment de l'accident, il y avait entre 11000 et 12000 m³ de GPL stockés sur le site.

Cet accident a été analysé par une équipe du TNO (*Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek*) qui s'est rendue sur le site deux semaines après la

catastrophe. Les résultats de l'enquête peuvent être trouvés dans les publications de Pietersen (1985 ; 1988).

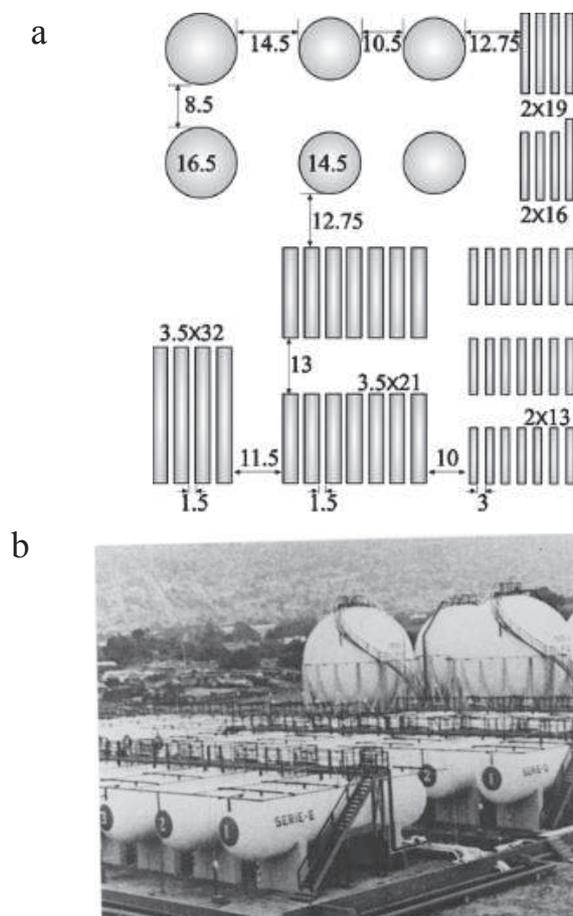


Figure 1.2 (a) Détails du site de stockage, dimensions en m (Assael et Kakosimos 2010).
(b) Les réservoirs de stockages avant la catastrophe (Pietersen,1985).

D'après les enquêteurs, les séquences de l'accident se sont déroulées comme suit :

Perte de confinement (rupture d'une canalisation) : le matin du 18 novembre, alors que le site était vide, il se faisait approvisionner par une raffinerie située à 400 km plus loin. À environ 5h30 la salle de contrôle ainsi qu'une station de pompage située à 40 km du site, remarquent une chute de pression. Une canalisation de 200 mm de diamètre (sous 24 bars) entre une sphère et une série de cylindres venait de se rompre. Le personnel se trouvant dans la salle de contrôle a tenté d'identifier la cause de la chute de pression mais n'a malheureusement pas réussi. La fuite dura 5 à 10 min.

Explosion de nuage et incendie : à 5h40 le nuage de gaz s'enflamma au niveau de la torchère alors qu'il occupait une surface de 200×150 m avec une hauteur estimée à 2 m, le nuage ayant vraisemblablement pénétré dans des maisons, son inflammation causa leur destruction. L'inflammation du nuage généra une forte onde de surpression, après cette explosion, plusieurs incendies se sont déclenchés (incendies dans 10 maisons, un feu au niveau du sol et au niveau de la canalisation rompue).

BLEVE : à 5h45 a eu lieu le premier BLEVE (sur l'une des petites sphères). Environ une minute après, un autre BLEVE est survenu sur une autre petite sphère, il constitua l'une des explosions les plus violentes observées lors de cet accident. L'un de ces deux BLEVEs a engendré la formation d'une boule de feu d'un diamètre d'environ 300 m ainsi que l'éjection d'un ou de deux réservoirs cylindriques.

Série de BLEVEs : en plus des effets de surpression et la projection de fragments causés par les deux premiers BLEVEs, la boule de feu générée enflamma la nappe au sol (gouttelettes de GPL), ce qui provoqua des effets thermiques. La combinaison de ces trois effets physiques provoqua dans un intervalle de temps d'environ une heure et demie une série de BLEVEs (environ 15 explosions au total).

La séquence domino a donc été : Explosion de nuage \rightarrow feux \rightarrow BLEVEs \rightarrow feux \rightarrow BLEVEs. Le bilan officiel de cette catastrophe industrielle (Rapport d'étude INERIS, 2008) est de 600 morts et 7000 blessés, 39 000 personnes évacuées.

L'analyse de l'accident (l'enquête menée par le TNO), a révélé que les causes de ce dernier sont liées à la sécurité globale du site. En effet, l'aménagement du site et l'impossibilité d'utiliser les moyens de protection suite à leur endommagement, ont favorisé la propagation de l'accident.

Concernant l'aménagement du site, comme le montre la figure 1.2 les réservoirs sont très proches, cependant ce qui n'apparaît pas sur la figure ce sont les habitations. Comme mentionné auparavant le site a été construit dans les années 60 et à l'époque la zone était

inhabitée, mais au cours du temps des habitations se sont construites et en 1984 les bâtiments les plus proches du site étaient donc à seulement 130 m.

Pour ce qui est des mesures de prévention des risques, ils n'existaient pas de système de détection de gaz, ni de système d'isolement. De tels systèmes auraient pu permettre de détecter la fuite et de l'isoler (fermeture automatique des vannes).

Quant à l'intervention des pompiers celle-ci a été fortement perturbée par les opérations d'évacuations des habitants. Finalement les moyens de protection, notamment, les moyens de lutte contre les incendies ont été endommagés et rendus inopérants suite au premier BLEVE.

1.3.2 Accident de Buncefield, Royaume-Uni, 11 décembre 2005

Le dépôt pétrolier de Buncefield est situé à environ 4 km du centre-ville d'Hemel Hempstead (40 km au nord de Londres), c'était le cinquième plus grand terminal pétrolier du Royaume uni. Il hébergeait trois entreprises (*Voir figure 1.3*) qui stockaient habituellement jusqu'à 150000 t de carburants (essence, gasoil, kérosène). Ce dépôt alimentait notamment en kérosène, via un oléoduc, l'aéroport londonien de Luton et celui d'Heathrow.

Le déroulement des séquences accidentelles peut être résumé comme suit :

Perte de confinement initiale due à un sur-remplissage : à partir de 19 h, le samedi 10 décembre 2005, le bac 912 situé au niveau de la rétention A de l'entreprise 1 (ouest), est approvisionné en essence sans plomb à un débit de 550 m³/h.

Le dimanche 11 décembre 2005 à 5h 20, le bac 912 commence à déborder et un nuage explosif (air-carburant) se forme. Les deux systèmes automatiques de détection de niveau n'ont pas fonctionnés (*Voir figure 1.4*). Il y avait un flotteur d'alarme de niveau haut et un système de contrôle indépendant du niveau haut. À 5h38, le nuage qui s'est formé au pied du bac 912 est visible sur les enregistrements vidéo, qui montrent qu'il a atteint 1m d'épaisseur, puis 2m à 5h46. Le nuage explosif formé se répandit sur le site sur une surface de 80 000 m² puis à 5h50, le nuage se propagea hors du site.

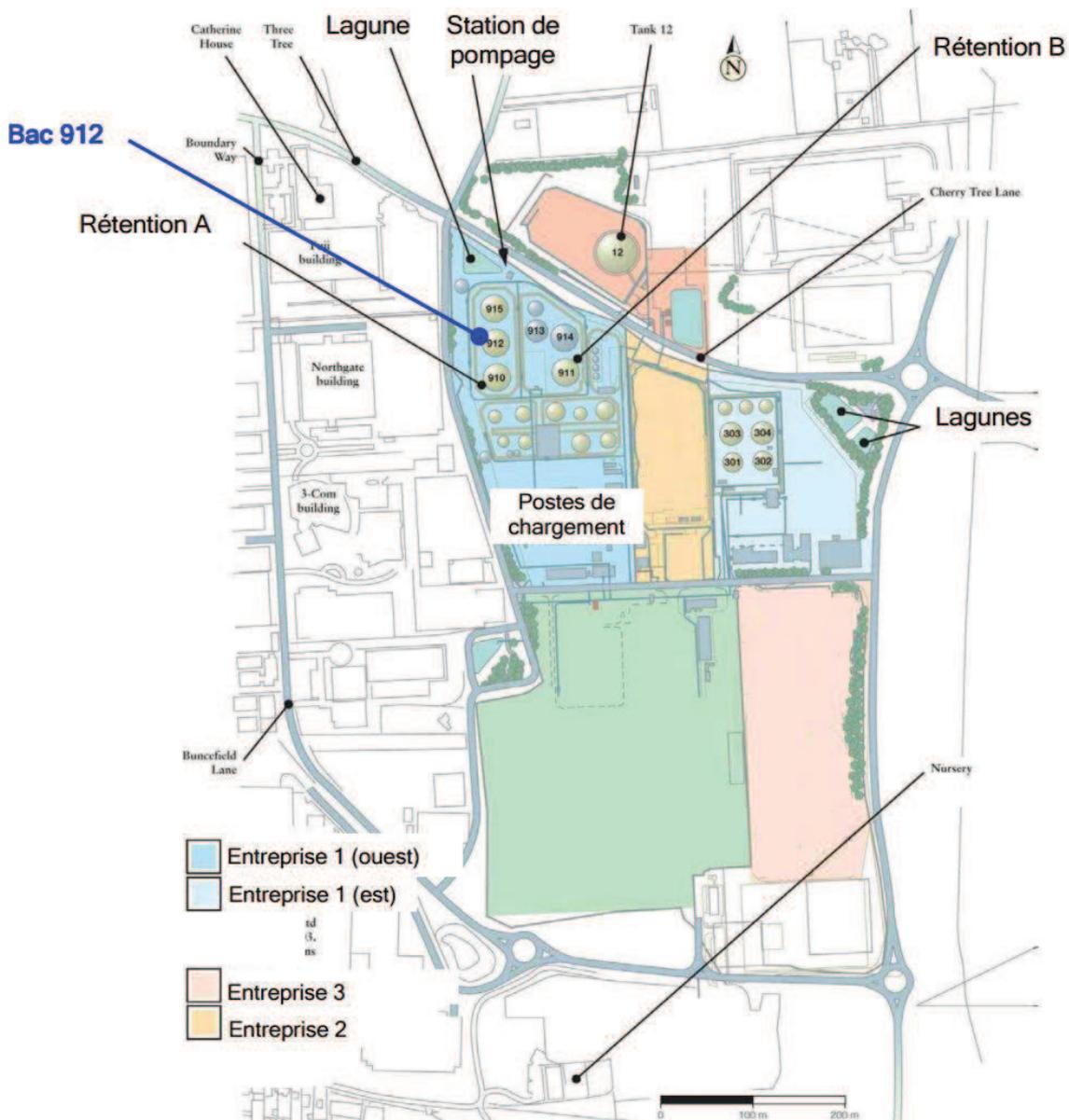


Figure 1.3 Schéma du dépôt de Buncefield (ARIA N°31312)

La première explosion : à 6h 01 la surface au sol du nuage explosif a été estimée à environ 120000 m² avec une hauteur de 2 m (Johnson, 2010). Le dimanche 11 décembre à 06h 01:32 a lieu la première et principale explosion, elle se produite au niveau des parkings de Fuji et Northgate (parkings des bâtiments Fuji et Northgate Voir figure 1.3).

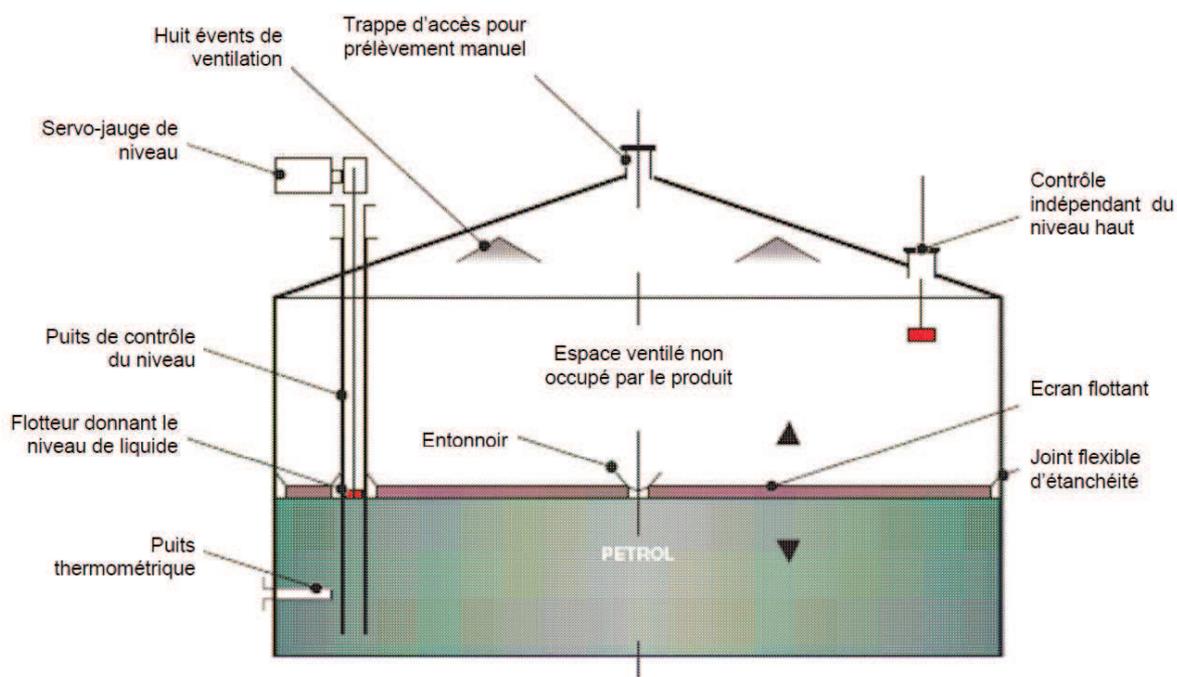


Figure 1.4 Instruments de contrôles présents sur le bac 912 (ARIA N°31312)

Incendie : juste après l'explosion principale un incendie s'est déclenché et a embrasé 21 grands réservoirs.

Explosions secondaires : à 6h27 et 6h28, deux explosions subséquentes se sont produites.

L'enchaînement accidentel (séquence domino) observé sur cet accident est :

Explosion de nuage (UVCE) → incendie → explosion.

La défaillance du système de détection de niveau dans le réservoir 912 est à l'origine de l'accident. En effet, l'alimentation en essence de ce réservoir n'a pas été arrêtée. À 3 h, la jauge de niveau du bac 912 indiquait un niveau stable aux deux-tiers alors que l'approvisionnement se poursuivait au même débit. À 5h50, l'approvisionnement d'un autre réservoir en parallèle s'arrêta alors que la vanne d'alimentation du bac 912 était toujours ouverte, le débit d'approvisionnement atteignit 890 m³/h. Les informations provenant du système de contrôle du distributeur d'essence n'indiquaient aucune alarme de niveau haut en provenance du site ouest de la 1^{ère} société.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, c'est au niveau des parkings de Fuji et de Northgate que la première et la plus violente explosion s'est produite dévastant cette partie du site. La vaporisation de l'essence a été principalement favorisée par sa forte concentration en butane non stabilisé (10%), mais aussi par la déviation du jet de produit par un anneau de rigidification du réservoir qui causa sa fragmentation en gouttelettes.

L'onde de suppression provoquée par l'explosion principale (au niveau des parkings de Fuji et Northgate) fut extrêmement élevée (entre 700 et 1000 mbar), beaucoup plus élevée que ce que peut prévoir la modélisation du phénomène dangereux UVCE dans ces conditions (entre 20 et 50 mbar).

Dans leur rapport (Buncefield explosion mechanism - Advisory Group Report, 2007), le groupe d'experts du *Major Incident Investigation Board* (MIIB), a émis l'hypothèse d'une accélération du front de flamme par les turbulences créées au passage au niveau de la végétation des allées, ceci pour expliquer les incohérences observées avec les connaissances actuelles du phénomène UVCE.

Concernant le lieu d'inflammation du nuage, deux hypothèses ont été retenues par les enquêteurs : la cabine du générateur de secours ou, plus probablement, le local des pompes d'urgence (Aria N° 31312).

Au regard de l'importance (violence) de l'accident le bilan humain est miraculeux. En effet, les dommages humains auraient pu être dramatiques, car la zone industrielle est habituellement très fréquentée, cependant le jour et l'heure de l'accident (un dimanche très tôt le matin) ont fait que peu de personnes se trouvaient à proximité. De ce fait, 43 personnes ont été blessées à la suite de cet accident, dont une gravement.

En ce qui concerne les conséquences environnementales, la nappe phréatique sous le site et à plus de 2 km au nord, à l'est et au sud-est a été polluée par les hydrocarbures et les eaux d'extinction. Le coût total engendré par l'accident a été estimé à environ un milliard de livres sterling.

1.4 Approches scientifiques et méthodologies existantes

En raison de la complexité des scénarios d'effets dominos et de leur prise en compte relativement récente, il n'existe pas encore de méthode largement reconnue pour leur appréciation. Cela est aussi dû au fait qu'aucune définition n'est unanimement retenue par les experts du domaine pour décrire ce phénomène. En effet, l'absence d'une définition claire et commune, a fait que les travaux effectués sur ce sujet, ont été réalisés séparément sur divers aspects spécifiques des effets dominos. Par exemple, le développement de modèles de vulnérabilité des équipements aux effets de surpression et/ou thermiques ou le développement d'outils d'identification du danger d'effet domino, *etc.*

De plus, ainsi que nous l'avons mentionné auparavant (Section 1.1.3) le processus d'appréciation des risques passe par plusieurs étapes qui peuvent être résumées ainsi : l'identification, l'analyse et puis l'évaluation des risques (*Voir* tableau 1.1). Selon l'étape du processus (identification préliminaire des dangers ou analyse détaillée) mais aussi la phase ou le stade de l'étude par rapport au cycle de vie de l'installation (conception, exploitation), les méthodes d'analyse des risques à employer sont différentes. Tout cela explique la diversité des méthodes proposées dans la littérature pour pouvoir inclure les effets dominos dans chacune des étapes du processus d'appréciation des risques.

Même si on peut remarquer un intérêt croissant relatif au sujet à travers l'augmentation du nombre de publications ces dix dernières années et une prise de conscience de plus en plus importante chez le législateur et les industriels. L'étude des effets dominos reste relativement peu traitée au regard de leur importance et est restreinte à un petit nombre de chercheurs. Cette situation est clairement reflétée par le fait que des ouvrages de référence qui fournissent de précieuses informations, méthodes,... concernant différents aspects de l'appréciation des risques, n'abordent pas le sujet des effets dominos. Par exemple les *coloured book* du TNO (Purple book, 2005 ; Red book, 2005,...) ou encore la 1^{er} édition du *Lees' Process Safety Essentials* (Mannan, 2014) qui résume les différents volumes du *Lees' Loss Prevention in the*

Process Industries (des ouvrages incontournables dans le domaine des risques dans les industries de procédés) ne donnent aucune orientation quant à l'analyse des effets dominos.

Toutefois, la troisième édition des fameux *Lees' Loss Prevention in the Process Industries* (Mannan, 2005) consacre trois pages aux effets dominos sur un total de 3581 pages (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2010 ; Laurent, 2011). La méthode décrite est celle proposée par Bagster et Pitblado (1991). Le guide pour l'analyse quantitative des risques (CCPS, 2000) traite le sujet en quatre pages, on y retrouve l'origine de l'approche proposée par Bagster et Pitblado, qui est la méthode utilisée par le *Health and Safety Executive* (HSE) en 1978, en vue de prendre en compte l'effet domino, lors d'une analyse de risques (rapports de l'étude de Canvey, 1978 ; 1981).

Cette dernière consiste à augmenter la fréquence d'occurrence des incidents majeurs, identifiés pour un équipement dans une installation donnée, pour ensuite examiner l'impact de l'effet domino. Cela revient à estimer l'augmentation de la probabilité d'un accident donné à conséquences fixées. Pour ce faire, des événements externes supplémentaires sont ajoutés à l'arbre de défaillance pour tenir compte des mécanismes dominos conduisant à un événement majeur.

En s'inspirant de cette méthode, et en utilisant les données du rapport de Canvey, Bagster et Pitblado (1991) ont mis en place une procédure pour analyser les effets dominos. Celle-ci repose sur deux principes (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2010) :

- (i) Le premier est celui proposé par le HSE, mentionné ci-dessus. Il stipule que l'effet domino augmente la probabilité de défaillance et d'endommagement dû à un accident donné avec des conséquences fixes ; l'effet domino agirait comme un événement externe dans un arbre de défaillance.
- (ii) Le deuxième est que le phénomène aggrave les conséquences d'un accident pour une fréquence fixe. D'où une autre possibilité pour en tenir compte lors de l'analyse de risques, serait de modifier les résultats des arbres d'évènements en amplifiant les conséquences d'un accident donné. Ce qui revient à examiner l'aggravation des dommages suite à un accident donné pour une fréquence d'occurrence fixée initialement.

La méthode proposée par le HSE, décrite dans les rapports de Canvey, et celle proposée par Bagster et Pitblado sont parmi les premières méthodes proposées pour l'intégration des effets dominos lors des analyses de risques. Depuis, d'autres méthodes ont été proposées dans la littérature. Pour les raisons expliquées auparavant, ces méthodes sont diverses, elles peuvent être regroupées sous deux grandes familles :

- les méthodes très simplifiées, basées sur les valeurs seuils d'endommagement, qu'on qualifiera de **méthodes qualitatives** et qui peuvent être utilisées comme outil d'analyse préliminaire du danger d'effet domino.
- les méthodes plus complexes qui utilisent des modèles probabilistes de vulnérabilité des équipements (ou autres : méthode Monte-Carlo,...) et qui servent à intégrer l'effet domino lors de l'analyse quantitative des risques, et qu'on désignera par **méthodes quantitatives**.

Avant de donner un aperçu de ces dernières, une approche d'une importance cruciale pour le développement de méthodes d'analyse des risques d'effet domino est décrite dans la section qui suit. Il s'agit de l'analyse des accidents passés ayant fait intervenir des effets dominos.

1.4.1 Analyse des accidents passés

L'analyse des accidents passés est un moyen indispensable pour l'étude des effets dominos, car c'est l'unique source de données expérimentales dans ce domaine. Cette démarche permet d'une part d'avoir un retour d'expérience à exploiter, afin de savoir quelle serait la meilleure approche concernant le développement de méthodes d'analyse, de prévention de ce risque. D'autre part, elle permet d'obtenir les données d'entrées nécessaires telles que, les événements initiateurs, leurs fréquences, les séquences d'accident les plus fréquentes et les substances souvent impliquées, *etc.*

Le retour d'expérience vise à comprendre ce phénomène afin de le maîtriser et limiter ainsi les conséquences engendrées, grâce aux enseignements tirés des accidents passés. L'étude peut se faire sous forme d'une investigation détaillée d'un seul accident, ou sous forme d'une analyse statistique sur différents types d'échantillons d'accidents :

- Uniquement des accidents ayant fait intervenir des effets dominos

- Un échantillon mixte contenant des accidents avec et sans la survenue d'effet domino
- Accidents à effet domino causés par un seul type d'accident primaire (jet enflammé, BLEVE)

Malgré l'importance de cette approche, les publications consacrées au sujet représentent un faible pourcentage par rapport au nombre total d'articles traitant le problème d'effet domino. Par exemple, Necci *et al.* (2015) ont analysé 60 articles (les plus pertinents) publiés entre 1984 et 2014 concernant les effets dominos et n'ont recensé que 6 articles (ce qui représente 9% du nombre total d'articles analysés) dédiés à l'analyse des accidents passés.

Encore une fois la convergence vers une définition commune et précise de l'effet domino est essentielle pour l'étude de ce phénomène. Effectivement, l'analyse des accidents passés est particulièrement affectée par l'absence d'une formalisation non polysémique de l'effet domino. Les bases de données qui recensent les accidents passés, classent ces derniers comme étant des accidents à effet domino ou non selon la définition adoptée.

L'autre **principale difficulté** inhérente à cette approche est le manque d'informations détaillées dans les bases de données, rapport d'enquêtes, *etc.* ce qui rend particulièrement compliqué le fait de se prononcer sur la survenue ou non d'un effet domino, et puis de déterminer avec précision ses caractéristiques (séquences, niveau d'enchaînement,...).

Dans ce qui suit, les travaux analysés relatifs à cette approche et une synthèse des principaux résultats sont présentés.

Accident ayant fait intervenir des effets dominos

L'une des premières enquêtes est celle réalisée par Delvosalle *et al.* (1998), où 41 accidents ayant fait intervenir des effets dominos survenus entre 1944 et 1995 ont été analysés (Reniers et Cozzani, 2013). Les accidents ont été classés selon deux critères :

- (i) le type d'installation primaire et secondaire impliqué ;
- (ii) la nature de l'effet physique primaire et secondaire généré.

Une autre recherche de ce type a été effectuée par Vallée *et al.* (2002), sur la base de données ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents). Cette étude a recensé 114 cas d'accidents, elle retrace l'état de l'accidentologie en date du 05/10/2001. Il a été conclu que dans la grande majorité des cas, les effets dominos étaient initiés par des incendies (feu de nappe, jet enflammé, feu de bac,...) ou des explosions (VCE/UVCE, éclatement de réservoir,...). Les accidents secondaires recensés étaient des incendies dans 54 % des cas (tous types d'incendies confondus : incendie dans des stockages, incendie de wagon ou de camion, feu de nappe ou de cuvette). Dans 11% des cas, l'accident secondaire était un BLEVE, dans 8 % des cas un VCE ou UVCE et dans 7 % des cas une dispersion de nuage toxique et finalement dans 2 % des cas un Boil-over.

Une autre conclusion très importante de cette recherche est le nombre d'enchaînements de phénomènes accidentels recensés (niveau de l'effet domino). Dans 66 % des cas analysés, l'effet domino observé était de 1^{er} niveau (un seul enchaînement), et dans 28 % des cas il était de 2^{ème} niveau. Il est donc rare que la cascade des phénomènes accidentels se poursuive au-delà du 2^{ème} enchaînement. Il est à noter que les accidents répertoriés se rapportent essentiellement au secteur de l'industrie de procédés (installations chimiques/pétrochimiques, l'industrie pharmaceutique,...).

Darbra *et al.* (2010) ont étudié les principales caractéristiques des accidents à effets dominos, à travers l'analyse de 225 accidents passés survenus entre 1961 et 2007 sur des installations de procédés, des sites de stockage ou encore lors du transport de matières dangereuses. L'analyse des auteurs a porté sur plusieurs aspects, notamment les causes et conséquences des accidents, leurs localisations, les scénarios et séquences accidentelles, les substances dangereuses impliquées, *etc.*

L'étude montre que les accidents primaires initiateurs d'effet domino sont le plus souvent dus à événements externes (31 %), à des défaillances mécaniques (29%) et à des erreurs humaines (21%). La majorité des accidents ont eu lieu sur des sites de stockages (35%) et des installations de procédés (28%). Concernant les substances dangereuses impliquées, l'analyse montre que dans 89 % des cas étudiés, des matières inflammables ont été impliquées, le plus souvent du

GPL. Les enchaînements de phénomènes accidentels les plus fréquents sont : explosion→ feu (27,6%), feu → explosion (27,5), feu→ feu (17,8).

Finalement, l'étude montre que durant les 20 dernières années les accidents à effet domino sont en baisse en Europe et aux États-Unis, tandis que dans le reste du monde leur nombre et leur gravité sont en hausse.

Dans le même esprit un inventaire a été réalisé par Abdolhamidzadeh *et al.* (2011), où 224 accidents impliquant l'effet domino survenus entre 1917 et 2009 ont été recensés en précisant l'année, la localisation de l'accident (ville, pays), l'entreprise, les séquences des événements ainsi que les dommages causés et la source de l'information. L'analyse des informations a permis de déduire que 57% des accidents dominos sont dus à des explosions (dans **84%** des cas les explosions étaient de type **VCE**), le reste à des incendies (43% des cas, où **80%** des feux étaient des **feux de nappe**). Trois quarts des accidents dominos passés se sont produits sur des installations fixes; un nombre important d'accidents dominos se sont développés **au-delà du premier enchaînement**.

En plus de ces déductions, l'auteur visait à mettre à disposition des chercheurs une base de données qui pourrait servir de support, pour de futures études du phénomène. Par exemple, les enchaînements d'accidents rapportés peuvent être d'une grande importance lors d'études ayant pour but la compréhension et la prévention des effets dominos, car ils représentent les éventuels scénarios dominos à envisager. L'association de plusieurs séquences pour un même accident primaire fournit une idée claire et réaliste des scénarios possibles.

Il est important de remarquer qu'en plus de la distribution chronologique des accidents analysés (1917- 2009), un certain nombre d'entre eux ont eu lieu dans des pays en cours de développement, cela introduit une hétérogénéité dans l'échantillon analysé. En effet, non seulement les normes de sécurité des installations et la maîtrise de l'urbanisation ont évolué au cours du temps. Mais encore ces normes ainsi que la culture de sécurité en général sont différentes entre les pays en cours de développement et les pays considérées industriellement et économiquement développés.

Cela conduit à une augmentation des fréquences des accidents et leurs conséquences, ce qui les rend incompatibles avec la réalité dans les pays développés.

Finalement, le dernier exemple et le plus récent relatif à ce type d'étude a été publié par Hemmatian, Abdolhamidzadeh, Darbra et Casal en 2014. On y retrouve les auteurs des deux précédentes études (Darbra, Abdolhamidzadeh), car l'étude avait pour but de lever les incohérences entre les deux dernières études citées ci-dessus, notamment à cause de la localisation géographique et la distribution chronologique de certains accidents analysés par Abdolhamidzadeh *et al.*

Pour ce faire les auteurs ont fusionné les deux échantillons étudiés auparavant, supprimé un bon nombre d'accidents jugés non représentatifs et ont ajouté des accidents survenus récemment. Cela a permis de collecter 330 accidents survenus entre 1961 et 2013.

Une analyse spécifique a été réalisée concernant l'occurrence des accidents et leurs caractéristiques dans les pays en cours de développement, où l'industrie se développe rapidement, parfois au détriment de la sécurité. Également, une comparaison avec la situation dans les pays industrialisés a été effectuée. En plus, une attention spécifique a été apportée aux accidents survenus entre 2000 et 2013.

La répartition des accidents à effets dominos à travers le monde est représentée sur la figure 1.5. Une comparaison entre l'ensemble des accidents et ceux survenus après l'an 2000 (53 accidents) montre clairement que ces accidents sont en baisse dans les pays développés contrairement aux pays en cours de développements.

Les causes des accidents survenus au 21^{ème} siècle sont représentées à la figure 1.6. Les détails concernant chacune des grandes catégories de causes peuvent être trouvés dans Hemmatian *et al.* (2014).

Sur les 330 accidents étudiés, 53% ont été initiés par l'accident primaire « explosion » et le reste par un feu. Concernant le type de site concerné, 38,5 % des cas, ont eu lieu sur des installations de procédés et 33% sur des parcs de stockages ; 10,6 % des accidents ont eu lieu lors des opérations de transfert (transfert et transport à l'extérieur du site).

Il a été conclu que la grande majorité des accidents (282 sur 330) ne comptait qu'un seul enchaînement (un accident primaire et un accident secondaire).

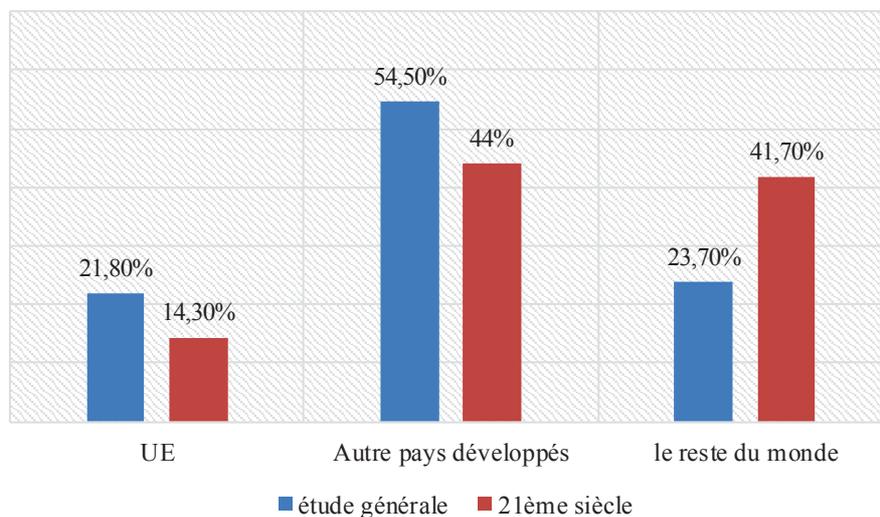


Figure 1.5 Comparaison des pourcentages d'accidents à effet domino dans différentes parties du monde.

Le rapport entre les accidents où un seul enchaînement a été observé et ceux de deux enchaînements (minimum 3 accidents) est de 6, cela rejoint les résultats de l'étude menée par Darbra *et al.*

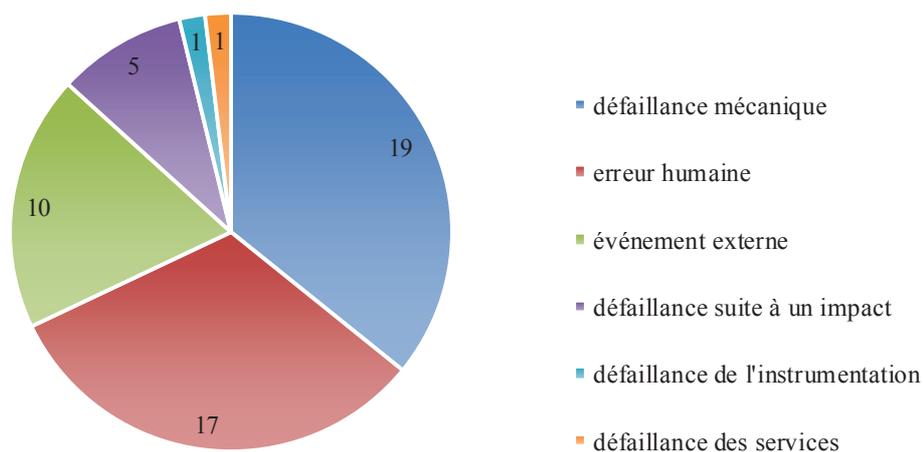


Figure 1.6 Nombre d'accidents à effet domino au 21^{ème} siècle en fonction des causes. Pour plus de détails concernant les catégories de causes, Voir Hemmatian *et al.* (2014).

L'analyse de séquences accidentelles a été réalisée à travers l'arbre des fréquences relatives, où chaque séquence accidentelle (enchaînement d'accident) est représentée par une branche et sa fréquence d'occurrence est présentée entre parenthèse. La fréquence relative a été calculée en divisant le nombre d'accidents de chaque niveau par celui du niveau précédent. Les résultats sont présentés à la figure 1.7, les fréquences d'occurrence globales d'une séquence sont données à la fin de la branche.

On peut remarquer que les accidents initiateurs sont des feux ou des explosions. La dispersion de nuage ne figure pas sur la représentation (figure 1.7), car si le nuage s'enflamme, cette dernière est naturellement assimilée à un feu ou une explosion, selon les effets observés (thermiques, ou thermiques et mécaniques). Sinon, la dispersion de toxiques ne peut pas causer un autre accident (l'endommagement d'un autre équipement).

Études sur des échantillons mixtes contenant des accidents avec et sans la survenue d'effets dominos

Il est important de ne pas limiter les inventaires aux accidents à effets dominos et de s'intéresser aux accidents industriels en général, ou par secteur. En effet, cela permet de positionner le risque d'accident à effet domino parmi l'ensemble des accidents industriels.

L'un des meilleurs exemples pour cette approche est l'étude effectuée par Kourniotis *et al.* (2000) sur un échantillon de 207 accidents soigneusement choisis. Les auteurs ont assuré un certain degré d'homogénéité de l'échantillon en prenant en compte la distribution géographique et chronologique des accidents. Cela a été fait en limitant les pays à ceux considérés industriellement ou économiquement développés, et en réduisant l'intervalle de temps entre les accidents choisis. Ils ont démontré que l'occurrence de l'effet domino lors d'un accident peut considérablement aggraver ses conséquences. C'est à l'aide des courbes F/N (fréquence/ nombre de morts, représentation typique du risque sociétal) qu'ils ont abouti à cette conclusion. Par ailleurs, ils ont conclu que la propension d'un accident à engendrer un effet domino dépend de la substance impliquée dans son événement primaire.

D'autres études comme celle effectuée Ronza *et al.* (2003) ou encore Zhang et Zheng (2012) n'avaient pas pour objectif l'analyse des effets dominos. Cependant, elles ont spécifié le nombre d'accidents ayant fait intervenir l'effet domino, et ont précisé certaines informations relatives aux enchaînements d'événements, les fréquences d'occurrences par rapport au nombre total d'accidents analysés, *etc.*

Concernant Ronza *et al.* ils ont analysé 828 accidents étant survenus sur des zones portuaires, parmi lesquelles figuraient 108 accidents à effets dominos. Les enchaînements de phénomènes accidentels les plus fréquents étaient : feu → explosion ; LOC → feu → explosion ; et LOC → dispersion de nuage inflammable → explosion.

Zhang et Zheng, 2012 ont analysé statistiquement 1632 accidents chimiques s'étant produits en Chine entre 2006 et 2010. L'étude montre que l'effet domino est présent dans 13,2 % des cas d'accident survenus sur des installations fixes. Principalement sous forme de LOC → explosion (45,6%) ; LOC → feu (26,2%) ; explosion → explosion (18,8). En ce qui concerne

le transport de matières dangereuses, l'effet domino a été enregistré dans 9% des cas soit 41 accidents. Dans 63,6% des cas (28 des accidents), sous forme de LOC → feu et dans 36,4% sous forme de LOC → explosion (16 accidents).

Accidents à effet domino causés par un seul type d'accident primaire (jet enflammé, BLEVE) ou encore étude post-accident

Gómez-Mares *et al.* (2008) se sont focalisés sur l'étude des scénarios accidentels impliquant le phénomène dangereux jet enflammé, au travers de l'analyse de 84 accidents passés. Il a été conclu que lorsqu'un jet enflammé survient, dans 50% des cas, il cause un autre accident avec des effets physiques intenses.

L'analyse des enchaînements de phénomènes accidentels a révélé que dans 27 % des cas, la séquence accidentelle était LOC → jet enflammé → explosion ; et dans 11 % de cas c'était LOC → VCE → jet enflammé.

La dernière technique pour l'exploitation du retour d'expérience consiste à effectuer une analyse post-accident détaillée sur un accident ayant fait intervenir l'effet domino, comme l'illustre la publication de Abdolhamidzadeh *et al.* (2012). Ils ont analysé l'accident qui a affecté une usine de traitement des hydrocarbures, dans l'île de Kharg en Iran, le 24 juillet 2010, causant la mort de quatre travailleurs et blessant grièvement plusieurs autres. Dans leur étude les auteurs ont effectué une analyse détaillée des événements qui ont mené à l'accident. Pour améliorer et faciliter la compréhension du mécanisme de l'accident, des illustrations graphiques, sous forme de diagramme de séquence des événements ou diagramme d'Ishikawa, ont été utilisées pour décrire les séquences de l'accident et l'interaction entre les causes profondes et directes.

Synthèse des accidents passés

Il faut savoir que les accidents primaires (explosion, feu,...) qui peuvent provoquer un effet domino, sont dus soit à des événements initiateurs internes à la source, comme la corrosion, l'érosion, l'usure (fatigue), les défauts de construction, ou encore un dysfonctionnement. Soit

à des événements initiateurs externes à la source, qu'on peut classer en trois catégories selon leurs origines :

- Humaines : erreurs, actes de malveillance, terrorisme.
- Accidentelles : incidents survenus dans des installations industrielles voisines ou liés au transport de matières dangereuses.
- Naturelles : tsunami, tremblement de terre ...

D'après Abdolhamidzadeh *et al.* (2011) les VCEs et les feux de nappe sont les phénomènes dangereux les plus susceptibles de provoquer un effet domino. Il est important de souligner le fait qu'un effet domino indirect peut être causé par un rejet toxique. Le phénomène dangereux dispersion de toxique ne peut pas engendrer un effet domino direct mais indirect (*Voir* tableau 1.3), parce qu'il ne propage pas l'accident aux équipements voisins directement via un effet physique. En revanche, il peut affecter le personnel se trouvant dans une salle de contrôle, ce qui les empêcherait de déclencher la procédure d'urgence, *etc.* (Khan et Abbasi 1998 ; Laurent, 2011 ; Reniers et Cozzani, 2013). La classification de Reniers (2010) (tableau 1.3) trouve tout son intérêt dans ce contexte. Car il est impossible actuellement de traiter à la fois les quatre catégories d'effet domino. L'effet domino indirect reste cependant rare par rapport à l'effet domino direct, pour plus de détail voir Reniers et Cozzani (2013), où un chapitre est dédié aux effets dominos indirects (chapitre sept, Cozzani *et al.*, 2013).

1.4.2 Approche qualitative

Cette approche permet de développer des modèles très simplifiés, qui peuvent servir lors de l'analyse préliminaire du danger d'effet domino. Les méthodologies et/ou outils qui en découlent, servent en général à une première sélection des équipements (source et cible) considérés critiques vis-à-vis de la propagation des accidents. Ce qui permet de simplifier le problème en réduisant le nombre d'équipements retenus pour les étapes d'analyse approfondie du risque de cascade.

Elle est principalement basée sur l'utilisation des valeurs seuils d'endommagement ou d'escalade pour l'identification des cibles potentielles des éventuelles cascades.

L'identification des cibles potentielles permet alors de déterminer les chemins de propagation possibles (couple source-cible) suite à un accident primaire donné. Cependant, ces chemins sont qualifiés de qualitatifs, car la vulnérabilité des cibles aux différents effets physiques qu'ils peuvent recevoir n'est pas étudiée. En effet, la possibilité de propagation est analysée en comparant les vecteurs d'escalade (c'est-à-dire, l'intensité des effets physiques générés par l'accident primaire à la position de la cible potentielle) aux valeurs seuils d'escalade ou d'endommagement (selon les modèles).

C'est l'approche la plus courante, car c'est la plus simple. D'ailleurs c'est celle qui est utilisée dans l'ensemble des États membres de l'Union Européenne qui prennent en compte l'effet domino (exceptée l'Allemagne, *Voir* chapitre 2, section 2.6). Le chapitre suivant lui est autre entre dédié, on y retrouve les différents seuils d'effets proposés, une explication détaillée de la différence entre les seuils d'endommagement, d'aggravation et les distances de sécurité, *etc.* (*Voir* section 2.4 et 2.5).

Trois exemples d'outils développés en suivant cette approche sont : STARS Domino (2001) ; Domino XL 2.0 (2002) et DomPrevPlanning (2007). Ces derniers seront brièvement expliqués dans la section 1.4.4.

1.4.3 Approche quantitative

L'analyse quantitative des risques fournit des données indispensables pour la maîtrise de l'urbanisation, l'établissement des plans de prévention des risques technologiques. Cette approche permet d'appréhender les risques à travers la détermination non seulement de leurs distances d'effets (contours de dangers), mais également de leurs probabilités d'occurrences, ainsi que les impacts sur les personnes en premier lieu (individu et groupe d'individus : risque individuel et sociétal), puis sur les biens et l'environnement. Il est donc clair que la démarche d'appréciation des risques d'accidents à effets dominos est en réalité beaucoup plus complexe que ce que laisserait comprendre l'approche qualitative.

En effet, en plus d'une analyse détaillée des conséquences de l'accident primaire, les dommages structurels susceptibles d'être causés aux cibles doivent faire l'objet d'une analyse afin de se prononcer sur la probabilité d'escalade (occurrence d'un accident secondaire générant des effets physiques assez intenses). Les outils les plus utilisés pour déterminer la probabilité des accidents secondaires et leurs intensités sont les modèles probabilistes de vulnérabilité des équipements. Ces derniers seront expliqués aux sections suivantes (*Voir* section 1.4.3.1, 1.4.3.2 et 1.4.3.3).

Les travaux récents de Reniers et Cozzani (2013) détaillent l'ensemble des méthodologies pertinentes développées pour l'étude des effets dominos. On y retrouve entre autres les premières méthodes ayant eu pour but l'intégration des effets dominos lors des analyses quantitatives des risques (Bagster et Pitblado, 1991 ; Khan et Abbasi, 1998 ; Cozzani *et al.*, 2005).

Khan et Abbasi (1998) ont proposé une procédure appelée *Domino Effect Analysis* (DEA). Celle-ci inclut deux niveaux d'études. Le premier consiste à identifier les équipements vulnérables, en comparant les valeurs seuils d'endommagement des équipements aux effets physiques générés par l'accident primaire. Les valeurs seuils retenues pour les effets de surpression, les effets thermiques et les effets missiles sont respectivement : 0,7 atm, 37 kW/m², l'impact de la cible par un fragment ayant une vitesse supérieure à 75 m/s. Pour déterminer ces seuils, les auteurs se sont référés aux valeurs qui étaient disponibles dans la littérature (Clancey, 1972 ; Eissenberg *et al.*, 1975 ; Pietersen, 1990 ; Davies, 1993).

Le deuxième niveau de cette procédure consiste à analyser la possibilité d'occurrence de l'effet domino, en se basant sur le potentiel de dommage de l'accident primaire et les caractéristiques des équipements secondaires (équipements vulnérables identifiés lors du premier niveau de la procédure).

L'une des particularités de cette procédure est le fait qu'elle permet d'estimer la probabilité d'effet domino concernant les accidents secondaires impliquant des substances toxiques qui peuvent aggraver les dommages sur les humains. En se basant sur cette procédure, les auteurs ont proposé l'un des premiers outils spécialement conçu pour l'étude des effets dominos :

DOMIFFECTION (1998). Certaines caractéristiques de ce dernier seront données à la section Outils d'aide à la décision existants (*Voir* section 1.4.4.1).

En 2005, une procédure systématique pour l'analyse quantitative des effets dominos a été présentée par Cozzani *et al.* (2005). Cette dernière permet d'estimer le risque individuel et sociétal en prenant en compte la contribution des accidents à effets dominos. L'un des avantages de cette procédure est le fait que, lors du calcul de la fréquence des scénarios dominos, elle prend en compte la possibilité d'endommagements simultanés de plusieurs cibles. Cette méthode a été implémentée dans le logiciel ARIPAR sous forme d'un module «effet domino». Étant donné le nombre de combinaisons de scénarios possibles (endommagements simultanés), la procédure se limite aux effets dominos de premier niveau.

Plus de détails concernant les avantages et les inconvénients de la version domino du logiciel ARIPAR seront donnés à la section 1.4.4.4. En 2009, Antonioni *et al.* ont modifié cette procédure pour permettre l'analyse quantitative des accidents Na-Tech² générés par des éventuels séismes ou inondations.

Cozzani *et al.* (2014) ont démontré la possibilité d'utiliser cette procédure pour l'analyse des effets dominos de 2^{ème} niveau. Toutefois, les besoins en ressources informatiques nécessaires pour de telles applications ont encouragé la recherche d'approches alternatives pour le calcul des fréquences des scénarios dominos (Necci *et al.*, 2015).

C'est dans ce sens qu'Abdolhamidzadeh *et al.* (2010) ont proposé une méthode de calcul des fréquences des scénarios d'effets dominos, basée sur la méthode de simulation Monte-Carlo. Pour l'application de cette dernière un algorithme nommé *FRE*quency *Estimation of DOM*ino *accidents* (FREEDOM) a été développé. Une autre alternative aux méthodes classiques de calcul des fréquences et aux méthodes de Monte Carlo, est l'utilisation des réseaux bayésiens. Khakzad *et al.* (2013) ont proposé une méthode basée sur ces derniers (réseaux bayésiens) pour

² Na-Tech : contraction de « NATurel » et « Technologique » utilisée pour désigner les accidents technologiques déclenchés par un événement naturel

le calcul de la probabilité de propagation d'un accident survenu sur un équipement source à d'autres équipements.

Modélisations probabilistes de l'endommagement des équipements : modèles de vulnérabilités

Ces modèles sont cités dans cette partie avec les approches quantitatives car ils permettent de calculer la fréquence d'occurrence des scénarios à effets dominos. Ils représentent donc un support essentiel pour l'analyse quantitative.

L'examen des accidents passés montre qu'un accident primaire survenu sur un équipement donné, se propage suite à l'endommagement d'un autre équipement. L'endommagement direct de l'équipement cible causant une perte de confinement (LOC) est la cause la plus fréquente de la propagation des accidents. Les effets indirects sont rarement à l'origine de la propagation d'accidents (Ex. : effets toxiques). Par conséquent, l'étude de la propagation, nécessite l'analyse de la relation entre les effets physiques générés par l'accident primaire (vecteurs d'escalades) et les éventuels dommages causés aux équipements cibles. Cette relation est souvent désignée par : modèle de vulnérabilité des équipements.

En fonction de l'effet physique étudié certains modèles de vulnérabilité des équipements proposés dans la littérature sont présentés dans ce qui suit.

1.4.3.1 Vulnérabilité des équipements aux effets de suppression

L'utilisation des modèles Probit pour estimer la probabilité d'endommagement des équipements impactés par une onde de surpression a été proposée pour la première fois par Eisenberg *et al.* (1975) :

$$Y_{\text{blast}} = a + b \ln(\Delta P^\circ) \quad (1.1)$$

Avec :

Y_{blast} valeur Probit pour l'endommagement de l'équipement

ΔP° pic statique de suppression, en Pa

a et b coefficients du Probit

À partir de la valeur du Probit, la probabilité d'endommagement est facilement calculée (Lees, 1996; Van Den Bosh *et al.*, 1989).

En 2004, Cozzani et Salzano ont proposé des modèles Probit spécifiques pour différentes catégories d'équipements. L'étude a souligné l'importance de prendre en compte les caractéristiques des différentes catégories d'équipements lors de l'estimation des dommages causés par la surpression.

Mingguang et Juncheng (2008), en se basant les travaux de Cozzani et Salzano (2004), ont proposé un lissage/ajustement différent des données d'endommagements des équipements. Ils ont ainsi développé d'autres modèles Probits.

Le tableau 1.4 présente les coefficients a et b utilisés dans les fonctions Probit développées lors des études citées ci-dessus.

Tableau 1.4 Coefficients des fonctions Probit pour le calcul de la probabilité d'endommagement, proposés par différents auteurs (adapté de Necci *et al.*, 2015).

Type d'équipement	a	b	Auteurs
Atmosphérique	-23,8	2,92	Eisenberg <i>et al.</i> (1975)
Atmosphérique	-18,96	2,44	Cozzani et Salzano (2004)
Sous pression	-42,44	4,33	
Équipement allongé (tour de distillation...)	-28,07	3,16	
Petit équipement (pompe...)	-17,79	2,18	
Atmosphérique	-9,36	1,43	Mingguang et Juncheng (2008)
Sous pression	-14,44	1,82	
Équipement allongé	-12,22	1,65	
Petit équipement	-12,42	1,64	

1.4.3.2 Vulnérabilité des équipements aux effets thermiques

Un modèle pour le calcul de la probabilité d'endommagement des équipements impactés par des feux a été développé par Landucci *et al.* (2009). Ils ont établi une relation entre l'intensité du flux thermique reçu et le temps jusqu'à défaillance (*time to failure*, ttf). Le modèle calcule le ttf, puis à l'aide de la fonction Probit, il calcule la probabilité d'endommagement.

La particularité de ce modèle est qu'il permet de prendre en compte la spécificité du site étudié. En effet, le calcul des coefficients Probit a et b de l'équation (1.2) se fait en fonction du temps de réponse des secours ou des moyens de protections du site :

$$Y = a + b \times \ln(\text{ttf}) \quad (1.2)$$

$$a = \frac{3,718 \times \log(\text{tte1}) - 6,283 \times \log(\text{tte2})}{\log(\text{tte1}) - \log(\text{tte2})} \quad (1.3)$$

$$b = \frac{2,565}{\log(\text{tte1}) - \log(\text{tte2})} \quad (1.4)$$

Avec :

tte1 temps maximal nécessaire pour le déclenchement des procédures d'urgence, considéré par les auteurs comme étant le temps nécessaire pour la détection de l'incendie.

tte2 temps maximal pour le début des opérations de maîtrise du feu (ex. : déplacement des pompiers sur le lieu de l'incendie,...).

Les auteurs estiment que d'après le retour d'expérience dans 90% des cas, le temps nécessaire pour le début des opérations de secours effectives (capable de contrôler le feu) est inférieur à 20 min. Alors que dans seulement 10% des cas, cela peut se faire en moins de 5 min. C'est ainsi qu'ils ont proposé la fonction Probit (1.5) en considérant tte1 = 5 min et tte2 = 20 min.

$$Y = 9,25 - 1,85 \ln(\text{ttf}) \quad (1.5)$$

Cette dernière peut être très facilement adaptée au site étudié, selon la performance des mesures de maîtrise des risques existantes, à l'aide des équations (1.3) et (1.4).

Concernant le calcul du ttf, en secondes, les équations (1.6) et (1.7) ont été proposées respectivement pour les équipements atmosphériques et les équipements sous pression. Ces

dernières ont été validées en utilisant des résultats expérimentaux et ceux des modélisations par éléments finis :

$$\ln(\text{ttf}) = -1,13 \times \ln(I) - 2,67 \times 10^{-5} \times V + 9,9 \quad (1.6)$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0,95 \times \ln(I) + 8,845 \times V^{0,032} \quad (1.7)$$

Avec :

I intensité du flux thermique (kW/m²)

V volume de l'équipement en m³

Une amélioration de ce modèle a été apportée dans Reniers et Cozzani (2013). Des développements très récents (Landucci *et al.*, 2015) permettent d'inclure les caractéristiques spécifiques des barrières de sécurité du site étudié.

1.4.3.3 Vulnérabilité des équipements aux impacts de fragments

L'examen de la littérature montre que la majorité des études relatives aux effets missiles concernent l'estimation de la probabilité d'impact. La probabilité d'endommagement causé par l'impact de fragment est souvent considérée égale à un (Mannan, 2005 ; Reniers et Cozzani, 2013 ; Necci *et al.*, 2015).

Actuellement il n'existe pas de modèles de vulnérabilité **simples** pour l'étude de la probabilité d'endommagement. Cela est dû non seulement au nombre relativement faible d'accidents à effets dominos causés par ce type d'effets (REX : principale source de données). Mais également au nombre important de paramètres qui **influencent** l'impact des fragments et la probabilité d'endommagement (Necci *et al.*, 2015). Une discussion détaillée du sujet peut être trouvée au sixième chapitre de l'ouvrage de Reniers et Cozzani (2013).

1.4.4 Outils d'aide à la décision existants

Les paragraphes qui suivent présentent une brève description ainsi que les avantages et inconvénient des outils d'aide à la décision développés par le passé pour la gestion des scénarios d'effets dominos.

1.4.4.1 DOMIFFECTION (DOMIno eFFECTION), 1998

Le logiciel DOMIFFECTION a été présenté en 1998 par Khan et Abbasi, il fût probablement le premier logiciel dédié spécialement à l'étude des effets dominos. Cet outil permet à son utilisateur (Khan et Abbasi, 1998) de déterminer :

- Les conséquences des accidents primaires possibles
- La probabilité qu'un deuxième accident soit déclenché par le premier
- Les scénarios d'éventuels accidents secondaires, leurs conséquences, la probabilité que d'autres accidents se produisent et ainsi de suite (les scénarios d'accidents à effets dominos).

Comme nous l'avons expliqué auparavant, ce logiciel est basé sur une méthodologie appelée DEA (*Domino Effect Analysis*). Les auteurs ont utilisé des modèles déterministes pour estimer les conséquences des accidents et des modèles probabilistes pour calculer les fréquences des événements et la probabilité d'effet domino.

DOMIFFECTION est codé en C++. Il se compose de six modules principaux : interface utilisateur, donnée d'entrée, scénario d'accident, analyse, domino, graphiques. Le module domino permet d'estimer le potentiel de dommage d'un accident primaire à la position de tous autres équipements secondaires. La probabilité des scénarios dominos est estimée à l'aide des fonctions Probit (Eisenberg *et al.*, 1975 ; Green book, 1992 ; Lees, 1996).

Avantages et inconvénients

L'un des avantages de cet outil est son large champ d'application potentiel (Reniers et Cozzani, 2013). En effet, il a été utilisé pour l'analyse des effets dominos dans des raffineries,

des usines pétrochimiques (Khan et Abbasi, 2001a), installations chimiques, et installation de production d'engrais (Khan and Abbasi, 2001b). La complétude peut être considérée comme un autre avantage de DOMIFFECT, car les principales étapes d'appréciation des risques sont traitées par l'outil.

En revanche, au vu des développements récents, certains modèles utilisés par cet outil ne sont plus d'actualité. Par exemple, la fonction probit utilisée pour l'estimation de la probabilité d'endommagement causé par les effets de suppression est celle proposée par Eisenberg *et al.* (1975), alors qu'actuellement des modèles plus précis sont disponibles (Cozzani et Salzano, 2004). L'outil ne prend pas en compte d'éventuels effets de synergie des accidents secondaires (association de plusieurs effets physiques).

1.4.4.2 STARS Domino, 2001

STARS Domino est la version améliorée du logiciel STARS, acronyme de l'anglais *Software Toolkit for Advanced Reliability and Safety analysis* développé par Balocco *et al.* (2001). Il est composé de quatre modules : base de données, modèles du système, arbre de défaillances, arbre d'événements. L'utilisateur de cet outil peut créer une configuration du site étudié avec Microsoft Visio[®] ou importer des dessins de Conception Assistée par Ordinateur (fichiers CAO). L'affichage des résultats peut se faire sous forme de texte, de tableaux, de graphiques. L'option SIG (Système d'Informations Géographiques) permet de représenter les contours d'effets sur la carte de la région étudiée.

La méthode employée par cet outil est simple. L'utilisateur doit spécifier un équipement source sur la représentation graphique du site étudié (un fichier CAO importé, ou une configuration réalisée par l'utilisateur). Il doit ensuite définir les scénarios accidentels pour chaque équipement sélectionné comme source, en connectant des événements initiateurs à des mesures de maîtrise de risques, à des phénomènes physiques (feux, explosions), *etc.* selon la méthode d'arbre d'événements.

Les fréquences des séquences accidentelles construites sont calculées en utilisant les techniques de l'arbre d'événements. La simulation des phénomènes dangereux qui en

découlent, est réalisée à l'aide de modèles choisis par l'utilisateur parmi ceux proposés par STATS Domino.

Ensuite, en comparant les conséquences des accidents primaires aux seuils d'endommagement le programme identifie les équipements cibles. Si un accident secondaire est identifié, un nouvel événement initiateur est automatiquement ajouté à la séquence accidentelle en question.

Avantages et inconvénients

Le principal avantage de ce logiciel est sa capacité à interagir (interfaçage) avec d'autres outils (MATLAB[®], des outils de calcul de conséquences,...). Concernant l'affichage des résultats, comme expliqué ci-avant, il peut afficher les résultats sous différentes formes (texte, graphique, *etc.*). Par contre, le fait qu'il soit basé sur une approche très simplifiée (valeurs seuils), le rend valable uniquement pour une évaluation rapide des cibles potentielles des scénarios d'effets dominos. La possibilité d'effet domino de deuxième niveau n'a pas été abordée par Ballocco *et al.* (2001) (Reniers et Cozzani, 2013).

1.4.4.3 Domino XL 2.0, 2002

Le logiciel Domino XL 2.0 a été développé par Delvosalle *et al.* (2002) pour permettre l'application de la méthodologie d'analyse des effets dominos développée par Delvosalle en 1998. Cette dernière repose sur quatre étapes principales (Delvosalle *et al.*, 2002 ; Laurent, 2011) :

La première étape a pour but de lister, classer et repérer sur les plans des sites, les équipements ou zones d'équipements sources de danger ;

La seconde étape consiste à sélectionner parmi les équipements retenus dans l'étape précédente, ceux capables de générer un accident primaire et d'y associer les effets potentiels ;

La troisième étape a pour objectif de déterminer les cibles potentielles. Cela se fait à l'aide de l'approche simplifiée basée sur les distances d'effets et les seuils. Le calcul des distances d'effets des accidents primaires est principalement basé sur les modèles proposés par Van Den Bosh et Weterings, (Yellow book, 1997). C'est la complexité de la mise en œuvre de cette

étape qui a incité Delvosalle *et al.* (2002), à développer le logiciel Domino XL 2.0, pour permettre l'application de la méthode des cas industriels réels (Reniers et Cozzani, 2013) ; La dernière étape consiste à vérifier la pertinence des couples sources primaires-cibles secondaires sélectionnés dans l'étape précédente. Des codes couleurs et chiffres permettent de faciliter l'interprétation des résultats.

Ce logiciel fournit une aide précieuse à l'utilisateur au moment de la saisie des données d'entrée nécessaires pour l'exécution de la première et la seconde étape. La troisième étape est entièrement automatisée. Trois types de résultats différents sont fournis :

Les premiers sont appelés « **résultats généraux** ». Ils sont donnés sous forme de tableaux indiquant les équipements cibles potentielles.

Les deuxièmes sont désignés par « **résultats pondérés** » et visent à faciliter la prise de décision concernant la gestion des effets dominos, en déterminant le facteur de danger (DF) et le facteur de vulnérabilité (VF) pour chaque équipement ou zone d'équipement. Le facteur de danger est calculé pour les équipements sources et les trie en fonction de la gravité des conséquences qu'ils peuvent générer. Le facteur de vulnérabilité concerne les équipements cibles et les classe en fonction de leur vulnérabilité. Ces deux facteurs sont calculés sur la base d'un coefficient de pondération déterminé par l'utilisateur.

Les derniers sont nommés « **résultats pondérés spécifiques** ». Ils donnent une comparaison des facteurs DF et VF pour un équipement ou une zone d'équipement spécifique, sous forme de graphique à barres (Reniers et Cozzani, 2013), ce qui facilite l'analyse et l'interprétation des résultats.

Avantages et inconvénients

Ce logiciel est considéré comme étant simple d'utilisation grâce à l'aide qu'il fournit lors de la saisie des données, notamment à travers des instructions pour guider l'utilisateur étape par étape. Il vise à identifier puis à hiérarchiser les équipements les plus dangereux et les plus vulnérables par rapport aux effets dominos, en fonction des facteurs mentionnés auparavant. Toutefois, il ne peut pas être considéré comme étant complet, car il ne détermine pas la fréquence d'occurrence des effets dominos et donc ne calcule pas le risque. De plus, le fait

d'utiliser les seuils d'endommagement pour déterminer la probabilité d'escalade, constitue une simplification du problème. Il est important de noter que Domino XL 2.0 est utile pour l'aide à la décision lors des analyses préliminaires des effets dominos, et qu'il est utilisé en Wallonie pour cet effet (Alileche *et al.*, 2015).

1.4.4.4 Version domino du logiciel Aripar-GIS, 2006

Un module effet domino a été ajouté par Cozzani *et al.* (2006b) au logiciel ARIPAR, afin de permettre l'intégration de la problématique des effets dominos dans l'analyse quantitative des risques (QRA). Le logiciel Aripar-GIS vise à évaluer quantitativement les risques liés aux traitements, au stockage et au transport de matières dangereuses dans une zone industrielle pour aider à la prise de décision, par exemple lors de l'aménagement du territoire. Il est interfacé avec des logiciels de calcul des conséquences d'accidents comme : EFFECTS, ALOHA et PHAST, *etc.*, ce qui lui procure une bonne interopérabilité. Cozzani *et al.* (2006b) ont bénéficié de cette plate-forme existante et ont ajouté à ce logiciel, une méthodologie pour l'analyse quantitative des effets dominos développé par Cozzani *et al.* (2005). Étant donné que la version domino du logiciel Aripar-GIS est une extension de ce dernier, elle possède les mêmes caractéristiques techniques détaillées dans Spadoni *et al.* (2000). Certaines cases et tableaux ont été rajoutés aux interfaces utilisateurs pour permettre à l'utilisateur de considérer les effets dominos. Ils concernent principalement les équipements cibles, le choix des modèles de vulnérabilités des équipements et la probabilité d'occurrence des événements secondaires (Reniers et Cozzani, 2013).

La version domino du logiciel, génère automatiquement tous les scénarios dominos secondaires possibles suite à un accident primaire envisagé. Elle calcule leurs fréquences et produit une carte de vulnérabilité, en se basant sur un environnement SIG (Système d'Informations Géographiques). Enfin elle effectue une évaluation quantitative du risque dans la zone impactée. Après le calcul du risque individuel et sociétal en intégrant l'éventuelle contribution des effets dominos, des représentations graphiques (courbe F-N, courbe Iso-risque,...) sont fournies pour chaque indice de risque.

Avantages et inconvénients

L'environnement SIG simplifie considérablement l'application de la méthode proposée pour l'analyse des effets dominos, en automatisant l'identification des cibles potentielles. Il facilite la saisie des données d'entrée et l'affichage des résultats. La représentation graphique des indices de risque (risque individuel et risque sociétal) facilite l'analyse de la contribution de l'effet domino et aide à la prise de décision. La complétude peut être considérée comme l'un des avantages de cet outil. En effet, il réalise l'ensemble des étapes d'appréciation des risques et peut être utilisé pour des installations fixes ou pour des systèmes de transport. L'utilisation de seuils d'escalade et modèles de vulnérabilité spécifiques, selon le type de l'équipement cible et la prise en compte de la possibilité d'endommagements simultanés de plusieurs cibles constituent l'apport principal de cet outil.

L'une des limites du logiciel est le fait qu'il ne traite que les scénarios dominos de 1^{er} niveau. Étant donnée l'approche mathématique utilisée pour le calcul de la fréquence des effets dominos, l'extension de l'étude au 2^{ème} niveau nécessite un temps de calcul très important. En outre, l'utilisation des outils classiques de calculs de conséquences, ne permet pas de prendre en compte l'effet de synergie lors du calcul des conséquences des accidents qui peuvent survenir simultanément. Toutefois, la prise en compte de l'effet de synergie reste compliquée même en utilisant des outils de calcul de dynamique des fluides (*Computational Fluid Dynamics*, CFD).

1.4.4.5 DomPrevPlanning, 2007

Ce logiciel a été proposé par Reniers et Dullaert (2007) pour remédier aux problèmes liés à la qualité et à la quantité des données d'entrée nécessaires pour l'évaluation du risque d'effet domino et donc la prise de décision. Les données d'entrée requises pour une telle étude sont nombreuses et variées (Reniers et Dullaert, 2007) ce qui logiquement nécessite que l'utilisateur ait un haut niveau de connaissance du sujet (Reniers et Cozzani, 2013). Les auteurs ont donc proposé une méthodologie pour la hiérarchisation des séquences accidentelles et l'aide à la décision concernant la prévention des effets dominos, nécessitant le strict minimum

d'informations. Celle-ci repose sur dix étapes. Certaines de ces étapes doivent être effectuées en concertation entre les différents établissements appartenant à la zone étudiée. D'où le fait que l'application de l'outil DomPrevPlanning doit être réalisée par un conseil inter-établissement.

L'analyse de l'escalade est réalisée en comparant des distances d'effets générés par les accidents primaires aux distances réelles entre les équipements. La méthodologie n'inclut pas une modélisation détaillée des effets et ne calcule pas la fréquence des effets dominos. Les données relatives aux distances d'effets sont issues du document communément appelé *Instrument Domino-Effecten* (IDE) (RIVM, 2003). Ce dernier fournit des distances de sécurité calculées pour différents scénarios (Voir section 2.6.3 et tableau 2.9).

Après la comparaison de ces distances (distances réelles et distances d'effets) un facteur appelé *Domino Danger Unit* (DDU) est affecté pour chaque paire d'équipement unidirectionnel. Pour la même paire deux DDU sont affectés, afin de permettre de considérer les deux équipements comme étant source (DDU_{ij} et DDU_{ji}). Dans le premier cas c'est l'installation désignée par i qui est considérée comme source de l'accident et l'installation j qui est la cible, et vice versa. Quatre valeurs différentes du DDU sont à spécifier par l'utilisateur au début de l'étude. D'autres facteurs sont calculés sur la base du DDU et des fréquences de défaillance des équipements pour permettre de hiérarchiser les chemins de propagation impliquant trois équipements.

Avantages et inconvénients

DomPrevPlanning a été développé sous *Visual Basic for Applications* (VBA) ce qui permet de saisir les données d'entrée et d'afficher les résultats dans Microsoft Excel[®]. Il fournit une hiérarchisation des équipements par rapport au risque d'effets dominos. Il a été conçu pour pouvoir effectuer cette hiérarchisation en fonction du strict minimum d'informations. Cela le rend utile pour une analyse rapide des couples d'équipement (source – cible) par rapport aux effets dominos lors des premières phases de conceptions où peu d'informations sont disponibles. Dans le but de faciliter son utilisation, des instructions sont fournies à l'utilisateur lors de la saisie des données nécessaires. Le fait qu'il nécessite très peu de données d'entrée

et qu'il aide l'utilisateur à travers des indications, fait que ce dernier ne doit pas forcément avoir de grandes connaissances liées au domaine des effets dominos (Reniers et Cozzani, 2013).

En revanche, l'outil ne réalise pas une analyse détaillée des conséquences des accidents potentiels et ne calcule pas la fréquence des effets dominos. Par conséquent il ne permet pas de calculer le risque. Une autre limite de ce logiciel est qu'il ne prend en compte que les effets dominos de type « en série », selon la catégorisation proposée par Reniers (2010) (*Voir* tableau 1.3). Ce qui implique qu'il ne considère pas la possibilité que plusieurs accidents secondaires puissent avoir lieu simultanément.

Pour conclure, n'oublions pas que même à l'aide des outils CFD il est compliqué de prendre en compte les éventuels effets de synergie résultant de l'occurrence de plus d'un accident secondaire. Par contre, le calcul de la fréquence d'occurrence des effets dominos de catégorie « parallèle » selon la classification proposée par Reniers (2010). Autrement dit la prise en compte des accidents simultanés est possible selon l'approche proposée par Cozzani *et al.* (2005). Mais cette dernière est limitée aux scénarios dominos de 1^{er} niveau.

Abdolhamidzadeh *et al.* (2010) ont proposé un outil appelé FREEDOM pour permettre de calculer la fréquence de tels événements. Cependant cet outil s'attache uniquement au calcul des fréquences (ne produit pas de hiérarchisation des équipements et ne calcule pas les conséquences des effets).

1.5 Conclusion

L'ensemble des informations présentées concernant l'analyse des accidents passés a démontré que la pertinence des résultats de cette approche dépend non seulement de l'échantillon analysé et son homogénéité (la distribution géographique et chronologique des accidents). Mais également de la source (Ex. : bases de données) qui les classe comme accidents à effets dominos ou non selon la définition adoptée.

L'examen de la bibliographie portant sur les effets dominos a également démontré l'absence d'une procédure simple d'utilisation et précise pour leur appréciation. Les méthodes proposées peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

Méthodes de hiérarchisation des équipements par rapport au danger d'effets dominos. Elles reposent sur une approche simplifiée basée sur les seuils d'endommagement et/ou les distances de sécurité. Elles sont généralement faciles à utiliser. Par contre elles ne peuvent être employées que pour une analyse préliminaire des effets dominos.

Les méthodes visant à calculer le risque d'effets dominos (fréquence et gravité des conséquences). Il existe très peu de méthodes capables de calculer le risque d'effets dominos avec certaines simplifications et leur application à des cas réels reste lourde et très compliquée. En effet, leurs mises en œuvre nécessitent l'intervention d'experts et requièrent un temps de calcul important, d'où le fait qu'elles ne sont pas utilisées dans la pratique.

Cela a conduit les chercheurs à proposer des méthodes et des outils qui proposent de traiter séparément l'une des composantes du risque qui est la fréquence des effets dominos. Concernant le calcul des conséquences, notons que la prise en compte des effets de synergie nécessite l'utilisation des outils CFD et le calcul par éléments finis. Cette alternative reste compliquée à mettre en œuvre pour plusieurs raisons : le niveau de détail des informations nécessaires qui est souvent indisponibles lors des premières phases de conception, le niveau d'expertise requis qui n'est pas toujours présent, et enfin le coût. Ce qui les rend inapplicables pour l'analyse des risques à l'échelle d'une zone industrielle et limite souvent leur utilisation aux calculs qui servent au dimensionnement des équipements lors des phases de conception.

Il est très important de remarquer que les outils d'aide à la décision décrits dans ce chapitre ne sont pas disponibles sur le marché. À l'heure actuelle l'étude des effets dominos se résume au calcul des distances d'effets et à la délimitation de zones de dangers.

Pour ces raisons, il nous est apparu important de développer une méthodologie globale pour l'étude des effets dominos. Cette méthodologie doit intégrer des outils d'analyse des risques,

des modèles de vulnérabilité, *etc.* et formaliser les connaissances relatives à l'appréciation des effets dominos. Elle doit donc être basée sur l'état de l'art actuel en ce qui concerne les valeurs seuils d'escalade et les modèles de vulnérabilité des équipements. Par contre la prise en compte des accidents simultanés reste problématique, car l'utilisation d'outils CFD et la modélisation par éléments finis comme nous l'avons vu précédemment est inapplicable à cette échelle de description. Par conséquent nous ne considérons dans cette étude, que les effets dominos en chaîne.

Le chapitre suivant montre les résultats d'une étude réalisée à l'échelle européenne concernant entre autres les méthodes utilisées pour l'étude de la propagation des accidents.

CHAPITRE 2

ÉTUDE DES RISQUES DE PROPAGATION D'ACCIDENTS EN EUROPE : SEUILS POUR LES EFFETS DOMINOS ET DISTANCES DE SÉCURITÉ

Dans ce chapitre, nous rappelons tout d'abord, le cadre législatif relatif aux effets dominos, et le contexte dans lequel leur prise en compte a été imposée en Europe. Ensuite, la différence entre les seuils d'endommagement, d'aggravation et les distances de sécurité est précisée. Finalement, les résultats d'une étude menée dans dix États Membres (EM) de l'Union Européenne (UE) sont présentés, avec en particulier :

- Les définitions d'effets dominos adoptées dans les différents EM : Belgique (région Flamande et Wallonne), France, Grèce, Italie, Pologne, Espagne (région Catalogne), Pays-Bas, Allemagne, Royaume-Uni, et le Danemark.
- Les outils (logiciels, guides) et méthodes utilisés pour l'analyse des effets dominos.
- Les valeurs seuils et distances de sécurité utilisées, ainsi que les différentes réglementations qui régissent ces dernières.

2.1 Introduction

L'accident industriel de Mexico en 1984 qui a causé la mort de 600 personnes et blessé 7000, est probablement l'un des accidents à effet domino les plus connus (Pietersen, 1988). Il a conduit les autorités de l'Union Européenne à se pencher d'avantage sur le problème des effets dominos et à mettre en place des mesures réglementaires, incitant et obligeant les États Membres à les inclure dans leurs législations. Cela s'est traduit par la rédaction de l'article 8 de la directive Seveso II (Directive, 96/82/CE) relatif aux effets dominos puis de l'article 9 de la directive Seveso III (Directive, 2012/18/UE).

Afin de répondre aux exigences réglementaires, désormais, une attention particulière est consacrée aux effets dominos dans l'industrie chimique et celles des procédés en général. En ce sens, les normes techniques et les mesures de prévention telles que les distances de sécurité, l'ignifugation et l'utilisation de déluge d'eau, ont été introduites pour contrôler et réduire la probabilité des accidents en cascade (Mecklenburgh, 1985).

Toutefois, la complexité des scénarios dominos est à l'origine de l'inexistence d'une démarche commune pour leur évaluation. Ainsi, dans la littérature plusieurs approches différentes sont proposées pour l'analyse des effets dominos.

En raison des difficultés à la fois techniques et managériales rencontrées lors de l'appréciation des effets dominos, plusieurs outils et même différentes valeurs de distances de sécurité sont adoptés dans les pays. De plus, il n'existe pas encore une définition unanimement retenue de ce qui devrait être considéré comme un scénario accidentel à effet domino.

En particulier, il y a un désaccord dans la littérature concernant les éléments clés d'un scénario domino : propagation dans l'espace (à partir d'un équipement d'un procédé ou un réservoir à un autre), propagation dans le temps, ou encore l'escalade des conséquences finales par rapport à celles de l'accident primaire (initiateur), en d'autres termes, l'aggravation des conséquences, après extension des dommages.

Larsen *et al.*, 2012 ont abordé plusieurs problèmes parmi ceux mis en évidence par les services d'inspection des États membres de l'UE, lorsqu'il s'agit de vérifier la prise en compte des effets dominos entre les sites industriels voisins. L'un des challenges les plus importants mis en évidence dans le rapport, est le manque de critères pour l'identification des « groupes dominos », désignés comme les établissements parmi lesquels les accidents peuvent se propager et donner lieu à un effet domino externe. Un autre problème est le manque d'harmonisation entre les pays européens, en ce qui concerne les effets dominos. Leur rapport souligne le fait qu'un site peut être classé comme « établissement domino » ou pas, en fonction du pays où il est situé, en raison des différents critères utilisés dans les États membres de l'UE pour l'identification des groupes dominos.

2.2 Cadre législatif et réglementaire

La directive européenne Seveso III relative aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, établit des règles pour la prévention des accidents majeurs et l'atténuation de leurs conséquences sur l'homme et les biens. Elle distingue deux types d'établissements en fonction de la quantité totale de substances dangereuses sur le site :

- les établissements Seveso seuil haut ;
- les établissements Seveso seuil bas.

Les exigences prévues par la directive sont applicables selon les seuils Seveso (seuil haut ou seuil bas) et correspondent à des mesures de prévention et de limitation des conséquences.

Cette directive est transposée en droit français à travers la législation nommée la législation des Installations Classées pour la Protection de l'environnement ou plus communément réglementation ICPE.

Comme cité auparavant l'article 9 de la directive Seveso III est spécialement dédié aux effets dominos. Le tableau 2.1 indique les exigences de la directive 2012/18/UE (Seveso III) concernant les effets dominos.

Tableau 2.1 Exigences de l'article 9 de la directive 2012/18 /UE concernant l'effet domino.

Paragraphe	Exigences
1	Les États membres veillent à ce que l'autorité compétente, grâce aux informations reçues des exploitants conformément aux articles 7 et 10, ou à la suite d'une demande d'information supplémentaire de l'autorité compétente, ou par des inspections au titre de l'article 20, identifient tous les établissements seuil bas ou haut ou groupes d'établissements dans lesquels le risque ou les conséquences d'un accident majeur peuvent être accrus du fait de la situation géographique et de la proximité de ces établissements, ainsi que les inventaires des substances dangereuses de ces établissements.
2	Lorsque l'autorité compétente dispose d'informations complémentaires à celles fournies par l'exploitant conformément au point g) de l'article 7, paragraphe 1, elle met ces informations à la disposition de cet exploitant, en cas de nécessité pour l'application du présent article.
3	Les États membres s'assurent que les exploitants des établissements recensés conformément au paragraphe 1: a) échangent des informations adéquates pour permettre à ces établissements de prendre en compte la nature et l'étendue du danger global d'accident majeur dans leurs politiques de prévention des accidents majeurs, leurs systèmes de gestion de la sécurité, leurs rapports de sécurité et leurs plans d'urgence internes, selon le cas; b) coopèrent pour l'information du public et des sites voisins non couverts par la présente directive et pour la communication des informations à l'autorité chargée de préparer les plans d'urgence externes.

Il est à noter que le risque d'effet domino est reconnu par la législation européenne depuis la première directive Seveso (Directive 82/501/CEE), qui a exigé l'évaluation des effets dominos dans l'ensemble des sites tenus d'établir un rapport de sécurité. Cependant, comme indiqué plus haut (section 2.1) ce n'est qu'à partir de la directive Seveso II qu'un article a été spécialement consacré aux effets dominos.

La commission européenne demande aux États membres des rapports périodiques concernant l'application des directives Seveso. Pour ce faire la commission fournit aux États membres un questionnaire auquel ils doivent répondre.

Dans le cadre de la directive Seveso II, cela se faisait avec le document fourni par la décision de la commission du 17 juillet 2002 portant sur le questionnaire relatif à la directive 96/82/CE. Actuellement, dans le cadre de la directive Seveso III, cela se fait, à travers la décision d'exécution de la commission du 10 décembre 2014, établissant les modalités de communication des informations par les États membres sur la mise en œuvre de la directive 2012/18/UE.

Le tableau 2.2 récapitule les questions auxquelles les États membres doivent répondre dans le cadre des directives Seveso II et III.

On peut remarquer une simplification du questionnaire. Cela est probablement dû à l'absence de réponse sur certains points au vu de la complexité de l'identification des groupes dominos (absence de méthodes et d'outils).

La maîtrise de l'urbanisation est également très concernée par les accidents dominos. L'article 13 de la directive Seveso III, lui est consacré. En effet, les distances de sécurité entre les différents équipements critiques, installations et sites dangereux sont primordiales pour la prévention des accidents en cascade. De plus, les conséquences des accidents dominos sont pratiquement parmi les plus graves qui peuvent être considérées crédibles. Par conséquent, la prise en compte des scénarios dominos est primordiale pour la protection des populations à travers l'aménagement du territoire à proximité des sites industriels dangereux, et la maîtrise des risques technologiques.

Tableau 2.2 Récapitulatif des informations liées aux effets dominos, requises par les questionnaires d'application des directives Seveso.

Seveso II
<p>a) Fournir des informations générales sur la méthode retenue pour recenser les établissements ou groupes d'établissements visés à l'article 9, paragraphe 1.</p> <p>b) Combien de groupes d'établissements ont-ils été répertoriés, dans lesquels la probabilité et la possibilité ou les conséquences d'un accident majeur peuvent être accrues en raison de l'emplacement et de la proximité des établissements visés à l'article 8, paragraphe, 1 de la directive, relatif à l'effet domino ?</p> <p>c) Quel est le nombre moyen d'établissements par groupe ? (facultatif)</p> <p>d) Quel est le nombre d'établissements dans le plus petit groupe ? (groupe contenant le moins d'établissements) (facultatif)</p> <p>e) Quel est le nombre d'établissements dans le plus grand groupe? (groupe contenant le plus d'établissements) (facultatif)</p> <p>f) Quelle est la stratégie adoptée pour faire en sorte que des informations adéquates puissent être échangées de façon appropriée au sujet des établissements susceptibles d'être touchés par l'effet domino ? Illustrer cette stratégie à l'aide d'un ou deux exemples concrets en insistant sur les difficultés rencontrées dans la pratique.</p>
Seveso III
<p>Combien y a-t-il de groupes d'établissements identifiés dans lesquels le risque ou les conséquences d'un accident majeur peuvent être accrues du fait de la situation géographique et de la proximité de ces établissements, et quels sont les inventaires des substances dangereuses de ces établissements, en application de l'article 9 de la directive 2012/18/UE ?</p>

2.3 Définitions de l'effet domino

Les paramètres à examiner pour déterminer la possibilité de cascade et d'identifier les scénarios dominos, sont discutés dans les paragraphes qui suivent.

Plusieurs définitions sont disponibles dans la littérature scientifique et technique pour décrire l'effet domino dans le contexte de l'évaluation des risques industriels (*Voir* chapitre 1, section 1.2). Cependant, aucune d'entre elles n'est actuellement unanimement retenue par les experts du domaine pour décrire ce phénomène malgré l'intérêt d'une formalisation non polysémique. Cette divergence est probablement due à la complexité de ce phénomène et aussi aux différentes perspectives qui peuvent être adoptées lors de leur analyse.

Néanmoins, la définition de ce qui devrait être considéré comme un accident à effet domino ne concerne pas uniquement la communauté scientifique, car ce n'est pas qu'un exercice académique, dès lors que plusieurs normes techniques ainsi que la législation européenne requièrent l'appréciation des effets dominos. Par exemple, comme expliqué dans la section précédente, l'article 9 de la directive européenne 2012/18/UE exige l'identification des établissements qui peuvent être impactés par un scénario domino et exige d'inclure de tels scénarios dans les rapports de sécurité et dans la politique de prévention des accidents majeurs.

En raison de l'inexistence d'une formalisation non-polysémique pour décrire et caractériser le phénomène d'effet domino, la plupart des autorités compétentes des États Membres de l'UE se réfèrent à la définition proposée par l'article 8 de la directive 96/82 / EC (Seveso II).

Le tableau 2.3, présente cette définition ainsi que les définitions alternatives adoptées par certains États Membres et proposées dans la littérature.

Comme indiqué au tableau 2.3, la définition de l'effet domino donnée par la directive Seveso II se restreint aux effets dominos externes, car elle ne considère que les accidents **majeurs** qui se propagent d'un établissement à un autre, et donc omet les effets dominos internes.

Cette définition est inchangée dans l'article 9 de la directive Seveso III. Si la définition donnée par la législation européenne est adoptée, les responsables de sécurité peuvent répondre aux exigences réglementaires (rapports de sécurité, mise en place d'une politique de prévention des risques majeurs, dossier d'autorisation,...) sans pour autant apprécier une partie du risque qui découle de la possibilité d'un effet domino, et en particulier la cascade d'évènements d'une installation à une autre au sein du même établissement Seveso.

Une autre limite évidente de cette définition, est le fait qu'elle concerne uniquement les établissements Seveso. Or, un accident qui survient au sein d'un établissement Seveso peut impacter un établissement voisin qui ne tombe pas sous les obligations de la directive Seveso, et vice-versa. Pour ces raisons, certains États membres de l'UE proposent leurs propres définitions. En France, la définition proposée par Vallée *et al.* (2002) a été adoptée par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie qui est entre autres en charge des questions liées à la sécurité industrielles (*Voir* tableau 2.3). En Belgique, dans les pratiques

Wallonnes, la définition proposée par Delvosalle (1998) est utilisée, alors que le ministère Flamand de l'environnement de la nature, et de l'énergie a choisi la définition proposée par Gorrens *et al.* (2009) (*Voir* tableau 2.3). En Italie il n'y a pas de définition retenue officiellement comme alternative à celle figurant dans la directive Seveso. Bien que, plusieurs documents officiels (guides) et des projets de lois reconnaissent la possibilité des effets dominos, non seulement entre des sites Seveso différents, mais aussi à partir d'une unité à une autre au sein d'un même établissement. Au Royaume Uni, afin de répondre aux exigences de la directive Seveso, une définition légèrement modifiée est rapportée par la législation COMAH (*Control of Major Accident Hazard*) qui représente la transcription en droit Anglais des directives Seveso (*Voir* tableau 2.3). Il est à noter que certains États Membres (par exemple : l'Allemagne, la Grèce,...) ne proposent pas de définition et donc utilisent celle mentionnée dans la directive Seveso III.

L'analyse du tableau 2.3 montre l'absence d'une définition claire et commune de ce qui constitue un accident à effets dominos. Cette divergence a été confirmée lors d'un atelier d'experts (*expert workshop*) récemment organisé à Bologne en Italie (*Expert Workshop on Domino Effect, University of Bologna, 2014*), où différentes interprétations ont été données au concept d'effet domino, ainsi que la proposition d'inclure les séquences accidentelles selon le modèle de Reason (Swiss cheese model) dans la définition des effets dominos.

À ce stade, il semble intéressant de remonter aux travaux qui ont mis en lumière la nature séquentielle des événements menant à un accident. Celle-ci a été soulignée pour la première fois par Heinrich (1941) dans le cadre de la modélisation des accidents, en introduisant la « théorie des dominos », où l'auteur décrit l'accident comme une chaîne d'événements indépendants qui se produisent suivant un ordre particulier, entraînant des préjudices. Cependant, Il ne faut pas confondre la théorie des dominos, avec le phénomène d'effet domino, qui fait l'objet de cette étude. En effet, la théorie des dominos ne rejoint pas le sens d'effet domino comme il a été défini au tableau 2.3, puisqu'elle ne désigne pas la propagation d'un accident survenu dans une unité à d'autres unités voisines. La théorie d'Heinrich décrit et explique les séquences d'événements qui conduisent à un accident de travail.

Tableau 2.3 Définitions de l'effet domino

Auteur(s)	Définitions
Directive Européenne 96/82/CE (1996) dite Seveso II	Établissements ou des groupes d'établissements où la probabilité et la possibilité ou les conséquences d'un accident majeur peuvent être accrues, en raison de la localisation et de la proximité de ces établissements et de leurs inventaires de substances dangereuses.
Delvosalle (1998), Wallonie (Belgique)	Cascade d'événements dans laquelle les conséquences d'un accident primaire sont accrues à la fois spatialement et temporellement par les suivants, conduisant à un accident majeur.
Vallée <i>et al.</i> (2002) France	Action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement, qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène.
<i>Health and Safety Executive</i> (HSE), législation COMAH (2006), Royaume-Uni	Dans certaines circonstances, un accident majeur dans un établissement COMAH pourrait être déclenché par un incident dans un autre établissement COMAH (effet domino). L'événement initiateur n'est pas forcément un accident majeur mais doit être dans un établissement COMAH, (établissement Seveso seuil haut ou seuil bas), et doit impliquer une substance dangereuse définie.
Cozzani <i>et al.</i> (2006a) Italie	Séquences accidentelles ayant au moins trois caractéristiques communes : (i) un événement primaire initiateur. (ii) l'événement primaire se propage à cause d'un vecteur d'escalade (flux physique), qui entraîne des préjudices pour une ou plusieurs cibles secondaires. (iii) un ou plusieurs scénarios secondaires d'accidents, impliquant des unités similaires ou différentes se déroulent éventuellement sur le même schéma.
Gorrens <i>et al.</i> (2009) Flandre (Belgique).	Accident majeur dans une installation dite secondaire qui est causée par la défaillance de ce qu'on appelle une source de dangers externes.
Reniers et Cozzani (2013)	Accident où un événement indésirable initiateur se propage au sein d'un équipement (temporellement) et/ou aux équipements voisins (spatialement), séquentiellement ou simultanément, déclenchant ainsi un ou plusieurs événements indésirables secondaires, qui à leur tour peuvent provoquer d'autres événements indésirables (tertiaires et/ou plus), entraînant ainsi des conséquences globales plus graves que ceux de l'événement initial.

Dans le but d'uniformiser la définition de l'effet domino, en vue de progresser vers une formalisation non-polysémique et de converger ainsi vers un large consensus au moins au sein de la communauté scientifique, Reniers et Cozzani (2013) ont proposé une définition de l'effet domino. Celle-ci est présentée au tableau 2.3. Elle englobe tous les aspects spécifiques trouvés

dans la plupart des définitions d'effet domino, y compris les quatre catégories proposées par Reniers (2010), (*Voir* tableau 1.3) et aussi le concept d'effet domino local proposé par Abdolhamidzadeh *et al.* (2011), pour désigner plusieurs accidents distincts, séparés par un intervalle de temps, d'une minute ou plus, au sein d'une même unité.

Ainsi, en se référant à la définition suggérée par Reniers et Cozzani (2013), les deux caractéristiques clés de l'effet domino, sont la propagation de l'accident initiateur et l'aggravation de ses conséquences.

Par conséquent, lors de l'appréciation des accidents à effet domino, trois éléments doivent être évalués :

- L'accident primaire, c'est-à-dire le phénomène dangereux en question et les effets physiques qu'il génère : surpression, thermique, *etc.*
- Les cibles plausibles (ce sont les équipements qui peuvent être endommagés par l'accident primaire et dans le cas où ils sont endommagés, peuvent engendrer des effets physiques intenses et aggraver ainsi les conséquences de l'accident primaire).
- Les éventuels accidents secondaires importants, qui peuvent être engendrés suite à la propagation de l'accident primaire (ce sont les accidents secondaires provoqués par l'endommagement des équipements cibles, causant ainsi le rejet de substances dangereuses, ce qui produit des phénomènes dangereux capables d'aggraver les conséquences de l'accident primaire).

Il ressort clairement de ce qui précède que d'une part, les distances d'effets (distances où des effets sur les structures peuvent être envisagés « distances d'endommagement ») sont cruciales pour l'évaluation du potentiel des accidents primaires (phénomènes dangereux) à engendrer un effet domino. D'autre part, l'endommagement à lui seul n'est pas un élément qui caractérise l'effet domino : afin de provoquer une escalade (aggravation), le phénomène dangereux secondaire qui résulte du scénario accidentel secondaire doit avoir le potentiel de causer d'autres dommages (pertes humaines ou matérielles) en plus de ceux causés par l'accident primaire. Lors de l'analyse préliminaire des effets dominos, il est donc nécessaire de savoir quels sont les accidents primaires qui ont la propension de provoquer une escalade et quelles

sont les distances de sécurité qui permettent d'éviter de tels scénarios. D'où la nécessité de définir des critères de dommages et des seuils pour les effets dominos.

2.4 Seuils d'endommagement et seuils d'escalade (aggravation)

Lors de l'analyse des effets dominos, l'utilisation des valeurs seuils d'endommagement et d'aggravation est indispensable, pour identifier, parmi les installations ou équipements considérés critiques, les cibles potentielles d'un scénario initiateur d'effets dominos.

La modélisation des scénarios d'accidents à travers des modèles de calcul de conséquences, fournit des résultats qui peuvent être facilement comparés aux valeurs seuils retenues afin de déterminer les distances au-delà desquelles l'effet domino n'est plus considéré crédible (Cozzani *et al.*, 2007).

Une telle procédure bien que simple et claire, simplifie le problème, en réduisant l'analyse de l'effet domino à un problème monodimensionnel. Cependant, en raison de sa simplicité, celle-ci permet une évaluation préliminaire rapide.

En revanche, comme mentionné auparavant, le sujet est assez controversé, l'existence de nombreuses incertitudes sur les valeurs seuils d'escalade rend cette procédure délicate et quelquefois peu pertinente. En réalité les valeurs proposées varient et s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur (Cozzani *et al.*, 2004, 2006a). Cela est dû au nombre de facteurs influençant la possibilité de propagation de l'accident primaire (par exemple : la durée du scénario qui peut influencer la possibilité d'escalade).

De plus, l'endommagement de l'équipement cible n'est pas suffisant pour provoquer un effet domino, pour qu'il ait un accident à effet domino, il faut qu'il y'ait une escalade : les conséquences globales du scénario domino doivent être plus graves que ceux de l'accident primaire. Ainsi, un feu de nappe mineur généré suite à une explosion dévastatrice ne doit pas être considéré comme une escalade pertinente, car les conséquences de l'explosion primaire sont de loin plus importantes. Si cela n'est pas pris en compte, la plupart des accidents industriels majeurs peuvent alors être considérés comme des accidents à effets dominos.

Le tableau 2.4 montre les accidents primaires qui sont les plus susceptibles de déclencher des effets d'escalade (Reniers et Cozzani 2013).

Tableau 2.4 Effet domino direct : vecteurs d'escalade générés par différents accidents primaires. BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion; VCE: Vapor Cloud Explosion.

Accident primaire	Vecteur d'escalade
Feu de nappe	Rayonnement thermique, impact direct des flammes
Jet enflammé	Rayonnement thermique, impact direct des flammes
Boule de feu	Rayonnement thermique, impact direct des flammes
Nuage de feu	Impact direct des flammes
Explosion pneumatique	Projection de fragments, surpression
Explosion confinée	Projection de fragments, surpression
BLEVE	Projection de fragments, surpression
VCE	Surpression, impact direct des flammes
Dispersion de toxique	–

Les définitions, les détails de la modélisation et de la physique des phénomènes dangereux énumérés dans le tableau 2.4 sont largement décrits dans la littérature (Lees, 1996 ; Yellow Book, 2005 ; CCPS, 2010). Comme le montre le tableau, trois vecteurs principaux d'escalade ont été identifiés : rayonnement thermique ou impact direct des flammes, surpression et projection de fragments. La dispersion de substances toxiques a été exclue de la présente analyse, car cet effet physique n'engendre pas directement une perte de confinement ou l'endommagement d'un équipement secondaire.

Les valeurs seuils peuvent être effectivement utilisées pour décrire l'intensité minimale des effets physiques générés par les accidents primaires, capables de déclencher l'escalade. Cependant, dans la littérature (Voir figure 2.1 et 2.2 ; tableau 2.5) des valeurs différentes et parfois incohérentes sont proposées pour les seuils d'endommagements des équipements, causés par la surpression ou les effets thermiques.

Cette grande incertitude dans les valeurs seuils résulte de la complexité du phénomène d'escalade. Parmi les facteurs qui peuvent être à l'origine de ces incohérences apparentes, deux semblent prépondérants dans le cas des effets de surpression : (i) l'absence d'indications sur les caractéristiques spécifiques des équipements cibles ; (ii) l'ambiguïté dans la définition des dommages et/ou des pertes. Concernant les effets thermiques, d'autres facteurs en plus de ceux mentionnés ci-avant, peuvent considérablement influencer la possibilité d'escalade et peuvent

donc être à l'origine de ces incohérences, car ils sont rarement pris en compte : (iii) le mécanisme de propagation de l'accident primaire (type du vecteur d'escalade : rayonnement thermique ou impact direct des flammes) ; (iv) la durée du scénario feu (durée d'exposition).

Tableau 2.5 Estimation des dommages causés par les effets thermiques/surpression, proposée par *the international Oil and Gas Producers association* (OGP).

Vecteur d'escalade	Seuil	Équipement cible	Dégâts constatés
Thermique (kW/m ²)	12,5	Non spécifié	L'acier fin non protégé peut atteindre une contrainte thermique suffisamment élevée pour provoquer une défaillance structurelle
	25	Non spécifié	L'acier non protégé atteint des températures de contrainte thermique qui peuvent causer la défaillance.
	35	Non spécifié	Les matières cellulosiques s'enflamment après une minute d'exposition
Surpression (mbar)	207	Conique / réservoir à toit flottant	Inclinaison et soulèvement de l'équipement
	207	Réservoirs de stockage de pétrole	Rupture
	241-483	Réacteur de craquage	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
	276	Réacteur chimique	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
	379	Colonne de fractionnement	Fissuration de la structure
	414	Réservoir horizontal sous pression	Déformation de la structure & déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
	448	Colonne d'extraction	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
	517	Échangeur de chaleur	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
	552-965	Réservoir sphérique	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations
827	Réservoir vertical sous pression	Déplacement de l'équipement et rupture des canalisations	

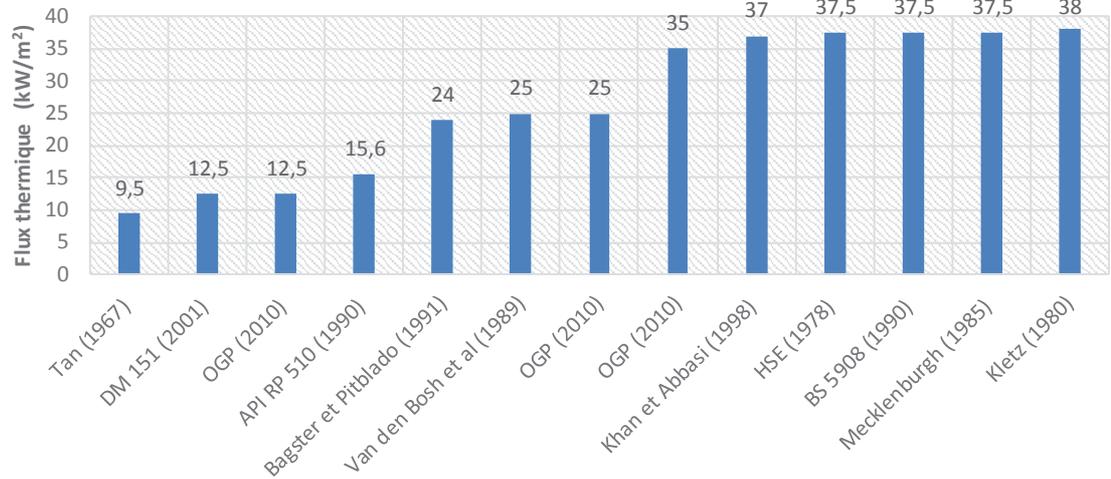


Figure 2.1 Seuils pour les effets dominos causés par les effets thermiques, proposés par différents auteurs

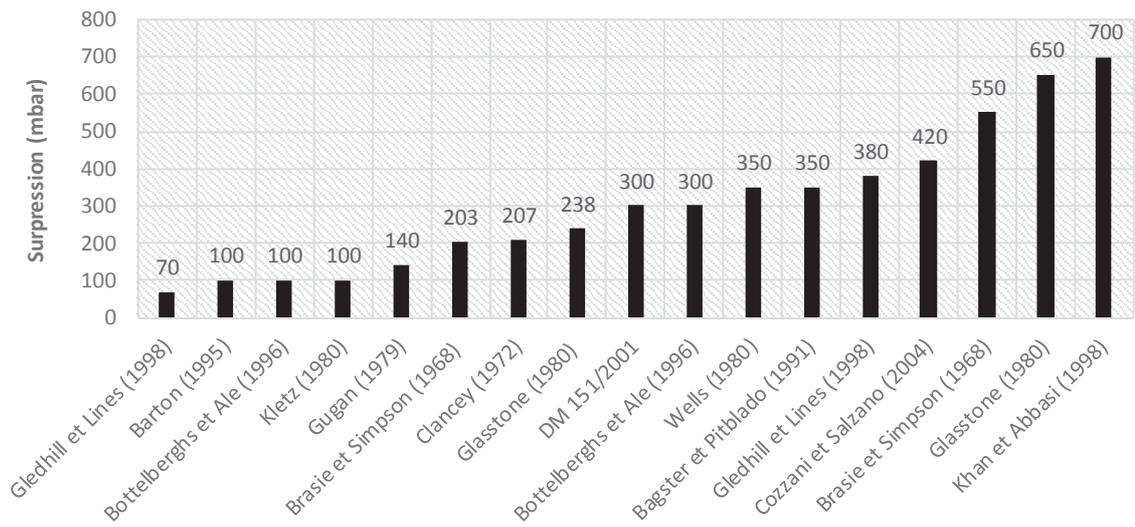


Figure 2.2 Seuils pour les effets dominos causés par la surpression, proposés par différents auteurs

Les seuils préconisés par *the international Oil and Gas Producers association* (OGP) (Voir tableau 2.5) (OGP, rapport N° 434 -14.1 et rapport N° 434 -15) sont recommandés comme un point de départ (conservateur) pour l'évaluation des dommages dus à des explosions et des incendies. OGP souligne le fait que les valeurs proposées sont uniquement indicatives et que la vulnérabilité des structures doit être déterminée sur la base d'une évaluation de la criticité

de la structure, suivie d'une approche de modélisation proportionnelle (c'est-à-dire sur la base de la criticité et la complexité).

Pour aborder ce problème, un cadre conceptuel basé sur la description des dommages subis par les équipements cibles, avec un nombre discret de niveaux d'endommagement et d'intensités des LOC a été proposé par Cozzani et Salzano (2004) (*Voir* chapitre 3, section 3.3.1.6).

L'analyse effectuée a mis en évidence le fait que si les dommages sévères conduisent toujours à de graves LOC, et par conséquent à de graves accidents, les dommages mineurs peuvent eux aussi provoquer des conséquences secondaires graves, dans certaines conditions de stockage ou de traitement en plus du danger lié aux substances. Par exemple, le cas d'une substance toxique et volatile contenue dans un équipement sous pression, celle-ci peut causer de graves conséquences dues à la dispersion de substances toxiques même dans le cas de diamètres de fuite relativement modérés (Ex. : défaillance des raccords).

C'est pourquoi, lors de l'analyse du danger de cascade, des seuils d'escalade spécifiques doivent être utilisés, au lieu des seuils d'endommagement généraux des structures.

Le tableau 2.6 rapporte des valeurs seuils d'endommagement et d'escalade (aggravation) obtenues pour plusieurs phénomènes dangereux. Les seuils présentés dans le tableau ont été obtenus suite à une analyse des données de la littérature et à partir de modèles structurels simplifiés, validés sur la base d'un grand nombre d'études de cas représentatifs. Une analyse de sensibilité de tous les facteurs qui influent sur la possibilité d'escalade a également été réalisée, afin d'évaluer les valeurs critiques pour différents paramètres (Cozzani *et al.*, 2006a). Il est également intéressant de remarquer que les seuils ne sont utiles que pour évaluer la possibilité d'effet domino. Lorsqu'il s'agit d'estimer sa probabilité, par exemple dans le cadre d'une analyse quantitative du risque, des outils et des modèles spécifiques sont nécessaires (*Voir* chapitre 1, section 1.4.3 et chapitre 3, section 3.3.1.6).

Tableau 2.6 Seuils d'endommagement, seuils d'escalade et distances de sécurité pour l'escalade (adapté de Cozzani *et al.*, 2006a)

Scenario	Vecteur d'escalade	Modalité	Catégorie de cibles	Seuil d'endommagement	Seuil d'escalade	Distance de sécurité
Feu de nuage	Thermique	Impact direct des flammes	Réservoirs à toit flottant	Domage: improbable	Enveloppe des flammes	distance max. flamme
			Tous autres équipements	Domage: improbable	Escalade improbable	–
Boule de feu	Thermique	Englouti	Atmosphérique	$I > 100 \text{ kW/m}^2$	$I > 100 \text{ kW/m}^2$	distance max. des flammes
			Sous pression	Domage: improbable	Escalade improbable	–
		Rayonnement	Atmosphérique	$I > 100 \text{ kW/m}^2$	$I > 100 \text{ kW/m}^2$	distance max. des flammes
			Sous pression	Domage: improbable	Escalade improbable	–
Jet enflammé	Thermique	Impact direct des flammes	Tous	Enveloppe des flammes	Enveloppe des flammes	–
			Rayonnement	$I > 15 \text{ kW/m}^2$	$I > 15 \text{ kW/m}^2$	50 m de l'enveloppe des flammes
Feu de nappe	Thermique	Englouti	Sous pression	$I > 45 \text{ kW/m}^2$	$I > 45 \text{ kW/m}^2$	25 m de l'enveloppe des flammes
			Rayonnement	Enveloppe des flammes	Enveloppe des flammes	–
VCE	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Atmosphérique	$I > 15 \text{ kW/m}^2$	$I > 15 \text{ kW/m}^2$	50 m du bord de la nappe
			Sous pression	$I > 45 \text{ kW/m}^2$	$I > 45 \text{ kW/m}^2$	20 m du bord de la nappe
			Atmosphérique	$P > 7 \text{ kPa}$	$P > 22 \text{ kPa}$	$R = 1,75 \text{ (ME); } 1,50 \text{ (BS)}$
			Sous pression	$P > 20 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,10 \text{ (ME); } 1,80 \text{ (BS)}$
			Allongé (toxique)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,10 \text{ (ME); } 1,80 \text{ (BS)}$
			Allongé (inflammable)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 31 \text{ kPa}$	$R = 1,35 \text{ (ME); } 0,85 \text{ (BS)}$
Explosion confinée	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Voir feu de nuage	Voir feu de nuage	Voir feu de nuage	
			Atmosphérique	$P > 7 \text{ kPa}$	$P > 22 \text{ kPa}$	20 m de l'évent
Explosion physique	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Sous pression	$P > 20 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	20 m de l'évent
			Allongé (toxique)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	20 m de l'évent
			Allongé (inflammable)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 31 \text{ kPa}$	20 m de l'évent
			Atmosphérique	$P > 7 \text{ kPa}$	$P > 22 \text{ kPa}$	$R = 1,80$
			Sous pression	$P > 20 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
			Allongé (toxique)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
BLEVE	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Allongé (inflammable)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 31 \text{ kPa}$	$R = 1,20$
			Tous	Impact de fragment	Impact de fragment	300 m (prob. $< 5 \times 10^{-2}$)
Projection de missile	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Atmosphérique	$P > 7 \text{ kPa}$	$P > 22 \text{ kPa}$	$R = 1,80$
			Sous pression	$P > 20 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
			Allongé (toxique)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
			Allongé (inflammable)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 31 \text{ kPa}$	$R = 1,20$
Projection de missile	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Tous	Impact de fragment	Impact de fragment	300 m (prob. $< 5 \times 10^{-2}$)
			Atmosphérique	$P > 7 \text{ kPa}$	$P > 22 \text{ kPa}$	$R = 1,80$
Projection de missile	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Sous pression	$P > 20 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
			Allongé (toxique)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 20 \text{ kPa}$	$R = 2,00$
Projection de missile	Surpression	Interaction de l'onde de choc	Allongé (inflammable)	$P > 14 \text{ kPa}$	$P > 31 \text{ kPa}$	$R = 1,20$
			Tous	Impact de fragment	Impact de fragment	300 m (prob. $< 5 \times 10^{-2}$)

I, intensité du flux thermique ; P, pic statique maximale de surpression ; R, énergie d'explosion en fonction de la distance adimensionnée ; ME, méthode multi-énergie ; BS, méthode de Baker-Strehlow. Enveloppe des flammes, volume occupé par les flammes.

2.5 L'escalade, extension des dommages : distance de sécurité

L'intensité de chaque vecteur d'escalade dépend de la quantité totale d'énergie (ou de substance) libérée à partir de l'équipement source primaire (réacteur, réservoir de stockage, *etc.*).

La distance maximale à partir de l'équipement source primaire à laquelle les effets d'escalade peuvent encore être considérés possibles est appelée « distance de sécurité ».

La distance de sécurité relative à l'escalade peut donc être considérée comme la distance de séparation minimale entre les installations (ou inter-équipement) requise pour éviter le phénomène d'escalade.

Si les valeurs seuils d'escalade sont disponibles, les distances de sécurité peuvent être facilement calculées en appliquant les modèles classiques de calcul de conséquences, disponibles dans la littérature (CCPS, 1994 ; Yellow Book, 1997 ; Purple Book, 1999).

En ce sens, Cozzani *et al.* ont proposé des abaques simplifiées pour l'évaluation rapide des distances de sécurité (Cozzani *et al.*, 2007 ; 2009).

Les distances de sécurité ne dépendent pas uniquement de la nature du vecteur d'escalade, mais aussi du scénario d'accident primaire (phénomène dangereux en question) ainsi que des caractéristiques de l'équipement cible.

Dans le cas du phénomène dangereux feu de nuage, l'expansion maximale de l'enveloppe des flammes (volume occupé par les flammes) est la distance de sécurité pour d'éventuelles sources de vapeurs inflammables, par exemple les réservoirs à toit flottant, tandis que les autres types d'équipement ne sont généralement pas affectés par ce phénomène dangereux.

Pour ce qui est du scénario boule de feu, une distance de sécurité liée au rayon de la boule de feu doit être considérée uniquement pour les équipements atmosphériques. En effet, des résultats récents (Cozzani *et al.*, 2006a) ont confirmé que la possibilité d'escalade peut être exclue pour les équipements sous pression même dans le cas d'absence de mesures de prévention passives.

Concernant les jets enflammés, la distance de sécurité dépend de la longueur maximale de la flamme et de sa direction. L'étude menée par Cozzani *et al.* (2006a) suggère que le temps

jusqu'à défaillance (ttf) pour les équipements atmosphériques est toujours supérieur à 15 min pour les cibles qui se trouvent à moins de 50 m de l'enveloppe des flammes.

Pour les équipements sous pression, la valeur minimale suggérée pour le temps jusqu'à défaillance est d'environ 13 min. Cependant, du fait que les équipements sous pression sont en général équipés de moyens de protection contre les incendies à la fois passifs (isolation thermique) et actifs (couronnes d'arrosage), qui peuvent élever la valeur du temps jusqu'à défaillance à des valeurs sûres. Par exemple, assez élevées pour permettre l'intervention des brigades de pompiers. L'escalade impliquant des équipements sous pression ignifugés, suite à un jet enflammé, est peu plausible dans le cas où la cible se trouve en dehors du volume occupé par les flammes (le transfert thermique se fait majoritairement par rayonnement).

De plus, même dans le cas des équipements non protégés, l'escalade n'est absolument pas plausible pour des distances supérieures à 25 m à partir de l'enveloppe des flammes dans la direction du jet.

La même analyse appliquée aux feux de nappe ressort que l'escalade peut être considérée crédible pour des équipements cibles atmosphériques, pour des distances inférieures à 50 m par rapport au bord de la nappe, avec un temps d'exposition de référence de 15 min. Dans le cas des équipements cibles de type sous pression une distance de sécurité conservatrice de 20 m peut être considérée, bien que, cette valeur peut être d'avantage réduite si l'en tient compte des effets de l'isolation thermique.

En ce qui concerne les phénomènes dangereux impliquant la suppression en tant que vecteur d'escalade, la distance de sécurité dépend principalement de la quantité d'énergie libérée ainsi que le type du scénario. La distance de sécurité est liée à la distance à laquelle le pic de surpression de l'onde de choc est égal à la valeur seuil d'endommagement causé par la surpression (l'interaction des structures avec l'onde de choc).

Dans le cas des VCEs, la distance de sécurité peut être calculée en suivant l'approche standard utilisée dans la méthode QRA (CCPS, 1994 ; Yellow Book, 1997 ; Purple Book, 1999), qui consiste à calculer l'énergie de l'explosion pour ensuite évaluer son indice de « violence » en fonction de l'encombrement de la zone et de la réactivité du gaz. C'est-à-dire, le « facteur de

violence F » pour la méthode multi-énergie (Van den Berg, 1985) ou « le nombre de Mach » dans la méthode de Baker-Sthrelow (Tang and Baker, 1999).

L'éclatement de capacité dû à l'explosion interne de gaz, de vapeurs ou de poussières, et en général destructif y compris pour les enceintes hautement résistantes. C'est pourquoi, les événements sont souvent utilisés pour atténuer les conséquences. Il ressort de l'analyse des distances de sécurité que l'endommagement dû aux effets de surpression n'est pas possible pour les cibles situées à plus de 20 m de l'événement.

Les missiles sont un vecteur d'escalade généré dans le cas des explosions physiques et BLEVE. L'escalade est causée par l'impact du missile sur la capacité cible, provoquant ainsi une perte de confinement. Pour ce faire, deux conditions doivent être réunies : (i) la distance inter-équipement (source-cible) doit être inférieure à la distance maximale à laquelle le missile peut être projeté et (ii) l'impact doit être suivi d'une perte de confinement sur la capacité cible.

La deuxième condition est généralement supposée vérifiée lors de l'analyse des dommages causés par les effets missiles à travers les approches conservatrices (Gubinelli *et al.*, 2004 ; Mannan, 2005).

La distance de projection dépend principalement de la vitesse initiale du fragment, de sa direction et du coefficient de traînée. Pour la majorité des explosions physiques la distance maximale de projection de fragments calculée est généralement supérieure à 1000 m. Quand bien même cette valeur théorique puisse être considérée surestimée (conservatrice), des projections allant jusqu'à 900 m ont été observées dans des accidents passés impliquant des réservoirs de stockage (Westin, 1971 ; Holden *et al.*, 1993).

Du fait que ces distances soient bien au-delà des distances inter-installation standards (normales) d'un site, la définition d'un seuil d'escalade basé uniquement sur les distances de projection considérées crédibles est impossible (car **inapplicable**). D'où la nécessité de considérer la probabilité de l'impact, qui décroît rapidement avec la distance de projection. En effet, l'étude menée par Gubinelli *et al.* (2004, 2009) montre que la probabilité de l'impact d'un fragment suite à une explosion physique est d'environ 3×10^{-1} à 100 m et de 5×10^{-2} à 300 m. Dans le cas d'un BLEVE, les valeurs conservatrices des probabilités d'impact sont : $2,5 \times 10^{-1}$ à 100 m et de $2,5 \times 10^{-2}$ à 300 m.

Après la définition de critères d'acceptabilité, ces résultats peuvent être utilisés pour évaluer les zones qui peuvent être affectées. Il est clair que de telles distances ne prennent pas en considération le rôle des mesures de prévention des risques.

2.6 Analyse des effets dominos

Comme expliqué auparavant (section 2.2) la législation en vigueur et les normes techniques sont influencés par la complexité des scénarios dominos, d'où l'absence d'une approche commune pour leur analyse. Toutefois, l'approche fréquemment retenue dans les législations des différents pays européens et les normes est basée sur les valeurs seuils.

Bien que l'application de la directive Seveso dans les États membres de l'UE doit être basée sur des méthodes et outils pour l'identification des sites susceptibles de provoquer des effets dominos, aucune procédure unanimement retenue pour la réalisation de cette tâche est disponible.

Cela est en quelque sorte le résultat de l'absence d'une approche harmonisée pour l'appréciation des risques d'accident majeurs dans les pays européens, où des approches qualitatives, semi-quantitatives ou encore quantitatives sont adoptées selon les États membres.

En 2012, le *Joint Research Centre* (JRC) de la commission européenne en collaboration avec la direction Norvégienne de la protection civile ont publié un rapport concernant la prise en compte des effets dominos en Europe (Larsen *et al.*, 2012). Le rapport affirme que l'identification des établissements dominos, n'est pas réalisée dans tous les pays³, 14 pays seulement ont répondu avoir effectué une telle démarche. De plus, la grande majorité des États Membres de l'UE ne disposent pas d'outils spécifiques (guides, checklists, modèles, logiciels) dédiés à l'analyse des effets dominos. L'identification des éventuels effets dominos est soit réalisée dans le cadre des rapports de sécurité, ou comme une procédure indépendante où les services d'inspection ne sont pas impliqués.

³ L'étude a été menée sur les pays Seveso qui sont considérés (en 2012) inclure les 27 États membres de l'UE, la Norvège et l'Islande comme pays de l'espace économique européen, et la Croatie, pays candidat à l'UE.

Par ailleurs, dans la plupart des pays, lors de l'inspection du voisinage des établissements Seveso, les établissements non-Seveso ne sont pas pris en compte comme étant des cibles potentielles d'une escalade conduisant à un effet domino. Par conséquent, il n'y a pas de guides, notes d'orientation ou recommandations européennes harmonisées pour l'évaluation des effets dominos.

Dans le but de recueillir les informations actualisées concernant le sujet, une étude a été réalisée dans dix États membres de l'UE. L'étude a été axée sur :

- les définitions de l'effet domino adoptées dans les différents EM : Belgique (région Flamande et Wallonne), France, Grèce, Italie, Pologne, Espagne (région Catalogne), Pays-Bas, Allemagne, Royaume-Uni, et le Danemark.
- les outils (logiciels, guides) et méthodes utilisés pour l'analyse des effets dominos.
- les valeurs seuils et distances de sécurité utilisées, ainsi que les différentes réglementations qui régissent ces dernières.

Pour ce faire, une enquête a été adressée à des experts en sécurité industrielle, ou à des membres des autorités compétentes en charge de l'implémentation des directives Seveso.

Les résultats de l'enquête menée dans le cadre de cette étude montrent que chaque État membre possède ses propres règles et méthodes pour traiter les effets dominos, même si elles sont toutes basées sur des valeurs seuils prédéfinies ou des distances de sécurité.

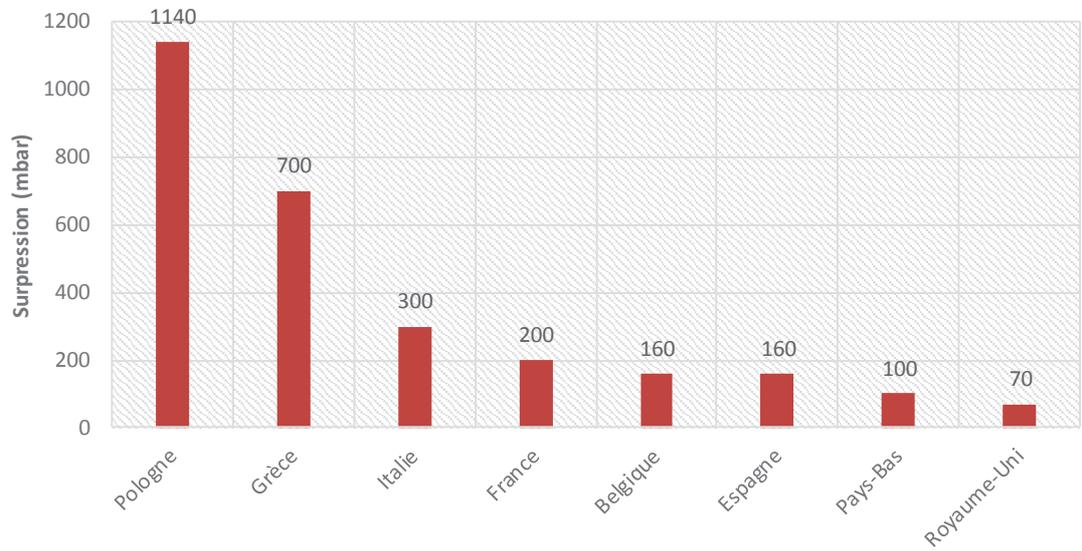
Les réponses et conclusions concernant les définitions de l'effet domino ont été présentées à la section 2.3. Il est à noter que les experts Danois contactés n'ont pas répondu à l'enquête pour des raisons de divergences concernant la définition de l'effet domino.

Le tableau 2.7 rapporte les valeurs seuils utilisées pour l'évaluation des effets dominos dans huit États membres, ces pays sont : Belgique (région Flamande et Wallonne), France, Grèce, Italie, Pologne, Espagne (région Catalogne), Pays-Bas et le Royaume-Uni.

Les législations liées aux valeurs seuils, les méthodes et outils d'analyse utilisés ainsi que d'autres détails fournis par les experts contactés sont donnés à l'Annexe I.

Comme le montre la figure 2.3 les valeurs proposées varient et s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur.

a



b

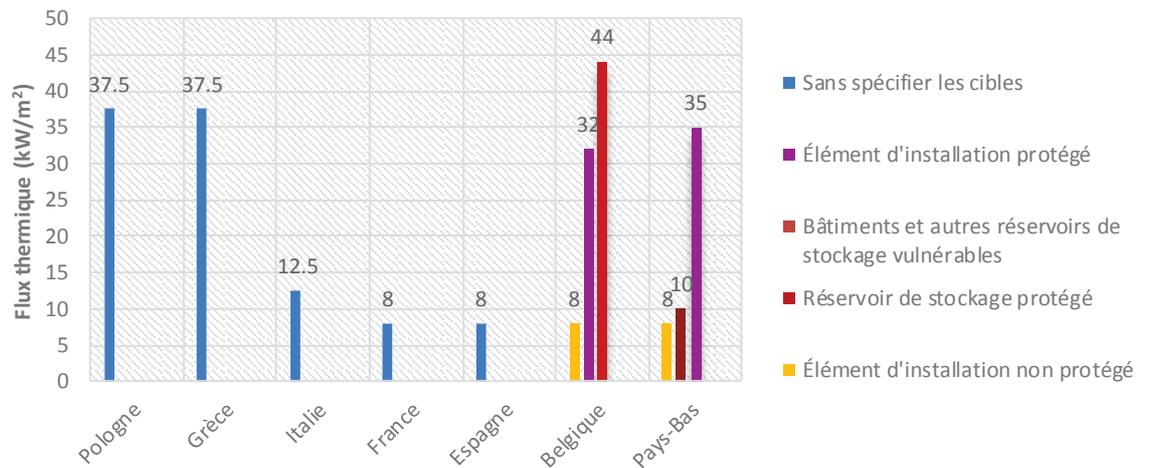


Figure 2.3 (a) Seuils de surpression pour les effets dominos dans différents EM de l'UE sans spécification des cibles. (b) Seuils thermiques pour les effets dominos dans différents EM de l'UE.

Tableau 2.7 Récapitulatif des valeurs seuils pour les effets dominos utilisées dans huit États Membres de l'UE.

État membre	Valeurs seuils			Effets mécaniques
	Effets de surpression	Effets thermiques		
La région Flamande, Belgique	Seuil 1 : 100 mbar (effondrement total d'entrepôts) Seuil 2 : 160 mbar (endommagement des installations sous pression) Seuil 3 : 450 mbar (effondrement total des installations sous pression)	Seuil 1 : 8 kW/m ² (éléments d'installation non protégés) Seuil 2 : 32 kW/m ² (éléments d'installation protégés) Seuil 3 : 44 kW/m ² (stockage sous pression protégé)		Seuil 1 : rupture des ailes d'éoliennes Seuil 2 : hauteur des installations dangereuses externes (éoliennes, lignes électriques) Optionnel : effets missiles avec seuil 3 : 80% des fragments
La région Wallonne, Belgique	Seuil 1 : 160 mbar	Seuil 1 : 8 kW/m ² (éléments d'installation non protégés) Seuil 2 : 32 kW/m ² (stockage atmosphérique protégé) Seuil 3 : 44 kW/m ² (stockage sous pression protégé)		Seuil 1 : Aucune valeur de référence
France	Seuil 1 : 200 mbar (une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernées)	Seuil 1 : 8 kW/m ² (dégâts graves sur les structures, une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernées)		Pas de seuil : au cas par cas (seulement pour les équipements voisins au sein d'un même établissement)
Grèce	Seuil 1 : 700 mbar (pour les UVCE)	Seuil 1 : 37,5 kW/m ² (pour les feux de nappe), rayon de la boule de feu (pour BLEVE), longueur de la flamme pour les jets enflammés)		Aucune valeur de référence
Italie	Seuil 1 : 300 mbar	Seuil 1 : 12,5 kW/m ² (rayonnement stationnaire) Seuil 2 : 200 – 800 m (boule de feu)		Seuil 1 : 200 – 800 m
Pologne	Seuil 1 : 1140 mbar (effondrement partiel de la structure) Seuil 2 : 1300 mbar (dommages sévères)	Seuil 1 : 37,5 kW/m ²		Pas de seuil : au cas par cas, sur la base de calculs spécifiques
La région Catalogne, Espagne	Seuil 1 : 160 mbar	Seuil 1 : 8 kW/m ²		Seuil 1 : portée maximale des missiles
Pay s-Bas	Seuil 1 : 100 mbar (bâtiments de stockage) Seuil 2 : 200 mbar (réservoir de stockage atmosphérique) Seuil 3 : 300 mbar (réservoir atmosphérique à double paroi, effondrement total des habitations) Seuil 4 : 450 mbar (réservoir de stockage sous pression)	Seuil 1 : 8 kW/m ² (éléments d'installation non protégés) Seuil 2 : 10 kW/m ² (bâtiments et autres réservoirs de stockage vulnérables) Seuil 3 : 35 – 37,5 kW/m ² (éléments d'installation protégé)		Seuil 1 : 0,5 % (probabilité d'impact par un fragment)
Royaume-Uni, Grande-Bretagne (Angleterre, Écosse, pays de Galles) ^a	Seuil 1 : 70 mbar (destructions de vitres considérés comme seuil des effets létaux pour une population vulnérable)	Seuil 1 : 500 dose thermique [(kW/m ²) ⁴³ .s] (pour les feux de nappe, boules de feu et les jets enflammés) Seuil 2 : 1/2 LII (pour les feux de nuage) Seuil 3 : risque individuel de 0,3×10 ⁻⁶ (probabilité de décès pour un individu qui se trouve au sein de l'enveloppe du nuage de feu défini par LII)		Seuil 1 : distance maximale atteinte par un missile (rarement considérée)

^a contrairement aux autres EM, au Royaume-Uni les seuils rapportés sont établis pour l'évaluation des effets sur l'homme (utilisées pour l'identification des groupes dominos sur la base de la vulnérabilité humaine, les détails sont donnés dans la section 2.6.1)

Dans l'ensemble les états membres ont fourni des valeurs seuils qui se réfèrent uniquement au type de l'effet physique (*Voir* tableau 2.7), à l'exception de la Belgique et des Pays-Bas, qui font une distinction entre les équipements cibles selon leurs natures, et où les mesures de protection sont prises en compte (figure 2.3).

Les approches suivies dans les différents États membres pour l'analyse des effets dominos, plus exactement pour l'identification des établissements dominos, dans la plupart des cas, afin de répondre aux exigences réglementaires, sont brièvement décrites dans les paragraphes qui suivent.

2.6.1 Royaume-Uni

Les directives Seveso sont transcrites au Royaume-Uni par les législations COMAH. L'autorité compétente, le *Health and safety Executive* (HSE) identifie les groupes dominos, en utilisant des contours établis (calculés) au départ pour la maîtrise de l'urbanisation, ces derniers sont appelés « *consultation distances* ». Lorsque ce contour atteint les frontières des autres établissements, il est utilisé comme base pour regrouper les établissements.

L'identification des groupes dominos a pour objectif principal de permettre aux exploitants de considérer l'implication d'éventuels effets dominos qui peuvent les impacter ou impacter leurs voisins, lors de la réalisation des rapports de sécurité et la définition d'une politique de prévention des accidents majeurs.

Cette première évaluation permet aux exploitants d'envisager ou non, une analyse approfondie des effets dominos pour identifier les sources et cibles potentielles d'escalade qui mènent à des scénarios dominos.

Le tableau 2.8 résume les étapes de la procédure appliquée pour la définition des groupes dominos et leurs interactions. La limite de cette méthode réside dans le fait que les *consultation distances* ont été conçues pour protéger la population et non pas pour la prévention de l'extension des dommages (escalade), et par conséquent ils ne permettent pas de prendre en compte les effets d'escalade.

Tableau 2.8 Procédure appliquée pour l'identification des groupes dominos au Royaume-Uni

Etapas	Description
1	Une <i>consultation distance</i> est définie pour chaque établissement (<i>Voir</i> remarque 1).
2	Les établissements en attente d'une <i>consultation distance</i> se voient affecter une distance de 500 m s'ils présentent des risques d'explosion ou d'incendie, sinon une distance de 1000 m (<i>Voir</i> remarque 2) est affectée pour les sites qui présentent le risque de dispersion toxique. Les distances sont mesurées à partir des frontières de de l'établissement (<i>Voir</i> remarque 3).
3	Chaque établissement qui a un autre établissement partiellement ou totalement au sein de sa <i>consultation distance</i> est identifié, ensuite, parmi ces établissements, ceux qui rentrent dans le cadre de la consultation distance sont identifiés. L'autorité compétente contact les exploitants de ces établissements (<i>Voir</i> remarque 4).
4	Lorsque l'autorité de l'aménagement du territoire transmet à l'autorité compétente des informations sur l'évolution des quantités maximales admissibles de substances dangereuses, celles-ci sont prises en compte et peuvent affecter la <i>consultation distance</i> .
5	Toute modification apportée aux <i>consultation distances</i> entraîne un examen de l'impact qu'elle peut avoir sur les groupes dominos.
6	Lorsque les groupes dominos sont affectés (impactés) l'étape 3 est répétée.

Remarque 1 : la *consultation distance* est définie sur la base des quantités maximales autorisées de produits chimiques. Lorsqu'elle concerne des quantités importantes de produits toxiques et/ou très toxiques et qu'elle est supérieure à 1000 m, une valeur administrative de 1000 m est attribuée pour désigner les groupes dominos. Les *consultation distances* supérieures à 1000 m représentent une exception et non pas la norme, et vu qu'elles sont basées sur les quantités maximales autorisées (plutôt que les quantités réelles) l'utilisation des *consultation distances* supérieures à 1000 m pour l'identification des groupes dominos engendrerait une charge de travail disproportionnée pour les exploitants.

Remarque 2 : une vérification est effectuée avec les équipes des unités pour lesquelles une distance de 1000 m a été attribuée, pour s'assurer que les établissements ont bien considérés les quantités maximales admissibles pour le stockage en masse des substances toxiques et/ou très toxiques.

Remarque 3 : après la détermination de la *consultation distance* réelle, celle-ci est examinée pour estimer, le cas échéant, l'impact qu'elle peut avoir sur les groupes dominos déjà déterminés.

Remarque 4 : lorsqu'un établissement rentre dans le cadre d'une « consultation distance » d'un autre établissement, mais qu'aucun établissement n'est concerné par sa *consultation distance*, le gabarit (modèle) de lettre utilisé pour le contacter est modifié, dans la mesure où l'établissement ne doit pas fournir des informations mais uniquement en recevoir.

2.6.2 Pologne

En Pologne il n'existe pas de législation spécifique aux effets dominos, il n'y a pas non plus d'indication quant aux seuils à utiliser. Toutefois, dans les pratiques actuelles deux valeurs seuils sont utilisées pour estimer les éventuels dommages sur les structures causés par les effets de surpression et susceptibles d'engendrer l'extension des dommages et des effets de cascade, concernant les effets thermiques, une seule valeur est utilisée (*Voir* tableau 2.7).

2.6.3 Pays-Bas

La directive de la commission européenne 96/82/CE est transposée au Pays-Bas par le décret « Brzo 1999 » relatif aux risques d'accidents graves *Besluit Risico's Zware Ongevallen* (BRZO). Depuis le 8 Juin 2015, après l'entrée en vigueur de la directive Seveso III, le 1 juin 2015, l'ancien décret a été remplacé par le décret Brzo 2015 pour tenir compte des amendements qui ont été apportés à la directive européenne Seveso.

Les autorités compétentes Néerlandaises font une distinction entre les effets dominos externes et internes. Dans le but d'identifier les établissements Seveso (appelés aussi établissement Brzo au Pays-Bas) susceptibles de provoquer des effets dominos externes, un document appelé *Instrument Domino-Effecten* (IDE) est utilisé. Ce document a été rédigé sous forme de guide pratique pour faciliter la prise en compte des effets dominos. Dans l'IDE, lors de la détermination des distances des effets dominos, il est supposé que seuls les mécanismes de transfert d'énergie immédiats tels que l'impact de fragments, pic de surpression, flux

thermique stationnaire (de longue durée), et une longue exposition aux flammes peuvent conduire à un effet domino.

Les scénarios d'accidents primaires (phénomènes dangereux) considérés capables de causer une escalade et conduire à un effet domino sont : les explosions et les feux pour les substances explosives et pyrotechniques ; et l'éclatement de capacités sous pression, BLEVE, explosion de nuage (VCE), feu de nappe, feu de bâtiment pour les autres substances dangereuses.

La distance de l'effet domino est calculée en utilisant des données concernant des installations et des systèmes contenant des substances classées comme étant explosives, inflammables, très inflammables ou extrêmement inflammables selon la classification WM (*Wet Milieubeheer*, loi Néerlandaise sur la gestion de l'environnement).

L'IDE considère une liste fixe de phénomènes dangereux et une liste fixe d'effets physiques qui provoquent l'endommagement des équipements, ainsi que des quantités fixes de substances. Donc, les informations requises pour déterminer les distances de sécurité pour l'escalade sont disponibles. Les tableaux fournis par l'IDE rapportent les valeurs des distances de sécurité pour les effets dominos, calculées pour tous les scénarios primaires cités auparavant (considérés par l'IDE).

Afin d'obtenir la distance de sécurité appropriée et correcte en utilisant l'IDE, le type d'installation (réservoir de stockage, capacité de procédés, chargement et déchargement, cylindre de gaz, bâtiment de stockage, stockage d'explosif) ainsi que les conditions des substances (atmosphérique, sous pression, cryogénique, ou explosive de classe 1-4) doivent être déterminés.

Le tableau 2.9 donne un aperçu des informations fournies par les tableaux de l'IDE.

L'IDE est ainsi un outil assez simple à utiliser, qui met à disposition des valeurs numériques concernant les distances de sécurité et les distances d'effets dominos, même si les valeurs fournies sont très conservatrices. En effet, l'outil ne prend pas en compte l'effet protecteur que peuvent avoir les murs entre deux installations ou encore les bâtiments, cela est considéré comme l'une de ses limites.

Tableau 2.9 Distances de sécurité (m) pour les installations vulnérables, à partir des stockages sous pression/procédés sous pression impliquant des gaz inflammables (adapté de *Instrument Domino - Effecten*, RIVM, 2003).

M _{sys} (t)	Eclatement/pic de surpression (bar)			Missile	BLEVE (R _{boulet de feu})	VCE/Pic de surpression (bar)				Feu de nappe/ flux thermique (kW/m ²)				
	0,1	0,2	0,3			0,45	Distance-LII	0,1	0,2	0,3	0,45	D _{max}	8	37,5
≤5														
GF1	30	21	16	11	52	40	141	90	72	58	24,8	67	39	
GF2	35	23	18	16		120	204	168	157	150	23,9	97	54	
GF3	61	37	27	21		115	187	146	138	135	-	-	-	
> 5-10					65									
GF1	37	26	20	14		55	177	113	90	73	35	89	53	
GF2	43	29	23	16		157	266	220	205	195	33,4	130	74	
GF3	77	47	34	27	134	237	172	161	155	-	-	-		
> 10 -20					81									
GF1	47	33	25	18		74	223	142	113	93	49,4	120	68	
GF2	55	37	28	20		207	345	286	266	250	46,8	167	95	
GF3	97	59	43	34	190	299	235	223	215	-	-	-		

GF1, GF2 et GF3 sont des catégories de danger attribuées aux gaz inflammables en fonction de leurs propriétés chimiques et physiques. M_{sys} : quantité totale de substance contenue dans le système considéré ; D_{max} : diamètre maximale du feu de nappe ; R_{boulet de feu} : rayon d'impact de la boule de feu ; LII : limite inférieur d'inflammabilité.

2.6.4 Allemagne

En Allemagne il n'y a pas de proposition alternative concernant la définition de l'effet domino par rapport à celle proposée par les directives Seveso. L'évaluation des scénarios dominos est basée sur la législation nationale « *Störfall Verordnung* » qui représente la transcription en droit Allemand de la directive 96/82 /CE et de ses différents amendements. Une distinction est faite entre les effets dominos au sein d'un même établissement et ceux qui impliquent plusieurs établissements.

Afin de prévenir ces scénarios, les autorités compétentes Allemandes appliquent deux distances de sécurité, aucune valeur seuil pour les effets physiques n'est utilisée. En règle générale, les exploitants des établissements Seveso seuil bas doivent démontrer que les effets d'escalade suite aux éventuelles explosions et feux sont maîtrisés à une distance de 200 m à partir des frontières du site, quant aux établissements Seveso seuil haut, ils sont obligés de maîtriser les effets engendrés par les feux et les explosion à une distance de 500 m.

2.6.5 Belgique

En Belgique, les effets dominos externes concernant les établissements Seveso seuil haut sont analysés dans le cadre des rapports de sécurité. Dans ces rapports, les entreprises doivent évaluer la possibilité des effets dominos externes, et le cas échéant, identifier les effets dominos que l'établissement peut générer et affecter avec les entreprises voisines, et aussi les effets dominos auxquels l'entreprise peut être exposée, suite à des accidents qui pourraient survenir dans les établissements voisins.

L'application de cette procédure nécessite la mise à disposition des entreprises des informations requises pour l'identification et la prise en compte des scénarios dominos dans le processus de management des risques.

Une nouvelle approche pour traiter le problème des effets dominos dans les zones industrielles chimiques est envisagée, et sera appliquée d'ici peu (2015 à 2016), après la transcription en droit Belge de la directive Seveso III. Cependant, cette nouvelle approche est en cours de finalisation et l'ensemble de ses détails n'est pas encore connu.

2.6.6 France, Italie, Grèce et Catalogne (Espagne)

En Grèce, Catalogne, France et Italie une approche différente qui s'inspire des pratiques classiques de la maîtrise de l'urbanisation est appliquée pour l'évaluation des effets dominos. Toutes les méthodes employées sont basées sur la définition de zones en fonction de valeurs seuils spécifiques pour la vulnérabilité de la population et/ou des biens.

Un zonage est établi séparant la zone impactée en plusieurs périmètres sur la base de valeurs seuils qui correspondent aux types des éventuels dommages. Cependant, comme cité auparavant, aucune harmonisation n'existe. Chaque État membre possède ses propres règles de zonage et valeurs seuils. La figure 2.4 montre les différentes valeurs seuils utilisées pour les effets de surpression et les périmètres qu'elles définissent. Les seuils utilisés pour délimiter les zones d'effet domino concernant les effets thermiques sont présentés au tableau 2.7.

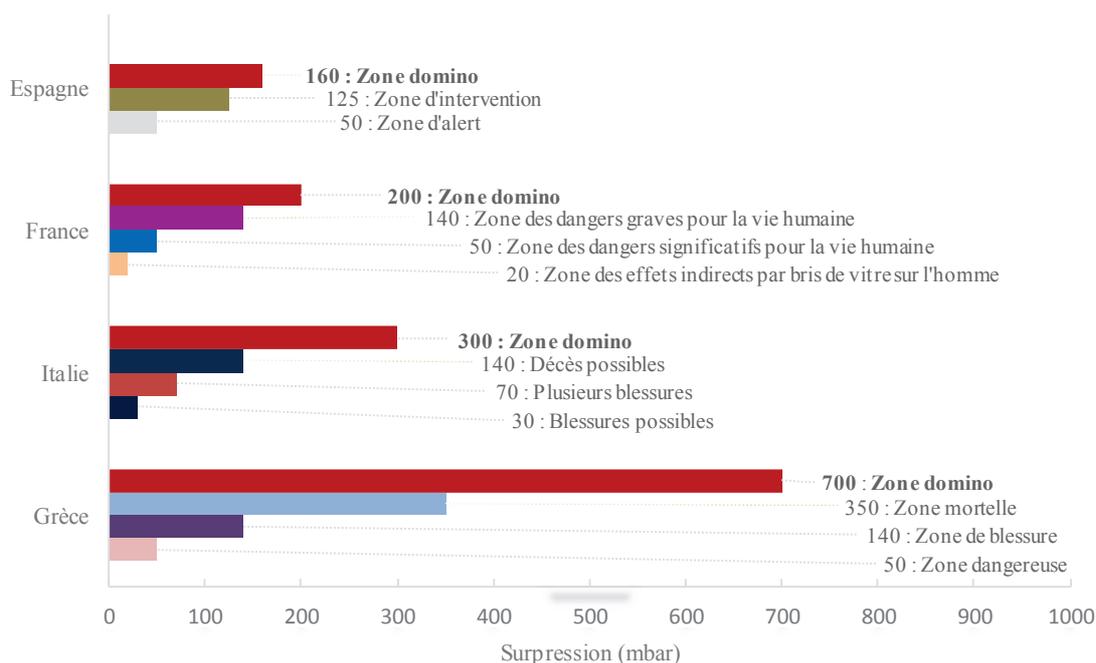


Figure 2.4 Seuils des effets de surpression pour la définition des zones dans quatre États membres.

Étant donné qu'il s'agit de la même approche pour l'ensemble des États membres, nous détaillons dans ce qui suit l'exemple de la France, en expliquant les valeurs utilisés. Effectivement, en principe, des approches similaires sont suivies en Grèce, Italie et en Catalogne, avec des valeurs seuils différentes, rapportées au tableau 2.7.

En France, le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie fournit un guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs. Ce guide a pour objectif d'accompagner l'exploitant dans sa démarche d'estimation des dommages matériels potentiels sur les différents tiers en cas d'accident majeur. Il présente une méthode d'estimation des dommages matériels potentiels, en fonction des **seuils d'effets définis dans l'arrêté ministériel** « échelle » du 29/09/2005, du temps d'exposition des biens aux effets du phénomène dangereux et aussi du type de dégâts observés. On y retrouve, entre autres, l'origine des valeurs seuils proposées pour les effets dominos et les dommages auxquelles elles correspondent. Le tableau 2.10 représente un extrait des tableaux fournis par ce guide, il présente les seuils utilisés en France pour délimiter la zone d'effets dominos. Cette zone est établie sur la base de l'endommagement des structures (éléments d'installation, capacité, *etc.*). Toutefois comme le montre la figure 2.4 ou encore l'arrêté du 29 septembre 2005, les conséquences de ces seuils peuvent facilement être traduites en termes de létalité (danger pour l'homme).

L'arrêté ministériel qui définit les seuils à utiliser pour les effets dominos indique qu'une modulation est possible en fonction des matériaux et structures concernés. Afin d'effectuer une telle modulation, il est important de bien caractériser le scénario en question et de se référer au guide proposé par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

Les seuils thermiques et les seuils de surpression relatifs à la résistance des structures ainsi que le type de dégâts constaté sont donnés à l'Annexe II.

Tableau 2.10 Type de dommages observés pour le seuil de surpression et le seuil thermique pour les effets dominos. (Extrait du Guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs, proposé par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie).

Seuil de surpression relatif aux effets dominos			
Type de dégâts constatés	Surpression	% dommages estimés	Références
Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations	200 mbar	100%	Lannoy (1984) Lees (1996) Green Book-TNO (1989) Clancey (1972) INRS (1994) Bit (1993) + analyses acc. Lechaudel (1995) Michaelis (1995) AZF (2001)
Fissure ou rupture des réservoirs de stockage			
Murs en parpaings ou béton non armé détruit			
Lézards et cassures dans les murs béton ou parpaings non armés de 20 à 30 cm			
Destruction à 50 % des maisons en briques			
Destruction de 50% des maisons en briques (INRS)			
Maisons inhabitables, effondrement partiel ou totale de la toiture, démolition d'1 ou 2 murs extérieurs, dégâts importants aux murs porteurs intérieurs (INRS)			
Véhicules sur parking : vitres cassées et carrosserie sérieusement endommagée			
Toitures détruites			
Déformations légères des canalisations			
Légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels, cadres en acier des bâtiments déformés et/ou arrachés de leurs fondations			

Seuil thermique relatif aux effets dominos			
Type de dégâts constatés	Flux en $(\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3} \cdot \text{s}$	Flux en kW/m^2	Références
La peinture cloque	1800	8	GESIP (1991) Green Book-TNO (1989) APIRP 521 (1990)
Destruction des éléments de structures en verre			
Apparition d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles (tels que le bois) en présence d'une source d'ignition			
Propagation de feu probable sans mesure de refroidissement suffisante			

(*) Pourcentage de dégâts estimés.

Concernant les seuils d'effets relatifs à l'impact de fragments (effets missiles), il n'existe pas à l'heure actuelle de valeur de référence. L'évaluation des effets missiles nécessite une analyse au cas par cas et est limitée généralement aux équipements appartenant à un même site.

Il est important de souligner le fait que même si des exigences spécifiques à l'analyse des effets dominos existent dans la législation, les industriels ne sont pas obligés d'utiliser des outils spécifiés par les autorités pour analyser en détails de tels scénarios. Ils sont effectivement libres de recourir aux méthodologies de leur choix.

Par conséquent, les études de dangers se limitent habituellement à rapporter la possibilité d'extension des dommages à une zone impactée, identifiée en utilisant les valeurs seuils d'effets physiques fournies par l'autorité compétente, comme expliqué ci-avant, sans pour autant procéder à une évaluation plus poussée des scénarios dominos.

Afin de sécuriser d'avantage les parcs industriels et les rendre plus sûrs par rapport aux effets dominos, des définitions claires et précises de ce que sont un parc industriel et le phénomène « effet domino », sont nécessaires. De plus, des outils pour évaluer et contrôler les risques (checklists, guides) liés aux parcs industriels dans leur ensemble (comme une seule entité) sont indispensables. Ainsi qu'une législation plus précise, suivie d'une réglementation claire des exigences (décret, avec indication du champ d'application : listes des équipements, seuils relatifs aux effets physiques, et détermination d'une autorité compétente...), doivent être mises en place au sein de l'Europe, après approbation.

2.7 Conclusion

Bien que les effets dominos et les scénarios dominos soient bien connus depuis des décennies, la définition de l'effet domino, la procédure d'analyse quantitative des scénarios dominos et même les critères techniques (seuils,...) pour identifier la possibilité d'une escalade sont toujours discordants dans la littérature scientifique et les normes techniques.

L'analyse des pratiques actuelles dans certains États membres de l'UE, où une législation spécifique qui exige l'évaluation des scénarios dominos est en vigueur depuis environ 20 ans, affirme l'absence de critères communs pour la gestion de tels scénarios.

Même si des progrès notables ont été réalisés dans la littérature scientifique concernant l'identification et l'analyse des effets dominos, le monde industriel manque toujours d'une réglementation claire et précise concernant leur appréciation

De plus, les exigences réglementaires des autorités compétentes se limitent souvent à l'identification des zones d'impact d'une éventuelle extension des dommages due au phénomène d'escalade.

Dans ce contexte, la convergence vers la mise en place d'une définition commune de ce qu'est l'effet domino ainsi que des valeurs seuils largement approuvées et actualisées, capables de prendre en compte les différences qui existent entre les catégories d'équipements, peut être une amélioration substantielle de l'identification et de la prévention des scénarios d'accidents en cascade.

Par ailleurs, il est clair que l'analyse réalisée dans les États membres de l'UE est purement qualitative et que l'estimation de la probabilité de survenue des éventuels dommages doit être quantifiée afin d'être en mesure de se prononcer sur l'acceptabilité du risque.

C'est dans ce sens que nous proposons au chapitre suivant une méthode pour la prévention des effets dominos, qui utilise les valeurs seuils pour une évaluation qualitative, mais aussi les modèles de vulnérabilité pour estimer la probabilité d'endommagement des cibles et déterminer ensuite quantitativement la fréquence d'occurrence d'un effet domino.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE POUR LA PRÉVENTION DES ACCIDENTS À EFFETS DOMINOS

Ce chapitre décrit dans un premier temps, la démarche suivie pour le développement de la méthodologie pour la prévention des accidents à effets dominos. Dans un deuxième temps, les deux étapes de la méthode sont expliquées, à savoir l'identification des chemins de propagation puis celle des équipements critiques.

3.1 Introduction

Un effet domino peut être initié par plusieurs types d'accidents primaires (Phénomène Dangereux : PhD), ces derniers sont souvent causés par des pertes de confinement (LOC).

La survenue d'un effet domino lors d'un accident augmente considérablement la gravité de ce dernier (Hemmatian *et al.*, 2014). Cela est dû à la propagation de l'accident à la fois dans l'espace et dans le temps, ce qui bien évidemment, se répercute sur la criticité du risque individuel et sociétal.

La prise en compte des effets dominos lors des études de dangers est exigée par la législation Européenne (*Voir* chapitre 2, section 2.2). Néanmoins, comme nous l'avons constaté précédemment, il n'existe pas de méthode unanimement acceptée pour l'appréciation du risque d'effet domino. Par conséquent, il n'y a pas de logiciels ou d'outils, largement utilisés ni commercialisés capables de traiter les effets dominos.

L'approche proposée dans ce chapitre se veut simple d'utilisation et applicable dans un contexte industriel réel. Elle permet l'identification et la hiérarchisation des chemins de propagation des accidents. Les résultats finaux sont présentés de manière simplifiée sous forme de tableaux, ce qui facilite leurs interprétations. Ces tableaux représentent une hiérarchisation

quantitative⁴ des équipements ou unités impliqués dans les chemins de propagation identifiés. Le classement des équipements est effectué en fonction de leur propension à causer ou à propager l'effet domino.

Contrairement aux autres outils de classement proposés par le passé (chapitre 1, section 1.4.4.2, 1.4.4.3 et section 1.4.4.5), l'originalité de l'approche présentée dans ce chapitre réside non seulement dans la prise en compte de l'emplacement exact des équipements et des sources d'accidents après dispersion ou épandage (nuage explosif, nappe inflammable, *etc.*), mais aussi dans la nature des résultats fournis (quantitative).

3.2 Démarche mise en œuvre pour le développement de la méthode proposée

Le développement de la méthode présentée dans ce chapitre s'est déroulé quatre étapes principales (*Voir* figure 3. 1), à savoir :

- 1) Étude du Retour d'EXpérience « REX »;
- 2) Analyse des méthodes et outils existants;
- 3) Conception d'une base de connaissances et formalisation du savoir-faire;
- 4) Choix de l'approche à adopter et des techniques à utiliser.

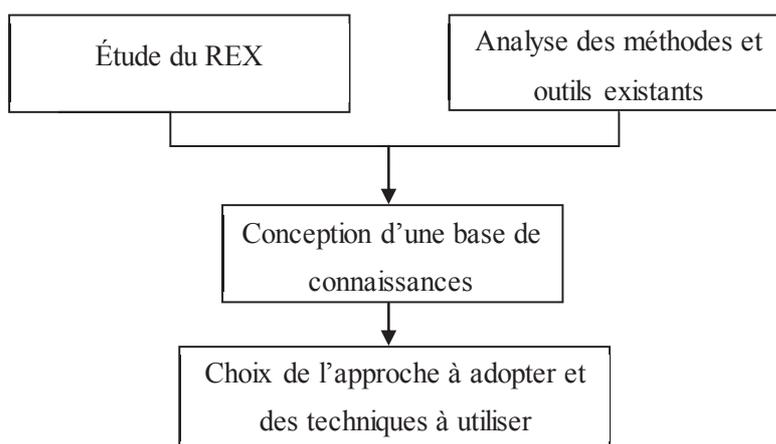


Figure 3.1 Démarche suivie pour le développement de la méthode proposée.

⁴ Résultat d'une évaluation, en ordre de grandeur, de la gravité des conséquences sur l'homme et les structures, après estimation de la vraisemblance des événements conduisant à l'accident.

Les deux premières étapes nous ont permis d'établir un cahier des charges traduisant les besoins à satisfaire et les contraintes à considérer :

En termes de besoins : la méthode doit prendre en compte : les conditions météorologiques, la cinétique des phénomènes dangereux, les mesures de maîtrise des risques, et aussi la localisation précise des sources d'accidents et des sources d'inflammations.

En termes de contraintes : la méthode doit fournir des résultats pertinents et être simple d'utilisation, facile à intégrer dans le processus d'appréciation des risques, notamment dans le cadre des études de dangers.

Par ailleurs, le temps de calcul doit être raisonnable afin de pouvoir considérer l'ensemble des équipements d'un site industriel. Enfin, du fait du manque de données expérimentales, voire de l'inexistence d'expériences à grande échelle, l'étude sera basée exclusivement sur le REX afin d'obtenir les bases pour construire le cadre théorique, le tester et l'améliorer.

3.2.1 Étude du retour d'expérience

Le retour d'expérience est l'un des piliers des approches modernes du management des risques (Dien et Llory, 2004). D'après Périlhon (2007) l'analyse des accidents passés est essentielle pour l'évolution de la compréhension et de la connaissance des risques. La compréhension des causes d'un accident et la façon dont les séquences se sont déroulées (enchaînement des événements ayant conduit à l'accident), permet de tirer des enseignements pour la prévention des accidents.

Ainsi, préalablement au développement d'une méthode pour la prévention des accidents à effets dominos, nous avons effectué une étude du REX. Cette analyse nous a permis non seulement d'avoir une idée claire des secteurs industriels concernés et ceux qui sont le plus exposés, mais également d'obtenir les données d'entrées nécessaires à l'élaboration d'un outil d'identification de tels risques. D'autre part, cette démarche a facilité le choix de l'approche à adopter.

L'étude a été réalisée sous forme de recherche bibliographique, examen et synthèse des articles scientifiques **les plus pertinents** traitant le sujet de l'analyse des accidents passés. **Les plus pertinents**, car il peut y avoir des incohérences, ces dernières sont dues aux échantillons

choisis. Effectivement, pour assurer l'homogénéité des données, la distribution chronologique et géographique doit être considérée comme un critère important lors de la collecte des données. En ce sens, les échantillons doivent se limiter aux pays considérés économiquement et industriellement développés, car les moyens de prévention et de protection mis en œuvre et plus généralement la culture du risque dans ces pays est différente de celle adoptée dans les pays en cours de développement. Cependant, même si nous avons porté un intérêt particulier pour les accidents survenus en Europe, nous avons également examiné les accidents survenus dans des pays en cours de développement afin de comparer et tirer des conclusions sur l'efficacité des mesures adoptées et le progrès en termes de prévention.

Un autre point important pour assurer l'homogénéité de l'échantillon est la réduction de l'intervalle de temps entre les accidents sélectionnés pour former l'échantillon. En effet, cela permet de tenir compte de l'impact positif ou négatif que peut avoir l'évolution des technologies, pratiques (Ex. : parc éco-industriel, usine de biogaz, *etc.*) mais aussi celui des mesures de maîtrise des risques développées et l'amélioration du système de management des risques en générale.

Les articles étudiés lors de cette première phase ainsi que certains détails concernant les approches suivies par les auteurs sont présentés au chapitre 1, section 1.4.1 (analyse des accidents passés).

Cette première étape nous a permis de comprendre les caractéristiques des scénarios effets dominos, de tirer des enseignements, et de recueillir de précieuses informations. Par exemple, les événements initiateurs de ce phénomène, les séquences accidentelles les plus fréquentes ainsi que les substances dangereuses souvent impliquées, *etc.* Ces informations qui constituent les résultats de l'étude du REX, ont été utilisées dans l'étape 3 pour formaliser la connaissance et construire une base de connaissances pour enrichir notre réflexion et renforcer notre expertise. Elles sont exposées au point 3.2.3.

3.2.2 Analyse des méthodes et outils existants

L'examen des méthodologies proposées par le passé révèle entre autres les limites de ces dernières et indique logiquement les besoins à combler. Sans pour autant reprendre l'état de l'art concernant les études ayant eu pour but de traiter les effets dominos présentées dans le chapitre 1, section 1.4.4, nous décrivons ci-dessous la classification des outils d'analyse des accidents en cascade. Il est à noter que lors de cette étape, un examen parallèle des méthodes traditionnelles d'analyse des risques (HAZOP, Arbre d'événements, QRA, LOPA,...) a été réalisé afin de sélectionner la ou les techniques à utiliser, ainsi que la ou les méthodes à intégrer dans la méthodologie à développer.

Les quelques outils disponibles, dédiés à l'étude des effets dominos, peuvent être classés en deux catégories, selon leurs finalités et l'approche adoptée. La première catégorie d'outils fournit une hiérarchisation **qualitative** des équipements sur la base de la probabilité de propagation et la gravité des conséquences, les résultats sont qualitatifs car ils sont basés sur l'intensité des effets sans prendre en compte la vulnérabilité des cibles. Parmi les outils appartenant à cette première catégorie, il existe des logiciels qui fournissent une évaluation simplifiée basée sur un nombre réduit de données d'entrée, et ont pour objectif de fournir une analyse préliminaire du danger d'effet domino, comme le logiciel DomPrevPlanning (Reniers et Dullaert, 2007) ou le STARS Domino (Ballocco *et al.*, 2001).

La deuxième catégorie vise à inclure les effets dominos dans l'analyse quantitative des risques (QRA). Ce type d'outil fournit des résultats détaillés, souvent présentés sous forme d'indices de risque communément utilisés, comme les indices de risque individuel et sociétal. Par contre, il nécessite plusieurs données d'entrée et requiert d'importantes ressources informatiques en vue d'effectuer des calculs complexes. La version domino du logiciel Aripa-GIS développée par Cozzani *et al.* (2006b) et le logiciel DOMIFFECTION proposé par Khan et Abbasi (1998) appartiennent à cette catégorie.

Le travail réalisé lors de cette étape visait à exploiter le retour d'expérience issu de l'utilisation des autres méthodes afin d'éviter les inconvénients et limitations de celles-ci. Les résultats et conclusions ont servi à enrichir notre base de connaissance et à orienter nos choix lors du

développement de l'outil proposé. Il est apparu important de trouver un équilibre entre le niveau de complexité des modèles intégrés à la méthode proposée et sa convivialité, c'est-à-dire le ratio facilité d'utilisation/efficacité.

3.2.3 Conception d'une base de connaissances

Dans un souci d'organisation et de formalisation du savoir, il est apparu nécessaire de renseigner une base de connaissances structurée, contenant l'ensemble des informations et expertises nécessaires au développement de la méthode proposée. L'ensemble des informations recueillies lors des deux étapes précédentes, à savoir, l'étude du REX et l'analyse des méthodes existantes, a été utilisé pour la conception de cette base de connaissances, afin de formaliser les savoirs acquis et faciliter la recherche et l'utilisation des informations.

Tout d'abord, les différents résultats de la recherche bibliographique ont été organisés dans une bibliothèque numérique. Cette dernière contient : une bibliographie commentée, des textes de synthèses, des références. Les sources y sont classées selon plusieurs critères : pertinence, approche suivie (Ex. : analyse statistique des accidents passés, développement de modèles de vulnérabilité, QRA, *etc.*), type de document (communication scientifique, thèse, livre, texte réglementaire ou autres).

Ensuite, nous avons élaboré une liste d'experts du domaine des accidents en cascade. Avec qui, après avoir examiné les travaux réalisés par le passé, nous avons échangé des idées afin de bénéficier de leurs expériences et situer nos objectifs de recherche au sein d'une vision d'ensemble du domaine.

Finalement, une liste de ressources méthodologiques et un inventaire des instruments retenus, ont été dressés, en plus de la sélection d'un certain nombre de travaux innovants et pertinents pour constituer les bases de la méthode proposée.

Cette phase d'extraction des connaissances et formalisation du savoir s'est avérée très importante, car elle a considérablement facilité la prise en main de la méthode par des apprenants.

Au cours de ce travail l'utilisation de la méthode a en effet été confiée, au travers de projets et de stages, à des élèves ingénieurs du département Maîtrise des Risques Industriels et

Environnementaux de l'INSA de Rouen. Ils ont participé à des tâches variées comme par exemple : des enquêtes auprès des entreprises Normandes concernant l'analyse d'effets dominos et l'application de l'outil à des études de cas.

Les résultats de l'étude du retour d'expérience sont représentatifs de la valeur des connaissances acquises, c'est pourquoi, pour conclure cette étape, nous en rappelons quelques-uns ci-dessous :

- Les accidents ayant fait intervenir des effets dominos, se rapportent essentiellement au secteur de l'industrie des procédés et au transport de matières dangereuses, mais ne se limitent pas à ces derniers.
- En raison des importantes quantités de matières dangereuses présentes dans les zones de stockage, ces dernières sont les plus susceptibles d'engendrer des PhD avec des effets significatifs capables de causer un effet domino.
- Les séquences accidentelles les plus fréquentes sont : (i) explosions → feu; (ii) feu → explosion et finalement (iii) feu → feu.
- Dans la majorité des cas, les séquences dominos s'arrêtent au premier niveau (un seul enchaînement (*Voir figure 1.7*)).

3.2.4 Choix de l'approche à adopter et des techniques à utiliser

3.2.4.1 Approche probabiliste

L'approche probabiliste s'impose si l'on veut prendre en compte les risques d'accidents à effets dominos lors de l'appréciation des risques pour la maîtrise de l'urbanisation et donc la protection des populations, des biens et de l'environnement. Puisqu'elle permet d'exclure de l'étude les scénarios à très faibles probabilités d'occurrence, même si leurs conséquences sont graves.

Étant donné le nombre très important des scénarios envisageables, l'approche déterministe n'est pas évidente dans une telle démarche et elle conduit rapide à une explosion combinatoire. D'autant plus qu'elle repose sur le postulat « risque d'accident zéro à l'extérieur du site » ce qui mènera à définir des distances de sécurité très grandes, en particulier pour les rejets

toxiques et la projection de fragments en cas d'explosion. De telles distances sont incompatibles avec les sites industriels existants et inapplicables pour les sites en construction (Hourtolou *et al.*, 2002).

Le choix de l'approche probabiliste, hormis le fait qu'il soit inévitable pour la prise en compte des effets dominos, est motivé par l'objectif final de notre étude. Ce dernier consiste à identifier les équipements les plus critiques vis-à-vis de la propagation de l'accident et de les hiérarchiser selon leur propension à causer ou à propager l'accident. Ceci dans le but de permettre aux responsables de la sécurité d'agir sur ces équipements, en renforçant les moyens de prévention et de protection afin de réduire le risque. C'est dans cette optique que l'approche probabiliste, trouve tout son intérêt, car c'est la plus riche en matière d'informations.

3.2.4.2 Méthode de l'arbre d'événements

À l'évidence, l'analyse des effets dominos est une extension de l'identification des dangers, aussi le développement d'une méthode globale pour l'étude des effets dominos, nécessite l'intégration d'outils d'analyse de risques, de modèles de vulnérabilité, *etc.* C'est pourquoi la méthode a été conçue de façon à ce qu'elle puisse être utilisée sans qu'il soit nécessaire de s'appuyer sur les résultats des études de dangers. Néanmoins, si ces résultats sont disponibles, cela permet d'alléger certaines étapes de la méthode.

Lors de l'analyse des méthodes et outils existants (*Voir* section 3.2.2), nous avons examiné les méthodes classiques d'analyse de risques, suite à quoi nous avons choisi de retenir la méthode d'analyse par arbre d'événements. Cette dernière est reconnue comme une méthode efficace, car elle permet de répondre aux besoins identifiés, elle est communément utilisée en phase d'analyse détaillée des risques, lors des études de dangers.

Avant de détailler les phases de la méthode proposée dans les paragraphes qui suivent, nous tenons à souligner le fait qu'une telle démarche ne vise pas à remplacer le déplacement d'un groupe de travail sur le terrain, afin d'effectuer une analyse des risques. En revanche, elle permet d'axer les efforts sur les unités les plus dangereuses. En d'autres termes, elle servira d'outil d'aide à la décision, qui facilite la prise en compte des effets dominos lors des analyses

de risques. En effet c'est à travers l'identification des équipements les plus dangereux du point de vue de la propagation des accidents, qu'il est possible de centrer les efforts des groupes de travail, autour de ces équipements ciblés, et les examiner avec plus de détails. Par exemple, en utilisant des outils plus sophistiqués que ceux utilisés usuellement (approfondissement de l'étude pour un équipement ou un scénario, moyennant des outils CFD, *etc.*).

3.3 Méthodologie

Le modèle développé est basé sur une description topographique de la zone étudiée, incluant les caractéristiques de chaque unité, il prend en compte les mesures de maîtrise des risques mises en œuvre par l'industriel. Le modèle combine, l'estimation de la probabilité d'endommagement proposée par Cozzani et Salzano (2004); Cozzani *et al.* (2006b); Landucci *et al.* (2009) et les valeurs seuils d'escalade proposées par Cozzani *et al.* (2006a).

Afin d'identifier les scénarios d'accidents de référence engendrés par les rejets de matières dangereuses, des arbres d'événements génériques issues de l'état de l'art actuel (Delvosalle *et al.*, 2006; Vilchez *et al.*, 2011) ont été adaptés à l'objectif de l'étude.

La méthode proposée est schématisée figure 3.2. Comme le montre la figure, l'approche est basée sur deux phases principales. La première, est l'identification des chemins de propagation des accidents, elle est implémentée sous MATLAB® et Visual Basic for Applications (VBA) afin de faciliter l'entrée des données, et l'analyse des résultats dans Microsoft Excel®.

La deuxième phase est l'identification des équipements les plus dangereux. Elle consiste à classer les équipements impliqués dans les chemins de propagation, en fonction de leur vraisemblance à causer ou propager un effet domino. L'algorithme qui effectue cette phase est codé sous VBA. Les détails de ces deux phases sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.3.1 Phase 1 : Identification des chemins de propagation

Les pertes de confinement peuvent être considérées comme l'événement initiateur des scénarios accidentels le plus récurrent dans l'industrie des procédés (Mannan, 2014). Elles provoquent des phénomènes dangereux qui varient en fonction de plusieurs paramètres :

- conditions opératoires : température et pression ;
- caractéristiques et type de l'équipement défaillant : réservoir de stockage ou capacité de procédés (sous pression, cryogénique, atmosphérique);
- type du rejet (instantané ou continu), son orientation (vers le haut ou vers le bas) ;
- phase de la matière rejetée (liquide, gazeuse ou diphasique), sa catégorie (inflammabilité, réactivité et toxicité).

De ce fait, les trois catégories de LOCs mentionnées dans le Purple Book (Uijt de Haag et Ale, 2005) et décrites dans le tableau 3.1 sont considérées dans cette étude comme les événements critiques principaux capables de provoquer un effet domino.

Six étapes sont nécessaires pour l'identification des chemins de propagations des accidents en cascades. Ces étapes sont résumées dans la première phase de l'organigramme représenté dans la figure 3.2 et détaillées dans les paragraphes qui suivent.

Tableau 3.1 Caractérisation des LOCs suggérées par le Purple Book (Uijt de Haag et Ale, 2005)

LOC	Description
G1	Rejet instantané de l'ensemble du produit contenu (rupture catastrophique)
G2	Rejet continu de l'ensemble du produit contenu en dix minutes à un débit constant
G3	Rejet continu par une brèche de diamètre équivalent de 10 mm

3.3.1.1 Description de la zone industrielle étudiée

En premier lieu, les données nécessaires à l'application de la méthode sont collectées et stockées. Des interfaces utilisateur simples sont codées sous VBA, afin de faciliter la saisie des données d'entrée (*Voir Annexe III*). Le tableau 3.2 résume les informations requises.

Ces données représentent une description détaillée des caractéristiques des équipements, ainsi que celles des matières qu'ils contiennent. Les barrières de sécurité existantes sont identifiées puis analysées, afin de décider de leur prise en compte ou non dans le calcul des fréquences

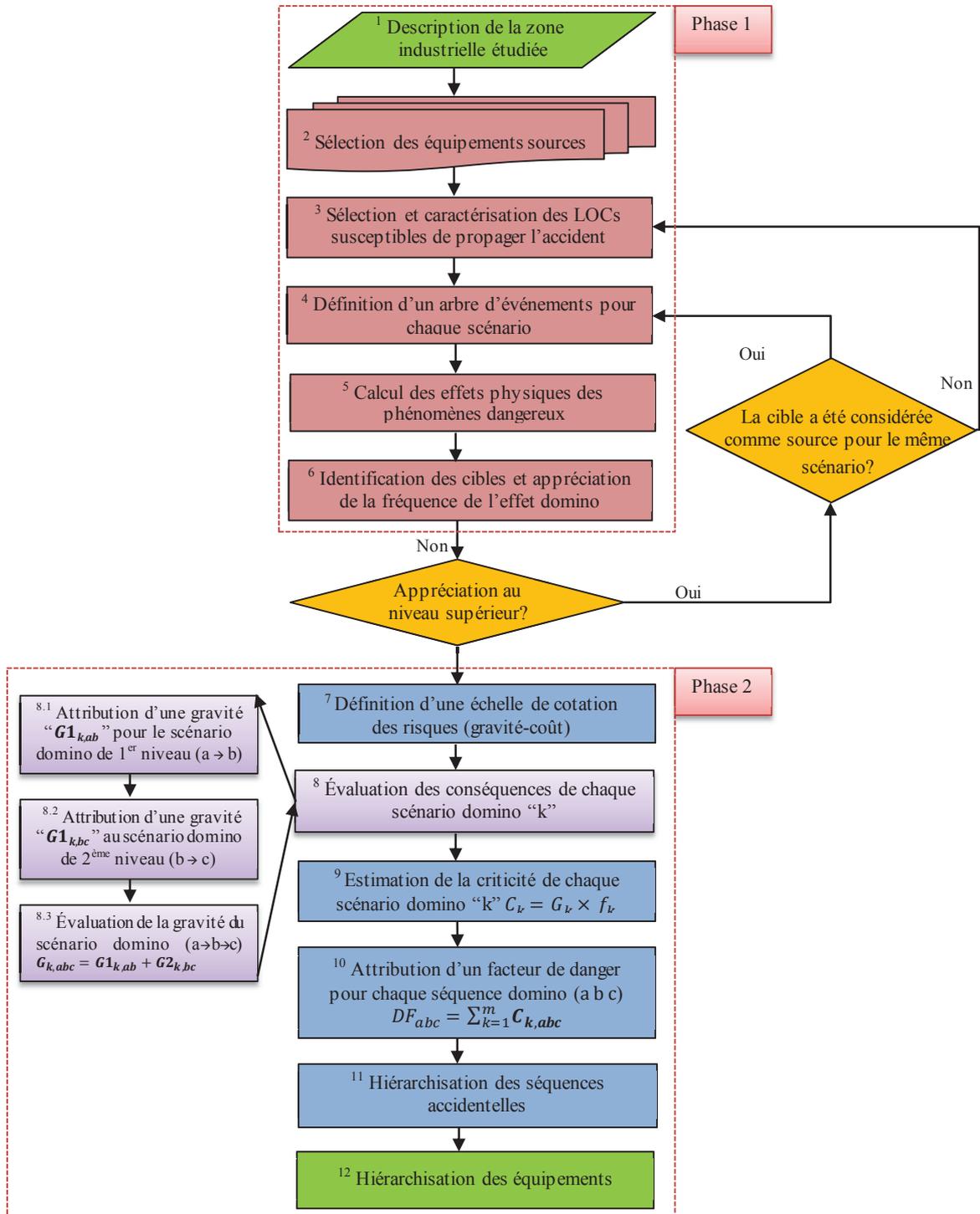
d'occurrence d'un accident donné. La considération ou non d'une mesure⁵ de maîtrise du risque se fait en fonction de sa performance (Ex. : temps de réponse) et de sa nature (active ou passive, barrière de prévention, de limitation ou de contrôle). Le tableau 3.3 présente les différents types d'équipements considérés par le modèle ainsi que leurs fréquences de défaillance génériques associées à l'événement critique (l'événement redouté central) : les fuites et rejets instantanés (LOCs définies dans le tableau 3.1). Les fréquences des pertes de confinement utilisées lors du développement du présent modèle sont des fréquences génériques issues de l'analyse statistique des accidents passés.

Les barrières de sécurité en amont de l'événement critique (LOC) sont intégrées dans la fréquence de ce dernier. Deux bases de données ont été utilisées, le CPR 18E dit Purple Book et le *Handbook Failure Frequencies* dit AMINAL (Uijt de Haag et Ale, 2005; AMINAL, 2009).

Lors de l'application de la méthode, il est possible d'utiliser ces données génériques afin d'initier la réflexion, cependant les données spécifiques au site étudié sont à privilégier.

Ces dernières peuvent être disponibles dans les études de dangers, sinon elles peuvent être calculées par la méthode de l'arbre des défaillances.

⁵ Les mesures de maîtrise des risques considérées par le modèle se séparent en quatre catégories (*Voir* tableau 2.2) : systèmes de protection ou de lutte contre les incendies; systèmes de prévention des feux de nappes; systèmes de prévention de la dispersion; dispositifs anti-déflagrations.



Phase 1 : Identification des chemins de propagation

Phase 2 : Identification des équipements critiques

Figure 3.2 Organigramme de la méthodologie développée

Tableau 3.2 Les informations requises pour l'application de la méthode

Information concernant	Information requises
Équipement	Nombre d'équipements appartenant à la zone d'intérêt L'emplacement des équipements (coordonnées x et y)
	Type d'équipement : réservoir ou capacité et sa catégorie : atmosphérique, cryogénique ou sous pression
	Volume, longueur, diamètre, forme : cylindrique ou sphérique La surface des cuves de rétention
	Barrières de sécurité : <ul style="list-style-type: none"> • systèmes de protection ou de lutte contre les incendies (Ex. : couronne de refroidissement) • systèmes de prévention des feux de nappes (drainage souterrain, injection de mousse, <i>etc.</i>) • systèmes de prévention de la dispersion : rideaux d'eau ou de vapeur, extraction à un système de torchère, vannes d'isolation (vanne de pied de bac, <i>etc.</i>) • dispositifs anti-déflagrations
	Degré de remplissage, la pression maximale de service
Substance	Conditions de stockage ou d'utilisation : pression et température Quantité, phase de la matière : gazeuse, liquide, diphasique Catégorie de la substance (inflammabilité, réactivité et toxicité) selon le règlement CLP ¹
Conditions météorologiques	Classe de stabilité, direction et vitesse du vent, température ambiante, flux de rayonnement solaire, l'humidité relative, pourcentage de CO ₂ Probabilité de chaque ensemble de conditions climatiques
L'homme et les biens	Nombre de personnes présentes sur la zone d'étude, leurs emplacements (coordonnées x et y), emplacements des bureaux, des bâtiments (coordonnées x et y)

¹CLP acronyme de l'anglais « *Classification, Labelling, Packaging* » (Voir Règlement (CE) N° 1272/2008)

Il est important de souligner que lors de la définition de la catégorie de danger des substances, les conditions de stockage (ou de traitement/utilisation) sont à prendre en compte. En effet, une substance considérée inflammable (point éclair compris entre 21 °C et 55 °C) dans des conditions de température et de pression normales, doit être considérée comme très inflammable, si elle est stockée ou traitée à haute température et/ou haute pression. De même, une substance inflammable ou très inflammable peut être considérée extrêmement inflammable, si elle est utilisée à une température supérieure à sa température d'ébullition.

Tableau 3.3 Équipements considérés par le modèle et leurs fréquences annuelles de LOCs (Uijt de Haag et Ale, 2005; AMINAL, 2009)

Équipement	Fréquence des LOCs (an ⁻¹)	LOC de type G1	LOC de type G2	LOC de type G3
Réservoir sous pression		5×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-5}
Capacité de procédés sous pression		5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-4}
Réacteur sous pression		5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-4}
Capacité de procédés atmosphérique		5×10^{-5}	5×10^{-5}	$2,4 \times 10^{-2}$
Réacteur atmosphérique		5×10^{-5}	5×10^{-5}	$2,4 \times 10^{-2}$
Réservoir atmosphérique ou cryogénique :				
• <i>Single-containment tank</i>		5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-4}
• <i>Tank with a protective outer shell</i>		5×10^{-7}	5×10^{-7}	-
• <i>Double containment tank</i>		$1,25 \times 10^{-8}$	$1,25 \times 10^{-8}$	-
• <i>Full containment</i>		1×10^{-8}	-	-
• <i>Mounded tank</i>		1×10^{-8}	-	-
Cylindre de gaz		1×10^{-6}	-	-

Les termes anglais désignant le type d'équipement pour les stockages atmosphériques ou cryogéniques ont été conservés, car leurs traductions ne sont pas succinctes et nécessitent des explications (*Voir* Annexe IV).

Une fois que toutes les informations requises pour l'application de la méthode (*Voir* tableau 3.2) ont été recueillies, l'étape suivante relative aux équipements peut être abordée.

3.3.1.2 Sélection des équipements sources

Tous les équipements appartenant à la zone d'intérêt, décrite dans l'étape précédente (*Voir* section 3.3.1.1), sont considérés comme d'éventuelles cibles afin d'évaluer la gravité des conséquences d'un accident à effet domino susceptible de les impacter.

En revanche, les équipements désignés comme critiques du point de vue du phénomène d'escalade, et par conséquent sélectionnés comme sources crédibles d'un tel scénario, se limitent aux équipements où sont stockés ou manipulés des matières considérées inflammables, très inflammables ou extrêmement inflammables conformément au Règlement (CE) N° 1272/2008 du parlement Européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la

classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, dit Règlement CLP (*Voir* Règlement (CE) N° 1272/2008).

La sélection des équipements critiques sur un site est une étape importante du processus d'appréciation des risques, car elle permet de réduire considérablement le temps nécessaire à l'application de la ou des méthodes employées.

Comme indiqué précédemment, l'analyse des effets dominos est une extension de l'identification des dangers, elle ne commence que lorsque l'identification des dangers primaires est effectuée et leurs conséquences calculées. Ainsi, l'identification des équipements sources capables de provoquer un effet domino peut se faire, soit en utilisant les résultats de l'étude de dangers, soit à l'aide de méthodes d'analyse des risques. Il est à noter que l'équipement capable de causer l'accident isolé le plus grave n'est pas forcément celui qui est le plus critique vis-à-vis de la propagation et donc de l'escalade des événements. Effectivement, le phénomène de cascade dépend de plusieurs paramètres. En plus de l'intensité des effets physiques engendrés par l'accident primaire, on peut citer par exemple :

- la position (x et y) des cibles potentielles par rapport à la source (en incluant la distance inter-équipement, ou en général la distance source de l'accident-cible et la direction dans laquelle se trouve la cible) ;
- les conditions météorologiques, en particulier la direction et la vitesse du vent ainsi que la température ambiante ;
- les mesures de maîtrise des risques (barrières de sécurité) mises en œuvre par l'industriel, leurs performances,...

Par conséquent, lors de la sélection des équipements sources, il convient de garder à l'esprit l'objectif de la méthode proposée et d'utiliser les résultats de l'étude de dangers, si ceux-ci sont disponibles. Sinon, la méthode de sélection des équipements critiques proposée par Delvosalle *et al.*, (2006) dans la *Method for the Identification of Major Accident Hazards* (MIMAH), développée dans le cadre du projet *Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS in the framework of the Seveso II directive* (ARAMIS) peut être appliquée. Également, la méthode proposée dans le IDE, (RIVM, 2003) peut aussi être utilisée.

3.3.1.3 Sélection et caractérisation des pertes de confinement

Par définition, l'Événement Redouté Central (ERC) est l'événement conventionnellement défini dans le cadre d'une analyse de risques au centre de l'enchaînement accidentel. Ce dernier correspond généralement à une perte de confinement sur un équipement dangereux (Ex. : rupture, brèche) pour les fluides et à une perte d'intégrité physique (Ex. : décomposition, contamination) pour les solides (Circulaire du 10 mai 2010). En effet, l'analyse statistique des accidents passés et le retour d'expérience confirment que les pertes de confinement représentent l'événement initiateur des scénarios accidentels, le plus récurrent dans l'industrie des procédés. De ce fait, et vu la finalité de l'outil développé, dans cette étude, les LOCs ont été choisies comme l'événement critique susceptible de provoquer un effet domino.

Tableau 3.4 Les phénomènes dangereux possibles suite à une LOC et leurs gravités

Classe de LOC	Danger associé à la substance	Type de l'équipement		
		Atmosphérique	Sous pression	Allongé (Ex. : tour de distillation)
G1	Inflammable	Feu de nappe, feu de nuage, VCE	BLEVE/boule de feu, feu de nuage, VCE	Feu de nappe, feu de nuage, VCE
	Toxique	Dispersion toxique	Dispersion toxique	Dispersion toxique
G2	Inflammable	Feu de nappe, feu de nuage, VCE	Jet enflammé, feu de nuage, VCE	Feu de nappe, feu de nuage, VCE
	Toxique	Dispersion toxique	Dispersion toxique	Dispersion toxique
G3	Inflammable	<i>Feu de nappe (mineur)</i>	Jet enflammé	<i>Feu de nappe (mineur), feu de nuage (mineur)</i>
	Toxique	<i>Dispersion toxique (mineur)</i>	Dispersion toxique	Dispersion toxique

VCE, vapor cloud explosion. BLEVE, boiling liquid evaporating vapor explosion. **Haute gravité, gras.** *Faible gravité, italique.*

Une autre conclusion importante du retour d'expérience est que la gravité des accidents primaires suite à une perte de confinement dépend du type d'équipement où la LOC a eu lieu, de la substance rejetée et de l'intensité de la LOC (Cozzani *et al.*, 2006a).

C'est pourquoi, la sélection d'une LOC comme événement critique est basée sur son aptitude à propager l'accident. Le tableau 3.4 montre les phénomènes dangereux qui peuvent survenir

suite à une LOC, selon le type de l'équipement concerné et les dangers intrinsèques de la substance.

Pour chaque équipement identifié comme source potentielle d'un effet domino, les scénarios de pertes de confinement sont caractérisés. Cette étape consiste à déterminer le terme source : la phase du rejet, son débit massique, durée de la fuite, diamètre et direction, *etc.*

Par exemple, pour déterminer la position relative du nuage ou d'une nappe inflammable dans la zone d'étude, le débit massique puis la masse totale de substance émise dans l'atmosphère, sont déterminés en utilisant un modèle de dispersion atmosphérique. Ensuite, la position relative (coordonnées x et y) du nuage inflammable dans la zone est utilisée à l'étape suivante (*Voir* section 3.3.1.4) pour déterminer la probabilité de l'inflammation retardée et celle de l'accélération du front de flamme.

Dans le cas des fuites continues, le débit massique est aussi utilisé pour l'estimation de la probabilité d'inflammation directe. La direction du rejet, le diamètre de la brèche et sa hauteur sont choisis de façon à représenter le pire des cas : c'est-à-dire, le cas où la propagation est possible.

Au cours de cette étape, une attention spécifique est accordée aux conditions météorologiques. Les scénarios de rejets sont définis avec l'ensemble des conditions météorologiques jugées représentatives sur la zone étudiée. En revanche, lorsque l'étape expliquée dans la section 3.3.1.5 est réalisée, les phénomènes dangereux qui ne sont pas influencés par les conditions météorologiques sont considérés une seule fois.

Il convient de mentionner que lors de cette étape de caractérisation des scénarios de pertes de confinement, il est primordial de considérer les conditions de température et de pression mais aussi les causes qui ont provoqué la LOC. En effet, ces paramètres influencent directement le devenir du terme source, ce qui fait que la phase du rejet peut être différente de la phase de stockage ou d'utilisation. Par exemple, les scénarios concernant les capacités de procédés peuvent engendrer des rejets avec des températures élevées, ce qui aura un impact direct sur la phase de la matière rejetée (évaporation des liquides). Un autre exemple est la nature des rejets causés par des feux. Par conséquent, les conditions du rejet doivent être évaluées pour chaque cas, afin d'attribuer l'arbre d'évènements le plus adéquat.

3.3.1.4 Définition d'un arbre d'événements pour chaque scénario

Les phénomènes dangereux à envisager suite à une perte de confinement sont multiples et varient selon les paramètres cités auparavant (*Voir* section 3.3.1). Afin de déterminer les différentes conséquences possibles à associer aux événements critiques (LOCs) ainsi que leurs fréquences d'occurrence, l'évolution de chaque LOC est représentée en utilisant la méthode d'arbre d'événements. En s'appuyant sur la littérature scientifique et technique disponible (Uijt de Haag et Ale (2005) ; Delvosalle *et al.* (2006) et Vilchez *et al.* (2011)), 24 arbres d'événements ont été construits dans lesquels chaque branche représente un scénario d'accident.

Pour chaque scénario de perte de confinement (événement redouté) caractérisé dans l'étape précédente (*Voir* section 3.3.1.3), une fonction Matlab teste les conditions de chaque arbre d'événements et affecte l'arbre approprié. Les informations nécessaires à l'affectation d'un arbre d'événements sont obtenues à l'étape précédente (section 3.3.1.3), à savoir :

- le type d'équipement ;
- la classe de perte de confinement ;
- le débit massique du rejet ;
- la phase de la substance rejetée, sa catégorie et réactivité, *etc.*

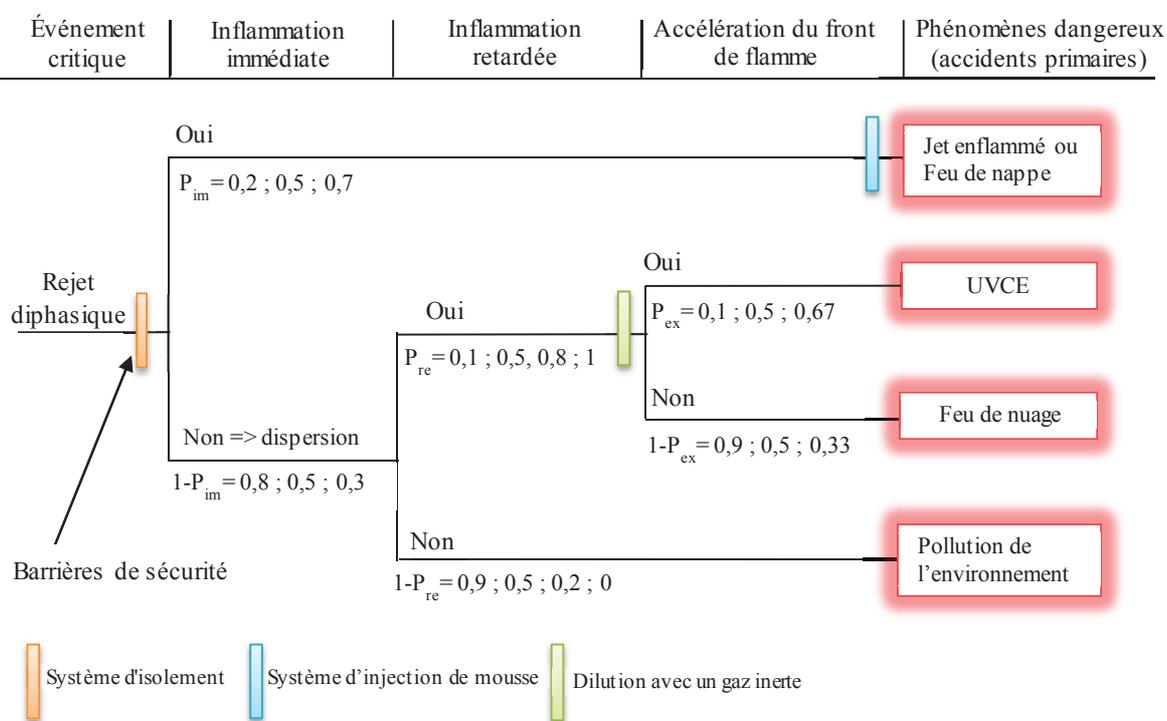
Après avoir obtenu les informations nécessaires, l'affectation d'un arbre d'événements à un événement redouté central (LOC) permet d'identifier les différents phénomènes dangereux pouvant découler du LOC, et d'estimer leurs fréquences.

À titre d'exemple, la figure 3.3 représente un arbre d'événements simplifié, qui décrit les différentes conséquences associées à une fuite continue d'un gaz liquéfié sous pression, de catégorie extrêmement inflammable et hautement réactif.

Dans les paragraphes qui suivent nous expliquons les différentes probabilités intermédiaires qui permettent avec les fréquences d'occurrence des LOCs de quantifier les risques.

Il convient de préciser que contrairement aux *fréquences*⁶ de défaillance présentées au tableau 3.3, il s'agit ici de *probabilités*⁷ d'occurrence qui déterminent le passage de l'évènement redouté (LOC) aux phénomènes dangereux :

- probabilité d'inflammation immédiate ;
- probabilité d'inflammation retardée ;
- probabilité d'accélération du front de flamme (explosion) ;
- probabilité de défaillance à la demande/sollicitation des barrières de sécurité (PFD).



P_{im} : probabilité d'inflammation directe, dépend du débit de la fuite

P_{re} : probabilité d'inflammation retardée, dépend de la présence de source d'inflammation

P_{ex} : probabilité d'explosion, dépend de la congestion de la zone où se trouve le nuage inflammable.

Figure 3.3 Arbre d'événements simplifié d'un rejet continu de matière liquéfiée sous pression, extrêmement inflammable et hautement réactive

⁶ Nombre d'événements ou d'effets par unité de temps donnée

⁷ Mesure de la possibilité d'occurrence exprimée par un chiffre entre 0 et 1, 0 indiquant une impossibilité et 1 indiquant une certitude absolue.

Étant donné que plusieurs paramètres participent à la probabilité d'inflammation, pour représenter tous les cas possibles par souci d'exhaustivité, nous avons implémenté dans le code, plusieurs valeurs proposées par différentes sources (Browning, 1969 ; Purple Book, 2005 ; ARAMIS, 2006). Dans la plupart des cas, l'estimation de la probabilité se fait automatiquement par le programme, sur la base des informations collectées à l'étape « description de la zone industrielle étudiée » (*Voir* section 3.3.1.1). Toutefois, concernant les cas où l'estimation de la probabilité ne peut pas être faite automatiquement, nous avons émis des orientations afin de faciliter le choix de l'utilisateur. Par exemple, dans le cas de l'inflammation retardée, une modélisation de la dispersion atmosphérique est nécessaire pour connaître la position du nuage et pouvoir choisir la valeur à utiliser, selon la présence de sources d'inflammation, leurs efficacités (énergie apportée), *etc.*

Il appartient donc à l'utilisateur de choisir parmi les valeurs proposées, celle qui correspond le plus au cas étudié. D'autre part, nous préconisons une étude détaillée de l'environnement de la fuite, et une prise en compte précise de la localisation et de la nature des sources d'inflammations.

Probabilité d'inflammation immédiate

L'inflammation immédiate (P_{im}) dépend de la catégorie de la substance (inflammabilité et réactivité) et de son état physique, du terme source (type de fuite, quantité de la matière rejetée si le rejet est instantané, ou du débit de la fuite si celle-ci est continue, son environnement proche, *etc.*), l'existence de sources d'inflammation dans l'environnement immédiat de l'équipement défaillant, *etc.*

Pour le cas des rejets en phase gazeuse, nous avons retenu les valeurs proposées par le Purple Book, car elles tiennent compte du type de fuite, de la réactivité du gaz ainsi que du débit.

Le tableau 3.5 présente les valeurs proposées par le Purple Book.

Le tableau 3.6 présente des exemples de produits, en fonction de leur réactivité, fourni par le Purple Book.

Tableau 3.5 Probabilité d'inflammation directe des rejets gazeux (Purple Book, 2005)

Type de fuite		Réactivité du gaz	
Instantané (kg)	Continue (kg/s)	Faible	Moyenne et haute
< 1000	< 10	0,02	0,2
1000-10000	10-100	0,04	0,5
> 10000	> 100	0,09	0,7

Tableau 3.6 Réactivité de certaines substances (Purple Book, 2005)

Faible réactivité	Réactivité moyenne	Forte réactivité
1-chloro-2,3-époxypropane	But-1-ène	1-butanethiol*
1,3-dichloropropène	1,2-diaminoéthane	Acétylène
3-chloro-1-propène	1,3-butadiène	Benzène*
Ammoniac	Acétaldéhyde	Sulfure de carbone *
Bromométhane	Acétonitrile	Éthanethiol *
Monoxyde de carbone	Acrylonitrile	Oxyde d'éthylène
Chloroéthane	Butane	Formiate d'éthyle *
Chlorométhane	Chloroéthène	Formaldéhyde *
Méthane	Diméthylamine	Sulfure d'hydrogène*
Tétraéthylplomb	Éthane	Acrylate de méthyle *
	Éthène	Formiate de méthyle *
	Éthyléthanamine	Méthylloxirane *
	Acide formique	Naphta, Solvant *
	Propane	Tétrahydrothiophène*
	Propène	Acétate de vinyle *

Les substances pour lesquelles on ne dispose pas de suffisamment d'informations sont considérées comme étant fortement réactives. Celles-ci sont indiquées avec un astérisque (*).

Concernant les rejets en phase liquide, Browning (1969) propose plusieurs valeurs en fonction de l'environnement de la fuite. Le tableau 3.7 reprend les valeurs proposées dans le cas considéré favorable, c'est-à-dire : l'existence d'une cuve de rétention, de mesures de maîtrise du risque d'inflammation (Ex. : injection rapide de mousse,...), l'utilisation de matériel antidéflagrant.

Le Purple Book quant à lui indique la valeur de 0,065 pour les liquides ayant un point éclair inférieur ou égale à 21 °C et 0,01 pour ceux qui sont moins volatiles (point éclair compris entre

21 °C et 55 °C). Ces mêmes valeurs sont proposées par le BEVI (2009). Les valeurs proposées par le Purple book et BEVI figurent à la troisième colonne du tableau 3.7.

Les valeurs proposées par le Purple book sont utilisées comme valeurs par défaut.

Tableau 3.7 Probabilité d'allumage direct des liquides. $P_{éc}$: point éclair

Inflammabilité	Probabilité d'inflammation immédiate	
	Browning	Purple book et BEVI
Inflammable ($21^{\circ}\text{C} < P_{éc} \leq 55^{\circ}\text{C}$)	0,01	0,01
Facilement inflammable ($P_{éc} \leq 21^{\circ}\text{C}$)	0,1	0,065
Extrêmement inflammable ($P_{éc} < 0^{\circ}\text{C}$)	0,1	-

Probabilité de l'inflammation retardée

L'inflammation retardée dépend de la présence de sources d'allumage (point chaud, étincelle, *etc.*) à la position relative du nuage inflammable. Cette position relative est à son tour influencée par : les conditions météorologiques, la quantité de gaz rejetée ou évaporée (terme source), *etc.* Comme expliqué à la section précédente (section 3.3.1.3), afin de déterminer la position relative du nuage inflammable (coordonnées x et y), la simulation du rejet à l'aide d'un modèle de dispersion atmosphérique est indispensable.

Le Purple Book (Uijt de Haag et Ale, 2005) propose deux façons différentes pour calculer cette probabilité. La première est basée sur les sources d'allumage réelles et leurs localisations précises au sein et en dehors de l'établissement. Une équation est proposée pour estimer cette probabilité, elle l'exprime en fonction du temps, de l'efficacité des sources d'inflammation, et de la probabilité que la source soit présente au moment du passage du nuage. Le Purple Book propose aussi les valeurs calculées (en utilisant l'équation proposée) pour différentes sources pour une inflammation du produit dans un intervalle d'une minute.

La deuxième façon proposée par le Purple Book consiste à considérer que si l'inflammation du nuage n'a pas eu lieu à l'intérieur de l'établissement, elle se produira au moment où la taille du nuage est maximale.

La méthodologie MIMAH (Delvosalle *et al.*, 2006) ainsi que Vilchez *et al.* (2011) proposent des valeurs génériques pour la probabilité d'inflammation différée. Les valeurs suggérées

dépendent du type de la zone où se trouve le nuage inflammable. La différenciation entre les zones est basée sur la possibilité de présence de sources d'inflammation (Ex. : zone de stockage, zone de traitement, à l'extérieur de l'établissement,...) et prend en compte l'existence de dispositifs anti-déflagration (Ex. : zone de stockage avec (ou sans) dispositifs antidéflagrants).

Les valeurs suggérées par le projet ARAMIS ont été implémentées dans le code comme valeurs par défaut. Ces dernières sont présentées au tableau 3.8.

Cependant, un calcul plus précis peut être effectué selon les orientations du Purple Book, au cours de l'évaluation quantitative des risques (procédure QRA classique), puis utilisé pour l'analyse des effets dominos.

Tableau 3.8 Probabilité d'inflammation retardée en fonction des zones

Zones	Probabilité
Zone de procédés	
avec dispositif anti-déflagration	0,8
avec dispositif anti-déflagration sur toute la zone	0,1
sans dispositif anti-déflagration	1
Zone de stockage	
avec dispositif anti-déflagration	0,5
avec dispositif anti-déflagration sur toute la zone	0,1
sans dispositif anti-déflagration	1
Au-delà des frontières de l'établissement	1
Locaux techniques , unité de combustion, zone d'habitation, site en construction	1

Probabilité d'accélération du front de flamme

L'accélération du front de flamme dépend du niveau de congestion de la zone où se trouve le nuage inflammable après dispersion. Elle régit la probabilité d'occurrence d'une explosion de nuage (UVCE). Si la vitesse de propagation du front de flamme est suffisamment élevée pour engendrer une onde de surpression aérienne (déflagration), le phénomène dangereux observé est un UVCE.

Dans le cas contraire la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression et le phénomène dangereux est appelé feu de nuage. Il faut savoir qu'il s'agit du même phénomène

physique dans les deux cas (combustion d'un mélange gazeux inflammable), à la seule différence que l'UVCE provoque une onde de suppression.

Les valeurs proposées par Delvosalle *et al.* (2006) sont implémentées dans le code : 0,1 si le nuage se trouve dans une zone faiblement encombrée, 0,5 si la zone est moyennement encombrée et 0,67 si la zone est fortement encombrée.

Probabilité de défaillance à la demande des mesures de maîtrise des risques (PFD)

Il est important de rappeler qu'à ce stade de la méthode, les mesures de maîtrise des risques dites de prévention, donc qui peuvent agir sur les événements conduisant à la survenue du PhD (accident primaire), sont prises en compte lors de l'estimation de la fréquence d'occurrence des PhD. Par exemple, les systèmes d'isolation, les rideaux d'eaux conçus pour limiter la quantité de matière rejetée et sa dispersion, l'utilisation de mousse pour limiter l'évaporation des nappes, *etc.*

Dans certains cas la branche représentant un scénario sur lequel une barrière de sécurité dite de contrôle est mise en œuvre, peut être retirée de l'arbre d'événements, Ex. : enceinte de confinement séparée ou un réservoir récupérateur (*catch-tank*) pour les rejets gazeux ; le système de drainage souterrain pour les fuites de substances liquides,...

Cependant, les barrières de protection (Ex. : couronne d'arrosage,...) ne sont considérées que lorsqu'il s'agit de calculer la probabilité de propagation, car elles sont conçues pour éviter la propagation des accidents primaires en réduisant l'impact de leurs effets.

Fréquence d'occurrence des accidents primaires (phénomènes dangereux)

Dans l'hypothèse où, la fréquence d'occurrence annuelle de l'accident primaire est inférieure à $0,1 \text{ an}^{-1}$, son estimation peut se faire en utilisant l'équation 3.1 :

$$f_{\text{ap}} = f_{\text{LOC}} \times P_S \times P_{\text{CM}} \times \prod_{n=1}^m \text{PFD}_n \quad (3.1)$$

Avec :

- f_{ap} fréquence d'occurrence annuelle de l'accident primaire (Ex : feu de nappe, dispersion toxique, explosion,...).
- P_S probabilité du scénario, produit des probabilités des événements conduisant à l'accident primaire : inflammation direct (P_{im})/ retardée (P_{re}), accélération du front de flamme (P_{ex}).
- f_{LOC} fréquence d'occurrence annuelle de la perte de confinement.
- P_{CM} probabilité des conditions météorologiques considérées (si pertinent pour le scénario).
- PDF_n probabilité de défaillance à la sollicitation de la $n^{ème}$ mesure de maîtrise du risque, qui peut réduire la fréquence d'occurrence de l'accident primaire.
- m nombre total de mesures de maîtrise du risque qui peuvent agir sur ce dernier.

Afin de comprendre la démarche probabiliste utilisée, l'ensemble des hypothèses et explications sont disponibles dans le « Guide pour l'intégration de la probabilité dans les études de dangers » ainsi que dans les « Fiches pratiques : Intégration de la probabilité dans les études de dangers » fournis par l'INERIS (Deust, 2008 ; Deust *et al.*, 2008).

3.3.1.5 Calcul des effets physiques des phénomènes dangereux

Les phénomènes dangereux retenus pour cette étape sont ceux susceptibles de causer un effet domino : éclatement de capacité (BLEVE dans le cas de gaz liquéfiée sous pression), boule de feu, feu de nappe, jet enflammé, VCE et la dispersion de gaz toxique (Cozzani *et al.*, 2006a).

Les équipements qui stockent ou utilisent des produits uniquement toxiques (pas inflammables) ne sont pas considérés comme sources crédibles d'un scénario domino.

Par conséquent, le phénomène dangereux dispersion de nuage toxique n'est considéré que s'il est associé à un incendie ou une explosion qui peut engendrer un scénario domino direct.

L'intensité des effets physiques générés par les phénomènes dangereux cités ci-dessus peut être calculée en utilisant des outils commerciaux de calcul de conséquences (Ex. : Effets du TNO; Phast du DNV, *etc.*). Les modèles classiques d'évaluation des effets de phénomènes accidentels peuvent être utilisés comme alternatifs (Lees, 1996 ; CCPS, 2000 ; Van den Bosch

et Weterings, 2005 ; Assael et Kakosimos, 2010). Les effets physiques pris en compte sont les effets thermiques, les effets de surpression ainsi que les effets toxiques.

3.3.1.6 Identification des cibles et appréciation de la fréquence de l'effet domino

Identification des cibles potentielles

L'identification des cibles potentielles est effectuée en comparant les distances réelles aux distances d'effets, calculées pour les valeurs seuils prédéfinies. Dans le cas des scénarios : éclatement de capacité, boule de feu et jet enflammé (concernant le cas du jet enflammé pour plus de détails, voir le chapitre 4, section 4.1.2.5), la distance réelle est la distance qui sépare l'équipement source de l'équipement cible. Dans le cas des feux de nappe, elle représente la distance entre la nappe inflammable après épandage et l'équipement cible. Pour ce qui est des UVCE, elle est considérée comme étant la distance entre la frontière de la zone encombrée occupée par le nuage inflammable et l'équipement cible. Selon le cas étudié : diamètres des équipements, type de phénomène dangereux, *etc.* l'utilisateur peut choisir d'utiliser la distance centre-centre, (du centre de la source d'accident : équipement, nappe ou zone pour (UVCE) au centre de l'équipement cible), sinon la distance paroi-paroi, ou frontière-paroi lorsqu'il s'agit d'un UVCE, centre-paroi ou encore paroi-centre.

Dans le chapitre 4, les valeurs seuils proposées par Cozzani *et al.* (2006a) (Voir tableau 2.6) sont utilisées, toutefois, en principe d'autres valeurs seuils peuvent être utilisées à cette étape. Effectivement, les valeurs seuils d'escalade peuvent être facilement adaptées au site étudié, notamment dans le cas des seuils pour les scénarios d'incendies, car ils dépendent de plusieurs paramètres spécifiques au site mais aussi aux scénarios considérés. Par exemple, la durée du scénario, le temps nécessaire à l'intervention des pompiers, *etc.* Ils peuvent aussi varier d'un équipement à un autre au sein du même site (Ex. : présence de mesures de maîtrise des risques, l'usure de l'équipement, vieillissement, fatigue).

Les équipements qui reçoivent des effets physiques avec des intensités supérieures aux valeurs seuils sont identifiés comme cibles potentielles.

Estimation de la probabilité d'escalade pour chaque cible

Les équipements considérés comme cibles potentielles sont sélectionnés pour un calcul précis de l'intensité des effets physiques reçus, en considérant les distances réelles qui les séparent de la source de l'accident primaire, ainsi que les conditions météorologiques.

La probabilité d'**escalade** est déterminée en utilisant des modèles de vulnérabilité spécifiques « fonction Probit » (Cozzani et Salzano, 2004; Cozzani *et al.*, 2006b; Landucci *et al.*, 2009). Les détails concernant ces modèles de vulnérabilité sont présentés au Chapitre 1 (Voir section 1.4.3). Les paramètres spécifiques au site étudié peuvent être introduits dans la procédure de calcul de la probabilité d'escalade due aux incendies, comme le suggère Landucci *et al.* (2009, 2015) (Voir chapitre 1 section 1.4.3).

Pour l'estimation de la probabilité d'escalade, l'équation 3.2 proposée par Finney (1971) est utilisée, celle-ci établie une relation de type gaussien entre la probabilité d'escalade (P_{ij}) et la fonction Probit.

$$P_{ij} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y_{ij}-5} \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] du \quad (3.2)$$

Avec :

P_{ij} probabilité d'escalade ($0 \leq P_{ij} \leq 1$).

Y_{ij} fonction Probit.

$$u = \frac{V - \mu}{\sigma} \quad (3.3)$$

Où V est une variable indépendante qui représente l'intensité de l'effet reçu « la dose » ; $\mu = 5$ et $\sigma = 1$ représentent respectivement la moyenne et la variance.

Une approximation numérique pour résoudre l'équation 3.2 a été proposée par Vilchez *et al.* (2001), l'équation qui en résulte est complexe et introduit des difficultés numériques, sa solution analytique comporte une erreur d'approximation de l'ordre de $1,6 \times 10^{-3}$. C'est pourquoi, nous avons implémenté l'équation 3.4 dans le programme de calcul (Molina *et al.*, 2013). Cette dernière comporte une erreur d'approximation de l'ordre de 1×10^{-3} .

$$P_{ij} = \frac{1,005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{ij} - 5,004}{0,6120}\right)}} \quad (3.4)$$

P_{ij} probabilité d'escalade, probabilité qu'un équipement j soit endommagé suite à un accident causé par l'équipement i .

Y_{ij} fonction Probit.

Afin de limiter l'étude aux scénarios d'escalade pertinents, trois seuils sont définis. La valeur seuil de 10^{-5} est utilisée pour la probabilité d'escalade; un seuil de 10^{-12} événements/an est considéré pour la fréquence des scénarios dominos de premier niveau (un seul enchaînement) et finalement le seuil de 10^{-13} est considéré pour la fréquence d'occurrence des scénarios dominos de deuxième niveau.

Les scénarios qui ont une probabilité d'escalade ou une fréquence d'occurrence inférieure aux seuils cités ci-dessus ne seront pas considérés dans l'étude.

Estimation de l'intensité des dommages causés

Le niveau d'endommagement des équipements cibles impliqués dans des scénarios dominos jugés crédibles d'après l'étape précédente, doit être estimé afin de quantifier les conséquences de l'impact.

Le niveau d'endommagement peut être associé à l'intensité du LOC causé sur la cible.

Cozzani et Salzano (2004) ont été les premiers à proposer un cadre conceptuel pour décrire l'intensité des LOC suite à un impact. Ils ont associé l'intensité des LOC dus aux effets de surpression à deux niveaux d'endommagement :

- Niveau d'endommagement 1 : dommages légers sur la structure ou sur les équipements auxiliaires, associés à une LOC de type G3 (*Voir* tableau 3.1), résultant en une perte de confinement modérée.
- Niveau d'endommagement 2 : dommages sévères ou catastrophiques, ou encore effondrement total de la structure (ruine), associés à un rejet instantané de l'ensemble du contenu de l'équipement (G1/G2 *Voir* tableau 3.1).

La même approche a été suivie pour évaluer l'intensité des LOC suite à une exposition aux effets thermiques (Cozzani *et al.*, 2006b). Les catégories d'intensité de LOC citées ci-dessus ont été utilisées pour évaluer les dommages causés sur les équipements impactés.

Par la suite, Mingguang et Juncheng (2008) ont suggéré une séparation entre les pertes de confinement de type G1 et G2 dus aux effets de surpression, sur la base de l'approche proposée par Cozzani et Salzano (2004).

Calcul de la fréquence de l'effet domino

La fréquence des scénarios effets dominos est calculée en combinant la fréquence de l'accident primaire calculé à l'étape 4 de la méthode (*Voir* figure 3.2 et la section 3.3.1.4) et la probabilité d'escalade.

Dans l'hypothèse où l'accident primaire (accident survenu sur l'équipement i) et l'accident secondaire (accident survenu sur l'équipement j), ne peuvent pas avoir lieu simultanément, en dehors du cadre d'un effet domino. La fréquence du phénomène de l'effet domino peut être exprimée comme suit :

$$F_{ed} = f_{ap} \times P_{ij} \times \prod_{n=1}^m PFD_n \quad 3.5$$

Avec :

f_{ap} fréquence d'occurrence de l'accident primaire (an^{-1}).

P_{ij} probabilité d'escalade suite à l'accident primaire.

PFD_n probabilité de défaillance à la sollicitation de la $n^{ème}$ barrière de sécurité, qui peut limiter les conséquences de l'effet physique considéré.

m nombre totale de mesures de maîtrise du risque conçues pour agir ce dernier.

Cette hypothèse est permise parce que les fréquences d'occurrence de l'accident primaire et secondaire sans l'apparition d'effet domino sont suffisamment faibles. De plus, dans l'industrie des procédés, la défaillance simultanée de plusieurs équipements n'est considérée possible que dans le cas d'une catastrophe naturelle, et cela a été abordé par plusieurs chercheurs dans ce qui est connu comme les accidents Na-Tech.

3.3.2 Phase 2 : Identification des équipements critiques

Cette phase est réalisée en six étapes principales et vise à fournir une hiérarchisation des équipements les plus dangereux par rapport au danger d'effet domino. Une fois la hiérarchisation des séquences accidentelles (c'est-à-dire les chemins de propagation) est effectuée, les équipements impliqués dans ces dernières sont ensuite hiérarchisés. Certains détails de la procédure sont illustrés à la deuxième phase de la figure 3.2.

Définition d'une échelle de cotation des risques (gravité-coût) :

Trois échelles de cotation sont suggérées pour l'évaluation du coût des accidents dominos, en fonction de leur gravité : gravité des conséquences sur l'homme, gravité des conséquences sur les équipements, et gravité des conséquences sur les biens. En fonction de ces suggestions, chaque entreprise peut définir ses propres échelles, sinon les critères généraux (orientations) fournis ci-dessous peuvent être appliqués.

Préjudices causés à l'homme : les dommages causés à l'homme peuvent aller d'une incapacité temporaire légère jusqu'au décès de la victime. Dans le but d'attribuer un coût à ces préjudices, les coûts moyens des sinistres fixés par l'Arrêté ministériel du 27 novembre 2014, peuvent être appliqués. Ce dernier indique les coûts moyens des catégories d'incapacité temporaire et d'incapacité permanente, calculés par grands secteurs d'activité, au niveau national.

Toutefois, ces coûts peuvent être adaptés selon la culture de l'entreprise, pour tenir compte des spécificités des sites, mais aussi pour répondre aux exigences réglementaires du pays d'implantation de l'entreprise.

Le tableau 3.9 montre les coûts moyens des sinistres de gravité comparable, calculés pour le secteur d'activité : industries de la chimie, du caoutchouc et de la plasturgie. Les barèmes 2015 des coûts moyens d'incapacité temporaire et d'incapacité permanente pour l'ensemble des secteurs d'activité sont présentés à l'Annexe V.

Tableau 3.9 Coût moyens des différentes catégories d'incapacité pour les industries de la chimie, du caoutchouc et de la plasturgie

Catégories d'incapacité		Coûts moyens (€)
Incapacité temporaire	Sans arrêt de travail ou arrêts de travail de moins de 4 jours	382
	Arrêts de travail de 4 jours à 15 jours	569
	Arrêts de travail de 16 jours à 45 jours	1 891
	Arrêts de travail de 46 jours à 90 jours	5 216
	Arrêts de travail de 91 jours à 150 jours	9 668
	Arrêts de travail de plus de 150 jours	33 993
Incapacité Permanente (IP)	IP de moins de 10 %	2 117
	IP de 10 % à 19 %	50 345
	IP de 20 % à 39 %	100 223
	IP de 40 % et plus ou décès de la victime	538 610

Dommmages causés aux équipements : le coût total de l'endommagement d'un équipement suite à un accident est fonction du coût de l'équipement vide et celui de la substance qu'il contient. Selon la gravité des dommages causés sur les cibles évaluées lors des étapes précédentes, des coefficients peuvent être définis afin d'estimer le coût **total** des dommages. Par exemple, dans le cas d'une rupture catastrophique, donc LOC de type G1, le coût de l'équipement endommagé peut être multiplié par trois, afin de considérer le coût du nettoyage du site, l'achat d'un nouvel équipement et son installation. Le tableau 3.10 représente les coefficients qui permettent de calculer le coût total de l'endommagement d'un équipement donné, en fonction de l'intensité des LOC (niveau d'endommagement).

Les coûts des équipements (vides) peuvent être estimés à partir du site internet : *Matches' Process Equipment Cost Estimates* (<http://www.matche.com/equipcost/Default.html>).

Tableau 3.10 Coefficients attribués pour chaque LOC

Type de LOC causé sur la cible (niveau d'endommagement)	Coefficient
G1 : rupture catastrophique	3
G2 : rejet du contenu en 10 min	2
G3 : brèche de 10 mm de diamètre	0,5

Dommmages causés aux biens : dans le cas où des biens se trouvent dans la zone impactée par un scénario donné, un coût peut être estimé sur la base des dommages subis par la structure. Le tableau 3.11 présente les seuils réglementaires fixés par l'Arrêté du 29 septembre 2005 pour les études de dangers en France. Les valeurs spécifiques à chaque pays peuvent être utilisées pour estimer les dommages sur la structure.

Plus d'informations concernant le type de dégâts observés et les pourcentages de dommages estimés en fonction des seuils présentés au tableau 3.11 sont données à l'Annexe II.

Tableau 3.11 Seuil d'endommagement des structures

Effets physiques	Seuils	Dommages causés
Surpression (mbar)	20	Destructions significatives de vitres
	50	Dégâts légers sur les structures
	140	Dégâts graves sur les structures
	200	Seuil des effets dominos
	300	Dégâts très graves sur les structures
Effet thermique (kW/m ²)	5	Destructions de vitres significatives
	8	Dégâts graves sur les structures (seuil des effets dominos)
	16	Dégâts très graves sur les structures, hors structures béton (en cas d'exposition prolongée)
	20	Dégâts très graves sur les structures béton
	200	Ruine du béton en quelques dizaines de minutes

3.3.2.1 Estimation de la criticité de chaque scénario domino

Lors de cette étape, la gravité des chemins de propagation impliquant trois équipements (a, b et c), causés par deux enchaînements de phénomènes, est estimée. Deux enchaînements sont considérés pour permettre de prendre en compte les scénarios dominos de 1^{er} et de 2^{ème} niveau, car d'après le retour d'expérience sur les accidents passés ayant fait intervenir des effets dominos (Vallée *et al.*, 2002 ; Darbra *et al.*, 2010 ; Hemmatian *et al.*, 2014), une à deux cascades de phénomènes accidentels sont observées dans la grande majorité des accidents (Ex. : 94% des cas pour les accidents analysés par Vallée *et al.*).

Après le calcul de l'intensité des effets physiques et de la vulnérabilité des cibles, un coût est attribué en fonction des échelles définies précédemment à la 7^{ème} étape de la procédure (Voir figure 3.2). Premièrement, la gravité du scénario domino de 1^{er} niveau, donc du premier enchaînement (accident primaire et secondaire, étape 8.1 de la figure 3.2) est calculée en

traduisant les dommages en pertes financières (coûts). Deuxièmement, la gravité du deuxième enchaînement (accident tertiaire, étape 8.2 de la figure 3.2) est calculée. Finalement, une agrégation des deux gravités est réalisée pour obtenir la gravité globale de chaque scénario "k" (étape 8.3 de la figure 3.2).

L'estimation de la gravité d'éventuels préjudices infligés à l'homme est réalisée en utilisant les fonctions Probit (Green Book, 1992), par exemple à l'aide du logiciel EFFECTS où l'ensemble des modèles présentés dans le Green Book sont implémentés. Les dommages causés par la dispersion de toxiques sont considérés à cette étape.

En France, en ce qui a trait aux conséquences (dégâts) sur les structures, les seuils des dommages prédéfinis (*Voir* tableau 3.11) sont utilisés pour estimer la gravité des dommages et puis attribuer un coût selon l'approche proposée par les autorités compétentes. Le guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs, fourni par le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, présente une approche pour l'estimation des coûts des dommages matériels potentiels aux tiers.

Le logiciel EFFECTS permet également l'estimation de la gravité des dommages causés aux structures et donc peut être utilisé.

La gravité des dommages causés aux équipements est obtenue à l'issue des étapes précédentes (*Voir* estimation de l'intensité des dommages causés, page 117).

Enfin, la gravité totale d'un scénario donné "k" où la séquence domino « a → b → c » est observée, est obtenue en additionnant les gravités (coûts) des dommages causés aux hommes ($G_{k, \text{hommes}}$), aux équipements ($G_{k, \text{équipements}}$) et aux biens ($G_{k, \text{biens}}$) :

$$G_{k, abc} = G_{k, \text{hommes}} + G_{k, \text{équipements}} + G_{k, \text{biens}} \quad 3.6$$

Une fois la gravité des scénarios et leurs fréquences estimées, la criticité de chaque scénario est calculée avec l'équation 3.7 :

$$C_{k,abc} = G_{k,abc} \times f_{k,abc} \quad 3.7$$

k scénario domino où la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » a été observée.

a, b et c équipements impliqués dans le scénario domino “ k ”.

$C_{k,abc}$ criticité de la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » pour le $k^{\text{ème}}$ scénario.

$G_{k,abc}$ gravité de la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » pour le scénario “ k ”.

$f_{k,abc}$ fréquence annuelle de la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » pour le scénario “ k ”.

3.3.2.2 Attribution d'un facteur de danger pour chaque séquence domino

Dans le but de hiérarchiser les séquences dominos, à cette étape de la méthode (*Voir* étape 10 de la figure 3.2), un facteur de danger est estimé pour chaque séquence domino, en utilisant l'équation 3.8 :

$$DF_{abc} = \sum_{k=1}^p C_{k,abc} \quad 3.8$$

DF_{abc} facteur de danger de la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ ».

p nombre total d'apparition de la séquence accidentelle « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » ($\sum k$).

$C_{k,abc}$ criticité de la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » pour le $k^{\text{ème}}$ scénario.

k scénario où la séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » a été observée.

3.3.2.3 Hiérarchisation des équipements

Deux hiérarchisations différentes des équipements impliqués dans les séquences dominos sont fournies (étape 12 de la figure 3.3).

Dans le but d'identifier les équipements qui ont la plus forte propension à initier un effet domino, la première hiérarchisation est effectuée en se focalisant sur les équipements initiateurs des séquences dominos (l'équipement “ a ” de chaque séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ »). Cela revient donc à identifier les sources de scénarios de cascade les plus dangereuses, afin de pouvoir agir sur ces dernières à l'aide de MMR préventives est donc éliminer le risque à

la source. Cependant le risque zéro n'existe pas, c'est pourquoi une deuxième hiérarchisation est proposée.

La deuxième hiérarchisation concerne les équipements centraux des séquences accidentelles (l'équipement "b" de chaque séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ ») et permet d'identifier les équipements les plus dangereux par rapport à la prorogation des accidents. Elle vise ainsi à identifier les équipements sur lesquels la mise en œuvre de MMR protectives permettrait d'éviter ou au moins de limiter la propagation des accidents primaires.

Ces deux hiérarchisations se font sur la base d'un facteur de danger, calculé à partir des facteurs de danger des séquences dominos dans lesquelles les équipements sont impliqués.

3.4 Conclusion

Dans le but de faciliter la prise de décision concernant la prévention des effets dominos, une méthodologie simple et efficace a été développée pour l'identification et la hiérarchisation des chemins de propagation des accidents. Les résultats finaux du modèle sont présentés sous forme d'une hiérarchisation quantitative des équipements impliqués dans les scénarios dominos.

Cette hiérarchisation donne une idée claire des dangers que représentent les équipements par rapport aux accidents en cascade, en précisant si la dangerosité de l'équipement provient de sa capacité à initier ou à propager un effet de cascade.

Contrairement aux autres outils de hiérarchisation, l'approche proposée dans ce chapitre considère les positions des équipements ainsi que celles des sources d'accidents, et fournit des résultats quantitatifs en tenant compte des effets des conditions météorologiques et des mesures de maîtrise des risques existantes ou proposées.

L'outil est non seulement capable de déterminer l'équipement le plus dangereux par rapport aux effets dominos, mais aussi d'aider à la prise de décision concernant la définition et la mise en place des mesures de maîtrise des risques.

CHAPITRE 4

APPLICATIONS À DES ÉTUDES DE CAS

Ce dernier chapitre présente deux exemples d'application de la méthode proposée. Dans un premiers temps, nous présentons une expérimentation de l'outil, réalisée sur un cas simplifié, afin de faciliter la compréhension du fonctionnement de l'outil. Dans un deuxième temps une simulation d'accidents sur le parc de réservoirs de l'entreprise X permet d'illustrer les apports opérationnels de l'outil, de vérifier la pertinence et la cohérence des résultats mais aussi de découvrir les inconvénients et repérer les points à améliorer.

4.1 Cas d'étude simplifié

Dans le but de décrire l'outil proposé et d'illustrer son potentiel, nous présentons dans ce qui suit une étude d'un cas simplifié. Cette première étude de cas a été réalisée sur une zone de stockage d'hydrocarbure. La figure 4.1 montre la topologie de la zone d'étude.

4.1.1 Description de l'exemple d'application

Pour obtenir une appréciation réaliste des effets dominos, la topographie de la zone de stockage analysée a été arbitrairement imaginée sur la base de topographies de sites industriels existants (zones de stockages).

La localisation des équipements est donnée dans le tableau 4.1. Elle est représentée par les coordonnées X et Y des équipements dans la zone d'étude, en considérant l'équipement T1 comme étant l'origine du repère.

La zone de stockage consiste en deux réservoirs sous pression (T1 et T2) et six réservoirs de stockage atmosphériques (T3-8), les caractéristiques des réservoirs analysés ainsi que les substances qu'ils contiennent sont présentées dans le tableau 4.2.

La quantité de matière contenue dans chacun des équipements est estimée en considérant un taux de remplissage de 80%.

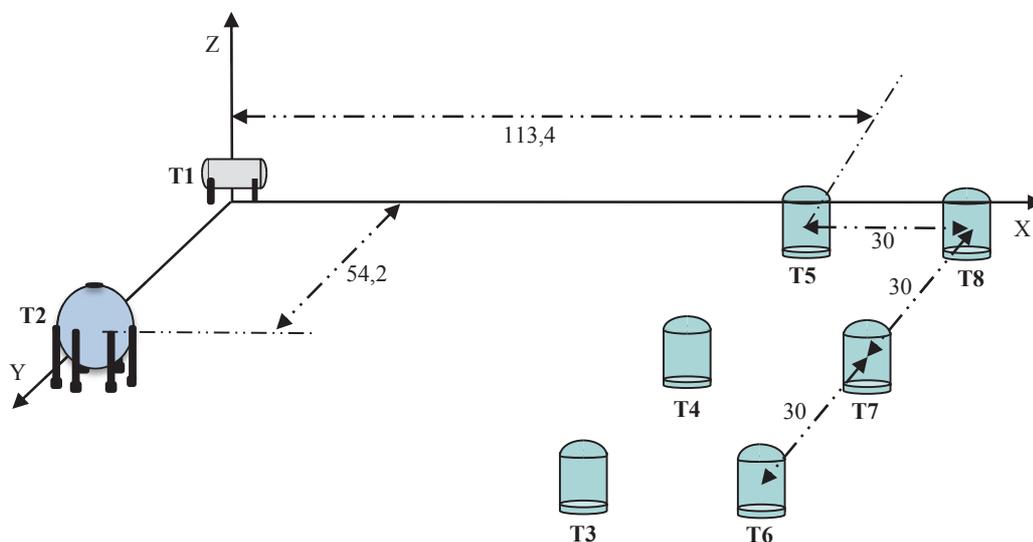


Figure 4.1 Topographie (en m) de la zone de stockage considérée pour l'étude du cas simple

Tableau 4.1 Coordonnées (en m) des équipements considérés dans le cas d'étude

Capacité	X	Y
T1	0,00	0,00
T2	0,00	54,20
T3	113,88	64,99
T4	113,88	35,02
T5	113,88	4,51
T6	145,33	64,99
T7	145,33	35,02
T8	145,33	4,51

Tableau 4.2 Données relatives aux capacités considérées pour le cas d'étude

Capacité	Type	V (m ³)	D (m)	H (m)	Matière	Phase de stockage
T1	Sous pression (cylindre horizontal)	250	3,8	4,8	Propane	Diphasique
T2	Sous pression (sphère)	1766	15,0	16,0	GPL	Diphasique
T3-8	Atmosphérique (cylindre vertical à toit fixe)	1030	9,0	16,2	Ethanol	Liquide

V: Volume; D: diamètre; H: hauteur; GPL: Gaz de pétrole liquéfié.

Un système de protection contre les incendies (sprinklers : couronnes d'arrosage) conçu pour protéger les équipements des feux externes (limiter la propagation des incendies) est considéré pour l'ensemble des équipements de la zone de stockage étudiée. Une cuve de rétention d'une surface de 900 m² ainsi qu'un système de prévention et de lutte contre les feux de nappe sont également considérés pour les équipements atmosphériques (T3-8).

Le système de prévention et de lutte contre les feux de nappe consiste en l'utilisation de mousse pour limiter au maximum l'apport en oxygène de façon à maintenir la teneur de ce dernier dans le mélange inflammable (air-liquide) au-dessous de la concentration nécessaire à l'inflammation de la nappe (*prévention de l'inflammation*). En outre, ce même système permet d'étouffer le feu via le même procédé, en réduisant l'alimentation du feu en oxygène (air) si l'inflammation de la nappe est survenue (*lutte contre la propagation*).

En ce qui a trait à la probabilité de défaillance à la sollicitation (PFD) des mesures de maîtrise des risques (MMR) citées ci-dessus, la valeur de référence de 5×10^{-2} est supposée pour les systèmes d'injection de mousse des réservoirs atmosphériques, ainsi que les sprinklers des réservoirs de stockage sous pression. Tandis que la valeur de $2,38 \times 10^{-2}$, est supposée pour la PFD des sprinklers des réservoirs atmosphériques.

Trois ensembles de conditions météorologiques (classe de stabilité, direction et vitesse du vent,...) ont été choisis pour le calcul des conséquences des rejets (*Voir* tableau 4.3).

Tableau 4.3 Conditions météorologiques utilisées pour le cas d'étude

Conditions	Ensemble	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3
Probabilité		0,2	0,3	0,5
Classe de stabilité		B	D	D
Vitesse du vent (m/s)		2	5	8
Direction du vent		O (270°)	NO (313°)	S (180°)
T° et pression (°C; bar)		20; 1,013	20; 1,013	20; 1,013
Humidité relative (%)		47	47	47
Flux de rayonnement solaire (kW/m ²)		500	500	500

O: ouest; NO: nord-ouest; S: sud.

4.1.2 Application de la méthode

Comme expliqué dans le chapitre 3, la méthodologie développée consiste en 12 étapes (*Voir* figure 3.2). Dans ce paragraphe, nous allons réaliser les 12 étapes de la méthode sur le cas d'étude décrit dans la section 4.1.1. Cependant, étant donné que toutes les étapes ont été précédemment décrites dans le chapitre 3 nous reprenons uniquement les étapes clés.

4.1.2.1 Description de la zone industrielle étudiée

La description de la zone de stockage est réalisée sous Excel® à l'aide d'interfaces utilisateurs simples (*Voir* Annexe III). Le but de cette étape est de renseigner les données d'entrée nécessaires à l'exécution des programmes de calcul qui réalisent la plupart des opérations requises et qui constituent donc le cœur de l'outil proposé.

Quatre tableaux sont renseignés. Ils concernent les équipements, les substances qu'ils contiennent, les conditions météorologiques, l'homme et les biens. Nous avons anticipé cette première étape dans la section 4.1.1, afin d'introduire le cas étudié. Toutefois, nous reprenons dans cette section certains détails concernant les équipements et les substances contenues (*Voir* tableau 4.4).

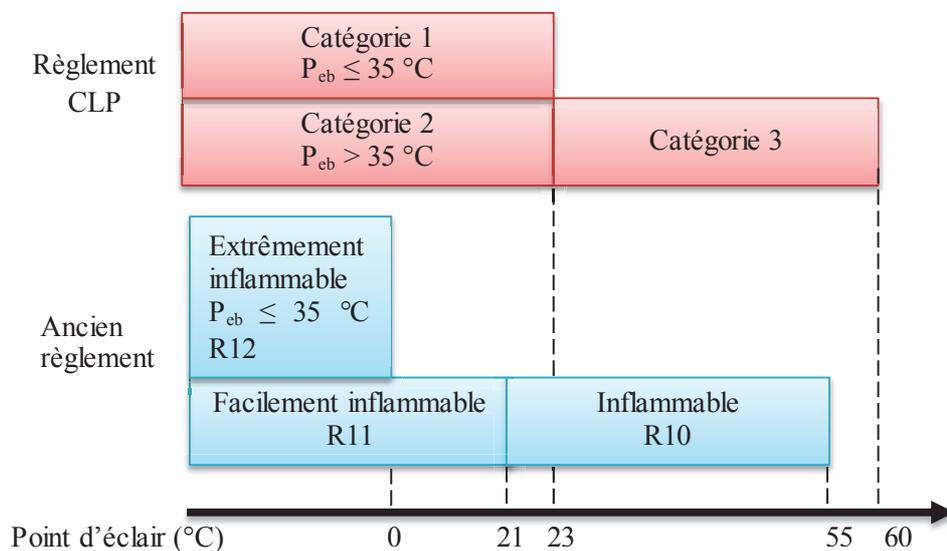
Il est important de rappeler que la classe de danger d'une substance ou d'un mélange est non seulement liée aux caractéristiques physiques des substances, notamment le point d'éclair et le point d'ébullition, la valeur de la limite inférieure d'explosivité (LIE), l'étendue de leur domaine d'explosivité, mais aussi aux conditions de stockage ou d'utilisation. Comme il a été évoqué précédemment, si une substance classée liquide inflammable de catégorie 3 aux conditions normales de température et de pression, est stockée ou utilisée sous certaines conditions qui peuvent provoquer des accidents graves (Ex. : haute pression et haute température), la substance peut être classée dans la classe liquide inflammable de catégorie 2 (facilement inflammable selon l'ancienne réglementation (directives 67/548/CEE et 1999/45/CE modifiées)).

De même, on peut classer une substance inflammable de catégorie 2 (facilement inflammable) dans la catégorie 1 (extrêmement inflammable) si la température de stockage est supérieure à la température d'ébullition à pression atmosphérique.

Afin de mieux illustrer ce passage possible entre les catégories de dangers des liquides inflammables, la figure 4.2 présente une comparaison des valeurs seuils utilisées pour la classification des liquides inflammables.

Tableau 4.4 Résumé des données d'entrée utilisées. GPL : Gaz de pétrole liquéfié.

N° équipement		1	2	3 à 8
Capacité	Identifiant	T1	T2	T3-8
	Type	Sous pression	Sous pression	Atmosphérique
	Forme	Cylindre horizontal	Sphère	Cylindre vertical à toit fixe (toit conique)
	Diamètre (m)	3,80	15,00	9,00
	Hauteur (m)	4,80	16,00	16,20
	Pression de stockage (bar)	8,38	8,38	Atmosphérique
	Pression de calcul (bar)	25,00	25,00	0,18
	Température de stockage (°C)	20,00	20,00	20,00
Substance	Nom	Propane	GPL	Ethanol
	Phase	Diphasique	Diphasique	Liquide
	Quantité (t)	99,79	705,01	651,22
	Catégorie des substances	Extrêmement inflammable	Extrêmement inflammable	Très inflammable



P_{eb} : point d'ébullition.

Figure 4.2 Comparaison des valeurs seuils pour la classe de danger liquides inflammables

4.1.2.2 Sélection des équipements sources

Cette étape consiste à sélectionner les équipements critiques susceptibles de provoquer un accident capable de se propager aux équipements voisins. Cette sélection se fait sur la base de plusieurs critères : la quantité de matière et sa catégorie de danger, le type d'équipement et sa position dans la zone (coordonnées x et y), *etc.*

Vu le nombre d'équipements présents sur la zone d'étude et leur type (réservoirs de stockage de matières inflammables), il n'est pas nécessaire de recourir aux méthodes citées dans la section 3.3.1.2 du chapitre 3. En effet, les équipements T1, T2 et T4 sont choisis comme sources primaires sur lesquelles on simule les événements redoutés centraux (perte de confinement).

Les deux équipements sous pression (T1 et T2) sont sélectionnés à cause du risque inhérent aux équipements sous pression, mais aussi de la dangerosité des produits qu'ils contiennent. Cependant, concernant les équipements atmosphériques (T3-8), puisqu'ils sont équipés de cuves de rétention qui limitent l'épandage du liquide inflammable, et en tenant compte de la

distance qui les sépare, seul l'équipement T4 a été sélectionné comme source crédible. Étant donné que sa position est centrale et que les effets physiques générés par les accidents pouvant survenir sur les autres équipements atmosphériques sont identiques à ceux générés par l'équipement T4, la seule différence est que le centre des effets change (coordonnées du centre des cuves de rétention pour les feux de nappe et centre de l'équipement pour les éclatements de capacité).

4.1.2.3 Sélection et caractérisation des pertes de confinement

Étant donné les distances entre les équipements (zone de stockage), la perte de confinement de classe G3 : « *rejet continu par une brèche de diamètre équivalent de 10 mm* », n'est pas considérée comme étant grave. En effet, comme indiqué dans le tableau 3.4 les phénomènes dangereux pouvant survenir suite à un tel ERC en prenant en compte les catégories de dangers des substances et les types d'équipements, sont :

1. Pour les équipements T3-8, un feu de nappe mineur ;
2. Pour les équipements T1 et T2, un jet enflammé.

Par conséquent, cet ERC n'est pas sélectionné, car, pour ce qui est des équipements atmosphériques (T3-8), en plus du fait que le feu de nappe est mineur, il est contenu dans une cuve de rétention. Pour les équipements sous pression, le phénomène dangereux jet enflammé n'est pas capable d'endommager les équipements voisins, puisque l'intensité des effets thermiques n'atteint pas les valeurs seuils d'endommagement aux distances séparant l'équipement source des cibles potentielles.

Lors de la caractérisation des scénarios de pertes de confinement, on détermine la phase du rejet son débit massique, durée de la fuite, diamètre, direction, *etc.* puis on sélectionne parmi les mesures de sécurité existantes celles qui peuvent agir sur l'ERC en question. Selon le temps de réponse des mesures de maîtrise des risques, celles-ci sont prises en compte ou non. Effectivement, si l'on considère un LOC de type G2 (*Rejet continu de l'ensemble du produit contenu en dix minutes à un débit constant*) les barrières de sécurité ayant un temps de réponse supérieur ou égal à 10 min ne seront pas considérées.

La caractérisation des scénarios accidentels s'effectue en deux parties, la première est réalisée par l'utilisateur vu qu'il s'agit de choisir les scénarios à simuler et les paramètres que les outils de calcul ne peuvent pas déterminer, tel que la phase du rejet, sa direction, hauteur de la brèche, la considération ou non des mesures de prévention et de protection. Dans cet exemple nous considérons que la phase de rejet correspond à la phase de stockage, c'est-à-dire : diphasique pour les équipements T1 et T2 et liquide pour l'équipement T4.

Les attributs des scénarios de LOC ont été choisis pour représenter les cas où la propagation par effet domino est possible (pire des cas) : rejet *horizontal* de l'*ensemble* du contenu, avec une brèche (cas de rejet continu) située *en bas* de la capacité (à hauteur de zéro mètre par rapport au fond du réservoir).

En ce qui a trait aux mesures de maîtrise des risques, l'ensemble des mesures mentionnées dans la section 4.1.1 sont prises en compte. Toutefois, dans le but d'étudier leur impact sur la propagation des accidents, nous considérons deux cas distincts : un premier cas où les mesures de maîtrise des risques interviennent de façon ordinaire avec les PFD annoncées dans la section 4.1.1 et un deuxième cas, où, on les considère inexistantes ce qui revient à attribuer la valeur 1 à leur PFD.

La deuxième partie de la phase de caractérisation, est réalisée à l'aide du logiciel EFFECTS (TNO). Toutefois, d'autres outils de calcul peuvent être utilisés pour quantifier les termes sources et évaluer le diamètre de la brèche, le débit massique de la fuite ainsi que la durée du rejet, et la position relative du nuage/nappe inflammable.

Le tableau 4.5 représente les caractéristiques citées ci-dessus, obtenues à partir du logiciel EFFECTS, pour les fuites de type G2 (*Voir* tableau 3.1). Les coordonnées du centre de la nappe issue de l'épandage du contenu de l'équipement T4 correspondent au centre de la cuve de rétention, qui coïncide avec celui de l'équipement T4.

Tableau 4.5 Caractéristiques des rejets continus de classe G2

Équipement	T1	T2	T4
Diamètre de la brèche (mm)	112,27	295,27	340,42
Débit massique (kg/s)	166,43	1175,70	1146,80
Durée de la fuite (s)	997,59	1006,20	1122,00

Pour ce qui est des nuages inflammables formés suite à la dispersion atmosphérique du contenu des équipements T1 ou T2, on ne s'intéresse pas à leurs coordonnées. Étant donné qu'ils ne peuvent pas engendrer des phénomènes dangereux pouvant propager l'accident (explosion de nuage), car ils n'existent pas de zone encombrée dans la zone de stockage étudiée.

Le phénomène qui peut survenir est un feu de nuage qui ne peut propager l'accident qu'en cas de présence de réservoirs atmosphériques à toit flottant.

4.1.2.4 Affectation d'un arbre d'événements pour chaque ERC

L'attribution d'un arbre d'événements pour représenter l'évolution des scénarios accidentels définis dans l'étape précédente (section 4.1.2.3) permet d'identifier tous les phénomènes dangereux possibles à associer à l'ERC considéré et de déterminer leurs fréquences d'occurrence. Le tableau 4.6 illustre les résultats obtenus pour les équipements T1 et T2 pour les trois ensembles de conditions météorologiques définies au tableau 4.3. Tandis que, le tableau 4.7 représente les résultats obtenus pour l'équipement T4, à la fois, en tenant compte des mesures de maîtrise des risques, puis en supposant qu'aucune mesure de maîtrise des risques (MMR) active (sprinklers et injecteur de mousse) existe (PFD=1). La comparaison des résultats de la prise en compte ou non des MMR est faite uniquement pour l'équipement T4, car parmi les MMR considérées, il n'y a que le système d'injection de mousse qui peut agir sur les accidents primaires de type feu de nappe (*Voir* section 4.1.1), et ce dernier ne peut être provoqué que par l'équipement T4. Les autres MMR agissent sur la propagation des accidents en limitant leurs conséquences et donc ne sont pas considérées lors du calcul des fréquences des accidents primaires.

Tableau 4.6 Phénomènes dangereux à associer aux ERC considérés pour les équipements T1 et T2 et leurs fréquences d'occurrence (an^{-1})

ERC et PhD		CM	CM1	CM2	CM3
G1	BLEVE		$5,00 \times 10^{-7}$	$5,00 \times 10^{-7}$	$5,00 \times 10^{-7}$
	Boule de feu		$3,50 \times 10^{-7}$	$3,50 \times 10^{-7}$	$3,50 \times 10^{-7}$
	Feu de nappe mineur		$7,00 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-7}$	$1,75 \times 10^{-7}$
	UVCE		$6,00 \times 10^{-9}$	$9,00 \times 10^{-9}$	$1,50 \times 10^{-8}$
	Feu de nuage		$5,40 \times 10^{-8}$	$8,10 \times 10^{-8}$	$1,35 \times 10^{-7}$
G2	Jet enflammée		$7,00 \times 10^{-8}$	$1,05 \times 10^{-7}$	$1,75 \times 10^{-7}$
	UVCE		$3,00 \times 10^{-9}$	$4,50 \times 10^{-9}$	$7,50 \times 10^{-9}$
	Feu de nuage		$2,70 \times 10^{-8}$	$4,05 \times 10^{-8}$	$6,75 \times 10^{-8}$

CM : ensemble de conditions météorologiques (Voir tableau 3.4)

Tableau 4.7 Phénomènes dangereux à associer aux ERC considérés pour les équipements T4 et leurs fréquences d'occurrence (an^{-1}).

ERC et PhD		Avec système d'injection de mousse			Sans système d'injection de mousse		
		CM1	CM2	CM3	CM1	CM2	CM3
G1	Éclatement de capacité	$5,00 \times 10^{-6}$					
	Feu de nappe	$3,25 \times 10^{-9}$	$4,88 \times 10^{-9}$	$8,13 \times 10^{-9}$	$6,50 \times 10^{-8}$	$9,75 \times 10^{-8}$	$1,63 \times 10^{-7}$
	UVCE	$9,35 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-7}$	$2,34 \times 10^{-7}$	$9,35 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-7}$	$2,34 \times 10^{-7}$
	Feu de nuage	$8,42 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-6}$	$8,42 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-6}$
G2	Feu de nappe	$3,25 \times 10^{-9}$	$4,88 \times 10^{-9}$	$8,13 \times 10^{-9}$	$6,50 \times 10^{-8}$	$9,75 \times 10^{-8}$	$1,63 \times 10^{-7}$
	UVCE	$9,35 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-7}$	$2,34 \times 10^{-7}$	$9,35 \times 10^{-8}$	$1,40 \times 10^{-7}$	$2,34 \times 10^{-7}$
	Feu de nuage	$8,42 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-6}$	$8,42 \times 10^{-7}$	$1,26 \times 10^{-6}$	$2,10 \times 10^{-6}$

CM : ensemble de conditions météorologiques (Voir tableau 3.4)

La figure 4.3 montre l'arbre d'événements affecté à l'ERC G1 (*perte totale de confinement, rupture catastrophique*) pour les équipements T1 et T2. Les barrières de sécurité ne sont pas représentées sur l'arbre d'événements illustré dans la figure 4.3.

4.1.2.5 Calcul des effets physiques générés par les phénomènes dangereux

Les résultats de l'évaluation des effets physiques (vecteurs d'escalade) générés par les accidents primaires : BLEVE, boule de feu et jet enflammé survenus suite à la défaillance des équipements T1 et T2 sont résumés dans les tableaux 4.8 et 4.9. Les valeurs obtenues pour les phénomènes : éclatement de la capacité T4 et feu de nappe suite à une perte de confinement sur cette même capacité sont données dans le tableau 4.10.

Malgré le danger lié au phénomène UVCE ce dernier ne figure pas sur les trois tableaux cités auparavant (tableau 4.8, 4.9 et tableau 4.10), car il n'existe pas de zone encombrée sur la zone d'étude et donc les effets de surpression engendrés par une explosion de nuage n'atteignent pas la valeur seuil d'effet domino (200 mbar). Concernant les effets thermiques des UVCE, ce sont les mêmes que ceux générés par le feu de nuage (même phénomène physique), et en l'occurrence, ces derniers ne peuvent pas provoquer un autre accident, hormis sur des cibles de type réservoir atmosphérique à toit flottant.

Concernant le feu de nappe mineur, comme l'illustre la figure 4.3 la probabilité d'inflammation direct de la flaque (nappe inflammable) est la même que celle de l'inflammation du nuage gazeux (gaz + aérosol) qui provoque une boule de feu. En effet, l'inflammation de l'un (nappe ou nuage) entraîne automatiquement l'inflammation de l'autre. Ce qui fait que, les effets générés par un feu de nappe mineur sont négligés par rapport aux effets du phénomène boule de feu. De plus, on sait que la flaque qui se forme s'évapore rapidement dans notre cas (propane ou GPL : *gaz* liquéfié *sous pression*, contrairement au cas de gaz liquéfié à basse température).

Le centre des effets physiques générés par les phénomènes dangereux BLEVE et boule de feu survenus sur l'équipement T1 et T2 ainsi que l'éclatement de la capacité T4, coïncide avec le centre de l'équipement défaillant (indiqué au tableau 4.1). Pareillement, pour le phénomène feu de nappe, car nous considérons que le centre de la cuve de rétention coïncide avec celui de l'équipement.

Par contre, en ce qui concerne le jet enflammé on distingue deux cas différents : le cas où la cible se trouve dans le volume occupé par les flammes, dans ce cas, le calcul de la distance

d'effet se fait à partir de la position de l'équipement source. Dans le cas contraire, les distances d'effets se calculent à partir du centre de la zone d'effet délimitée par le contour des seuils d'escalade prédéfinies.

Tableau 4.8 Effets thermiques générés par le jet enflammé survenu sur les équipements T1 et T2

Capacité	CM	Longueur de la flamme (m)	Centre des effets		Rayon des effets (m)	
			X	Y	Pour le seuil 1 (15 kW/m ²)	Pour le seuil 2 (45 kW/m ²)
T1	CM1	137,96	104,68	3,80	120,00	85,52
	CM2	107,24	69,36	-44,15	104,00	85,00
	CM3	97,99	0,29	70	109,88	72,00
T2	CM1	311,77	213,95	58,28	296,00	210,00
	CM2	242,34	112,96	-55,53	245,00	174,00
	CM3	221,44	0,00	196,00	257,30	162,50

CM : conditions météorologiques

Tableau 4.9 Distances des effets de la Boule de feu, BLEVE survenus sur les équipements T1, T2

Capacité	Rayon (m) des effets thermiques générés par la Boule de feu pour le seuil (100 kW/m ²)	Rayon (m) des effets de surpression due au BLEVE	
		Pour le seuil 1 (22 kPa)	Pour le seuil 2 (20 kPa)
T1	195,40	66,10	70,00
T2	347,12	116,00	123,00

Tableau 4.10 Distances des effets de l'éclatement de la capacité T4 et du feu de nappe qui en résulte

CM	Feu de nappe			Éclatement de capacité			
	Centre de la nappe/effets		Rayon de la nappe	Rayon des effets (m)		Rayon des effets (m)	
	X	Y		Pour seuil 1 (15 kW/m ²)	Pour seuil 2 (45 kW/m ²)	Pour seuil 1 (22 kPa)	Pour seuil 2 (20 kPa)
CM1	113,88	35,02	16,92	32,27	16,92	22,53	23,54
CM2	113,88	35,02	16,92	44,06	16,92		
CM3	113,88	35,02	16,92	52,26	16,92		

CM : conditions météorologiques

4.1.2.6 Identification des cibles et calcul des fréquences de l'effet domino

Les valeurs seuils utilisées dans cet exemple pour l'identification des cibles potentielles sont celles indiquées tableau 2.6 (Cozzani *et al.*, 2006a). Lors du calcul de la fréquence d'occurrence, les modèles de vulnérabilité présentés au tableau 4.11 ont été utilisés (Mingguang et Juncheng, 2008 ; Landucci *et al.*, 2009).

L'ensemble des scénarios dominos de premier niveau dans le cas où les mesures de maîtrise des risques sont considérées est donné tableau 4.12. Les scénarios de même niveau (1^{er}) obtenus sans considération des MMR sont présentés au tableau 4.13. Les résultats des scénarios de deuxième niveau fournis par l'outil, en tenant compte des MMR et sans en tenir compte, sont respectivement présentés aux tableaux 4.14 et 4.15.

Les informations illustrées dans les tableaux cités ci-avant (tableaux 4.12-15) sont très importantes, car elles permettent de savoir quel type de mesure de maîtrise des risques doit être utilisé pour éviter ou limiter les accidents en cascade, en fonction des accidents et des effets physiques impliqués.

Tableau 4.11 Modèles de vulnérabilité

Effets physiques	Type de cible	Modèles de vulnérabilité
Thermique	Atmosphérique	$\ln(\text{ttf}) = -1,13 \times \ln(I_{i,j}) - 2,67 \times 10^{-5} \times V + 9,9$ $Y_{i,j} = 12,54 - 1,847 \times \ln(\text{ttf})$
	Sous pression	$\ln(\text{ttf}) = -0,95 \times \ln(I_{i,j}) + 8,845 \times V^{0,032}$ $Y_{i,j} = 12,54 - 1,847 \times \ln(\text{ttf})$
Surpression	Atmosphérique	$Y_{i,j} = -9,36 + 1,43 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Sous pression	$Y_{i,j} = -14,44 + 1,82 \times \ln(\Delta P_{i,j})$

i, source de l'accident. j, cible. $Y_{i,j}$, fonction probit. ttf, temps-avant-défaillance (s). V, volume de l'équipement (m^3). $I_{i,j}$, intensité du flux thermique (kW/m^2). $\Delta P_{i,j}$, pic de surpression (kPa).

Tableau 4.12(1/2) Scénarios dominos de 1^{er} niveau avec prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible (Voir tableau 3.1). $f_{\text{Effet Domino}}$, fréquence de l'effet domino.

CM	Accident initial	Vecteur d'escalade	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario	Source	Cible	$f_{\text{Effet Domino}}$ (an ⁻¹)	LOC _{cible}
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	1618725,0	$1,82 \times 10^{-3}$	T1	T5	$1,12 \times 10^{-9}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	1618725,0	$1,56 \times 10^{-3}$	T1	T8	$9,64 \times 10^{-10}$	G1
CM3	Jet enflammé	Impact des flammes	5216841,0	$1,97 \times 10^{-4}$	T1	T2	$3,77 \times 10^{-11}$	G1
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$8,77 \times 10^{-6}$	T1	T3	$1,34 \times 10^{-11}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$1,58 \times 10^{-4}$	T1	T4	$2,42 \times 10^{-10}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$3,40 \times 10^{-6}$	T1	T6	$5,20 \times 10^{-12}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$1,58 \times 10^{-4}$	T1	T7	$2,42 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$9,62 \times 10^{-7}$	T1	T4	$1,47 \times 10^{-12}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$5,68 \times 10^{-6}$	T1	T5	$8,69 \times 10^{-12}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$8,01 \times 10^{-7}$	T1	T8	$1,22 \times 10^{-12}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$4,14 \times 10^{-3}$	T1	T3	$4,69 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$4,86 \times 10^{-3}$	T1	T4	$5,51 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$5,16 \times 10^{-3}$	T1	T5	$5,84 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$2,48 \times 10^{-3}$	T1	T6	$2,81 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$3,02 \times 10^{-3}$	T1	T7	$3,42 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$3,26 \times 10^{-3}$	T1	T8	$3,69 \times 10^{-9}$	G3
CM1	BLEVE	Suppression	3860894,0	$8,19 \times 10^{-1}$	T1	T2	$2,12 \times 10^{-7}$	G2
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$8,24 \times 10^{-3}$	T2	T3	$1,39 \times 10^{-9}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$8,24 \times 10^{-3}$	T2	T4	$1,39 \times 10^{-9}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$8,24 \times 10^{-3}$	T2	T6	$1,39 \times 10^{-9}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$8,24 \times 10^{-3}$	T2	T7	$1,39 \times 10^{-9}$	G1
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$2,88 \times 10^{-3}$	T2	T5	$5,82 \times 10^{-10}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,79 \times 10^{-3}$	T2	T8	$7,64 \times 10^{-10}$	G3

Tableau 4.12 (2/2) Scénarios dominos de 1^{er} niveau avec prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaitre sur la cible (Voir tableau 3.1). $f_{\text{Effet Domino}}$, fréquence de l'effet domino.

CM	Accident initial	Vecteur d'escalade	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario	Source	Cible	$f_{\text{Effet Domino}}$ (an ⁻¹)	LOC _{cible}
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$9,11 \times 10^{-4}$	T2	T3	$1,84 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,64 \times 10^{-3}$	T2	T4	$7,36 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$9,58 \times 10^{-3}$	T2	T5	$1,93 \times 10^{-9}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$5,94 \times 10^{-4}$	T2	T6	$1,2 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$2,07 \times 10^{-3}$	T2	T7	$4,18 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$6,32 \times 10^{-3}$	T2	T8	$1,28 \times 10^{-9}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,07 \times 10^{-4}$	T2	T3	$2,16 \times 10^{-11}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$4,03 \times 10^{-5}$	T2	T4	$8,13 \times 10^{-12}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,45 \times 10^{-5}$	T2	T5	$2,93 \times 10^{-12}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$4,56 \times 10^{-5}$	T2	T6	$9,20 \times 10^{-12}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$2,16 \times 10^{-5}$	T2	T7	$4,37 \times 10^{-12}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$9,19 \times 10^{-6}$	T2	T8	$1,85 \times 10^{-12}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,74 \times 10^{-2}$	T2	T3	$7,55 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,73 \times 10^{-2}$	T2	T4	$7,54 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,67 \times 10^{-2}$	T2	T5	$7,40 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,47 \times 10^{-2}$	T2	T6	$7,01 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,45 \times 10^{-2}$	T2	T7	$6,96 \times 10^{-9}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,39 \times 10^{-2}$	T2	T8	$6,85 \times 10^{-9}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4872141,0	$1,74 \times 10^{-4}$	T2	T1	$3,57 \times 10^{-11}$	G3
CM1	BLEVE	Suppression	5529991,0	1,35	T2	T3	$2,44 \times 10^{-7}$	G2
CM1	BLEVE	Suppression	5529991,0	1,32	T2	T4	$2,39 \times 10^{-7}$	G2
CM1	BLEVE	Suppression	5446641,0	2,66	T2	T1	$4,88 \times 10^{-7}$	G1
CM3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1545500,0	$6,50 \times 10^{-6}$	T4	T3	$4,20 \times 10^{-12}$	G2
CM3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1931875,0	$8,13 \times 10^{-6}$	T4	T3	$4,20 \times 10^{-12}$	G2

Tableau 4.13 (1/2) Scénarios dominos de 1^{er} niveau sans prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible (*Voir* Tableau 3.1). $f_{\text{Effet Domino}}$, fréquence de l'effet domino.

CM	Accident initial	Vecteur d'escalade	Sévérité du scénario(€)	Criticité du scénario	Source	Cible	$f_{\text{Effet Domino}}$ (an ⁻¹)	LOC _{cible}
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	1618725,0	$7,63 \times 10^{-2}$	T1	T5	$4,71 \times 10^{-8}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	1618725,0	$6,56 \times 10^{-2}$	T1	T8	$4,05 \times 10^{-8}$	G1
MC3	Jet enflammé	Impact des flammes	5216841,0	$3,94 \times 10^{-3}$	T1	T2	$7,55 \times 10^{-10}$	G1
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$3,69 \times 10^{-4}$	T1	T3	$5,65 \times 10^{-10}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$6,65 \times 10^{-3}$	T1	T4	$1,02 \times 10^{-8}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$1,43 \times 10^{-4}$	T1	T6	$2,19 \times 10^{-10}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$6,65 \times 10^{-3}$	T1	T7	$1,02 \times 10^{-8}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$4,04 \times 10^{-5}$	T1	T4	$6,19 \times 10^{-11}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$2,39 \times 10^{-4}$	T1	T5	$3,65 \times 10^{-10}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	652787,5	$3,36 \times 10^{-5}$	T1	T8	$5,152E^{-11}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$1,74 \times 10^{-1}$	T1	T3	$1,97 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$2,04 \times 10^{-1}$	T1	T4	$2,31 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$2,17 \times 10^{-1}$	T1	T5	$2,45 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$1,04 \times 10^{-1}$	T1	T6	$1,18 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$1,27 \times 10^{-1}$	T1	T7	$1,44 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	882587,5	$1,37 \times 10^{-1}$	T1	T8	$1,55 \times 10^{-7}$	G3
CM1	BLEVE	Surpression	3860894,0	$8,19 \times 10^{-1}$	T1	T2	$2,12 \times 10^{-7}$	G2
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$3,46 \times 10^{-1}$	T2	T3	$5,85 \times 10^{-8}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$3,46 \times 10^{-1}$	T2	T4	$5,85 \times 10^{-8}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$3,46 \times 10^{-1}$	T2	T6	$5,85 \times 10^{-8}$	G1
CM1	Jet enflammé	Impact des flammes	5916366,0	$3,46 \times 10^{-1}$	T2	T7	$5,85 \times 10^{-8}$	G1
CM1	BLEVE	Surpression	4950428,5	1,21	T2	T3	$2,44 \times 10^{-7}$	G2
CM1	BLEVE	Surpression	4950428,5	1,19	T2	T4	$2,4 \times 10^{-7}$	G2
CM1	BLEVE	Surpression	4950428,5	2,42	T2	T1	$4,88 \times 10^{-7}$	G1
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,21 \times 10^{-1}$	T2	T5	$2,45 \times 10^{-8}$	G3
CM1	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,59 \times 10^{-1}$	T2	T8	$3,21 \times 10^{-8}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,83 \times 10^{-2}$	T2	T3	$7,73 \times 10^{-9}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,53 \times 10^{-1}$	T2	T4	$3,09 \times 10^{-8}$	G3

Tableau 4.13 (2/2) Scénarios dominos de 1^{er} niveau sans prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaitre sur la cible (Voir Tableau 3.1). $f_{\text{Effet Domino}}$, fréquence de l'effet domino.

CM	Accident initial	Vecteur d'escalade	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario	Source	Cible	$f_{\text{Effet Domino}}$ (an ⁻¹)	LOC _{cible}
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$4,02 \times 10^{-1}$	T2	T5	$8,13 \times 10^{-8}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$2,50 \times 10^{-2}$	T2	T6	$5,04 \times 10^{-9}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$8,70 \times 10^{-2}$	T2	T7	$1,76 \times 10^{-8}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$2,66 \times 10^{-1}$	T2	T8	$5,36 \times 10^{-8}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$4,50 \times 10^{-3}$	T2	T3	$9,09 \times 10^{-10}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,69 \times 10^{-3}$	T2	T4	$3,42 \times 10^{-10}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$6,09 \times 10^{-4}$	T2	T5	$1,23 \times 10^{-10}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$1,91 \times 10^{-3}$	T2	T6	$3,87 \times 10^{-10}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$9,09 \times 10^{-4}$	T2	T7	$1,84 \times 10^{-10}$	G3
CM3	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4950428,5	$3,86 \times 10^{-4}$	T2	T8	$7,80 \times 10^{-11}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,57	T2	T3	$3,17 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,57	T2	T4	$3,17 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,54	T2	T5	$3,11 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,46	T2	T6	$2,94 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,45	T2	T7	$2,93 \times 10^{-7}$	G3
CM1	Boule de feu	Rayonnement thermique	4950428,5	1,43	T2	T8	$2,88 \times 10^{-7}$	G3
CM2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	4872141	$3,48 \times 10^{-3}$	T2	T1	$7,15 \times 10^{-10}$	G3
CM1	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1545500	$9,92 \times 10^{-4}$	T4	T7	$6,42 \times 10^{-10}$	G2
CM2	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1545500	$1,16 \times 10^{-3}$	T4	T8	$7,49 \times 10^{-10}$	G2
CM3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1545500	$5,46 \times 10^{-3}$	T4	T3	$3,53 \times 10^{-9}$	G2
CM1	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1931875	$1,24 \times 10^{-3}$	T4	T7	$6,42 \times 10^{-10}$	G2
CM2	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1931875	$1,45 \times 10^{-3}$	T4	T8	$7,49 \times 10^{-10}$	G2
CM3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	1931875	$6,83 \times 10^{-3}$	T4	T3	$3,53 \times 10^{-9}$	G2

Tableau 4.14 (1/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau avec prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible (Voir Tableau 3.1). f_{Ej} , f_{EjT} Dominos, fréquence de l'effet domino

CM	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	f_{Ej} , f_{EjT} Dominos	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T3	G1	$8,45 \times 10^{-10}$	5020019,0	$4,24 \times 10^{-3}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T4	G1	$8,45 \times 10^{-10}$	5020019,0	$4,24 \times 10^{-3}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T6	G1	$8,45 \times 10^{-10}$	5020019,0	$4,24 \times 10^{-3}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T7	G1	$8,45 \times 10^{-10}$	5020019,0	$4,24 \times 10^{-3}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	T5	G3	$3,53 \times 10^{-10}$	4054081,5	$1,43 \times 10^{-3}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	T8	G3	$4,64 \times 10^{-10}$	4054081,5	$1,88 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T3	G3	$5,71 \times 10^{-13}$	5410028,5	$3,09 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T4	G3	$5,68 \times 10^{-13}$	5410028,5	$3,07 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T5	G3	$5,58 \times 10^{-13}$	5410028,5	$3,02 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T6	G3	$5,28 \times 10^{-13}$	5410028,5	$2,86 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T7	G3	$5,28 \times 10^{-13}$	5410028,5	$2,86 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T8	G3	$5,16 \times 10^{-13}$	5410028,5	$2,79 \times 10^{-6}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T3	G1	3×10^{-11}	6375966,0	$1,91 \times 10^{-4}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T4	G1	$2,81 \times 10^{-11}$	6375966,0	$1,79 \times 10^{-4}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T5	G1	$2,81 \times 10^{-11}$	6375966,0	$1,79 \times 10^{-4}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T6	G2	$2,25 \times 10^{-11}$	5989591,0	$1,35 \times 10^{-4}$

Tableau 4.14 (2/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau avec prise en compte des MMR. LOC_{cible}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). Effet Domino, fréquence de l'effet domino.

MC	Sourcel	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	$f_{\text{Effet Domino}}$	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T7	G2	$2,25 \times 10^{-11}$	5989591,0	$1,35 \times 10^{-4}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T3	G3	$4,57 \times 10^{-9}$	5639828,5	$2,58 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T4	G3	$5,38 \times 10^{-9}$	5639828,5	$3,03 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T5	G3	$5,71 \times 10^{-9}$	5639828,5	$3,22 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T6	G3	$2,76 \times 10^{-9}$	5639828,5	$1,56 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T7	G3	$3,34 \times 10^{-9}$	5639828,5	$1,89 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T8	G3	$3,58 \times 10^{-9}$	5639828,5	$2,02 \times 10^{-2}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	T6	G2	$1,87 \times 10^{-13}$	6302741,0	$1,18 \times 10^{-6}$
CM1	T2	BLEVE	Surpression	T4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	T7	G2	$1,83 \times 10^{-13}$	6302741,0	$1,15 \times 10^{-6}$

Tableau 4.15 (1/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau sans prise en compte des MMR. LOC_{cible2}, classe perte de confinement supposée apparaitre sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). Effet Domino, fréquence de l'effet domino.

CM	Source 1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible 1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible 2	LOC _{cible2}	$f_{Effet\ Domino}$	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T3	G1	$1,24 \times 10^{-7}$	5020019,0	$6,24 \times 10^{-1}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T4	G1	$1,24 \times 10^{-7}$	5020019,0	$6,24 \times 10^{-1}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T6	G1	$1,24 \times 10^{-7}$	5020019,0	$6,24 \times 10^{-1}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Impact des flammes	T7	G1	$1,24 \times 10^{-7}$	5020019,0	$6,24 \times 10^{-1}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	T5	G3	$5,19E \times 10^{-8}$	4054081,5	$2,10 \times 10^{-1}$
CM1	T1	BLEVE	Surpression	T2	Jet enflammé	Rayonnement thermique	T8	G3	$6,82 \times 10^{-8}$	4054081,5	$2,76 \times 10^{-1}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T3	G3	$4,80 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,60 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T4	G3	$4,77 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,58 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T5	G3	$4,69 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,54 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T6	G3	$4,44 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,40 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T7	G3	$4,44 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,40 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	Boule de feu	Rayonnement thermique	T8	G3	$4,34 \times 10^{-10}$	5410028,5	$2,35 \times 10^{-3}$
CM1	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T5	Feu de nappe	Rayonnement thermique	T8	G2	$3,79 \times 10^{-11}$	2391475,0	$9,06 \times 10^{-5}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T3	G1	$5,99 \times 10^{-10}$	6375966,0	$3,82 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T4	G1	$5,62 \times 10^{-10}$	6375966,0	$3,58 \times 10^{-3}$
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Surpression	T5	G1	$5,62 \times 10^{-10}$	6375966,0	$3,58 \times 10^{-3}$

Tableau 4.15 (2/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau sans prise en compte des MMR. LOC_{cible2}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). *f*_{Effet Domino}, fréquence de l'effet domino.

CM	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	<i>f</i> _{Effet Domino}	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Supression	T6	G2	4,50×10 ⁻¹⁰	5989591,0	2,70×10 ⁻³
CM3	T1	Jet enflammé	Impact des flammes	T2	BLEVE	Supression	T7	G2	4,50×10 ⁻¹⁰	5989591,0	2,70×10 ⁻³
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T3	G3	1,92×10 ⁻⁷	5639828,5	1,08
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T4	G3	2,26×10 ⁻⁷	5639828,5	1,27
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T5	G3	2,40×10 ⁻⁷	5639828,5	1,35
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T6	G3	1,16×10 ⁻⁷	5639828,5	6,54×10 ⁻¹
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T7	G3	1,40×10 ⁻⁷	5639828,5	7,92×10 ⁻¹
CM1	T2	BLEVE	Supression	T1	Boule de feu	Rayonnement thermique	T8	G3	1,50×10 ⁻⁷	5639828,5	8,48×10 ⁻¹
CM1	T2	BLEVE	Supression	T3	Feu de nappe	Rayonnement thermique	T6	G2	7,84×10 ⁻¹²	6302741,0	4,94×10 ⁻⁵
CM1	T2	BLEVE	Supression	T4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	T7	G2	7,69×10 ⁻¹²	6302741,0	4,85×10 ⁻⁵

4.1.2.7 Hiérarchisation des séquences accidentelles

Le tableau 4.16 présente les résultats obtenus pour la hiérarchisation des séquences dominos de premier niveau en tenant compte des mesures de maîtrise des risques existantes, tandis que ceux obtenus sans la prise en compte des MMR sont présentés au tableau 4.17. Ces deux tableaux présentent aussi une hiérarchisation des équipements sources et des équipements cibles.

Il est important de rappeler que les scénarios dominos de premier niveau, ayant une fréquence d'occurrence annuelle inférieure à la valeur seuil prédéfinie « 10^{-12} événement/an » (*Voir* chapitre 3, section 3.3.1.6) ne sont pas considérés plausibles, ils ne sont donc pas examinés plus avant. C'est pourquoi, ils ne figurent pas dans l'ensemble des tableaux qui présentent les résultats. Les informations fournies par l'outil sont représentées aux tableaux 4.12 et 4.13, respectivement pour les scénarios dominos de premier niveau, avec et sans considération des mesures de maîtrise des risques. Seuls les éléments principaux sont présentés dans un souci de lisibilité.

Le tableau 4.18 montre la hiérarchisation des séquences dominos de deuxième niveau en considérant les mesures de maîtrise des risques existantes. Le tableau 4.19 indique les résultats obtenus pour les séquences dominos de deuxième niveau, sans la prise en compte des MMR. Comme pour les deux tableaux précédents, une hiérarchisation des équipements sources et une autre concernant les équipements cibles sont présentées dans les deux cas (prise en compte ou non des MMR). Plus de détails concernant les résultats des scénarios dominos de deuxième niveau sont présentés au tableau 4.14 pour les scénarios avec prise en compte des MMR et au tableau 4.15 pour les scénarios obtenus sans prise en compte de MMR.

Tableau 4.16 Hiérarchisation des séquences dominos de 1^{er} niveau en considérant les mesures de maîtrise des risques. ID : identifiant de l'équipement

Hiérarchisation des séquences dominos de 1 ^{er} niveau				Classification des cibles		Classification des sources	
Source (a)	Cible (b)	DF _{ab}	F _{ed} (an ⁻¹)	ID _{Cible}	DF _{Cible}	ID _{Source}	DF _{Source}
T2	T1	2,66	$4,88 \times 10^{-7}$	T1	2,66	T2	5,61
T2	T3	1,40	$2,53 \times 10^{-7}$	T3	1,40	T1	$8,46 \times 10^{-1}$
T2	T4	1,37	$2,49 \times 10^{-7}$	T4	1,38	T4	$1,46 \times 10^{-5}$
T1	T2	$8,19 \times 10^{-1}$	$2,12 \times 10^{-7}$	T2	$8,19 \times 10^{-1}$		
T2	T5	$4,91 \times 10^{-2}$	$9,92 \times 10^{-9}$	T5	$5,61 \times 10^{-2}$		
T2	T7	$4,48 \times 10^{-2}$	$8,78 \times 10^{-9}$	T8	$4,89 \times 10^{-2}$		
T2	T8	$4,41 \times 10^{-2}$	$8,90 \times 10^{-9}$	T7	$4,80 \times 10^{-2}$		
T2	T6	$4,36 \times 10^{-2}$	$8,53 \times 10^{-9}$	T6	$4,61 \times 10^{-2}$		
T1	T5	$6,98 \times 10^{-3}$	$6,97 \times 10^{-9}$				
T1	T4	$5,02 \times 10^{-3}$	$5,75 \times 10^{-9}$				
T1	T8	$4,82 \times 10^{-3}$	$4,66 \times 10^{-9}$				
T1	T3	$4,15 \times 10^{-3}$	$4,70 \times 10^{-9}$				
T1	T7	$3,18 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-9}$				
T1	T6	$2,49 \times 10^{-3}$	$2,82 \times 10^{-9}$				
T4	T3	$1,46 \times 10^{-5}$	$8,41 \times 10^{-12}$				

DF_{ab} : facteur de danger de la séquence (a b). F_{ed} : fréquence des séquences dominos. DF_{Cible} : \sum facteurs de danger des séquences impactant l'équipement cible. DF_{Source} : \sum facteurs de danger des séquences provoquées par la capacité source.

Tableau 4.17 Hiérarchisation séquences dominos de 1^{er} niveau sans considération des mesures de maîtrise des risques. ID : identifiant de l'équipement

Hiérarchisation des séquences dominos de 1 ^{er} niveau				Classification des cibles		Classification des sources	
Source (a)	Cible (b)	DF _{ab}	F _{ed} (an ⁻¹)	ID _{Cible}	DF _{Cible}	ID _{Source}	DF _{Source}
T2	T4	3,26	$6,46 \times 10^{-7}$	T4	3,47	T2	16,5
T2	T3	3,17	$6,29 \times 10^{-7}$	T3	3,36	T1	1,94
T2	T1	2,42	$4,89 \times 10^{-7}$	T1	2,42	T4	$1,71 \times 10^{-2}$
T2	T5	2,06	$4,17 \times 10^{-7}$	T5	2,36		
T2	T7	1,88	$3,69 \times 10^{-7}$	T8	2,06		
T2	T8	1,85	$3,74 \times 10^{-7}$	T7	2,02		
T2	T6	1,83	$3,58 \times 10^{-7}$	T6	1,94		
T1	T2	$8,23 \times 10^{-1}$	$2,13 \times 10^{-7}$	T2	$8,23 \times 10^{-1}$		
T1	T5	$2,93 \times 10^{-1}$	$2,93 \times 10^{-7}$				
T1	T4	$2,11 \times 10^{-1}$	$2,42 \times 10^{-7}$				
T1	T8	$2,03 \times 10^{-1}$	$1,96 \times 10^{-7}$				
T1	T3	$1,74 \times 10^{-1}$	$1,98 \times 10^{-7}$				
T1	T7	$1,34 \times 10^{-1}$	$1,54 \times 10^{-7}$				
T1	T6	$1,05 \times 10^{-1}$	$1,18 \times 10^{-7}$				
T4	T3	$1,23 \times 10^{-2}$	$7,07 \times 10^{-9}$				
T4	T8	$2,60 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-9}$				
T4	T7	$2,23 \times 10^{-3}$	$1,28 \times 10^{-9}$				

DF_{ab} : facteur de danger de la séquence (a b). F_{ed} : fréquence des séquences dominos. DF_{Cible} : \sum facteurs de danger des séquences impactant l'équipement cible. DF_{Source} : \sum facteurs de danger des séquences provoquées par la capacité source.

Tableau 4.18 Hiérarchisation séquences dominos de 2^{ème} niveau en considérant les mesures de maîtrise des risques. ID : identifiant de l'équipement.

Hiérarchisation des séquences dominos de 2 ^{ème} niveau					Classification des cibles		Classification des sources	
Source1 (a)	Cible1/ source2 (b)	Cible2 (c)	DF _{abc}	F _{ed} (an ⁻¹)	ID	DF _{Cible1}	ID	DF _{Source1}
T2	T1	T5	$3,22 \times 10^{-2}$	$5,71 \times 10^{-9}$	T1	$1,43 \times 10^{-1}$	T2	$1,43 \times 10^{-1}$
T2	T1	T4	$3,03 \times 10^{-2}$	$5,38 \times 10^{-9}$	T2	$2,11 \times 10^{-2}$	T1	$2,11 \times 10^{-2}$
T2	T1	T3	$2,58 \times 10^{-2}$	$4,57 \times 10^{-9}$	T3	$1,18 \times 10^{-6}$		
T2	T1	T8	$2,02 \times 10^{-2}$	$3,58 \times 10^{-9}$	T4	$1,15 \times 10^{-6}$		
T2	T1	T7	$1,89 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-9}$				
T2	T1	T6	$1,56 \times 10^{-2}$	$2,76 \times 10^{-9}$				
T1	T2	T3	$4,43 \times 10^{-3}$	$8,75 \times 10^{-10}$				
T1	T2	T4	$4,42 \times 10^{-3}$	$8,73 \times 10^{-10}$				
T1	T2	T6	$4,38 \times 10^{-3}$	$8,68 \times 10^{-10}$				
T1	T2	T7	$4,38 \times 10^{-3}$	$8,68 \times 10^{-10}$				
T1	T2	T8	$1,88 \times 10^{-3}$	$4,64 \times 10^{-10}$				
T1	T2	T5	$1,61 \times 10^{-3}$	$3,82 \times 10^{-10}$				
T2	T3	T6	$1,18 \times 10^{-6}$	$1,87 \times 10^{-13}$				
T2	T4	T7	$1,15 \times 10^{-6}$	$1,83 \times 10^{-13}$				

DF_{abc} : facteur de danger de la séquence (a b c). F_{ed} : fréquence des séquences dominos. DF_{Cible1} : \sum facteurs de danger des séquences propagées par l'équipement cible. DF_{Source1} : \sum facteurs de danger des séquences provoquées par la capacité source.

Tableau 4.19 Hiérarchisation séquences dominos de 2^{ème} niveau sans considération des MMR. ID : identifiant de l'équipement DF_{abc} : facteur de danger de la séquence (a b c). F_{ed} : fréquence des séquences dominos.

Hiérarchisation des séquences dominos de 2 ^{ème} niveau					Classification des cibles		Classification des sources	
Source1 (a)	Cible1/ source2 (b)	Cible2 (c)	DF _{abc}	F _{ed} (an ⁻¹)	ID	DF _{Cible1}	ID	DF _{Source1}
T2	T1	T5	1,35	$2,40 \times 10^{-7}$	T1	6,01	T2	6,01
T2	T1	T4	1,27	$2,26 \times 10^{-7}$	T2	3,01	T1	3,01
T2	T1	T3	1,08	$1,92 \times 10^{-7}$	T5	$9,06 \times 10^{-5}$		
T2	T1	T8	$8,48 \times 10^{-1}$	$1,50 \times 10^{-7}$	T3	$4,94 \times 10^{-5}$		
T2	T1	T7	$7,92 \times 10^{-1}$	$1,40 \times 10^{-7}$	T4	$4,85 \times 10^{-5}$		
T2	T1	T6	$6,54 \times 10^{-1}$	$1,16 \times 10^{-7}$				
T1	T2	T3	$6,30 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-7}$				
T1	T2	T4	$6,30 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-7}$				
T1	T2	T6	$6,29 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-7}$				
T1	T2	T7	$6,29 \times 10^{-1}$	$1,25 \times 10^{-7}$				
T1	T2	T8	$2,79 \times 10^{-1}$	$6,86 \times 10^{-8}$				
T1	T2	T5	$2,17 \times 10^{-1}$	$5,30 \times 10^{-8}$				
T1	T5	T8	$9,06 \times 10^{-5}$	$3,79 \times 10^{-11}$				
T2	T3	T6	$4,94 \times 10^{-5}$	$7,84 \times 10^{-12}$				
T2	T4	T7	$4,85 \times 10^{-5}$	$7,69 \times 10^{-12}$				

DF_{Cible1} : \sum facteurs de danger des séquences propagées par l'équipement cible. DF_{Source1} : \sum facteurs de danger des séquences provoquées par la capacité source.

4.1.3 Discussion

Les résultats présentés aux tableaux 4.16 et 4.17 montrent clairement que les mesures de maîtrise des risques réduisent la criticité des scénarios. Cela est illustré au travers du facteur de danger des séquences dominos (*Voir* la troisième colonne des tableaux 4.16 et 4.17), qui représente la somme des criticités de l'ensemble des scénarios qui donnent lieu à une même séquence. Les détails des scénarios (dont la criticité) sont donnés aux tableaux 4.12 et 4.13.

De même, lorsqu'on considère les MMR, le nombre de chemins de propagation considérés crédibles décroît: deux scénarios ne sont plus considérés crédibles parce que leurs fréquences d'occurrence sont inférieures à la valeur seuil (10^{-12} événement/an).

Une comparaison des fréquences d'occurrence des séquences dominos montrées à la colonne 4 des tableaux 4.16, 4.17 (escalade de premier niveau), ou encore 4.18 et 4.19 (escalade de deuxième niveau) met en évidence le fait que la présence de mesures de maîtrise des risques appropriées, avec de faibles probabilités de défaillance à la sollicitation, permet de réduire considérablement la fréquence des scénarios dominos.

Cependant, les fréquences d'occurrence de certains scénarios sont moins affectées que d'autres lorsqu'on considère les MMR (Ex. : explosion \rightarrow feu, ou encore le scénario, feu \rightarrow explosion), alors que d'autres ne sont pas du tout réduites, à savoir celles des scénarios de type, explosion \rightarrow explosion (*Voir* tableau 4.12 et 4.13 pour les scénarios domino de premier niveau et les tableaux 4.14 et 4.15 pour les scénarios de deuxième niveau).

Effectivement, les mesures de maîtrise des risques considérées ne permettent pas de réduire la fréquence d'occurrence des différents scénarios de la même façon, car elles sont toutes conçues pour lutter uniquement contre les feux (prévention de l'inflammation ou réduction de l'impact des effets thermiques). On peut remarquer aussi que les scénarios impliquant le phénomène dangereux feu de nappe sont les moins probables car l'ensemble des MMR peuvent agir sur ce phénomène dangereux.

Il est à noter, cependant, que la hiérarchisation des équipements sources (c'est-à-dire les équipements qui ont la capacité de provoquer un effet domino) est la même dans les deux cas (prise en compte ou non des MMR). Ce résultat découle des hypothèses concernant les mesures de maîtrise des risques considérées. En effet, les MMR considérées pour les équipements sous

pression (T1 et T2) ne peuvent pas agir sur les accidents primaires, car ce sont des mesures de protection (évitent la propagation de l'accident primaire, *Voir* section 4.1.1). Leur prise en compte n'impacte donc pas la capacité de l'équipement source à provoquer un accident grave de ce fait l'outil proposé, le classe toujours comme étant un équipement capable d'initier un effet domino.

On notera que l'équipement T4 est considéré le moins dangereux vis-à-vis de l'initiation d'un effet domino dans les deux cas (avec ou sans MMR active) et il n'est pas capable de provoquer un effet domino de deuxième niveau (*Voir* tableau 4.18 et 4.19), vu qu'il est équipé d'une cuve de rétention⁸. Cette dernière limite l'épandage du liquide inflammable et permet donc de réduire le mécanisme de propagation (vecteur d'escalade) au seul rayonnement thermique, sans action directe de flammes.

Cependant, la hiérarchisation des cibles potentielles change lorsque l'on considère les MMR, car celles-ci sont conçues pour réduire la vulnérabilité des équipements aux effets dominos.

On remarque aussi que la hiérarchisation des cibles varie selon le niveau des effets dominos considéré. Effectivement, comme expliqué dans le paragraphe précédent, les équipements atmosphériques (T3-8) ne peuvent pas propager l'accident au deuxième niveau grâce aux MMR que nous avons supposées au départ (couronne d'arrosage et système d'injection de mousse, en plus de la cuve de rétention).

4.2 Application de la méthode sur le parc de réservoirs de l'entreprise X (étude d'un cas réel)

Le parc de réservoirs sur lequel la méthode a été appliquée appartient à une usine de procédés chimiques implantée en France. Le parc sert à stocker les produits utilisés dans les procédés de transformations. En accord avec l'industriel concerné, ces travaux sont confidentiels.

⁸ La cuve de rétention est considérée comme une barrière de sécurité de type passive (ne nécessite aucune intervention humaine ni automatique : agit sans le besoin de détection ni d'activation d'un quelconque dispositif). Par conséquent, elle n'est pas concernée par la probabilité de défaillance à la sollicitation des MMR.

4.2.1 Description du parc de réservoir de l'entreprise X

La topographie du parc de réservoir est présentée à la figure 4.4. Les équipements représentés en vert ou en blanc sur la figure 4.4 ne sont pas capables d'initier un effet domino, du fait de la catégorie de danger des substances qu'ils contiennent ou parce qu'ils sont hors-service (vides et dégazés). Toutefois, ils sont représentés afin de ne pas les oublier lors de l'évaluation des conséquences des accidents qui peuvent les impacter, à travers la prise en compte de leurs coûts lors du calcul du coût des accidents qui peuvent les endommager. Le tableau 4.20 décrit les équipements pouvant être considérés comme source d'un effet domino, ces derniers sont représentés en orange sur la figure 4.4.

Concernant les mesures de maîtrise des risques, il existe des couronnes d'arrosage (eau) sur l'ensemble des équipements appartenant à la zone d'étude, ainsi que des cuves de rétention avec différentes surfaces (volume de rétention) comme le montre la figure 4.4.

Les réservoirs de stockage sont également équipés de vannes de pied de bac, actionnables à distance, elles sont de type sécurité feu (en cas d'incendie l'étanchéité du dispositif est maintenu). Ce système d'isolation est destiné à stopper l'alimentation des feux en combustible en cas de rupture de conduites, mais aussi à isoler les fuites de canalisation. L'existence de ce type de vannes nous permet d'écarter la possibilité d'avoir un effet domino suite à la rupture d'une canalisation (fuite sur une canalisation), car si le déclenchement à distance de ces vannes échoue (défaillance à la demande), cela revient à simuler une fuite sur le réservoir.

Les conditions météorologiques jugées représentatives de la région où est implantée l'usine sont données au tableau 4.21.

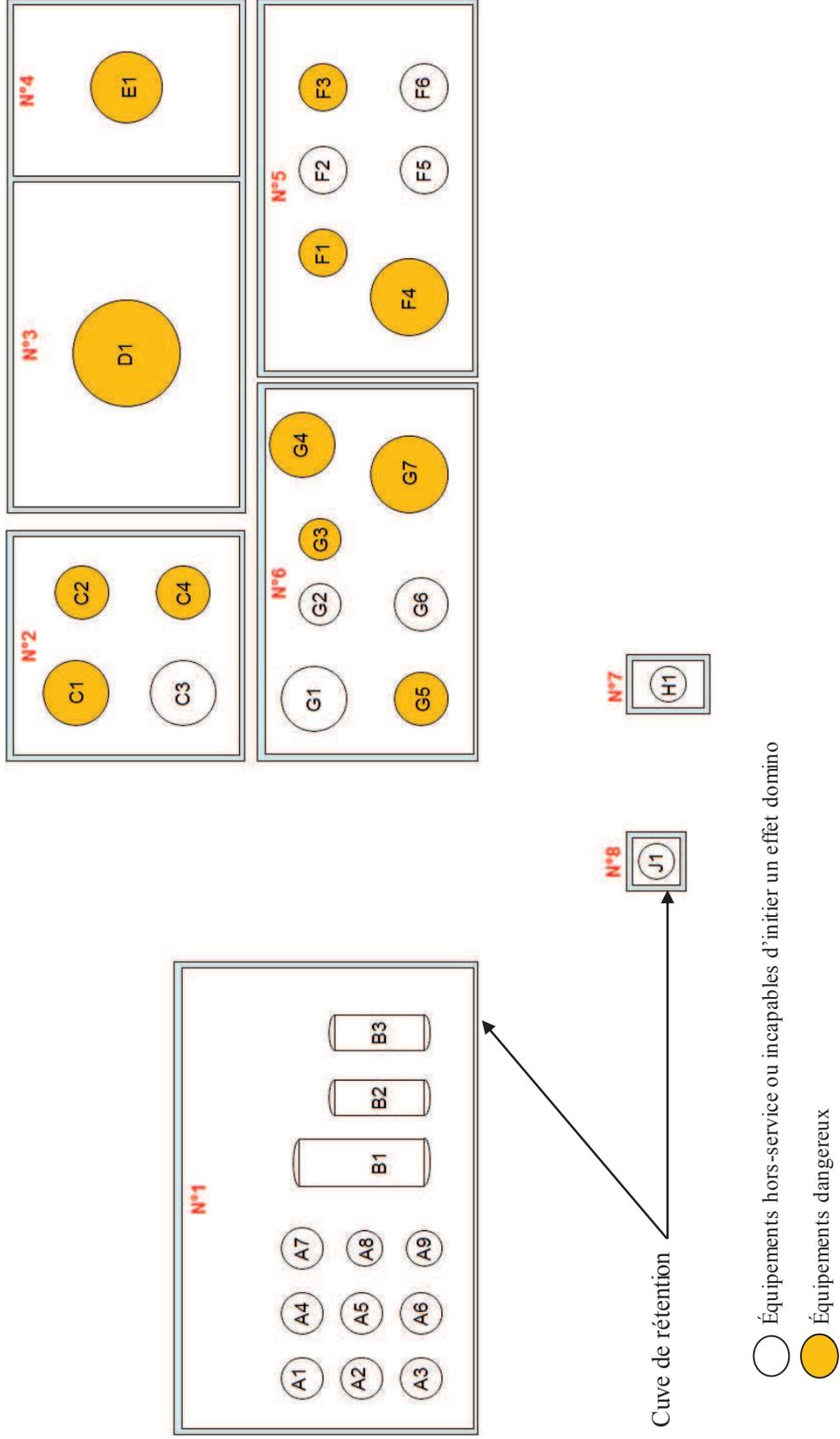


Figure 4.4 Topographie du parc de réservoirs analysé

Tableau 4.20 Informations relatives aux équipements et aux matières contenues

ID	Type de réservoir	\varnothing_{ext} (m)	V (m ³)	Coordonnées		S _{cuve} (m ²)	Substance
				X	Y		
C1	Atmosphérique	4,58	78,00	55,28	43,57	222,40	Isobutyl méthacrylate
C2	Atmosphérique	4,00	50,00	61,46	41,53	222,40	N-butylméthacrylate
C4	Atmosphérique	4,00	50,00	59,41	34,10	222,40	N-octane
D1	Atmosphérique	7,90	226,00	78,30	33,88	361,50	Styrène
E1	Atmosphérique	6,00	113,00	95,77	29,17	189,30	Acrylonitrile
G1	Atmosphérique	5,34	57,80	50,71	25,11	373,40	2-methylpyridine
G3	Atmosphérique	3,05	18,00	61,69	21,63	373,40	Méthacrylate de méthyle
G4	Atmosphérique	5,34	58,00	67,58	21,08	373,40	2,2,4-Trimethyl-1-pentene
G5	Atmosphérique	4,32	38,00	48,76	17,86	373,40	N-butylméthacrylate
G7	Atmosphérique	6,10	75,00	64,13	14,34	373,40	P-méthyl styrène
F1	Atmosphérique	3,70	50,00	81,64	17,08	405,40	Isobutyl méthacrylate
F3	Atmosphérique	3,80	46,50	92,26	14,22	405,40	Styrène
F4	Atmosphérique	6,10	75,00	75,81	11,19	405,40	P-méthyl Styène

ID : identifiant de l'équipement. \varnothing_{ext} : Diamètre extérieure. V : volume. S_{cuve} : surface de la cuve de rétention

Tableau 4.21 Conditions météorologiques (CM). SO: sud-ouest; NO: nord-est

Ensemble Conditions	Ensemble 1 (CM1)	Ensemble 2 (CM2)
Probabilité	0,773	0,277
Classe de stabilité	D	D
Vitesse du vent (m/s)	5	8
Direction du vent	SO (225°)	NE (45°)
T° et pression (°C; bar)	20; 1,013	20; 1,013
Humidité relative (%)	47	47
Flux de rayonnement solaire (kW/m ²)	500	500

Les valeurs seuils utilisées pour l'identification des cibles potentielles sont celles illustrées au tableau 2.6 (Cozzani et *al.*, 2006a) . Quant aux modèles de vulnérabilité employés pour le calcul de la probabilité d'endommagement des cibles, ils sont présentés au tableau 4.22 (Cozzani et Salzano, 2004 ; Reniers et Cozzani 2013).

Tableau 4.22 Modèles de vulnérabilité

Effets physiques	Type de cible	Modèles de vulnérabilité
Thermique	Atmosphérique	$\ln(\text{ttf}) = -1,13 \times \ln(I_{i,j}) - 2,667 \times 10^{-5} \times V + 9,877$ $Y_{i,j} = 9,25 - 1,847 \times \ln(\text{ttf}/60)$
	Sous pression	$\ln(\text{ttf}) = -1,29 \times \ln(I_{i,j}) + 10,97 \times V^{0,026}$ $Y_{i,j} = 9,25 - 1,847 \times \ln(\text{ttf}/60)$
Surpression	Atmosphérique	$Y_{i,j} = -18,96 + 2,44 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Sous pression	$Y_{i,j} = -42,44 + 4,33 \times \ln(\Delta P_{i,j})$

i , source de l'accident. j , cible. $Y_{i,j}$, fonction probit. ttf , temps-avant-défaillance (s). V , volume de l'équipement (m^3). $I_{i,j}$, intensité du flux thermique (kW/m^2). $\Delta P_{i,j}$, pic de surpression (kPa).

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats fournis par l'outil proposé, suite à son application au cas réel décrit ci-dessus. Nous présentons également certains détails et choix de calcul pour faciliter la compréhension de la démarche.

4.2.2 Choix des équipements sources

Dans ce cas d'étude le phénomène dangereux le plus redouté est le feu de nappe. En effet, les équipements qui peuvent être à l'origine d'un effet domino, sont des réservoirs atmosphériques et les matières qu'ils contiennent sont très peu volatiles, ce qui fait que la survenue d'un UVCE est improbable. De plus, l'éclatement d'une capacité atmosphérique ne génère pas d'effets de surpression graves, mis à part dans le champ proche.

De ce fait, le choix des équipements sources appartenant à une même cuve de rétention concernant le feu de nappe, se fait en fonction du pouvoir émissif des substances ou des mélanges qu'ils contiennent (on sélectionne un équipement par cuve).

Il est à noter, cependant, que pour ce qui est du PhD éclatement de capacité (rupture catastrophique), l'ensemble des équipements qui figurent en orange sur la figure 4.4 ont été considérés comme sources potentielles d'un tel phénomène dangereux, à l'exception de l'équipement C2.

Effectivement, nous n'avons pas sélectionné l'équipement C2, parce que, de par **sa position** (coordonnées X et Y) et ses caractéristiques, il n'est pas en mesure d'endommager des équipements autres que ceux déjà concernés par les sources choisies. Les effets de surpression qu'il peut générer sont identiques à ceux générés par l'équipement C4 et moins graves que

ceux de l'équipement C1, qui sont considérés comme sources pour ce PhD (éclatement de capacité).

Les équipements C4, G4 et F3 sont considérés comme sources du PhD feu de nappe sur les cuves de rétention auxquelles ils appartiennent respectivement (cuve 2, 5 et 6).

4.2.3 Fréquences d'occurrence des accidents primaires et évaluation des probabilités d'escalade

Le fait de considérer un seul équipement source par cuve de rétention réduit la fréquence d'occurrence du PhD feu de nappe, qu'on peut appeler aussi feu de cuvette, vu que l'épandage de la nappe inflammable est limité dans l'espace grâce à la cuve de rétention. Afin de remédier à ce problème, on multiplie la fréquence d'occurrence du feu de nappe par le nombre d'équipements appartenant à la cuve en question et capables de provoquer ce même PhD.

Rappelons que dans le cas d'un impact direct du feu sur des équipements atmosphériques ces derniers subissent une rupture catastrophique (LOC de type G1) et que la probabilité d'endommagement est égale à un (Cozzani *et al.*, 2006a). Les couronnes d'arrosage ne sont pas en mesure de refroidir suffisamment les équipements se trouvant dans la cuve en feu et le temps nécessaire pour la détection du feu, l'arrivée des équipes d'intervention internes est au moins égale au temps jusqu'à la défaillance (ttf) des équipements soumis à un feu impactant.

Dans le cas d'un accident primaire de type feu de nappe, nous considérons que la chaîne d'accident (chemin de propagation) s'arrête au premier niveau, donc à la première cible, **quand celle-ci appartient à la même cuve de rétention que l'équipement source**. En effet, si le réservoir source ne parvient pas à propager l'accident au-delà de cette cuve, les autres équipements appartenant à la même cuve de rétention ne seront pas en mesure de propager l'accident *via les effets thermiques* suite à leur endommagement. Puisque, les équipements sources sont choisis de façon à représenter le pire des cas concernant l'intensité des effets thermiques (substance ayant le pouvoir émissif le plus élevé), mais aussi, ils contiennent assez de substance pour faire durer le scénario feu de nappe au-delà du temps nécessaire à la rupture des équipements voisins.

Cependant, la possibilité de propagation au deuxième niveau (à d'autres cibles, en dehors de la cuve en feu), via les effets de suppression suite aux éclatements de capacité, est analysée.

Estimation du coût des scénarios dans le cas des feux de nappe (calcul de la gravité)

Étant donné la spécificité du parc de réservoirs étudié (une même cuve de rétention pour plusieurs réservoirs), le coût d'un scénario feu de nappe inclut le coût de l'endommagement de l'ensemble des équipements appartenant à la même cuve. C'est-à-dire, si par exemple, suite à un feu de nappe survenu sur la cuve N°2 un équipement X appartenant à une autre cuve est impacté, la gravité de ce scénario sera calculée en considérant les coûts de l'ensemble des équipements de la cuve N°2 en plus de celui de l'équipement X.

4.2.4 Identification des scénarios dominos (chemins de propagation)

Le nombre des chemins de propagation possibles est très important : 303 scénarios, aussi dans ce paragraphe, on ne présente que ceux initiés par les équipements appartenant à la cuve de rétention numéro 2 (*Voir* tableau 4.23).

Toutefois, l'ensemble des scénarios de deuxième niveau sont présentés à l'Annexe VI (hormis ceux présentés dans cette section). Dans le but de faciliter leur interprétation, nous avons regroupé par tableau les scénarios générés par des équipements appartenant à une même cuve de rétention (un tableau par cuve).

Il faut savoir que la fréquence d'occurrence des scénarios dominos présentés à la deuxième colonne du tableau 4.23 prend en compte la possibilité que ces derniers soient initiés par un autre équipement que celui considéré comme étant source (*Voir* section 4.2.3).

Dans la section qui suit nous expliquons la hiérarchisation des séquences dominos, des équipements sources, ainsi que celle des cibles.

Tableau 4.23(1/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par les équipements de la cuve N°2. LOC_{cible2}, classe perte de confinement supposée apparaitre sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). $f_{Effet\ Domino}$, fréquence de l'effet domino.

CM1	Source1	Accident primaire	Vecteur d'es calade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	$f_{Effet\ Domino}$	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G3	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G4	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G5	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G7	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G2	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Impact des flammes	G6	G1	$5,51 \times 10^{-12}$	80595431	$4,44 \times 10^{-4}$
CM1	C4	Éclatement de capacité	Suppression	C1	Feu de nappe	Impact des flammes	C2	G1	$2,31 \times 10^{-9}$	38443166	$8,88 \times 10^{-2}$
CM1	C4	Éclatement de capacité	Suppression	C1	Feu de nappe	Impact des flammes	C3	G1	$2,31 \times 10^{-9}$	38443166	$8,88 \times 10^{-2}$
CM1	C4	Éclatement de capacité	Suppression	C2	Feu de nappe	Impact des flammes	C1	G1	$2,44 \times 10^{-9}$	42605569	$1,04 \times 10^{-1}$
CM1	C4	Éclatement de capacité	Suppression	C2	Feu de nappe	Impact des flammes	C3	G1	$2,44 \times 10^{-9}$	42605569	$1,04 \times 10^{-1}$
CM1	C1	Éclatement de capacité	Suppression	C2	Feu de nappe	Impact des flammes	C4	G1	$2,44 \times 10^{-9}$	35360504	$8,63 \times 10^{-2}$
CM1	C1	Éclatement de capacité	Suppression	C2	Feu de nappe	Impact des flammes	C3	G1	$2,44 \times 10^{-9}$	35360504	$8,63 \times 10^{-2}$
CM1	C1	Éclatement de capacité	Suppression	C4	Feu de nappe	Impact des flammes	C2	G1	$1,59 \times 10^{-8}$	20330504	$3,24 \times 10^{-1}$
CM1	C1	Éclatement de capacité	Suppression	C4	Feu de nappe	Impact des flammes	C3	G1	$1,59 \times 10^{-8}$	20330504	$3,24 \times 10^{-1}$
CM2	C4	Feu de nappe	Rayonnement thermique	G1	Feu de nappe	Rayonnement thermique	H1	G2	$4,03 \times 10^{-12}$	81362812	$3,28 \times 10^{-4}$
CM1	C4	Éclatement de capacité	Suppression	C1	Éclatement de capacité	Suppression	C2	G1	$4,59 \times 10^{-6}$	25846118	119,00

Tableau 4.23 (2/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par les équipements de la cuve N°2. LOC_{cible2}, classe perte de confinement supposée apparaître sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). $f_{\text{Effet Domino}}$, fréquence de l'effet domino.

CM	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	$f_{\text{Effet Domino}}$	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
CM1	C4	Éclatement de capacité	Surpression	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C3	G1	$4,59 \times 10^{-6}$	19703766	90,4
CM1	C4	Éclatement de capacité	Surpression	C2	Éclatement de capacité	Surpression	C1	G1	$4,84 \times 10^{-6}$	24047446	116,0
CM1	C4	Éclatement de capacité	Surpression	C2	Éclatement de capacité	Surpression	C3	G1	$4,62 \times 10^{-6}$	23678297	109,0
CM1	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C2	Éclatement de capacité	Surpression	C4	G1	$4,84 \times 10^{-6}$	18845368	91,3
CM1	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C2	Éclatement de capacité	Surpression	C3	G1	$4,62 \times 10^{-6}$	9461195	43,7
CM1	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C4	Éclatement de capacité	Surpression	C2	G1	$4,82 \times 10^{-6}$	13139909	63,4
CM1	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C4	Éclatement de capacité	Surpression	C3	G1	$4,82 \times 10^{-6}$	13623598	65,7
CM1	C1	Éclatement de capacité	Surpression	C4	Éclatement de capacité	Surpression	G2	G2	$4,3 \times 10^{-6}$	13139909	56,8

4.2.5 Hiérarchisation des séquences dominos, des équipements sources et des cibles primaires

Il faut souligner que le facteur de danger utilisé pour la hiérarchisation des séquences dominos est différent de celui employé pour la classification des équipements. En effet, le fait de multiplier la fréquence d'occurrence d'un feu de nappe par le nombre d'équipements capables de causer ce PhD, engendre une surestimation du danger lié à l'équipement considéré comme source pour une cuve donnée. Par conséquent, la hiérarchisation des équipements sources ainsi que celle des cibles, se fait sur la base du facteur de danger calculé en considérant la fréquence d'occurrence du feu de nappe suite à la défaillance du seul équipement considéré comme source.

Le tableau 4.24 montre la hiérarchisation des 37 premières séquences dominos de deuxième niveau. La totalité des séquences dominos sont présentées à l'Annexe VII (hormis celles présentées dans cette section). **Plusieurs scénarios peuvent engendrer la même séquence**, c'est pourquoi, l'outil identifie 192 séquences générées par 303 scénarios différents.

Le tableau 4.25 présente la hiérarchisation des équipements sources primaires et sources secondaires (cibles primaires).

Tableau 4.24 Exemple d'hierarchisation séquences dominos de 2^{ème} niveau

Réservoir source 1	Réservoir cible 1/ source 2	Réservoir Cible 2	Fréquence de l'effet domino	Facteur de danger
G1	G5	G6	$4,80 \times 10^{-6}$	185,00
G1	G5	G2	$4,43 \times 10^{-6}$	135,00
C4	C1	C2	$4,58 \times 10^{-6}$	119,00
C4	C2	C1	$4,84 \times 10^{-6}$	117,00
C4	C2	C3	$4,62 \times 10^{-6}$	110,00
G4	G7	G6	$4,84 \times 10^{-6}$	98,00
C1	C2	C4	$4,84 \times 10^{-6}$	91,40
C4	C1	C3	$4,58 \times 10^{-6}$	90,40
G4	G3	G2	$4,85 \times 10^{-6}$	69,70
G7	G3	G4	$4,70 \times 10^{-6}$	69,10
G4	G7	F4	$4,46 \times 10^{-6}$	68,60
C1	C4	C3	$4,84 \times 10^{-6}$	66,10
G4	G7	G2	$4,54 \times 10^{-6}$	64,50
C1	C4	C2	$4,84 \times 10^{-6}$	63,70
G7	G3	G2	$4,85 \times 10^{-6}$	60,90
G7	G4	G2	$4,68 \times 10^{-6}$	58,60
C1	C4	G2	$4,32 \times 10^{-6}$	56,80
C1	C2	C3	$4,62 \times 10^{-6}$	43,80
G4	G7	G3	$4,84 \times 10^{-6}$	43,40
F4	F1	F3	$4,50 \times 10^{-6}$	43,20
F4	F1	F2	$4,84 \times 10^{-6}$	40,80
F4	F1	F6	$4,73 \times 10^{-6}$	39,80
G5	G1	G2	$4,84 \times 10^{-6}$	39,00
F1	F4	G7	$4,32 \times 10^{-6}$	37,30
G7	G4	G3	$4,85 \times 10^{-6}$	35,50
F1	F4	F6	$4,77 \times 10^{-6}$	21,40
F1	F4	F2	$4,34 \times 10^{-6}$	19,40
D1	G4	C4	$1,37 \times 10^{-8}$	1,10
G7	G4	C4	$1,55 \times 10^{-8}$	1,09
G4	G3	C4	$1,36 \times 10^{-8}$	1,07
G7	G3	C4	$1,36 \times 10^{-8}$	1,05
G4	G3	G7	$1,57 \times 10^{-8}$	1,05
G4	G3	G1	$1,57 \times 10^{-8}$	1,05
G4	G3	G5	$1,57 \times 10^{-8}$	1,05
G4	G3	G6	$1,57 \times 10^{-8}$	1,05
G7	G3	G1	$1,57 \times 10^{-8}$	1,03
G7	G3	G5	$1,57 \times 10^{-8}$	1,03

Tableau 4.25 Hiérarchisation des équipements sources et cibles primaires

Hiérarchisation des sources primaires		Hiérarchisation des sources secondaires	
Source 1	Facteur de danger	Source2 /cible1	Facteur de danger
C4	435,21	C2	361,36
C1	321,75	G5	321,58
G4	343,13	G7	268,80
G1	321,58	C4	186,57
G7	235,18	G3	210,25
F4	125,00	C1	209,04
F1	78,36	F1	123,82
G5	39,53	G4	115,11
D1	8,20	F4	78,49
G3	6,64	G1	39,53
F3	0,08	F3	0,19
E1	0,0004	D1	0,0002

4.3 Discussion

D'après le tableau 4.23 (ou encore l'Annexe VI, pour le reste des scénarios) on peut remarquer que les PhD éclatements de capacités (désignés par le chiffre 7 à la colonne « **accident primaire** » de l'Annexe VI) sont simulés uniquement avec le premier ensemble de conditions météorologiques (CM1, Voir tableau 4.21). Cette simplification est possible car le PhD éclatement de capacité n'est pas influencé par les conditions météorologiques.

Par contre, dans le cas d'un scénario de propagation et donc la possibilité de survenue d'autres PhD, les CM peuvent alors influencer le scénario de propagation. C'est pourquoi, on a choisi de simuler ce PhD, ou plus précisément les phénomènes dangereux qui en découlent, en cas de survenue d'un effet domino, avec l'ensemble de CM le plus probable ($P_{CM1} = 0,773$).

On remarque aussi que les scénarios les plus critiques (dernière colonne du tableau 4.23, ou encore de l'Annexe VI) sont ceux causés par le PhD éclatement de capacité. Dès lors, les séquences qui peuvent être causées par ce PhD sont les plus dangereuses, vu que le facteur de danger d'une séquence « $a \rightarrow b \rightarrow c$ » est calculé en additionnant les criticités de l'ensemble des scénarios qui peuvent la provoquer (Voir équation 3.8).

La criticité des scénarios initiés par le PhD éclatement de capacité est plus importante que celle des scénarios initiés par des feux de nappe, parce que :

1. La fréquence d'occurrence du PhD éclatement de capacité correspond à celle du rejet de type G1 et est égale à 5×10^{-6} (an^{-1}) pour les réservoirs atmosphériques (*Voir* tableau 3.3). Par contre, le calcul de la fréquence d'occurrence du PhD feu de nappe, nécessite la considération de la probabilité d'inflammation de la nappe, qui pour cet exemple d'étude a été considérée égale à 0,065 (Purple Book). Cela réduit la fréquence de survenue de ce dernier.
2. De plus, nous considérons une gravité plus importante pour les rejets de type G1 (donc éclatement de capacité) qui se traduit par le coût des scénarios : trois fois le coût de l'équipement endommagé, contre 2 fois le coût de l'équipement pour les LOC de type G2.
3. Les effets thermiques dus aux feux de nappe peuvent être atténués grâce aux couronnes d'arrosage, dans le cas du vecteur d'escalade rayonnement thermique, ce qui fait que la probabilité d'endommagement suite à ce PhD est réduite.

Deux des phénomènes dangereux les plus redoutés à savoir l'UVCE et la dispersion de nuage toxique, ne figurent pas parmi les PhD impliqués dans les scénarios dominos présentés au tableau 4.23 et à l'Annexe VI.

Concernant les UVCE leur improbabilité est due au fait que les substances sont peu volatiles. C'est pourquoi l'évaporation des nappes, qui se forment suite aux rejets ne produit pas suffisamment de vapeur qui permettrait d'atteindre la concentration minimale pour qu'une explosion de nuage ait lieu. Plus exactement, dans le cas étudié (rejet d'un liquide à pression et température atmosphériques), le taux d'évaporation par apport énergétique est très faible, voire nulle, vu que la température du sol est considérée égale à celle de la substance rejetée. Par conséquent, l'évaporation se fait principalement par tirage dû au vent, et ce mode d'évaporation est régi par la pression de vapeur des substances, qui est faible⁹.

⁹ La volatilité des substances peut se mesurer par leur tension de vapeur.

En ce qui concerne la dispersion de nuage toxique, la survenue de ce PhD ne propage pas l'accident, mais peut alourdir considérablement ses conséquences (conséquences sur les humains) et peut dans certains cas causer des effets dominos indirect.

Dans le cas étudié, en aucun cas, l'équipement E1 qui contient de l'Acrylonitrile n'est impliqué dans un scénario de propagation (impacté par les PhD simulés sur les équipements voisins). C'est pour cette raison qu'il ne figure pas sur la troisième colonne du tableau 4.25 qui présente la hiérarchisation des équipements sources secondaires (cible primaire).

D'autre part, lorsqu'on considère l'équipement E1 comme étant la source d'une perte de confinement, les conséquences de ce phénomène ne sont pas rajoutées à ceux des autres PhD lors de l'estimation de la gravité du scénario, parce qu'il y a pas de personnes qui peuvent être **exposées** selon la circulaire du 10 Mai 2010. En effet, une mise à l'abri est possible pour les personnes qui peuvent se trouver à proximité (locaux de l'entreprise X).

De plus, le nombre de personne présentes à l'extérieur du site est nul, puisqu'il n'y a pas de logement, de bâtiment public ou de commerce à proximité de l'entreprise X. Les entreprises voisines sont informées du risque de dispersion de nuage toxique et sont équipées pour y faire face.

Il convient de souligner que la hiérarchisation des séquences est un résultat intermédiaire très important, mais ce n'est pas la finalité de l'outil, les équipements qui causent les séquences les plus dangereuses ne sont pas forcément les équipements les plus dangereux.

En effet, la séquence « G1 → G5 → G6 » (*Voir* tableau 4.24), est considérée comme la plus dangereuse, pourtant l'outil identifie l'équipement C4 comme étant l'équipement source primaire le plus dangereux (*Voir* tableau 4.25). Cela est dû au fait que l'équipement C4 est à l'origine de plusieurs séquences dominos différentes, moins dangereuses que celle évoquée précédemment (« G1 → G5 → G6 »). Cependant, le calcul du facteur de danger de l'équipement C4, en considérant l'ensemble des séquences qu'il provoque est plus important que celui de l'équipement G4.

4.4 Conclusion

La méthode s'est révélée facile à utiliser, comme il a été constaté lors des projets et stages d'étudiants. Air Liquide publiera prochainement un exemple concret de l'utilisation de cette méthode par un stagiaire INSA sur une de leurs applications. Du fait qu'elle tient compte des distances réelles qui séparent les sources d'accidents de leurs cibles, elle permet de considérer le déplacement des nuages explosifs et des nappes inflammables. Par conséquent, il est possible de considérer les sources d'inflammation réelles et d'estimer des paramètres importants pour la quantification des conséquences des accidents, tel que le niveau d'encombrement de la zone occupée par le nuage inflammable dans le cas des UVCEs.

L'application de l'outil proposé à deux cas d'étude a permis de confirmer la nature imprévisible et complexe des effets dominos. Les équipements capables de provoquer des accidents primaires graves ne sont pas forcément ceux qui sont les plus dangereux par rapport aux effets dominos. Effectivement, l'identification des équipements les plus dangereux par rapport à ce phénomène nécessite la prise en compte de plusieurs paramètres (conditions météorologiques, temps nécessaire pour d'intervention des secours, positions des équipements, leurs coûts,...).

Le choix des modèles de vulnérabilité influence les résultats obtenus, par conséquent il faut choisir le modèle le plus adéquat selon le cas étudié, et l'adapter si nécessaire ainsi que nous l'avons présenté dans le chapitre 1 section 1.4.3.2.

La principale cause du PhD éclatement de capacité atmosphérique, en dehors des scénarios de propagation (pressurisation lente d'un bac atmosphérique pris dans un feu de nappe), est l'explosion de vapeurs inflammables dans un bac vide mal dégazé ou lors des opérations de nettoyages, dégazages (explosions internes). Du fait que les événements incitateurs de ce PhD ne sont pas les mêmes que ceux de l'explosion de capacité sous pression, cela contribue à ce que ce type de PhD soit considéré en quelque sorte, moins probable et donc moins critique que l'explosion de capacité sous pression. Toutefois, même si les effets de surpression suite à l'éclatement de capacité atmosphérique ne sont pas aussi dévastateurs que ceux générés par l'explosion d'équipement sous pression, ils peuvent endommager les équipements dans le

champ proche. Par conséquent, l'éclatement de capacités atmosphériques ne doit pas être négligé lors des études de dangers.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les effets dominos ou cascade d'événements dans les industries et particulièrement dans les industries chimiques et de transformation, sont reconnus comme des scénarios d'accidents possibles depuis environ trois décennies. Ils représentent une préoccupation croissante, car ils ont le potentiel de provoquer des conséquences dévastatrices. L'effet domino, comme phénomène, est un sujet controversé lorsque son évaluation est nécessaire. L'examen de la bibliographie portant sur ce dernier a démontré l'absence d'une définition commune et d'une procédure simple d'utilisation et précise pour son appréciation. En effet, la définition de ce phénomène et les critères techniques pour identifier la possibilité d'escalade, notamment les valeurs seuils sont toujours discordantes dans les normes techniques et la littérature scientifiques. L'absence de critères harmonisés pour l'identification et l'analyse de tels scénarios a été confirmée par une analyse des pratiques actuelles à l'échelle européenne, où une législation spécifique qui exige l'évaluation des scénarios dominos est en vigueur depuis environ 20 ans.

À l'heure actuelle l'étude des effets dominos se résume au calcul des distances d'effets et à la délimitation de zones de dangers. L'analyse effectuée dans les États membres de l'Union Européenne est purement qualitative. Pourtant la probabilité de survenue des éventuels dommages doit être calculée pour pouvoir se prononcer sur l'acceptabilité du risque.

Nous avons développé une méthodologie globale pour l'étude des effets dominos en chaîne initiés par des pertes de confinement. Celle-ci facilite la prise de décision concernant la prévention des effets dominos et répond au besoin d'un outil efficace et simple d'utilisation. Les résultats de l'étude sont fournis sous forme d'une hiérarchisation quantitative des équipements impliqués dans les scénarios dominos, en tenant compte des effets des conditions météorologiques et des mesures de maîtrise des risques existantes ou proposées. Cette hiérarchisation donne une idée claire des dangers que représentent les équipements par rapport aux accidents en cascade, en précisant si la dangerosité de l'équipement provient de sa capacité à initier ou à propager un effet de cascade.

La méthode a été conçue de façon à ce qu'elle puisse être utilisée sans qu'il soit nécessaire de s'appuyer sur les résultats des études de dangers. Néanmoins, si ces résultats sont disponibles, cela permet d'alléger certaines étapes de la méthode. Elle s'est révélée facile à utiliser, cela a été constaté lors de son application dans le cadre des projets et stages d'étudiants. Un autre exemple de son application à un cas réel sera prochainement publié par Air Liquide. L'application a été réalisée par un étudiant INSA lors d'un stage de spécialisation. Les interfaces utilisateurs ont été améliorées lors de ce stage (*Voir Annexe VIII*).

Nous avons atteint l'objectif de développer une méthode efficace et simple d'utilisation pour la prévention des effets dominos. Toutefois, nous tenons à rappeler qu'une telle démarche ne vise pas à remplacer le déplacement d'un groupe de travail sur le terrain afin d'effectuer une analyse des risques. En revanche, elle permet d'axer les efforts sur les installations les plus dangereuses, par l'allocation de plus de ressources humaines et financières.

En effet, étant donné les simplifications citées ci-après, elle est valable pour une analyse préliminaire du risque et nécessite une analyse plus approfondie pour les équipements identifiés comme étant les plus dangereux du point de vue de la propagation des accidents. En d'autres termes, elle sert d'outil d'aide à la décision, qui facilite la prise en compte des effets dominos lors des analyses de risques. Ainsi, il est possible de centrer les efforts des groupes de travail, autour de ces équipements ciblés, et de les examiner avec plus de détails. Par exemple, en utilisant des outils plus sophistiqués (Ex. : examen détaillé de la possibilité d'escalade pour un équipement ou un scénario, moyennant des outils CFD, calcul de la résistance des structures par éléments finis, *etc.*).

Les limites de la méthode résident principalement dans le fait qu'elle ne prend pas en compte les effets missiles et la possibilité d'accidents secondaires simultanés.

Les perspectives d'amélioration peuvent être résumées comme suit :

Généraliser les événements initiateurs des accidents primaires à d'autres causes, notamment d'origine externe à l'équipement source. Par exemple, les actes de malveillance ou encore les causes naturelles : inondations, tremblement de terre. Même si le déroulement des séquences accidentelles reste le même, ces types de causes nécessitent de revoir l'un des principes de

l'analyse des risques dans les industries des procédés, à savoir l'impossibilité de survenue de plusieurs défaillances simultanées sur différents équipements du site.

Par conséquent, une autre perspective et d'inclure la possibilité de survenue **d'accidents secondaires** simultanés (donc effets dominos parallèles), ce qui nécessiterait l'estimation des fréquences des scénarios simultanés, et aussi la prise en compte des effets de synergie qui en découlent :

Concernant le calcul de la fréquence de tels événements, cela peut être fait, soit en interfaçant l'outil proposé avec un programme spécialement conçu pour le calcul des fréquences comme l'outil FREEDOM (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2010). Ou encore à l'aide des réseaux bayésiens. Cette piste d'amélioration est explorée et un outil est actuellement en cours de développement par l'équipe du professeur Cozzani (nos partenaires Italiens, DICAM, Université de Bologne) pour permettre d'effectuer le calcul des fréquences à l'aide des réseaux bayésiens.

Pour ce qui est des effets de synergie, l'utilisation des outils CFD et le calcul par éléments finis s'impose. C'est pourquoi en l'état actuel des choses (puissance des ordinateurs disponibles,...) il faudrait limiter un tel approfondissement de l'étude aux équipements les plus vulnérables parmi ceux identifiés comme étant dangereux. Cette limite ne peut donc être dépassée que par le développement d'outils informatiques avec des capacités de calcul plus performantes.

À terme il serait intéressant de proposer deux versions différentes de l'outil avec des interfaces utilisateurs améliorées : une version simplifiée qui permettrait une analyse préliminaire **rapide**, et une version plus complète.

La version complète serait interfacée avec d'autres outils pour calculer les fréquences des scénarios et leurs conséquences. Elle permettrait d'intégrer les effets missiles, par exemple à l'aide de la méthode proposée par Nguyen (2009). Cette dernière est applicable pour certains cas (formes du projectile et type de la cible) et nécessite des temps de calculs significatifs (Nguyen, 2009). L'interfaçage avec l'outil RADMOD interne à la DICAM (Gubinelli et Cozzani, 2005) conçu pour calculer le temps jusqu'à la défaillance (*time to failure, ttf*) des équipements soumis à des flux thermiques (par actions directes des flammes ou par rayonnement) permettrait d'examiner plus en détails la possibilité d'escalade due à des feux.

La dernière proposition serait d'interfacer l'outil avec les modèles de gestion de crise et organisation des secours développés par nos collègues du LITIS. En effet, en fonction des scénarios de propagation identifiés il serait plus facile de prévoir les conséquences, d'orienter les secours et ainsi anticiper la gestion en situation de crise.

ANNEXE I
Évaluation des distances d'effets dominos par différents États Membres de l'UE

Tableau 1 (1/4) Résumé des outils utilisés pour l'évaluation des distances dominos et des législations ou réglementations nationales les qui la régissent dans différents États Membres de l'UE.

État membre	Contexte de l'évaluation	Les méthodes, outils et logiciels d'analyse	Évaluation des distances seuils	Législation relative aux valeurs seuils
La région Flamande, Belgique	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II. Législation régionale : rapports de sécurité environnementale (OVR) exigés par le décret du 05/04/1995 : <i>houdende algemene bepalingen inzake milieubeleid</i> (communément appelé DABM).	Analyse quantitative des risques en utilisant différentes méthodes et outils certifiés par les experts en sécurité : Logiciels commerciaux : EFFECTS/RISKCURVES; PHAST RISK; SAVE II. Logiciels indisponibles sur le marché, développés par des experts en sécurité certifiés.	Modèle spécifique recommandé Surpression : VCE : méthode multi-énergie, BLEVE, explosion de capacité sous pression : méthode de Baker-Strehlow. Thermique : Boule de feu: TNO, HSE, le SFPE et le modèle de Martinsen et Marx. Feu de nappe: POLF (Phast), POOLFIRE6, le modèle TNO, le modèle de SAVE II et celui de Mudan et Croce. Jet enflammé: modèle de Chamberlain, modèle de Cook, et celui de Johnson. Projection de fragments : Non inclus dans le calcul des effets dominos.	Les valeurs seuils pour les effets dominos ne sont pas précisées dans la législation, mais décrites dans les guides pour l'élaboration des rapports de sécurité (guides fournis par AMINAL).
La région Wallonne, Belgique	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II. Législation régionale : Études de sûreté (ES) et Notices d'identification des dangers (NID) exigés par le décret du gouvernement Wallon du 04/07/2012.	Méthodes : ARAMIS, analyse quantitative (Purple book). Logiciels commerciaux : PHAST; EFFECTS. Logiciel interne (développé à l'université de Mons par Delvosalle <i>et al.</i> , 2002) : DOMINOXL.	Surpression : Aucun modèle spécifique recommandé. Thermique : Aucun modèle spécifique recommandé. Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.	Guides régionale (Vade-Mecum- spécifications techniques relatives au contenu et à la présentation des études de sûreté, des notices d'identification des dangers et des rapports de sécurité (partie région Wallonne), Janvier 2005.

Tableau 1 (2/4) Résumé des outils utilisés pour l'évaluation des distances dominos et des législations ou réglementations nationales qui la régissent dans différents États Membres de l'UE.

État membre	Contexte de l'évaluation	Les méthodes, outils et logiciels d'analyse	Évaluation des distances seuils	
			Modèle spécifique recommandé	Législation relative aux valeurs seuils
La région Catalogne, Espagne	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II.	Méthode : Analyse quantitative des risques (Purple book, Reference manual Bevi risk assessments, « Bevi 3.2 »). Logiciels commerciaux : EFFECTS, RISKCURVES. Logiciels gratuit : ALOHA.	<p>Surpression : modèle de l'équivalent TNT, méthode multi-énergie. Yellow book, Purple book</p> <p>Thermique : Green book, Yellow book, Bevi 3.2.</p> <p>Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.</p>	<p><i>Decret 174/2001 de la Generalitat de Catalunya corresponent a l'aplicació a Catalunya del Real Decreto 1254/1999 de 16 de juliol de 1999 (B. O. E. de 20 de juliol de 1999).</i></p> <p><i>Directriz Básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen substancias peligrosas aprobada por el Real Decreto 1196/2003 de 19 de Setiembre de 2003 (B. O. E. de 9 de Octubre de 2003).</i></p> <p><i>Llei 12/2008 de 31 de juliol de Seguretat Industrial (DOGC n° 5191 de 8 d'agost de 2008).</i></p> <p><i>Instrucció 11/2010 SIE (Generalitat de Catalunya, 29 d'octubre de 2010).</i></p>
Grèce	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II.	EFFECTS, ALOHA, PHAST, SOCRATES.	<p>Surpression : modèle de l'équivalent TNT, méthode multi-énergie. Yellow book, Purple book.</p> <p>Thermique : Green book, Yellow book.</p> <p>Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.</p>	<p>Aucune (les seuils ne sont pas définis dans la législation). Les valeurs indiquées dans le tableau 2.7 sont utilisées dans la pratique.</p>
Pologne	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II.	Il n'existe pas d'outils ou de méthodes recommandés.	<p>Surpression : Aucun modèle spécifique recommandé.</p> <p>Thermique : Aucun modèle spécifique recommandé.</p> <p>Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.</p>	<p>Aucune (les seuils ne sont pas définis dans la législation). Les valeurs indiquées dans le tableau 2.7 sont utilisées dans la pratique.</p>

Tableau 1. (3/4) Résumé des outils utilisés pour l'évaluation des distances dominos et des législations ou réglementations nationales qui la régissent dans différents États Membres de l'UE.

État membre	Contexte de l'évaluation	Les méthodes, outils et logiciels d'analyse	Évaluation des distances seuils	Législation relative aux valeurs seuils
France	Les études de dangers exigées par la transcription en droit Français de la directive Seveso II (Législation ICPE).	Des orientations, recommandations, et des règles méthodologiques sont données par la Circulaire du 10 Mai 2010. Il n'existe pas de méthodes exigées.	<p>Modèle spécifique recommandé</p> <p>Surpression : VCE: méthode multi-énergie (Yellow Book, TNO), la méthode CAM^a, ou la méthode de Baker-Strehlow. BLEVE : modèle de Shield (TRC^b), pour des taux de remplissage compris entre 30 et 85%. Sinon aucun modèle n'est recommandé. Thermique : modèle de Shield (TRC), pour des taux de remplissage compris entre 30 et 85%. Sinon aucun modèle n'est recommandé.</p> <p>Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.</p>	<p>Législation Française, Arrêté ministériel du 29/09/05 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.</p>
Pays-Bas	Les rapports de sécurité exigés par la directive Seveso II. Les rapports d'analyses quantitatives des risques exigés par le décret Bevi, Décret sur la sécurité extérieure des aménagements : <i>Bestluit Externe Veiligheid Inrichtingen</i> (BEVI).	Reference Manual Bevi Risk Assessments; <i>Instrument Domino-Effecten</i> (IDE); Publication series of hazardous substances (Publicatierieks Gevaarlijke Stoffen, PGS). Logiciels commerciaux : SAFETI-NL, PHAST, Risk- NL.	<p>Surpression : modèle de l'équivalent TNT, méthode multi-énergie (TNO), Yellow Book, AASTP-1. Thermique : Green Book, Yellow Book, AASTP-1. Projection de fragments : Green Book; AASTP-1.</p>	<p>La législation Néerlandaise, Ministère du logement, de l'aménagement du territoire et de l'environnement : Décret sur les risques d'accidents majeurs : <i>Bestluit Risico's Zware Ongevallen</i> (BRZO, 1999). Décret sur la sécurité externe des établissements : <i>Bestluit externe veiligheid inrichtingen</i> (BEVI) 27/04/2004.</p>

^a CAM : Congestion Assessment Method, Shell. ^b TRC, Thornton Research Centre (Le Centre de Recherche de SHELL). AASTP-1. Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives.

Tableau 1. (4/4) Résumé des outils utilisés pour l'évaluation des distances dominos et des législations ou réglementations nationales qui la régissent dans différents États membres de l'UE.

État membre	Contexte de l'évaluation	Les méthodes, outils et logiciels d'analyse	Évaluation des distances seuils	Législation relative aux valeurs seuils
Italie	Les rapports de sécurité exigés par la transcription en droit Italien de la directive Seveso II. (D.Lgs.334/99).	Les critères généraux sont donnés dans DPCM 31/3/1989. Il n'existe pas de méthodes exigées.	<p>Modèle spécifique recommandé</p> <p>Suppression : Aucun modèle spécifique recommandé.</p> <p>Thermique : Aucun modèle spécifique recommandé.</p> <p>Projection de fragments : Aucun modèle spécifique recommandé.</p>	Législation Italienne, D.M. 09/05/2001 (<i>Requisitissimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante</i>).
Royaume-Uni, Grande-Bretagne (Angleterre, Écosse, pays de Galles)	Les notifications COMAH (Seveso). La maîtrise de l'urbanisation. Les notifications de l'autorité compétente concernant l'identification des groupes dominos.	Analyses des risques dans le cadre de la maîtrise de l'urbanisation, soit : 1) Analyse quantitative des risques (risque de recevoir une dose dangereuse spécifiée). 2) Évaluation des concepts de protection (varient jusqu'à un niveau spécifié de dommages, en générale, seuil de décès pour une population vulnérable). Ou : une combinaison de ce qui précède pour un établissement particulier.	<p>Suppression : VCE : méthode multi-énergie (TNO) Explosion d'explosifs condensés solides : modèle de l'équivalent TNT.</p> <p>Thermique : Feu de nappe, jet enflammé et boule de feu : modèles internes (HSE). Feu de nuage : le modèle de dispersion DRIFT. Gaz toxique : Dispersion de toxique : modèle de dispersion DRIFT.</p> <p>Feu d'entrepôt : modèles internes (HSE) pour les incendies d'entrepôt de pesticide. L'enrichissement en oxygène : modèle de dispersion DRIFT. Projection de fragments : analyse des accidents passés.</p>	Aucune (les seuils ne sont pas définis dans la législation). Les valeurs indiquées dans le tableau 2.7 sont définies par le HSE dans le cadre d'une politique d'évaluation, afin de fournir des conseils pour la maîtrise de l'urbanisation.

ANNEXE II

Seuils des effets sur les structures (adapté du guide d'estimation des dommages, ministère du développement durable)

Tableau (1/2) Seuils relatifs aux effets de surpression

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures			
Type de dégâts constatés	Surpression (mbar)	% dommages estimés	Références
Seuils des dégâts graves sur les structures			
Effondrement partiel des murs, des toits et tuiles des maisons			
Limite inférieure des dommages graves aux structures (la plupart des dégâts sont réparables et correspondent à des tuiles projetées, des vitres cassées, des panneaux tordus, fissures dans murs)			
Effondrement partiel de murs de 20 cm d'épaisseur (INRS)			
Vitres de voitures face à l'onde surpression explosées			
Légères fissures dans les murs en brique de 30 cm d'épaisseur	140	50%	Lannoy (1984) Lees (1996) Green Book-TNO (1989) Clancey (1972) INRS (1994) Bit (1993) + analyses acc.
Toiture en fibrociments détruite			
Charpente bois lamellé collé porteuse en partie détruite			
Déformation de réservoirs de stockage de 150 m ³ (avec robe de 3mm d'épaisseur)			
cassures dans les murs légers (plâtre, fibrociment, bois, tôle)			
Revêtement de murs en PVC éclaté			
Joint entre tôles ondulées en acier ou aluminium arrachés			
Fissure dans la robe d'un réservoir métallique			
Seuil des effets dominos			
Rupture des structures métalliques et déplacement des fondations			
Fissure ou rupture des réservoirs de stockage			
Murs en parpaings ou béton non armé détruit			
Lézardes et cassures dans les murs béton ou parpaings non armés de 20 à 30 cm			
Destruction à 50 % des maisons en briques			
Destruction de 50% des maisons en briques (INRS)	200	100%	Lechaudel (1995) Michaelis (1995) AZF (2001)
Maisons inhabitables, effondrement partiel ou totale de la toiture, démolition d'1 ou 2 murs extérieurs, dégâts importants aux murs porteurs intérieurs (INRS)			
Véhicules sur parking : vitres cassées et carrosserie sérieusement endommagée			
Toitures détruites			
Déformations légères des canalisations			
Légers dommages aux machines dans les bâtiments industriels, cadres en acier des bâtiments déformés et/ou arrachés de leurs fondations			

Tableau 1 (2/2) Seuils relatifs aux effets de surpression

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures			
Type de dégâts constatés	Surpression (mbar)	% dommages estimés	Références
Seuils des dégâts très graves sur les structures			
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage			Lannoy (1984), Lees (1996), Green Book-TNO (1989), Clancey (1972)
Destruction des poteaux	300	100%	INRS (1994), Bit (1993) + analyses acc. Lechaudel (1995) Michaelis (1995) AZF (2001)
Revêtement des bâtiments industriels légers soufflé			
Maisons d'habitation détruites			
Déplacement d'un rack de canalisations, rupture des canalisations			
Bardage acier des bâtiments arrachés, détruits			

Tableau 2 Seuils relatifs aux effets thermiques

Seuils thermiques relatifs à la résistance des structures				
Type de dégâts constatés	Flux en $(\text{[kW/m}^2\text{)]}^{4/3} \cdot \text{s}$	< 2 min	> 2 min	Références
Seuil thermique relatif aux effets dominos				
La peinture cloque				
Destruction des éléments de structures en verre				
Apparition d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles (tels que le bois) en présence d'une source d'ignition	1800	10% (*)	8	50%
Propagation de feu probable sans mesure de refroidissement suffisante				
Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton				GESIP (1991)
Flux limite de tenue des structures pour une exposition prolongée, hors structure béton				
Inflammation des surfaces exposées au flux radiatif et ainsi rupture ou destruction des éléments de structures selon les cas suivants : (i) Bois ; (ii) Matières synthétiques	-	15%	16	100%
Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton				Green Book-TNO (1989) API RP 521 (1990)
Tenue du béton pendant plusieurs heures				
Auto-inflammation du bois	-	20%	20	100%
Déformations significatives d'éléments de structure en acier				
Propagation du feu à des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, même refroidis				
Auto-inflammation des matériaux plastiques thermodurcissables				
Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes	-	30%	200	100%

(*) Pourcentage de dégâts estimés.

ANNEXE III

Exemples d'interfaces utilisateur

a

Définition des équipements

Définition de l'équipement N°1

Catégories:

Sous catégories:

Types:

Coordonnée en X : m

Coordonnée en Y : m

Coordonnée en Z : m

Volume m³

Choix:

b

Matière dangereuse (caractéristiques et conditions)

Description du contenu de l'équipement N°1

Quantité (masse) de la matière: kg

Température de stockage/manipulation: °C

Pression de stockage/manipulation: bar

Phase de la matière

Solide

Gazeuse

Diphasique

Liquide

Catégorie de la substance

Explosive

Extrêmement inflammable

Très inflammable

Inflammable

Figure 1 (a) Interface utilisateur pour décrire les équipements. (b) Interface utilisateur pour décrire les substances

ANNEXE IV

Traduction des termes anglais désignant les types équipements atmosphériques ou cryogéniques (adaptée de Forest *et al.*, 2007)

Type d'équipement en anglais	Traduction avec explication
Single-containment tank	Réservoir à simple paroi
Tank with a protective outer shell	Réservoir à double paroi, la 2 ^{ème} paroi retient le liquide mais pas la vapeur, et n'est pas capable de résister aux surcharges (pression d'explosion ou projectiles ¹)
Double containment tank	Réservoir à double paroi, la 2 ^{ème} paroi retient le liquide mais pas la vapeur, et est capable de résister aux surcharges (pression d'explosion ou projectiles)
Full containment tank	Réservoir à double paroi, la 2 ^{ème} paroi retient le liquide et la vapeur et est capable de résister aux surcharges (pression d'explosion ou projectiles)
Membrane tank	Réservoir à membrane, le récipient primaire est constitué par une membrane non autoportante qui contient le liquide et sa vapeur en fonctionnement normal. Le récipient secondaire est autoportant et contient le récipient primaire. Le récipient secondaire a la capacité de contenir tout le liquide et de réaliser l'évacuation contrôlée de la vapeur
In-ground tank	Réservoir sous talus, le niveau du liquide est sous ou au même niveau que le sol
Mounded tank	Réservoir totalement enterré, le niveau du liquide est sous le niveau du sol

¹ Effets missiles suite à une explosion : projection de fragments (parties d'un réservoir explosé)

ANNEXE VI
Scénarios dominos de 2^{ème} niveau

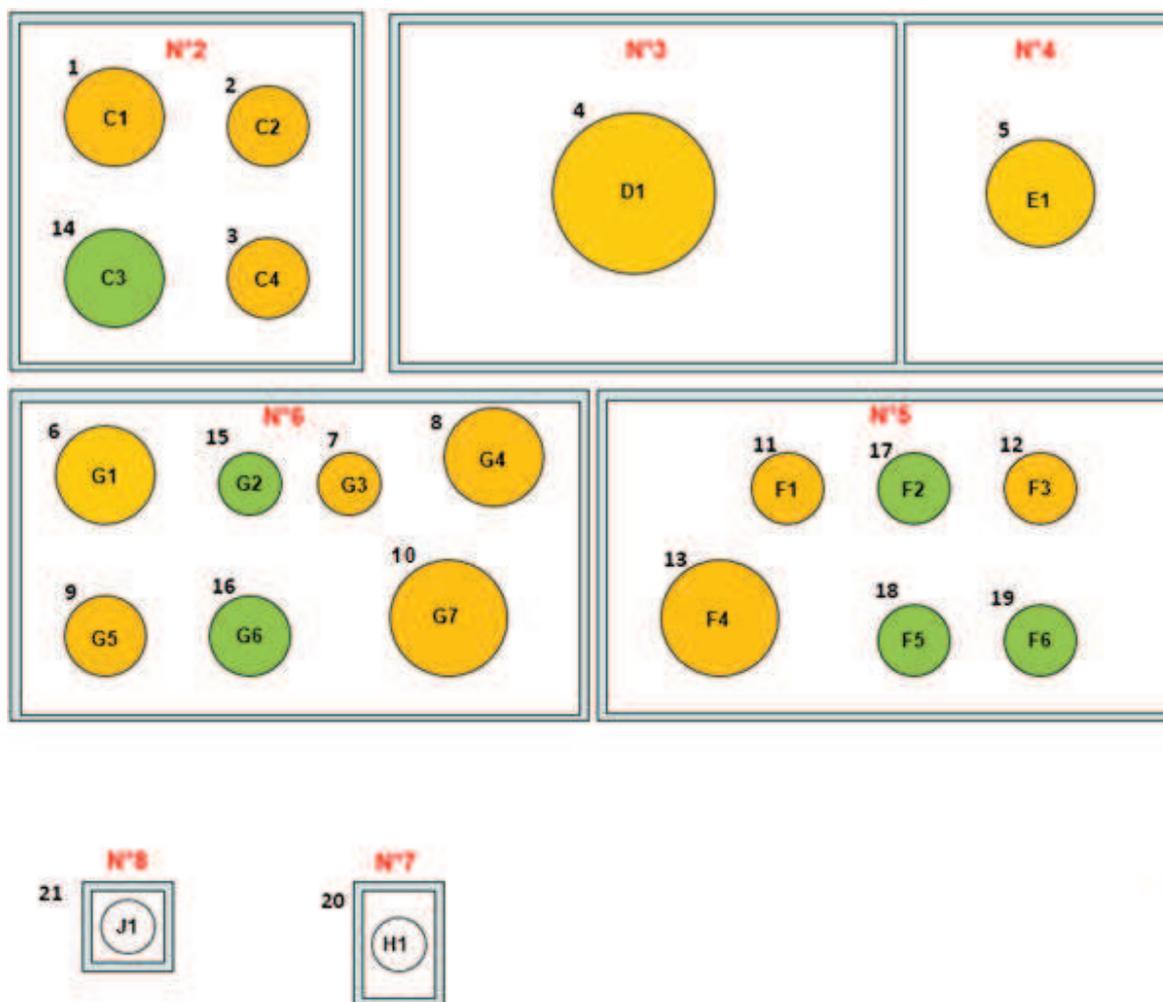


Figure 1 Numéros attribués aux équipements

La figure ci-dessus indique le numéro attribué dans le code de calcul pour les différents équipements. Cette dernière permet de lire les tableaux de l'Annexe VI et VII.

De plus, à la 3^{ème} et 6^{ème} colonne (accident primaire et accident secondaire), le numéro 2 est utilisé pour désigner le phénomène dangereux feu de nappe et le numéro 7 pour le PhD éclatement de capacité.

Tableau 1 (1/3) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par l'équipement D1 (cuve N°3). LOC_{cible2}, classe perte de confinement supposée apparaitre sur la cible secondaire (Voir Tableau 3.1). $f_{E,ffet\ Domino}$, fréquence de l'effet domino.

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	$f_{E,ffet\ Domino}$	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
2	4	2	2	7	2	1	16	GI	1.75E-12	67595334	1.19E-04
2	4	2	2	8	2	1	6	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	8	2	1	7	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	8	2	1	9	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	8	2	1	10	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	8	2	1	15	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	8	2	1	16	GI	1.84E-12	65128887	1.20E-04
2	4	2	2	10	2	1	6	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	10	2	1	7	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	10	2	1	8	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	10	2	1	9	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	10	2	1	15	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	10	2	1	16	GI	2.38E-13	59729543	1.42E-05
2	4	2	2	11	2	1	12	GI	1.33E-13	19140558	2.54E-06
2	4	2	2	11	2	1	13	GI	1.33E-13	19140558	2.54E-06
2	4	2	2	11	2	1	17	GI	1.33E-13	19140558	2.54E-06
2	4	2	2	11	2	1	18	GI	1.33E-13	19140558	2.54E-06
2	4	2	2	11	2	1	19	GI	1.33E-13	19140558	2.54E-06
1	4	7	3	8	2	1	6	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
1	4	7	3	8	2	1	7	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
1	4	7	3	8	2	1	9	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
1	4	7	3	8	2	1	10	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
1	4	7	3	8	2	1	15	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
1	4	7	3	8	2	1	16	GI	1.41E-08	68129302	9.63E-01
2	4	2	2	3	2	2	6	G2	8.60E-13	54237684	4.66E-05
2	4	2	2	3	2	2	15	G2	4.08E-13	40576083	1.65E-05
2	4	2	2	7	2	2	20	G2	8.36E-13	72751359	6.08E-05
2	4	2	2	8	2	2	20	G2	1.68E-12	70284912	1.18E-04
2	4	2	2	8	2	2	21	G2	8.63E-13	68172912	5.88E-05
2	4	2	2	10	2	2	20	G2	1.96E-13	64885568	1.27E-05
2	4	2	2	3	2	2	6	G2	8.60E-13	51237268	4.40E-05
2	4	2	2	3	2	2	15	G2	4.08E-13	37575667	1.53E-05
2	4	2	2	7	2	2	20	G2	8.36E-13	69750943	5.83E-05
2	4	2	2	8	2	2	20	G2	1.68E-12	67284496	1.13E-04

Tableau 1 (2/3)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
2	4	2	2	8	2	2	21	G2	8.63E-13	65172496	5.62E-05
2	4	2	2	10	2	2	20	G2	1.96E-13	61885152	1.21E-05
1	4	7	3	8	2	2	2	G2	7.74E-09	69895566	5.41E-01
1	4	7	3	8	2	2	3	G2	1.38E-08	79915566	1.10E+00
1	4	7	3	8	2	2	13	G2	3.22E-09	73670669	2.37E-01
1	4	7	3	8	2	2	14	G2	8.73E-09	72348042	6.32E-01

Tableau 1 (3/3)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
2	5	2	2	11	2	1	12	G1	1.47E-12	19859161	2.91E-05
2	5	2	2	11	2	1	13	G1	1.47E-12	19859161	2.91E-05
2	5	2	2	11	2	1	17	G1	1.47E-12	19859161	2.91E-05
2	5	2	2	11	2	1	18	G1	1.47E-12	19859161	2.91E-05
2	5	2	2	11	2	1	19	G1	1.47E-12	19859161	2.91E-05
2	5	2	2	12	2	1	11	G1	6.74E-13	20686637	1.39E-05
2	5	2	2	12	2	1	13	G1	6.74E-13	20686637	1.39E-05
2	5	2	2	12	2	1	17	G1	6.74E-13	20686637	1.39E-05
2	5	2	2	12	2	1	18	G1	6.74E-13	20686637	1.39E-05
2	5	2	2	12	2	1	19	G1	6.74E-13	20686637	1.39E-05
2	5	2	2	11	2	1	12	G1	1.47E-12	17619350	2.58E-05
2	5	2	2	11	2	1	13	G1	1.47E-12	17619350	2.58E-05
2	5	2	2	11	2	1	17	G1	1.47E-12	17619350	2.58E-05
2	5	2	2	11	2	1	18	G1	1.47E-12	17619350	2.58E-05
2	5	2	2	11	2	1	19	G1	1.47E-12	17619350	2.58E-05
2	5	2	2	12	2	1	11	G1	6.74E-13	18446826	1.24E-05
2	5	2	2	12	2	1	13	G1	6.74E-13	18446826	1.24E-05
2	5	2	2	12	2	1	17	G1	6.74E-13	18446826	1.24E-05
2	5	2	2	12	2	1	18	G1	6.74E-13	18446826	1.24E-05
2	5	2	2	12	2	1	19	G1	6.74E-13	18446826	1.24E-05
2	5	2	2	11	2	2	10	G2	3.24E-13	19954876	6.48E-06
2	5	2	2	12	2	2	8	G2	1.89E-13	20782352	3.93E-06
2	5	2	2	12	2	2	10	G2	3.18E-13	20782352	6.60E-06
2	5	2	2	11	2	2	10	G2	3.24E-13	21864716	7.09E-06
2	5	2	2	12	2	2	8	G2	1.89E-13	23891307	4.52E-06
2	5	2	2	12	2	2	10	G2	3.18E-13	22692192	7.20E-06

Tableau 2 Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par l'équipement EI (cuve N°4)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
2	12	2	2	8	2	1	6	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	8	2	1	7	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	8	2	1	9	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	8	2	1	10	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	8	2	1	15	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	8	2	1	16	GI	1.56E-12	73729803	1.15E-04
2	12	2	2	10	2	1	6	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	10	2	1	7	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	10	2	1	8	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	10	2	1	9	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	10	2	1	15	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	10	2	1	16	GI	4.01E-13	68330459	2.74E-05
2	12	2	2	8	2	1	6	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	8	2	1	7	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	8	2	1	9	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	8	2	1	10	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	8	2	1	15	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	8	2	1	16	GI	1.56E-12	73095258	1.14E-04
2	12	2	2	10	2	1	6	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
2	12	2	2	10	2	1	7	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
2	12	2	2	10	2	1	8	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
2	12	2	2	10	2	1	9	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
2	12	2	2	10	2	1	15	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
2	12	2	2	10	2	1	16	GI	4.01E-13	67695914	2.71E-05
1	11	7	3	12	2	1	13	GI	2.28E-09	15622154	3.57E-02
1	11	7	3	12	2	1	17	GI	2.28E-09	15622154	3.57E-02
1	11	7	3	12	2	1	18	GI	2.28E-09	15622154	3.57E-02
1	11	7	3	12	2	1	19	GI	2.28E-09	15622154	3.57E-02
1	11	7	3	13	2	1	12	GI	2.46E-09	9213739	2.26E-02
1	11	7	3	13	2	1	17	GI	2.46E-09	9213739	2.26E-02
1	11	7	3	13	2	1	18	GI	2.46E-09	9213739	2.26E-02
1	11	7	3	13	2	1	19	GI	2.46E-09	9213739	2.26E-02
1	13	7	3	10	2	1	6	GI	2.19E-09	62040762	1.36E-01
1	13	7	3	10	2	1	7	GI	2.19E-09	62040762	1.36E-01

Tableau 3 (1/2) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par les équipements appartenant à la cuve N°5.

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'es calade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	F _{eff} et Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	13	7	3	10	2	1	8	G1	2.19E-09	62040762	1.36E-01
1	13	7	3	10	2	1	9	G1	2.19E-09	62040762	1.36E-01
1	13	7	3	10	2	1	15	G1	2.19E-09	62040762	1.36E-01
1	13	7	3	10	2	1	16	G1	2.19E-09	62040762	1.36E-01
1	13	7	3	11	2	1	12	G1	2.44E-09	15757052	3.85E-02
1	13	7	3	11	2	1	17	G1	2.44E-09	15757052	3.85E-02
1	13	7	3	11	2	1	18	G1	2.44E-09	15757052	3.85E-02
1	13	7	3	11	2	1	19	G1	2.44E-09	15757052	3.85E-02
1	12	2	2	4	2	2	5	G2	2.22E-13	25082202	5.57E-06
2	12	2	2	8	2	2	20	G2	1.42E-12	75885413	1.08E-04
2	12	2	2	8	2	2	21	G2	7.30E-13	73773413	5.38E-05
2	12	2	2	10	2	2	20	G2	3.30E-13	70486069	2.33E-05
2	12	2	2	4	2	2	5	G2	2.22E-13	24447657	5.43E-06
2	12	2	2	8	2	2	20	G2	1.42E-12	75250868	1.07E-04
2	12	2	2	8	2	2	21	G2	7.30E-13	73138868	5.34E-05
2	12	2	2	10	2	2	20	G2	3.30E-13	69851524	2.31E-05
1	11	7	3	12	2	2	4	G2	5.08E-10	21622986	1.10E-02
1	11	7	3	12	2	2	5	G2	2.12E-09	20101778	4.26E-02
1	11	7	3	13	2	2	5	G2	2.27E-09	13693362	3.10E-02
1	13	7	3	10	2	2	2	G2	8.03E-10	63807026	5.12E-02
1	13	7	3	10	2	2	3	G2	2.08E-09	73827026	1.54E-01
1	13	7	3	10	2	2	4	G2	1.43E-09	68041593	9.75E-02
1	13	7	3	10	2	2	14	G2	1.03E-09	66259502	6.86E-02
1	13	7	3	11	2	2	5	G2	2.06E-09	20236675	4.18E-02
1	11	7	3	13	7	3	10	G2	4.32E-06	8631429	3.73E+01
1	11	7	3	13	7	3	17	G2	4.35E-06	4449872	1.93E+01
1	11	7	3	13	7	3	19	G1	4.77E-06	4481777	2.14E+01
1	13	7	3	11	7	3	12	G2	4.50E-06	9581140	4.31E+01
1	13	7	3	11	7	3	17	G1	4.84E-06	8407765	4.07E+01
1	13	7	3	11	7	3	19	G1	4.73E-06	8407765	3.98E+01
1	12	2	1	13	7	3	10	G2	5.09E-09	18847114	9.59E-02
2	12	2	1	13	7	3	10	G2	1.50E-09	18847114	2.82E-02
1	12	2	1	13	7	3	10	G2	5.09E-09	18212569	9.27E-02
2	12	2	1	13	7	3	10	G2	1.50E-09	18212569	2.72E-02

Tableau 3 (2/2)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	8	2	2	2	2	1	1	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	2	2	1	3	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	2	2	1	14	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	3	2	1	1	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	3	2	1	2	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	3	2	1	14	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	13	2	1	11	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	12	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	17	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	18	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	19	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	2	2	1	1	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	2	2	1	3	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	2	2	1	14	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	3	2	1	1	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	3	2	1	2	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	3	2	1	14	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	13	2	1	11	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	12	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	17	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	18	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	19	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	7	3	7	2	1	6	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	9	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	10	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	15	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	16	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	10	2	1	6	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	7	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	9	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	15	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	16	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	6	7	3	9	2	1	7	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01
1	6	7	3	9	2	1	8	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01

Tableau 4 (1/4) Scénarios dominos de 2^{ème} niveau, engendrés par les équipements appartenant à la cuve N°6.

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	8	2	2	2	2	1	1	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	2	2	1	3	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	2	2	1	14	GI	1.71E-11	94435865	1.61E-03
1	8	2	2	3	2	1	1	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	3	2	1	2	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	3	2	1	14	GI	1.99E-10	89425865	1.78E-02
1	8	2	2	13	2	1	11	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	12	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	17	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	18	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	13	2	1	19	GI	7.14E-12	73681360	5.26E-04
1	8	2	2	2	2	1	1	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	2	2	1	3	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	2	2	1	14	GI	1.71E-11	91713624	1.57E-03
1	8	2	2	3	2	1	1	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	3	2	1	2	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	3	2	1	14	GI	1.99E-10	86703624	1.72E-02
1	8	2	2	13	2	1	11	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	12	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	17	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	18	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	2	2	13	2	1	19	GI	7.14E-12	70959120	5.07E-04
1	8	7	3	7	2	1	6	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	9	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	10	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	15	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	7	2	1	16	GI	1.57E-08	66527396	1.05E+00
1	8	7	3	10	2	1	6	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	7	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	9	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	15	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	8	7	3	10	2	1	16	GI	2.46E-09	54927826	1.35E-01
1	6	7	3	9	2	1	7	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01
1	6	7	3	9	2	1	8	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01

Tableau 4 (2/4)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	6	7	3	9	2	1	10	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01
1	6	7	3	9	2	1	15	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01
1	6	7	3	9	2	1	16	GI	2.42E-09	77486795	1.88E-01
1	7	7	3	8	2	1	6	GI	1.43E-08	54195162	7.76E-01
1	7	7	3	8	2	1	9	GI	1.43E-08	54195162	7.76E-01
1	7	7	3	8	2	1	10	GI	1.43E-08	54195162	7.76E-01
1	7	7	3	8	2	1	15	GI	1.43E-08	54195162	7.76E-01
1	7	7	3	8	2	1	16	GI	1.43E-08	54195162	7.76E-01
1	9	7	3	6	2	1	7	GI	2.45E-09	36708574	8.99E-02
1	9	7	3	6	2	1	8	GI	2.45E-09	36708574	8.99E-02
1	9	7	3	6	2	1	10	GI	2.45E-09	36708574	8.99E-02
1	9	7	3	6	2	1	15	GI	2.45E-09	36708574	8.99E-02
1	9	7	3	6	2	1	16	GI	2.45E-09	36708574	8.99E-02
1	10	7	3	7	2	1	6	GI	1.57E-08	65328282	1.03E+00
1	10	7	3	7	2	1	8	GI	1.57E-08	65328282	1.03E+00
1	10	7	3	7	2	1	9	GI	1.57E-08	65328282	1.03E+00
1	10	7	3	7	2	1	15	GI	1.57E-08	65328282	1.03E+00
1	10	7	3	7	2	1	16	GI	1.57E-08	65328282	1.03E+00
1	10	7	3	8	2	1	6	GI	1.60E-08	57928941	9.28E-01
1	10	7	3	8	2	1	7	GI	1.60E-08	57928941	9.28E-01
1	10	7	3	8	2	1	9	GI	1.60E-08	57928941	9.28E-01
1	10	7	3	8	2	1	15	GI	1.60E-08	57928941	9.28E-01
1	10	7	3	8	2	1	16	GI	1.60E-08	57928941	9.28E-01
1	10	7	3	13	2	1	11	GI	2.18E-09	18199114	3.97E-02
1	10	7	3	13	2	1	12	GI	2.18E-09	18199114	3.97E-02
1	10	7	3	13	2	1	17	GI	2.18E-09	18199114	3.97E-02
1	10	7	3	13	2	1	18	GI	2.18E-09	18199114	3.97E-02
1	10	7	3	13	2	1	19	GI	2.18E-09	18199114	3.97E-02
1	8	2	2	4	2	2	5	G2	7.70E-12	72330751	5.57E-04
1	8	2	2	13	2	2	5	G2	6.59E-12	78160983	5.15E-04
1	8	2	2	4	2	2	5	G2	7.70E-12	69608510	5.36E-04
1	8	2	2	13	2	2	5	G2	6.59E-12	75438743	4.97E-04
1	8	7	3	7	2	2	3	G2	1.36E-08	78313660	1.07E+00
1	8	7	3	7	2	2	4	G2	4.53E-09	72528227	3.29E-01

Tableau 4 (3/4)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'escalade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	8	7	3	7	2	2	14	G2	3.52E-09	70746136	2.49E-01
1	8	7	3	10	2	2	2	G2	8.99E-10	56694090	5.10E-02
1	8	7	3	10	2	2	3	G2	2.34E-09	66714090	1.56E-01
1	8	7	3	10	2	2	4	G2	1.61E-09	60928657	9.78E-02
1	8	7	3	10	2	2	14	G2	1.16E-09	59146566	6.86E-02
1	6	7	3	9	2	2	2	G2	5.36E-10	79253059	4.24E-02
1	6	7	3	9	2	2	3	G2	2.22E-09	89273059	1.98E-01
1	6	7	3	9	2	2	4	G2	1.11E-09	83487626	9.24E-02
1	6	7	3	9	2	2	14	G2	7.36E-10	81705535	6.02E-02
1	7	7	3	8	2	2	2	G2	7.84E-09	55961426	4.39E-01
1	7	7	3	8	2	2	3	G2	1.39E-08	65981426	9.19E-01
1	7	7	3	8	2	2	4	G2	1.16E-08	60195993	6.98E-01
1	7	7	3	8	2	2	13	G2	3.26E-09	59736529	1.95E-01
1	7	7	3	8	2	2	14	G2	8.84E-09	58413902	5.16E-01
1	9	7	3	6	2	2	2	G2	6.39E-10	38474837	2.46E-02
1	9	7	3	6	2	2	3	G2	2.29E-09	48494837	1.11E-01
1	9	7	3	6	2	2	4	G2	1.31E-09	42709405	5.60E-02
1	9	7	3	6	2	2	14	G2	8.48E-10	40927313	3.47E-02
1	10	7	3	7	2	2	3	G2	1.36E-08	77114546	1.05E+00
1	10	7	3	7	2	2	4	G2	4.53E-09	71329113	3.23E-01
1	10	7	3	7	2	2	14	G2	3.52E-09	69547022	2.45E-01
1	10	7	3	8	2	2	2	G2	8.77E-09	59695205	5.24E-01
1	10	7	3	8	2	2	3	G2	1.56E-08	69715205	1.09E+00
1	10	7	3	8	2	2	4	G2	1.30E-08	63929772	8.29E-01
1	10	7	3	8	2	2	13	G2	3.64E-09	63470308	2.31E-01
1	10	7	3	8	2	2	14	G2	9.89E-09	62147681	6.15E-01
1	10	7	3	13	2	2	5	G2	2.01E-09	22678737	4.56E-02
1	8	7	3	7	7	3	15	G1	4.84E-06	14165623	6.86E+01
1	8	7	3	10	7	3	7	G1	4.84E-06	8934103	4.33E+01
1	8	7	3	10	7	3	13	G2	4.32E-06	13708089	5.93E+01
1	8	7	3	10	7	3	15	G1	4.54E-06	14165623	6.43E+01
1	8	7	3	10	7	3	16	G1	4.84E-06	20200291	9.78E+01
1	6	7	3	9	7	3	15	G2	4.44E-06	30490570	1.35E+02
1	6	7	3	9	7	3	16	G1	4.80E-06	38524872	1.85E+02

Tableau 4 (4/4)

MC	Source1	Accident primaire	Vecteur d'escalade	Cible1	Accident Secondaire	Vecteur d'es calade	Cible2	LOC _{cible2}	Effet Domino	Sévérité du scénario (€)	Criticité du scénario
1	9	7	3	6	7	3	15	G1	4.84E-06	8023271	3.89E+01
1	10	7	3	7	7	3	8	G1	4.68E-06	14534772	6.81E+01
1	10	7	3	7	7	3	15	G1	4.84E-06	12366951	5.99E+01
1	10	7	3	8	7	3	7	G1	4.84E-06	7135431	3.46E+01
1	10	7	3	8	7	3	15	G1	4.66E-06	12366951	5.77E+01
1	8	2	1	10	7	3	13	G2	5.49E-08	67391663	3.70E+00
2	8	2	1	10	7	3	13	G2	1.61E-08	67391663	1.09E+00
1	8	2	1	10	7	3	13	G2	5.49E-08	64669423	3.55E+00
2	8	2	1	10	7	3	13	G2	1.61E-08	64669423	1.04E+00

ANNEXE VII
Hierarchisation des séquences dominos de 2^{ème} niveau

Tableau 1 (1/4) Hierarchisation des séquences dominos de 2^{ème} niveau

Source 1	Cible 1/Source 2	Cible 2	Fréquence de l'effet domino	Facteur de danger
10	7	16	1.57E-08	1.03E+00
4	8	10	1.41E-08	9.64E-01
4	8	6	1.41E-08	9.64E-01
4	8	16	1.41E-08	9.64E-01
4	8	9	1.41E-08	9.64E-01
4	8	7	1.41E-08	9.64E-01
4	8	15	1.41E-08	9.64E-01
10	8	6	1.60E-08	9.28E-01
10	8	9	1.60E-08	9.28E-01
10	8	16	1.60E-08	9.28E-01
7	8	3	1.39E-08	9.19E-01
10	8	4	1.29E-08	8.29E-01
7	8	10	1.43E-08	7.76E-01
7	8	6	1.43E-08	7.76E-01
7	8	9	1.43E-08	7.76E-01
7	8	16	1.43E-08	7.76E-01
7	8	15	1.43E-08	7.76E-01
7	8	4	1.15E-08	6.98E-01
4	8	14	8.73E-09	6.32E-01
10	8	14	9.88E-09	6.15E-01
4	8	2	7.74E-09	5.41E-01
10	8	2	8.77E-09	5.24E-01
7	8	14	8.84E-09	5.16E-01
7	8	2	7.83E-09	4.39E-01
8	7	4	4.52E-09	3.29E-01
10	7	4	4.52E-09	3.23E-01
8	7	14	3.51E-09	2.49E-01
10	7	14	3.51E-09	2.45E-01
12	13	10	1.31E-08	2.44E-01
4	8	13	3.21E-09	2.37E-01
10	8	13	3.64E-09	2.31E-01
6	9	3	2.21E-09	1.98E-01
7	8	13	3.25E-09	1.95E-01
6	9	10	2.42E-09	1.88E-01
6	9	8	2.42E-09	1.88E-01
6	9	7	2.42E-09	1.88E-01
8	10	3	2.33E-09	1.56E-01
13	10	3	2.084E-09	1.54E-01
13	10	8	2.19E-09	1.36E-01
13	10	6	2.19E-09	1.36E-01
13	10	9	2.19E-09	1.36E-01
13	10	16	2.19E-09	1.36E-01
13	10	7	2.19E-09	1.36E-01

Tableau 1 (2/4)

Source 1	Cible 1/Source 2	Cible 2	Fréquence de l'effet domino	Facteur de danger
13	10	15	2.19E-09	1.36E-01
8	10	6	2.45E-09	1.35E-01
8	10	9	2.45E-09	1.35E-01
9	6	3	2.29E-09	1.11E-01
8	10	4	1.60E-09	9.78E-02
13	10	4	1.43E-09	9.75E-02
6	9	4	1.10E-09	9.24E-02
9	6	10	2.44E-09	8.99E-02
9	6	8	2.44E-09	8.99E-02
9	6	16	2.44E-09	8.99E-02
9	6	7	2.44E-09	8.99E-02
8	10	14	1.15E-09	6.86E-02
13	10	14	1.03E-09	6.86E-02
6	9	14	7.36E-10	6.02E-02
9	6	4	1.31E-09	5.60E-02
13	10	2	8.02E-10	5.12E-02
8	10	2	8.99E-10	5.10E-02
10	13	5	2.01E-09	4.56E-02
11	12	5	2.12E-09	4.26E-02
6	9	2	5.35E-10	4.24E-02
13	11	5	2.06E-09	4.18E-02
10	13	17	2.17E-09	3.97E-02
10	13	11	2.17E-09	3.97E-02
10	13	19	2.17E-09	3.97E-02
10	13	18	2.17E-09	3.97E-02
10	13	12	2.17E-09	3.97E-02
13	11	18	2.44E-09	3.85E-02
11	12	13	2.28E-09	3.57E-02
11	12	17	2.28E-09	3.57E-02
11	12	19	2.28E-09	3.57E-02
11	12	18	2.28E-09	3.57E-02
8	3	1	3.97E-10	3.50E-02
8	3	14	3.97E-10	3.50E-02
8	3	2	3.97E-10	3.50E-02
9	6	14	8.47E-10	3.47E-02
11	13	5	2.26E-09	3.10E-02
9	6	2	6.38E-10	2.46E-02
11	13	18	2.45E-09	2.26E-02
11	13	12	2.45E-09	2.26E-02
11	12	4	5.07E-10	1.10E-02
8	2	1	3.41E-11	3.18E-03
8	2	14	3.41E-11	3.18E-03
8	2	3	3.41E-11	3.18E-03

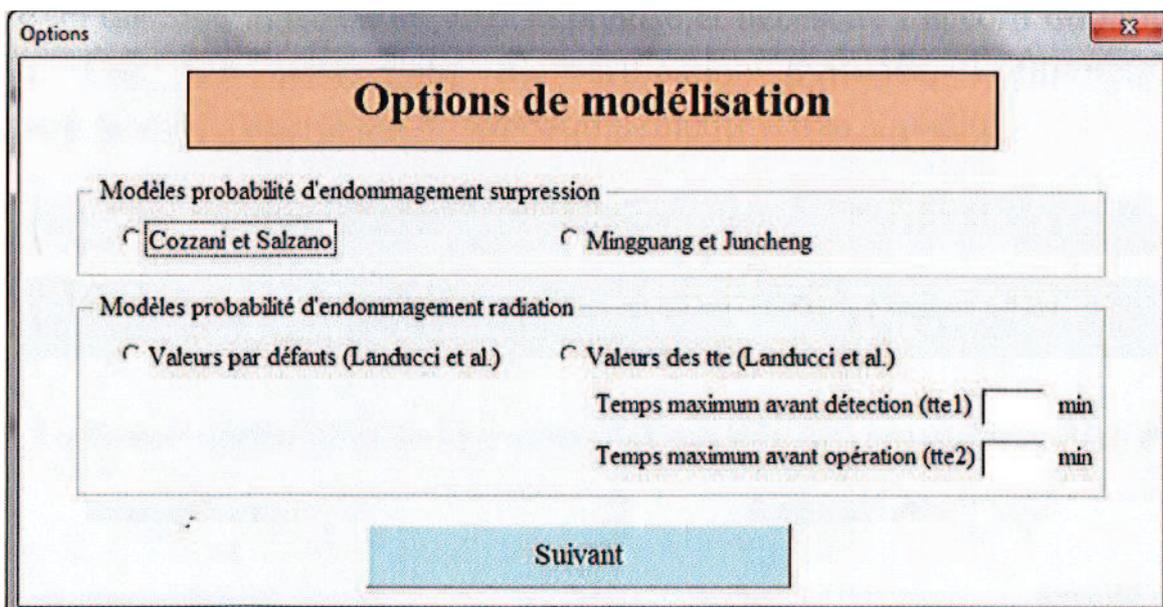
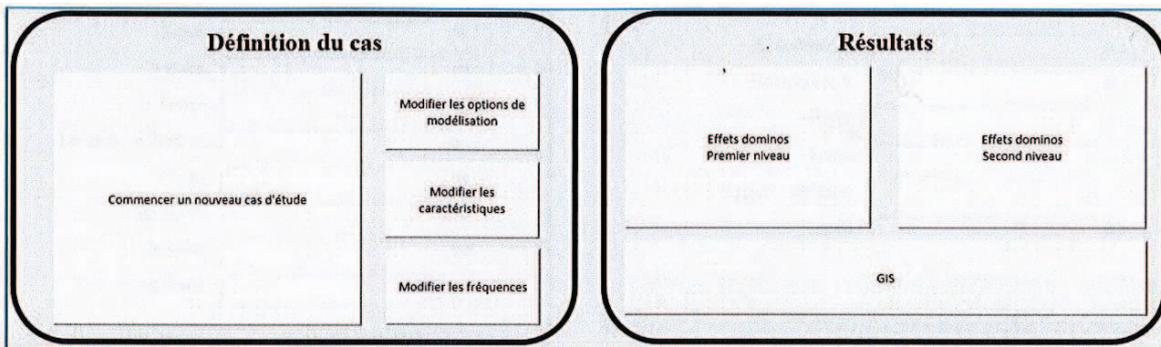
Tableau 1 (3/4)

Source 1	Cible 1/Source 2	Cible 2	Fréquence de l'effet domino	Facteur de danger
8	4	5	1.53E-11	1.09E-03
8	13	17	1.42E-11	1.03E-03
8	13	11	1.42E-11	1.03E-03
8	13	19	1.42E-11	1.03E-03
8	13	18	1.42E-11	1.03E-03
8	13	12	1.42E-11	1.03E-03
8	13	5	1.31E-11	1.01E-03
3	6	10	5.51E-12	4.44E-04
3	6	8	5.51E-12	4.44E-04
3	6	9	5.51E-12	4.44E-04
3	6	16	5.51E-12	4.44E-04
3	6	7	5.51E-12	4.44E-04
3	6	15	5.51E-12	4.44E-04
3	6	20	4.03E-12	3.28E-04
4	7	10	3.50E-12	2.42E-04
4	7	8	3.50E-12	2.42E-04
4	7	6	3.50E-12	2.42E-04
4	7	9	3.50E-12	2.42E-04
4	7	16	3.50E-12	2.42E-04
4	7	15	3.50E-12	2.42E-04
4	8	20	3.35E-12	2.30E-04
12	8	10	3.11E-12	2.28E-04
12	8	6	3.11E-12	2.28E-04
12	8	9	3.11E-12	2.28E-04
12	8	16	3.11E-12	2.28E-04
12	8	7	3.11E-12	2.28E-04
12	8	15	3.11E-12	2.28E-04
12	8	20	2.83E-12	2.14E-04
4	7	20	1.67E-12	1.19E-04
4	8	21	1.72E-12	1.15E-04
12	8	21	1.45E-12	1.07E-04
4	3	6	1.71E-12	9.07E-05
4	3	1	1.73E-12	6.10E-05
4	3	14	1.73E-12	6.10E-05
4	3	2	1.73E-12	6.10E-05
5	11	13	2.93E-12	5.50E-05
5	11	17	2.93E-12	5.50E-05
5	11	19	2.93E-12	5.50E-05
5	11	18	2.93E-12	5.50E-05
5	11	12	2.93E-12	5.50E-05
12	10	8	8.01E-13	5.45E-05
12	10	6	8.01E-13	5.45E-05
12	10	9	8.01E-13	5.45E-05

Tableau 1 (4/4)

Source 1	Cible 1/Source 2	Cible 2	Fréquence de l'effet domino	Facteur de danger
12	10	16	8.01E-13	5.45E-05
12	10	7	8.01E-13	5.45E-05
12	10	15	8.01E-13	5.45E-05
12	10	20	6.60E-13	4.64E-05
4	3	15	8.15E-13	3.19E-05
4	10	8	4.75E-13	2.91E-05
4	10	6	4.75E-13	2.91E-05
4	10	9	4.75E-13	2.91E-05
4	10	16	4.75E-13	2.91E-05
4	10	7	4.75E-13	2.91E-05
4	10	15	4.75E-13	2.91E-05
5	12	13	1.34E-12	2.64E-05
5	12	17	1.34E-12	2.64E-05
5	12	11	1.34E-12	2.64E-05
5	12	19	1.34E-12	2.64E-05
5	12	18	1.34E-12	2.64E-05
4	10	20	3.91E-13	2.48E-05
5	12	10	6.35E-13	1.38E-05
5	11	10	6.48E-13	1.36E-05
12	4	5	4.44E-13	1.10E-05
5	12	8	3.78E-13	8.45E-06
4	11	13	2.65E-13	5.48E-06
4	11	17	2.65E-13	5.48E-06
4	11	19	2.65E-13	5.48E-06
4	11	18	2.65E-13	5.48E-06
4	11	12	2.65E-13	5.48E-06

ANNEXE VIII
Exemples divers d'interfaces utilisateur améliorées lors d'un stage (Air Liquide)



Caractéristiques

Description des équipements uniquement cibles

Désignation de l'équipement :

Coordonnée x : m

Coordonnée y : m

Rayon : m

Forme :

Type d'équipement :

Volume : m³

Caractéristiques

Catégorie équipements sources

Equipement :

Matière inflammable

Oui Non

Type de phénomène dangereux

Jet-Fire Pool-Fire

Caractéristiques

Distances équipements sources - équipements cibles

Les distances calculées à partir des équipements cylindriques horizontaux peuvent différer de la réalité

Équipement source : Équipement cible :

Vérification

Distance approximative : m

Distance réelle : m

Accident

Accident et fréquence

Équipement :

ERC :

Phénomène dangereux :

Fréquence :

Methode

Sénaire | Equipement(s) cible(s) | Explosion/UVCE | Pool fire/ Jet fire

Phénomène Dangereux

Eclatement/explosion
 UVCE
 Pool Fire
 Jet Fire

Fréquence d'occurrence du phénomène dangereux :

Fonction distance auto

Equipement source

Cylindrique horizontal Coordonnée X :
 Cylindrique vertical Coordonnée Y :
 Sphérique Elevation : m
 Canalisation Rayon : m
 Hauteur : m

Calculer

Sénaire Equipement(s) cible(s) | Explosion/UVCE | Pool fire/ Jet fire

Nombre d'équipements cibles

Equipement 1 |

Désignation de l'équipement :

Caractéristiques

Forme :
Type d'équipement :
Rayon : m
Volume : m³
Hauteur : m

Position

Coordonnée X :
Coordonnée Y :
Elevation : m
Distance de la source : m
 User defined m

Modèle de calcul de probabilité d'endommagement

Cozzani et Salzano
 Mingguang et Juncheng

Valeur seuils des effets dominos

200 mbar
 Équivalent à une probabilité d'endommagement de 1%
 User-defined mbar

Eclatement de capacité

Automatique (Baker)
 Manuel

Prise en compte du sol

Volume du réservoir (en m³)
 Pression de rupture (bar)
 Coefficient isentropique

Effets

Num Equip	Distance (en m)	Valeur (en kPa)
1		

Modèle de calcul de probabilité d'endommagement

Barrières automatiques
 Fonction des tte (Landucci et al.)

Temps maximum avant détection (tte1) min
 Temps maximum avant opération (tte2) min

Valeur seuils des effets dominos

8 kW/m²
 Équivalent à une probabilité d'endommagement de 1%
 User-defined kW/m²

Équipement dans les flammes

Équipement cible 1
 Équipement cible 6
 Équipement cible 2
 Équipement cible 7
 Équipement cible 3
 Équipement cible 8
 Équipement cible 4
 Équipement cible 9
 Équipement cible 5
 Équipement cible 10

Effets

Num Equip	Distance (en m)	Valeur (en kW/m ²)
1		

BIBLIOGRAPHIE

- Abdolhamidzadeh B.**, Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S.A, **2010**. A new method for assessing domino effect in chemical process industry. *J Hazard Mater.* 182 (1):416–426.
- Abdolhamidzadeh B.**, Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S.A., **2011**. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24 (5): 575-593.
- Abdolhamidzadeh B.**, Hassan C.R.C., Hamid M.D., FarrokhMehr S., Badri N., Rashtchian D., **2012**. Anatomy of a domino accident: Roots, triggers and lessons learnt. *Process Saf Environ.* 90 (5): 424-429.
- Alileche N.**, Cozzani V., Reniers G., Estel L., **2015**. Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 143: 74–84.
- AMINAL**, **2009**. Handbook failure frequencies for drawing up a safety report. Flemish government. LNE department. Environment, nature and energy policy unit. Safety reporting division.
- American Petroleum Institute (**API**) RP 521, **1990**. Guide for Pressure Relieving and Depressuring Systems, 3rd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Alma Mater Studiorum-University of Bologna [Internet]. Bologna (Italy): **Expert Workshop**: Fostering current practices to a new generation approach dealing with Domino Effects in the Process Industries; **2014**. Available from: <http://www.dicam.unibo.it/risorse/files/final-workshop-domino-effects-program>.
- Antonioni G.**, Spadoni G., Cozzani V., **2009**. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22: 614–624.
- Arrêté ministériel** du 10 mai **2000** relatif à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. Disponible à l'URL : http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/5487
- Arrêté ministériel** du 29 septembre **2005** relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées

soumises à autorisation (JO n° 234 du 7 octobre 2005). J. Off. République Française. NOR:DEVP0540371A. Disponible à l'URL :

<http://legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2005/9/29/DEVP0540371A/jo/texte>

Arrêté ministériel du 27 novembre 2014 fixant pour l'année 2015 les coûts moyens des catégories d'incapacité temporaire et d'incapacité permanente mentionnées aux articles D. 242-6-6 et D. 242-34 du code de la sécurité sociale. JORF n°0298 du 26 décembre 2014 page 22295. J. Off. République Française. NOR:AFSS1428109A. Disponible à l'URL :

<http://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/11/27/AFSS1428109A/jo/texte>

Arrêté ministériel du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9, chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement. JORF n°0133 du 11 juin 2014 page 9698 texte n° 11. NOR:DEVP1316983A. Disponible à l'URL :

<http://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/5/26/DEVP1316983A/jo/texte>

Assael M.J., Kakosimos K.E., 2010. Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis. NW: CRC Press, Taylor and Francis Group. ISBN: 978-1-4398-2675-1.

Bagster D.F., Pitblado R.M., 1991. The estimation of domino incident frequencies: an approach. Process Safety and Environmental Protection. 69(4): 195-199.

Balocco G., Carpignano A., Di Figlia G., Nordvik J.P., Rizzuti L., 2001. Development of new tools for the consequence assessment of major accidents. In: European Safety and Reliability Conference ESREL.

Browning R.L., 1969. Estimating loss probabilities. Chemical Engineering. 76 (27) : 135.

Bureau International du Travail (**BIT**), 1993. La maîtrise des accidents majeurs : guide pratique, BIT, Genève.

Center for Chemical Process Safety (**CCPS**), 1994. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs, AIChE/ CCPS, New York.

Center for Chemical Process Safety (**CCPS**), 2000. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, second ed. CCPS/AIChE, New York.

Center for Chemical Process Safety (**CCPS**), 2010. Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, Bleve and Flash Fire Hazards. 2nd ed. CCPS/AIChE, New York.

Circulaire 10 mai 2000 relative à la prévention des accidents majeurs impliquant des substances ou des préparations dangereuses présentes dans certaines catégories d'installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation (application de la directive Seveso II). Disponible à l'URL : http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/7889

Circulaire n° DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 07 octobre 2005 relative aux Installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation. BOMEDD n° 23/2005 du 15 décembre 2005.

Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées an application de la loi du 30 juillet 2003. NOR : DEVP1013761C.

Clancey V.J., 1972. Diagnostic features of explosion damage. In: Proc. 6th Int. Meeting of Forensic Sciences, Edinburgh.

Council Directive (EC) 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major- accident hazards involving dangerous substances. Official Journal of the European Communities, L 010, Brussels 14/01/1997. p. 0013–0033.

Cozzani V., Salzano E., 2004. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure. Part I. Probit models. *J. Hazard. Mater.* 107: 67–80.

Cozzani V., Gubinelli G., Antonioni G., Spadoni G., Zanelli S., 2005. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *J. Hazard. Mater.* 127:14-30.

Cozzani V., Gubinelli G., Salzano E., 2006a. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *J. Hazard. Mater.* 129: 1–21.

Cozzani V., Antonioni G., Spadoni G., 2006b. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. *J. Loss Prev. Process Ind.* 19: 463–477.

Cozzani V., Tugnoli A., Salzano E., 2007. Prevention of domino effect: from active and passive strategies to inherently safer design. *J Hazard Mater.* 139(2):209-219.

Cozzani V., Tugnoli A., Salzano E., 2009. The development of an inherent safety approach to the prevention of domino accidents. *Accident Anal. Prev.* 41(6):1216-1227.

- Cozzani V.**, Krausmann E., Reniers G., **2013**. Other Causes of Escalation. In: Reniers, G., and Cozzani, V., (Eds.), Domino effects in the process industries: modeling, prevention and managing. Elsevier: Amsterdam, pp. 154–172.
- Cozzani V.**, Antonioni G., Landucci G., Tugnoli A., Bonvicini S, Spadoni G., **2014**. Quantitative assessment of domino and NaTech scenarios in complex industrial areas. J. Loss Prev. Process Ind. 28:10-22.
- Darbra R.M.**, Palacios A., Casal J., **2010**. Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. J Hazard Mater. 183:565-573.
- Davies P.A.**, **1993**. A Guide to the Evaluation of Condensed Phase Explosions. J Hazard Mater. 33: 1-18.
- Debray B.**, Chaumette S., Descouriere S., Trommeter V., **2006**. INERIS-DRA-2006- P46055-CL47569 : Ω 7 : Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.
- Delvosalle C.**, **1998**. A Methodology for the Identification and Evaluation of Domino Effects. Brussels (Belgium): Belgian Ministry of Employment and Labour. Report No.: CRC/MT/003.
- Delvosalle C.**, Fievez C., Brohez S., **2002**. A methodology and a software (DominoXL) for studying domino effects, Chisa 2002. In: 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, 25–29 August 2002, Praha, Czech Republic.
- Delvosalle C.**, Fievez C., Pipart A., Debray B., **2006**. ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries. J. Hazard. Mater. 130 : 200–219.
- Deust C.**, Joly C., Lenoble C., **2008**. Programme EAT-DRA 71 - Opération C2.1. Estimation des aspects probabilistes. Guide pratique pour l'intégration de la probabilité dans les études de dangers – Version 1. INERIS – DRA-08-95321-04393B.
- Deust C.**, **2008**. Programme EAT-DRA-71 - Opération C2.1. Estimation des aspects probabilistes. Fiches pratiques : Intégration de la probabilité dans les études de dangers. INERIS – DRA-08-85167-13165B.
- Décret n°77-1133** du 21 septembre **1977** pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement. Disponible à l'URL:<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000518520>
- Décret n° 2014-284** du 3 mars **2014** modifiant le titre Ier du livre V du code de l'environnement. NOR: DEVP1316998D. Disponible à l'URL :
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000028680929>

- Dien Y., Llory M., 2004.** Effects of the Columbia space shuttle accident on high risk industries or can we learn lessons from other industries ? Hazards XVIII, 23-25 Novembre 2004, Weston Building, UMIST, Manchester.
- Directive 2012/18/EU.** European Parliament and Council Directive 2012/18/EU of 4 July 2012 on Control of Major-Accident Hazards Involving Dangerous Substances, Amending and Subsequently Repealing Council Directive 96/82/EC. Official Journal of the European Communities, L 197, Brussels, 24/7/2012. p.0001–0037.
- Eisenberg N.A., Lynch C.J., Breeding R.J., 1975.** Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills. In: Rep. CG-D-136-75. Rockville, MD: Enviro Control Inc.
- European Commission, 2008.** Regulation (EC) no 1272/2008 of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. Off. J. Eur. Union.
- Finney D.J., 1971.** Probit Analysis. Cambridge University Press, UK.
- Forest C., De Dianous V., 2007.** Avis sur l'utilisation des données quantifiées du Purple Book. INERIS-DRA-07-73073-04726A.
- Gorrens B., De Clerck W., De Jongh K., Aerts M., 2009.** Domino effecten van en naar Seveso-inrichtingen. Brussels (Belgium): Flemish Ministry of Environment, Nature and Energy; 2009. Report No.: 07.0007. Dutch.
- Gómez-Mares M., Zárate L., Casal J., 2008.** Jet fires and the domino effect, Fire Safety J. 43:583–588.
- Groupe d'Étude de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques (**GESIP**), 1991. Les accidents de gaz liquéfiés (le BLEVE). Rapport GESIP n°91/05.
- Gubinelli G., Zanelli S., Cozzani V., 2004.** A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments. J Hazard Mater. 116:175-187.
- Gubinelli G., Cozzani V., 2005.** Modello a nodi termici di serbatoi irraggiati da incendi manuale d'uso. Pisa, Italia.
- Gubinelli G., Cozzani V., 2009.** Assessment of missile hazard: reference fragmentation patterns of process equipment. J Hazard Mater. 163: 1008-1018.
- Guide ISO/CEI 73 : 2009** Management du risque –Vocabulaire.

Guide pour l'estimation des dommages matériels potentiels aux biens des tiers en cas d'accidents majeurs, **2010**. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Disponible à l'URL : http://www.basse-normandie.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_dommm_mat2_cle1dc55b.pdf

Health and Safety Executive (**HSE**), **1978**. Canvey: An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area. Health and Safety Executive, London.

Health and Safety Executive (**HSE**), **1984**. The Control of Major Hazards, Third Report of the HSC Advisory Committee on Major Hazards, HMSO, London, UK .

Health and Safety Executive (**HSE**), **2006**. A guide to the Control of Major Accident Hazards Regulations 1999 (as amended), Guidance on Regulations, L111 2nd ed: HSE Books; 2006.

Heinrich W.H., **1941**. Industrial Accident Prevention. New York: McGraw-Hill.

Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R.M., Casal J., **2014**. The significance of domino effect in chemical accidents. . J. Loss Prev. Process Ind. 29:30-38.

Holden P.L., Reeves A.B., **1993**. Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels. IChemE Symposium Series 93, 220–205.

Hourtoulou D., **2002**, Rapport final – Opération a: ASSessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments, **INERIS** – DHo - 2002-26824.

Institut National de Recherche et Sécurité (**INRS**), **1994**. Les mélanges explosifs : gaz et vapeur ; poussières et solides, INRS ED355.

International Oil and Gas Producers Association (**OGP**), **2010**. Risk Assessment Data Directory. Vulnerability of humans. Report No.: 434 – 14.1.

International Oil and Gas Producers Association (**OGP**), **2010**. Risk Assessment Data Directory. Vulnerability of plant/structure. Report No.: 434 – 15.

Johnson, D.M., **2010**. The potential for vapour cloud explosions. Lessons from the Buncefield accident. . J. Loss Prev. Process Ind. 23: 921–927.

Khakzad N., Khan F.I., Amyotte P., Cozzani V., **2013**. Domino Effect Analysis using Bayesian Networks. Risk Analysis. 33:292–306.

Khan F.I., Abbasi S.A., **1998**. DOMIFFECTION: a new user friendly software for domino effect analysis Environ. Model. Softw. 13:163–177.

Khan F.I., Abbasi S.A., **2001a**. Estimation of probabilities and likely consequences of a chain of accidents (domino effect) in Manali Industrial Complex. J. Cleaner Prod. 9:493–508.

- Khan F.I., Abbasi S.A., 2001b.** An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *J. Loss Prev. Process Ind.* 14:283–306.
- Kourniotis, S.P., Kiranoudis, C.T., Markatos, N.C., 2000.** Statistical analysis of domino chemical accidents. *J Hazard Mater.* 71: 239–252.
- Landucci G., Gubinelli G., Antonioni G., Cozzani V., 2009.** The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire, *Accident Anal. Prev.* 41(6):1206–1215.
- Landucci, G., Argenti, F., Tugnoli, A., Cozzani, V., 2015.** Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 143:30-43.
- Lannoy A. 1984.** Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre, *Bulletin de la Direction des études et recherches n° 4, Électricité de France.*
- Larsen R.G., Wood M., Olsen A.L., Gyenes Z., 2012.** Seveso Inspection Series Volume 5: Chemical hazards risk management in industrial parks and domino effect establishments. Ruzzante GL, editor. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Laurent A., 2011.** Sécurité des procédés chimiques - Connaissances de base et méthode d'analyse de risques, 2^{ème} édition; Lavoisier. ISBN: 978-2-7430-1396-7.
- Lechaudel J. F., Mouilleau Y., 1995.** Assessment of an accidental vapour cloud explosion. *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries.* 314: 377-378.
- Lees F.P., 1996.** *Loss Prevention in the Process Industries-Hazard Identification, Assessment, and Control*, vols. 1–3 Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Loi n°76-663 du 19 juillet 1976** relative aux installations classées pour la protection de l'environnement. Disponible à l'URL : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000684771&categorieLien=cid>
- Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003** relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages (1). NOR: DEVX0200176L. Disponible à l'URL : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000604335>
- Loi DDADUE. LOI n° 2013-619 du 16 juillet 2013** portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne dans le domaine du développement durable. JORF n°0164 du 17 juillet 2013 page 11890. NOR: DEVK1240259L.

- López-Molina**, A., Vázquez-Román R., Mannan M.S., Félix-Flores M.G., **2013**. An approach for domino effect reduction based on optimal layouts. *J. Loss Prev. Process Ind.* 26: 887–894.
- Mannan S.**, **2005**. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, third ed. Elsevier, Oxford, UK.
- Mannan S.**, **2014**. *Lees' process safety essentials, hazard identification, assessment and control*. Elsevier. ISBN: 978-1-85617-776-4.
- 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. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2008. Français. <tel-00338938v2>.
- Mecklenburgh J.C.**, **1985**. *Process Plant Layout*. George Goodwin, London, UK.
- Major Accident Hazards Bureau (**MAHB**), **2005**. Guidance on the preparation of a safety report to meet the requirements of directive 96/82/EC as amended by directive 2003/105/EC (Seveso II). European Commission Joint Research Centre – Institute for the Protection and Security of the Citizen. Report EUR 22113 EN.
- Mingguang Z.**, Juncheng J., **2008**. An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure. *J Hazard Mater.* 158:280–286.
- Michaëlis P.**, Hodin A., Lechaudel J.F., Mavrothalassitis G. and Mejean P., **1995**. Methods applied to investigate the major UVCE that occurred in the TOTAL refinery's Fluid Catalytic Cracking Unit at La Mède, France. Proceedings of the 8th International Loss Prevention Symposium, pp 365-376, Antwerp, Belgium.
- Necci A.**, Cozzani V., Spadoni G., Khan F., **2015**. Assessment of domino effect: state of the art and research needs. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 143: 3-18.
- Pietersen C.M.**, **1985**. Analysis of the LPG Incident in San Juan Ixhuatepec, Mexico City, November 19, 1984. Rep. 85-0222. TNO, Apeldoorn, the Netherlands.
- Pietersen C.M.**, **1988**. Analysis of the LPG-disaster in Mexico city. *J Hazard Mater.* 20: 85–107.
- Pietersen C.M.**, **1990**. Consequence of Accidental Release of Hazardous Materials, *J. of Loss Prevention Process Industries.* 3(1):136-141.
- Périlhon P.** **2007**. *La Gestion des risques : Méthode MADS-MOSAR II Manuel de mise en oeuvre*. ISBN-10: 2915647380.

- Nguyen Q B, 2009.** Fiabilité des installations industrielles sous impact de fragments de structures - Effet domino. Engineering Sciences [physics]. Thèse de doctorat. Université Paris-Est, 2009. French. <NNT : 2009PEST1057>. <tel-00551266>.
- Reference Manual **BEVI Risk Assessments** version 3.2, **2009**. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM), Centre for External Safety, Bilthoven, Netherlands.
- Reniers G.L.L., Dullaert W., 2007.** DomPrevPlanning©: User-friendly software for planning domino effects prevention. Saf. Sci. 45: 1060–1081.
- Reniers G.L.L., 2010,** Multi-Plant Safety and Security Management in the Chemical and Process Industries, John Wiley & Sons. ISBN: 978-3-527-32551-1.
- Reniers G.L.L., Cozzani V., 2013.** Domino effects in the process industries: modeling, prevention and managing. 1st ed. Elsevier, Amsterdam. ISBN: 978-0-444-54323-3.
- RIVM, 2003.** Instrument domino effecten. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).
- Ronza A., Félez S., Darbra R.M., Carol S., Vilchez J.A., Casal J., 2003.** Predicting the frequency of accidents in ports areas by developing event trees from historical analysis, J. Loss Prevent. Proc. 16:551–560.
- Schüller J.C.H., Brinkman J.L., Van Gestel P.J., Van Otterloo R.W., 2005.** Methods for determining and processing probabilities (**Red Book**). CPR12E. Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Spadoni G., Egidi D., Contini S., 2000.** Through ARIPAR-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities. J Hazard Mater. 71, 423–437.
- Strehlow R.A., Luckritz R.T., Adamczyk A.A., Shimp S.A., 1979.** The blast wave generated by spherical flames. Combust Flame. 35:310-297.
- Tang M.J, Baker Q.A, 1999.** A new set of blast curves from vapour cloud explosion. Process Saf Prog. 18:235– 204.
- Uijt de Haag P.A.M., Ale B.J.M., 2005,** Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3): Guidelines for Quantitative Risk Assessment (**Purple Book**). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Uijt de Haag P.A.M., Ale B.J.M., 1999.** Guidelines for quantitative risk assessment (**Purple Book**). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).

- Van Den Bosh** C.J.H., Merx W.P.M., Jansen C.M.A., De Weger D., Reuzel P.G.J., Leeuwen D.V., **1989**. Methods for the calculation of possible damage (**Green Book**). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Van Den Bosh** C.J.H., Merx W.P.M., Jansen C.M.A., De Weger D., Reuzel P.G.J., Leeuwen DV, **1992**. Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (**Green Book**), first ed, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Van Den Bosch** C.J.H., Weterings R.A.P.M, **2005**. Methods for the calculation of physical effects (**Yellow Book**). 3rd ed. (2nd rev.), Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Van Den Bosch** C.J.H., Weterings R.A.P.M, **1997**. Methods for the calculation of physical effects (**Yellow Book**). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Van den Berg** A.C., **1985**. The Multi-energy method – a framework for vapor cloud explosion blast prediction. *J Hazard Mater.* 12:10–1.
- Vallée** A, Bernuchon E, Hourtolou D., **2002**. MICADO: Méthode pour l'identification et la caractérisation des effets dominos. Final report. Paris (France): **INERIS**, Direction des Risques Accidentels. Report No.: DRA-2002–25472. French.
- Vilchez** J.A., Espejo V., Casal J., **2011**. Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *J. Loss Prev. Process Ind.* 24: 281–287.
- Westin** R.A., **1971**. Summary of Ruptured Tank Cars Involved in Past Accidents, Report No. RA-01-2-7. Railroad Tank Car Safety Research and Test Project, Chicago, IL.
- Zhang** H.-D., Zheng X.-P., **2012**. Characteristics of hazardous chemical accidents in China: A statistical investigation. *J. Loss Prev. Process Ind.* 25: 686–693.