

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département Maitrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière QHSE-GRI



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'état en QHSE-GRI
Sous le thème

**Elaboration d'une nouvelle méthodologie
d'étude des effets dominos et application: cas
LINDE Gaz Algérie**

**Ghiles OUKACI
Mohamed Nadji BENFRIHA**

Sous la direction de : M. Amine BENMOKHTAR Maitre-Assistant
Mme.Chahrazed BOUTEKEDJIRET Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (30/06/2019)

Composition du jury :

Président :	M. M.OUADJAOUT	Maitre-Assistant	ENP
Rapporteur/ Promoteur :	M. A.BENMOKHTAR	Maitre-Assistant	ENP
	Mme. C.BOUTEKEDJIRET	Professeur	ENP
Examineurs :	Mme. M.FODIL	Maitre-Assistant	ENP
	M. A.DJILI	Maitre-Assistant	ENP

ENP 2019

+ REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique

Département Maitrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière QHSE-GRI



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du
diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Sous le thème

**Elaboration d'une nouvelle méthodologie
d'étude des effets dominos et application: cas
LINDE Gaz Algérie**

**Ghiles OUKACI
Mohamed Nadji BENFRIHA**

Sous la direction de : M. Amine BENMOKHTAR Maitre-assistant

Mme.Chahrazed BOUTEKEDJIRET Professeur

Présenté(e) et soutenue publiquement le (30/06/2019)

Composition du jury :

<i>Président :</i>	<i>M. M.OUADJAOUT</i>	<i>Maitre-assistant</i>	<i>ENP</i>
<i>Rapporteur/ Promoteur :</i>	<i>M. A.BENMOKHTAR</i>	<i>Maitre-assistant</i>	<i>ENP</i>
	<i>Mme. C.BOUTEKEDJIRET</i>	<i>Professeur</i>	<i>ENP</i>
<i>Examineurs :</i>	<i>Mme. M.FODIL</i>	<i>Maitre-assistant</i>	<i>ENP</i>
	<i>M. A.DJILI</i>	<i>Maitre-assistant</i>	<i>ENP</i>

ملخص

الغرض من هذا العمل هو تطوير منهجية جديدة خاصة بدراسة تأثيرات الدومينو وتطبيقها على حالة LGA : الجزء الأول تناول تقديم المنهجية في شكل مخطط توضيحي.

بعد ذلك تم تطبيق ما توصلنا إليه لغرض التحديد الاحتمالي لوقوع أحداث الدومينو الداخلية أو الخارجية وتحديد آثارها وكذلك تأثيره المالي. في الجزء الأخير تم تقديم إقتان لأحداث الدومينو الخارجية، يليه اقتراح لوضع خطة استمرارية العمل

الكلمات المفتاحية: تأثير الدومينو الداخلي، تأثير الدومينو الخارجي، احتمالية التصعيد، تحليل الحوادث، المحاكاة، خطة استمرارية العمل

Abstract

The purpose of this work is to develop a new specific methodology to the study of domino effects and apply it to the case of LGA.

The methodology will be presented first in the form of an explanatory diagram. It will then be applied for the purpose of probabilistically identifying and estimating the occurrence of internal and external domino events and determining their effects and their financial impact. An external mastery of external domino events will then be presented, followed by a proposal to put in place a business continuity plan.

Key words: Internal domino effect, external domino effect, probability of escalation, accident analysis, simulation, business continuity plan.

Résumé

Le but de ce travail est d'élaborer une nouvelle méthodologie spécifique à l'étude des effets dominos et l'appliquer au cas de LGA.

La méthodologie sera présentée en premier lieu sous forme de schéma explicatif. Elle sera ensuite appliquée dans le but d'identifier et d'estimer d'une manière probabiliste la survenue d'événements dominos interne ou externe et de déterminer leurs effets ainsi que leur impact financier. Un cadre de maîtrise des événements dominos externe sera ensuite présenté, suivi d'une proposition de mise en place d'un plan de continuité d'activité.

Mots clés : Effet domino interne, effet domino externe, probabilité d'escalade, analyse accidentologie, simulation, plan de continuité d'activité.

Remerciements

Nous voudrions remercier les membres du jury, Monsieur OUADJAOUT, Enseignant Chercheur à l'ENP et Directeur du Cycle Préparatoire –ENP qui nous a fait l'honneur de présider ce Jury, madame M. FODIL et monsieur A. DJILI, Enseignants à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'effort qu'ils ont prodigué pour examiner ce travail.

Nous tenons également à remercier nos promoteurs pour leur soutien, pour leur aide précieuse et pour leurs précieux conseils tout au long de ce mémoire :

Monsieur BENMOKHTAR, A. Maître-Assistant à l'ENP et Madame BOUTEKEDJIRET, C professeur à l'ENP .

Nos remerciements vont aussi à Monsieur KHELLAF Farid ingénieur HSE au sein de LGA, pour de nous avoir accompagné, donné de son temps et donné la chance d'effectuer notre projet de fin d'étude au sein de LGA,

Dédicaces

À mes grands-parents, les plus adorables du monde, de véritables modèles que dieu me les gardent,

À mes parents qui se sacrifient chaque jour pour nous,

À mon frère Rayan la base comme j'aime l'appelé et à ma petite sœur lina ma princesse.,

À toute ma famille,

À mon meilleur ami, le sang Koceila,

À mes amis, Samy, Said, Abdou, Mounir, Lynda, Ines, Yasmine et tous les autres qui m'ont aidé et soutenu,

Et enfin à la personne que j'ai la chance d'avoir comme ami et binôme Nadji,

Ghiles

Je dédie ce travail est l'aboutissement d'encouragements de la part de plusieurs personnes auprès desquelles je tiens à exprimer ma gratitude.

À mes chers parents, sources de mes joies, secrets de ma force, vous serez toujours modèle papa dans ta détermination, ta force et ton honnêteté. Maman dans ta bonté ta patience et tes Douaa. Merci pour tous vos sacrifices pour que vos enfants grandissent et prospèrent, merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de la vie au bien être de vos enfants. Merci d'être tous simplement mes parents, c'est à vous que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir.

À mes sœurs Amina et Nadjia en témoignage de l'attachement, l'amour et l'affections que je porte pour vous.

À mon très cher oncle Tarik et sa famille, vous avez toujours été présents pour le bon conseil,

À mes grands-parents et mes très chères tantes maternelles et paternelles ainsi que tous mes cousins(es), votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours un remerciement particulier à tous ceux qui ont partagé les bancs de l'école avec moi et tous ceux qui ont partagés mon quotidien je vous remercie du fond du cœur.

Mohamed Nadji

Nomenclature

F_{ed} : Fréquence d'occurrence annuelle de la séquence domino (installation j impactée suite à un accident dans i) (ans^{-1}).

F_{ep} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement primaire (ans^{-1}).

F_{erc} : Fréquence d'occurrence annuelle de l'événement redouté central (ans^{-1}).

IR : Risque individuel

i : Equipement source de l'accident.

I_{ij} : Intensité des radiations thermique (kW.m^{-2}).

J_m^k : Vecteur dont les éléments sont les index de la combinaison de k événements secondaires.

j : Equipement cible.

$P_{d,i}$: Probabilité d'escalade pour le i -ème événement secondaire

ΔP_{ij} : Surpression statique (kPa).

P_1 : Probabilité du scénario primaire.

P_{ij} : Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i .

V : Volume de l'équipement (m^3).

ν : Coefficient stœchiométrique.

Y_{ij} : Fonction Probit.

Liste des abréviations

ADD : Arbre De Défaillance

APR : Analyse Préliminaire de Risque

ASU : Air Separation Unit

BIA : Buisness Impact Analysis

DEA : Data Envelopment Analysis

DMIA : Durée Minimum d'Interruption d'Activité

EDD : Etude De Danger

ENGI : Entreprise Nationale des Gaz Industriels

EPI : Equipe de Première Intervention.

FREEDOM : FREquency Estimation of DOMino accidents

LGA : Linde Gas Algérie

MCAS : Maximum-Credible Accident Scenarios

PCA : Plan de Continuité d'Activité

SIS : Système Instrumenté de Sécurité.

SMCA : Système de Management de Continuité d'Activité

SNS : Société Nationale de Sidérurgie

UE : Union Européenne

VCE : Vapor Cloud Explosion.

Table des matière

Table des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Liste des abréviations

Introduction générale.....	14
I. Chapitre 1 : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE.....	17
I.1 Présentation de l'entreprise.....	17
I.1.1 : Présentation générale de Linde Gas Algérie (LGA)	17
I.1.2 Vue globale.....	17
I.2 Généralités sur les effets dominos	24
I.2.1 Définition et caractéristiques des accidents à effet domino.....	25
I.3 Problématique :	29
I.4 Méthodologie	30
I.4.1 Etude de l'existant	30
I.4.2 Réalisation d'une méthode d'étude des effets dominos	31
II. Chapitre 2 : ETUDE DES EFFETS DOMINOS INTERNES	34
II.1 Compréhension du process existant à LGA	34
II.1.1 Présentation de l'Air Separation Unit (ASU)	34
II.1.2 Description du processus de séparation d'air	34
II.1.2.1 Récupération d'oxygène et d'azote.....	34
II.1.2.2 Récupération de l'argon brut et pur :	37
II.2 Critique de l'étude de danger	37
II.2.1 Contenu de l'étude de danger :	38
II.2.2 Cadre réglementaire algérien	38
II.2.3 Démarche de l'analyse critique des EDD	39
II.2.4 Application de l'analyse critique de l'EDD	42
II.3 Analyse de l'accidentologie	46
II.3.1 Présentation du logiciel R	46
II.3.2 Méthodologie	47
II.3.2.1 Acquisitions des données	47
II.3.2.2 Traitement des données	48
II.3.2.3 Visualisation :.....	48
II.4 Application de la méthode :	57

II.4.1	Les arbres de défaillances	58
II.4.2	Présentation du logiciel	59
II.4.2.1	Evaluation des effets	66
II.4.2.1.1	Événement primaire 1 : VCE au niveau de l'atelier CCAM	66
II.4.2.1.2	Événement primaire 2 : Jet fire atelier CCAM	72
II.4.2.1.3	Événement primaire 3 : VCE au niveau du parc bouteilles	73
II.4.2.1.4	Événement primaire 4 : Jet fire au niveau du parc bouteilles.....	80
II.4.3	Calculs :	81
II.4.3.1	Méthodologie de calcul.....	81
II.4.3.2	. Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade.....	86
II.4.3.2.1	Détermination des scénarios secondaires	87
II.4.3.2.2	Calculs :.....	87
II.4.3.2.3	Détermination des scénarios tertiaires :.....	88
II.4.4	Réalisation des réseaux bayésiens.....	91
II.4.4.1	Définition d'un réseau bayésien.....	91
II.4.4.2	Identification des séquences dominos.....	92
II.4.4.3	Présentation du logiciel AGENARISK.....	96
II.4.4.4	Réalisation des réseaux bayésien	98
II.4.4.4.1	Scénario 1	98
II.4.4.4.2	Scénario 2	99
II.4.4.4.3	Scénario 3	100
II.4.5	Calcul des probabilités de combinaison.....	101
II.4.6	Risque individuel.....	102
III.	Chapitre 3 : ETUDE DES EFFETS DOMINOS EXTERNES	105
III.1	Prévention des accidents dominos externes (EDAP) Proposition de cadre Hazwim.....	106
III.1.1	La gestion multi-entreprise.....	106
III.1.2	Le cadre Hazwim EDAP	107
III.1.2.1	Étape 1: Définir la portée et la zone de portée d'une étude de la zone industrielle de sécurité domino externe	108
III.1.2.2	Étape 2: Etude initiale sur les effets dominos.....	108
III.1.2.3	Étape 3: le calendrier d'organisation	110
III.1.2.4	Étape 4: Composition de la Hazop et de la What-If équipes dans chaque entreprise 111	
III.1.2.5	Étape 5: Explication visite du site.....	111
IV.	Chapitre 4 : Impact financier, impact indirecte et proposition d'implémentation d'un plan de continuité d'activité	119
IV.1	Impact financier :.....	119

IV.2	Impact indirecte	120
IV.3	Plan de continuité d'activité (PCA)	123
IV.3.1	Compréhension de l'organisation et de son contexte	125
IV.3.2	Définition d'un périmètre	125
IV.3.3	Obtenir l'implication et l'engagement de la Direction	126
IV.3.4	Politique et objectifs du PCA	126
IV.3.5	Mise à disposition des ressources	127
IV.3.6	Compétences	127
IV.4	Business Impact Analysis (BIA)	129
	Conclusion générale	133
	Bibliographie	135
	Annexes	137

Table des figures

Figure I-1 : Gamme de production des gaz par site en Algérie.....	19
Figure I-2 : Schéma explicatif d'une chaîne domino	25
Figure I-3 : Schéma explicatif d'une propagation parallèle complexe	26
Figure II-1 : Etapes de la critique d'une EDD	40
Figure II-2 Démarche de détermination des écarts	41
Figure II-3 Insuffisances de forme	42
Figure II-4 : Insuffisances de fond	43
Figure II-5 : Schéma représentant les types d'écarts relevés	45
Figure II-6: Image de l'interface du logiciel R	47
Figure II-7 : Statistiques sur les types d'accidents.....	49
Figure II-8 : Statistiques sur les conséquences en fonction des types d'accidents	50
Figure II-9 : Statistiques sur les types d'accident en fonction des causes.....	51
Figure II-10 : Statistiques sur les types de produits mis en cause.....	52
Figure II-11 : Types de substances dangereuses impliquées dans les événements dominos	53
Figure II-12 : Types d'accidents primaires (initiateurs) impliqués dans les cas enregistrés d'effets dominos	54
Figure II-13 : Types d'incendies impliqués dans le déclenchement de l'effet domino.....	54
Figure II-14 : Types d'explosions responsables du déclenchement de l'effet domino.	55
Figure II-15 : Événements Dominos survenant dans des installations fixes et pendant le transport.	56
Figure II-16 : Probabilité d'occurrence d'une explosion de bouteille d'acétylène calculée par Arbre Analyste	60
Figure II-17 : Arbre de défaillance d'une explosion de bouteille d'acétylène	61
Figure II-18 : Probabilité d'occurrence d'une fuite sur une bouteille calculée par Arbre Analyste	62
Figure II-19 : Arbre de défaillance d'une fuite de bouteille.....	63
Figure II-20 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement VCE au niveau de l'atelier CCAM.....	70
Figure II-21 : Propagation de l'effet de surpression pour l'événement VCE au niveau de l'atelier CCAM.....	71
Figure II-22 : Effet de radiation en fonction de la distance pour l'événement Jet fire au niveau de l'atelier CCAM.....	72
Les résultats de la propagation dans les deux cas sont représentés dans les figures II-23 et II-24.	77
Figure II-24 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement VCE au niveau du parc bouteilles	78
Figure II-25 : Propagation des effets de surpression pour l'événement VCE au niveau du parc bouteilles	79

Figure II-26 : Effet de radiation en fonction de la distance pour l'événement jet fire au niveau du parc bouteilles	80
Figure II-27 Composantes d'un réseau Bayésien	91
Figure II-28 : Modèle de propagation probable d'un effet domino dans une usine à six unités	92
Figure II-29 : Réseau bayésien modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L1 et L2	95
Figure II-30 Réseau bayésien modifié pour incorporer les 3 niveaux d'effet domino et l'union des événements tertiaires et quaternaires	96
Figure II-31 : Réseau bayésien du scénario 1	98
Figure II-32 : Réseau bayésien du scénario 2	99
Figure II-33 : Réseau bayésien du scénario 3	100
Figure II-34 : Illustration du risque individuel sur le site de LGA	103
Figure III-1 Image satellite de l'emplacement de LGA et AIR LIQUID	106
Figure IV-2 Comparaison des couts du PCA et des conséquences d'une catastrophe	124
Figure IV-3 Déroulement du PCA après l'événement domino au sein de LGA	132

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Généralités sur LGA	17
Tableau I-2 : Production des gaz par site.	20
Tableau I-3 : Liste des abréviations	20
Tableau I-4 : Les différentes catégories d'évènements dominos [4]	27
<i>Tableau I-5 : Etude sur les méthodes existantes et leurs limites</i>	30
Tableau II-1 : Etat récapitulatif des dossiers traités par les services de la protection civile	42
Tableau II-2 : Résumé de la critique de l'EDD	43
Tableau II-3 : Appellation des données retenues	48
Tableau II-4 : Evénements primaires retenus	57
Tableau II-5 : Comparaison des températures d'auto inflammation et d'énergie min d'inflammation de différents gaz	57
Tableau II-6 : Vitesse de combustion laminaire des gaz combustibles	58
Tableau II-7 : Seuils des effets de radiation thermique sur l'homme	64
Tableau II-8 : Seuils des effets de radiation thermique sur les structures	65
Tableau II-9 : Seuils des effets de surpression sur l'homme	65
Tableau II-10 : Seuils des effets de surpression sur les structures	65
Tableau II-11 : Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique	66
Tableau II-12 : APR sur l'hydrogène au niveau de l'atelier CCAM	68
Tableau II-13 : Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « VCE au niveau de l'atelier CCAM »	69
Tableau II-14 : Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « VCE au niveau du parc bouteilles	77
Tableau II-15 : Modèles de vulnérabilité	86
Tableau II-16 : Scénarios secondaires et vecteurs d'escalade	87
Tableau II-17 : Scénarios tertiaires et vecteurs d'escalade	88
Tableau II-18 Scénario quaternaire et vecteurs d'escalade	89
Tableau II-19 : Scénarios secondaires et vecteurs d'escalade événements 2 et 4	90
Tableau II-20 : Table des probabilités conditionnelles attribuées au nœud auxiliaire L1 montrant sa dépendance conditionnelle à l'égard de ses parents par le biais d'une porte logique «OU»	95
Tableau II-21 : Probabilités des événements	101
Tableau II-22 : Probabilités des combinaisons d'évènements	101
Tableau III-1 : Matrice d'évaluation des risques	114
Tableau III-2 : HAZOP de l'atelier d'oxyde d'éthylène	116
Tableau IV-1 BIA LGA	130

Introduction générale

Introduction générale

En Algérie, la production des Gaz Industriels fut introduite pendant la période coloniale par l'entreprise Air Liquide. En 1972 l'État Algérien procède à la nationalisation de la société et l'intègre à la Société Nationale de Sidérurgie (SNS). En 1983, la restructuration de la SNS, a donné naissance à L'Entreprise Nationale de Gaz Industriels (ENGI) qui fut ensuite rachetée en 2008 par Linde Gas.

A travers une gamme complète en Gaz industriels, LINDE GAS ALGERIE, c'est donc implantée en Algérie et a eu pour objectif principal la prise en charge des besoins générés par la multiplication de l'utilisation de ces gaz dans divers secteurs économiques.

Cependant, ce genre d'activité industrielle engendre beaucoup de risques en termes de sécurité. Pour preuve, un accident a attiré notre attention, celui d'une usine de gaz industriels en France classé Seveso seuil haut selon la réglementation européenne, ou une détonation suivie d'une boule de feu survient à 12h28 le 10/04/2015 au niveau de la pompe de conditionnement de l'oxygène située au pied d'un réservoir d'oxygène liquide plein. La boule de feu se propage à 2 armoires électriques voisines. L'incendie consécutif menace 2 autres réservoirs proches d'argon et d'azote car il se propage dans les caniveaux techniques. L'employé le plus proche donne l'alerte.

Le plan d'organisation interne (POI) est déclenché à 12h35, 10 min avant l'arrivée des services de secours. Le conditionnement des bouteilles de gaz est stoppé ainsi que l'alimentation électrique de l'unité d'embouteillage. Les 72 employés sont confinés pendant 2 h. L'incendie est maîtrisé à 13h45.

Les tuyauteries du réseau de transfert des 3 réservoirs vers l'unité de conditionnement en bouteille sont endommagées par les flux thermiques. Ces tuyauteries encore en charge laissent s'échapper de l'azote et de l'argon. Craignant une propagation de l'incendie pour la partie enterrée du réseau, les pompiers l'arrosent et effectuent une vérification visuelle. Le site est surveillé durant le week-end. 80 % des activités de conditionnement des gaz industriels et spéciaux du site sont arrêtées pendant 2 mois [1].

Ce type d'accidents qui aurait pu avoir des conséquences beaucoup plus désastreuses, est nommé accident à effet domino. L'effet domino étant la propagation spatiale ou temporelle d'un événement primaire provoquant d'autres événements secondaires.

L'objectif de notre travail est d'apporter une nouvelle méthodologie pour l'étude de ces effets dominos et l'appliquer au cas de LINDE GAS ALGERIE.

Le mémoire est structuré en trois chapitres comme suit :

Le **premier chapitre** comporte une présentation de l'entreprise suivie de quelques généralités sur les effets dominos, qui nous aiderons à mieux cerner la problématique qui sera posée. Une étude sur quelques méthodologies existantes et leurs limites sera ensuite développée pour enfin réaliser le schéma explicatif de notre méthodologie.

Le **second chapitre** est la partie essentielle de l'application de la méthode pour l'étude des effets dominos. Il est constitué de plusieurs étapes où l'on détaille et applique les différentes parties de la méthodologie proposée. Cette méthodologie s'appuie sur l'utilisation des logiciels R®, ARBRE ANALYSTE®, PHAST® et AGENARISK® pour dans l'ordre une analyse de l'accidentologie, le calcul de probabilités d'événements, la simulation de la propagation des effets et la constitution de réseaux bayésiens.

Le **troisième chapitre** traite l'étude des effets dominos externe en proposant l'application d'un cadre nommé HAWZIM.

Le **quatrième chapitre** donne l'impact financier du scénario majeur d'effet domino, il y est également développé son impact indirect. On y retrouve une proposition d'implémentation d'un plan de continuité d'activité.

Chapitre I

CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

I. Chapitre 1 : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Afin de bien connaître l'environnement dans lequel nous évoluerons, nous commencerons tout naturellement par une présentation de l'entreprise. Etant le cœur de notre étude, des généralités sur les effets domino seront ensuite présentées. De ces deux éléments découlera une problématique pour laquelle nous élaborerons finalement une méthodologie de résolution.

I.1 Présentation de l'entreprise

I.1.1 : Présentation générale de Linde Gas Algérie (LGA)

Installée en 2007 en Algérie, LGA est une unité du groupe Allemand «The Linde Group», spécialisée dans la production, le conditionnement et la distribution des gaz industriels et médicaux.

I.1.2 Vue globale

Nous allons commencer par la présentation synthétique de l'entreprise à travers une fiche technique qui va nous apporter d'avantage d'informations sur LGA et un tableau englobant les différents produits offerts.

Généralités sur LGA

Tableau I-1 : Généralités sur LGA

Nom de l'entreprise	Linde Gas Algérie
Nature du capital/Forme juridique	Société Par Actions- SPA Linde Gas Algérie.
Création et mise en service	Privatisation de l'ENGI devenue LINDE Gas Algérie, signature officielle le 18 Juin 2007 avec la prise en charge dès le 1er Juillet (66% parts Linde, 34% de Sonatrach).
Activité	Production, conditionnement, commercialisation et distribution des Gas industriels alimentaires et Médicaux.
Marché où l'organisation opère avec répartition géographiques	LGA est présente sur l'ensemble du territoire national par un réseau comprenant 09 sites de production : Réghaia, Annaba, Constantine, Ouargla, Oran, Bouira, S.B.Abbès, Arzew, Skikda .répartis en trois régions : Centre/Sud, Ouest, Est.
Nombre de pays où l'organisation est implantée	L'entreprise est fondée par Carl Von Linde le 21 juin 1879, présente dans plus de 120 pays dans le monde entier avec plus de

	60000 Salariés.
Produits	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz Médicaux : Oxygène Médical, Protoxyde d'Azote, Oxyde d'éthylène. - Gaz industriels : Azote, Oxygène industriel, Argon, Acétylène, Hydrogène. - Gaz à usage alimentaire : CO2 alimentaire - Autres gaz : Fréons, Gaz purs, Mélanges (Argon-CO2, ...).
Services	<ul style="list-style-type: none"> - Inertage à l'azote - Installations pour fluides Médicaux. - Dessalement de l'eau de Mer. - Réfrigération, congélation et emballage des aliments. - Pisciculture.
Production	<p>Capacités de production (site Reghaia)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gaz carbonique : 2 tonnes / heure. - Oxygène : 4275 litres/heure. - Azote : 1695 litres/heure. - Protoxyde 100 kg/heure. <p>Capacité de Conditionnement (site Reghaia)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Oxygène : 400 m³ / heure. - Azote : 400 m³ / heure. <p>Gaz carbonique : Bouteille : 400 kg/ heure. Cadre : 100 kg/ heure</p> <ul style="list-style-type: none"> - Argon : 400 m³ / heure. - Protoxyde d'azote : 200 kg/heure. - Traitement de bouteilles : 200 b/jour
Taille de l'organisation	<p>Effectifs : A la fin du mois de février 2015 le nombre d'employés s'élevait à 538 employés, dont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Site Reghaia : 132 employés. - Siège : 78 employés. <p>Capital social : 1.500.000.000 de DA.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La superficie du site de Reghaia : 35 000 m² - La superficie du siège : 16840 m² dont 6375 bâtie
Distinction	<ul style="list-style-type: none"> - Certification système de management qualité ISO 9001 version 2015 - Certification système environnement ISO 14001 version 2015 - Certification Santé et sécurité au travail, référentiel OHSAS 18001 version 2007 - Certification sécurité alimentaire FSSC 22000 version 2010

Adresse	Le siège est situé au : 23, Avenue de l'ALN, Hussein Dey, Alger.
Tél/Fax	021 497 026 / 021 497 194
Site Web	www.linde.com
Logo de l'entreprise	

Source : Documents de LGA [2].

Gamme de production des gaz par site

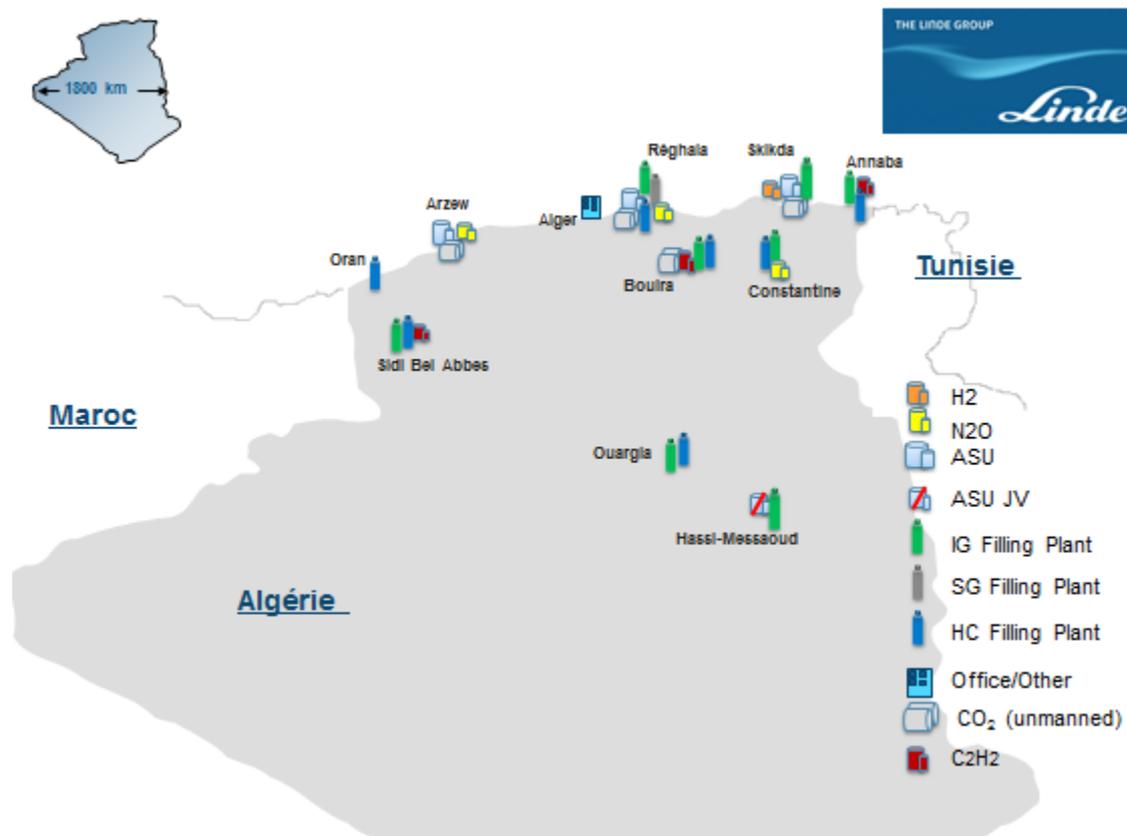


Figure I-1 : Gamme de production des gaz par site en Algérie

Tableau I-2 : Production des gaz par site.

REGIONS	SITES	PRODUCTION							CONDITIONNEMENT						
		LOX	LIN	LAR	LIC	LI N20	C2H2	H2	GOX	GAN	GAR	GC02	C02 Glace	GN20	MIX.
CENTRE/SUD	REGHAIA	*	*		*	*			*	*	*	*	*	*	*
	BOUIRA				*		*		*	*	*	*		*	*
	OUARGLA								*			*			
EST	CONSTANTINE					*			*	*		*		*	
	ANNABA						*		*	*		*			
	SKIKDA	*	*	*	*			*			*				
OUEST	SIDI BEL ABBES						*		*	*	*			*	*
	ARZEW	*	*		*										
	ORAN								*	*				*	

Tableau I-3 : Liste des abréviations

Abréviations	Significations
- LOX	- Oxygène liquide
- LIN	- Azote liquide
- LAR	- Argon liquide
- LIC	- CO ₂ liquide
- C ₂ H ₂	- Acétylène
- H ₂	- Hydrogène
- GOX	- Oxygène gazeux
- GAN	- Azote gazeux
- GAR	- Argon gazeux
- GCO ₂	- CO ₂ gaz
- GNO ₂	- Protoxyde d'Azote gaz
- LI NO ₂	- Protoxyde d'Azote liquide
- MIX	- Mélange de gaz exemple : hydrogène/azote, azote /CO ₂ ...

Comme le montre ce tableau, LGA dispose d'une gamme de produit très diversifiée, avec laquelle elle arrive à satisfaire les besoins de ses clients en les approvisionnant en différents gaz fabriqués, médicaux ou industriels à travers les neufs (9) sites dispersés aux quatre coins de l'Algérie (Est, Ouest, Centre-Sud), LGA assure une couverture nationale ce qui lui permet d'atteindre et de cibler un plus grand segment de clients et couvrir toute la demande nationale. Cette stratégie est aussi adoptée afin de décentraliser les activités de LGA.

L'organigramme de LGA

Linde Gas Algérie est organisée comme suit :

- **Direction Plant Manager** : Chaque site a un Plant Manager (Directeur de site) soit:
 - Plant manager Constantine, Annaba, Skikda, Bouira, Reghaia, Ouergla, Sidi Bel Abbès, Arzew et Oran.
- **Direction réalisation** : Elle est composée de trois directions :
 - Bulk
 - Opération PGP
 - Commerciale et marketing
- **Direction support** : Elle est composée de six directions :
 - Affaires juridiques
 - Informatique et systèmes d'information
 - Ressources humaines
 - Achats
 - Finance et comptabilité
 - SHEQ

De la direction SHEQ découle des responsables nationaux des différentes composantes soit :

- Un responsable national de qualité et audit SMI au niveau du Siège
- Responsable national de la sécurité au travail et transport (Siège)
- Responsable environnement (Siège)
- Responsable national d'hygiène et santé, basé à Skikda
- Responsable national safety process MHRP au niveau de Constantine.

- Responsable de sécurité alimentaire, basé à Arzew

La direction SHEQ de LGA dispose de trois coordinateurs régionaux, soit :

- Un coordinateur centre-sud situé à Reghaia
- Un coordinateur Ouest situé à Arzew
- Un coordinateur Est situé au niveau de Skikda

Aussi au niveau de chaque région, on retrouve des responsables SHEQ comme suit :

- SHEQ Site Bouira, Reghaia, Ouargla
- SHEQ Site Oran, Arzew et Sidi Bel Abbes
- SHEQ Site de Annaba, Constantine et Skikda.

Dans le but d'élaborer un diagnostic des pratiques et comportements dits responsables et répondant aux exigences de la Norme ISO 26000 relative à la Responsabilité Sociétale de l'Entreprise RSE, exploiter un outil de mesure de reporting nous paraît nécessaire. De ce fait, avoir recours au Global Reporting Initiative dit GRI nous semble approprié pour éclaircir les directives annoncées dans la Norme ISO 26000.

Gouvernance, engagement et implication de LGA

Nous allons maintenant élaborer un diagnostic des pratiques dites responsables et existantes au sein de LGA, et cela en nous basant sur un outil de reporting qui est le GRI. Avant de s'impliquer dans les trois dimensions de la Responsabilité Sociétale de l'Entreprise RSE, une identification de la gouvernance de l'organisation est primordiale.

Structure de gouvernance de l'organisation.

Le Conseil d'administration est composé de (05) cinq personnes, dont le PDG de LGA qui est aussi Président du Conseil d'Administration (PCA) ainsi que 2 membres de l'actionnaire à 34% Sonatrach. Le PDG gouverne par délégation du Conseil d'Administration (CA).

Le CA se réunit à fréquence de quatre (4) fois par an afin de soulever des questions relatives à la stratégie de l'entreprise ainsi que débattre des états financiers.

Les politiques HSE et Qualité constituent des éléments essentiels de la stratégie de LGA et du groupe Linde. Elle est périodiquement revue et mise à jour par le comité central du groupe. Le conseil d'administration s'engage dans la mise en œuvre de cette politique.

Mécanismes qui relient les actionnaires et les salariés au conseil d'administration

- Mensuellement, une réunion est organisée entre le PDG de Linde Gas et l'ensemble des directions (SHEQ, Opérations, finances comptabilité, commerciale et marketing...) qui porte sur la vision de l'entreprise et la stratégie à mettre en place.
- **Réunion de revue de direction** : Elle regroupe le PDG, les directeurs centraux, l'équipe SHEQ et les directeurs des sites, qui se réunissent une fois par an afin de :
 - Faire le point par rapport au bilan annuel du système de management intégré (SMI), ainsi que les réalisations en matière de production et de ventes.
 - Mettre en place les plans d'action nécessaires pour traiter les anomalies.
 - Fixer les objectifs à atteindre lors du prochain exercice.
- **Réunion CHSE (Comité d'Hygiène et Sécurité de l'Entreprise)** : C'est une commission réglementaire qui se réunit trimestriellement au niveau central et mensuellement au niveau de chaque site dans le but de traiter les préoccupations des salariés en matière d'hygiène, santé et sécurité. Cette commission paritaire se compose de représentants de la direction et des représentants des travailleurs.

Processus mis en place par le conseil d'administration pour éviter les conflits

La politique de l'entreprise est axée sur la participation des salariés et les partenaires dans la stratégie ainsi que dans la prise de décision afin de gagner leur confiance. La prise en compte de l'aspect social (Les Parties Prenantes) de l'entreprise est l'une des valeurs fondamentale du Groupe Linde Gas.

Pour ce faire, chaque réunion du CA est accompagnée d'une réunion avec le syndicat des travailleurs qui est représentatif des attentes, réclamations et besoins des salariés, afin de les intégrer dans le processus de prise de décision et dans l'élaboration de la stratégie de l'entreprise.

Tous les deux ans, le département ressource humaine effectue un sondage auprès de chaque employé de Linde Group. Un questionnaire leur est soumis, qui touche à tout les aspects relatifs à la vie quotidienne de l'employé dans l'entreprise (Son engagement, sa satisfaction, les conflits, la communication...). Le but de cette

démarche est de récolter le feed-back des employés relatif à leur perception de l'entreprise pour pouvoir mener des actions permettant à chaque direction de conduire son équipe dans une optique d'amélioration continue, tout en atteignant leurs satisfaction.

Référentiels internes déterminant de la culture de Linde Gas Algérie

Le groupe Linde dispose d'un code d'éthique applicable à tous ses employés y compris ceux de Linde Gas Algérie. Ce code leur aient transmis, puis ils bénéficient d'une formation qui se solde par un test en ligne afin de leurs dicerner un diplôme s'ils épousent et s'engagent à respecter ces instructions et principes.

- Il existe un service d'éthique sur la plateforme en ligne de Linde Group, chargé du traitement des requêtes concernant toute anomalie, réclamation ou soupçon de l'employé par rapport aux pratiques contraires à l'éthique de Linde Group.
- Les valeurs ainsi que les principes de l'entreprise sont communiqués aux salariés et affichés au niveau de l'entreprise afin qu'ils soient intégrés dans tous les processus de Linde Gas et ancrés dans le comportement de chacun et surtout respectés.
- L'année 2016 a été consacrée à l'environnement, durant cette dernière, la mission des responsables était de tracer des objectifs relatifs à la protection de l'environnement. Des actions de sensibilisation, de communication ont aussi été planifiées [2].

Comme expliqué dans l'introduction , LGA est une entreprise où le risque est omniprésent et la diversité des produits se trouvant sur le site engendre une probabilité d'occurrence d'un phénomène très délicat qui est les effets dominos, pour preuve l'accident à effet domino précédemment cité. Nous allons donc maintenant nous intéresser à définir les effets dominos.

I.2 Généralités sur les effets dominos

Les accidents majeurs les plus destructeurs sont ceux où il se produit un "effet domino", provoquant l'escalade d'un accident et la propagation de cet événement primaire pouvant éventuellement impliquer de multiples équipements et unités de production.

Les installations ou équipements industriels sont dans la majorité des cas regroupés dans un même espace, ce qui implique une interaction entre eux et un danger encore plus grand pour les infrastructures faisant partie de leur zone d'implantation et pour eux-mêmes.

Du point de vue de la sécurité des installations industrielles, l'étude des effets dominos est très complexe à cause de la nécessité de prendre en considération le fonctionnement de l'ensemble du système et non le fonctionnement de ses parties individuellement. De ce fait, plusieurs paramètres et données d'entrées doivent être pris en compte : la quantité de substances présentes et leurs propriétés physico-chimiques, les conditions spécifiques du procédé, les distances entre les équipements ou les installations, les conditions météorologiques, etc [3].

I.2.1 Définition et caractéristiques des accidents à effet domino

L'**effet domino** tel que l'ont défini Genserik Reniers et Valerio Cozzani dans leur ouvrage "Domino Effects in the Process Industries-Modelling, Prevention and Managing" paru en 2013 est : « la propagation spatiale ou temporelle d'un événement primaire provoquant d'autres événements secondaires ». Par conséquent, l'**accident domino** est l'accident dans lequel un événement indésirable primaire se propage temporellement (dans un équipement) ou/et spatialement (à l'équipement voisin), séquentiellement ou simultanément, déclenchant éventuellement d'autres événements indésirables d'ordre supérieur et entraînant des conséquences plus graves que celles de l'événement primaire.

La propagation peut être simple, c'est-à-dire le scénario primaire déclenche un scénario secondaire unique. En général, une propagation simple à plusieurs niveaux donne **une chaîne domino** ; un premier scénario d'accident déclenche un deuxième scénario d'accident, le deuxième scénario d'accident déclenche un troisième scénario d'accident, et ainsi de suite.

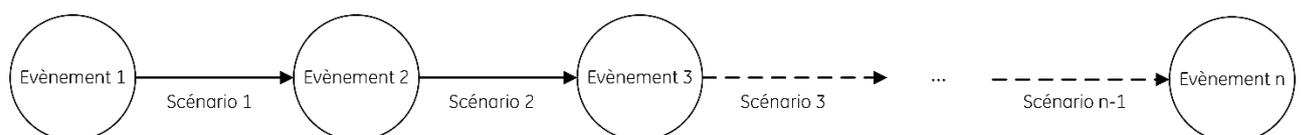


Figure I-2 : Schéma explicatif d'une chaîne domino

Dans le cas où l'accident primaire est grave, la propagation peut donner lieu à plusieurs scénarios secondaires simultanés. Ces derniers vont déclencher à leur tour plus d'un scénario ce qui va générer **une propagation parallèle complexe** à plusieurs niveaux.

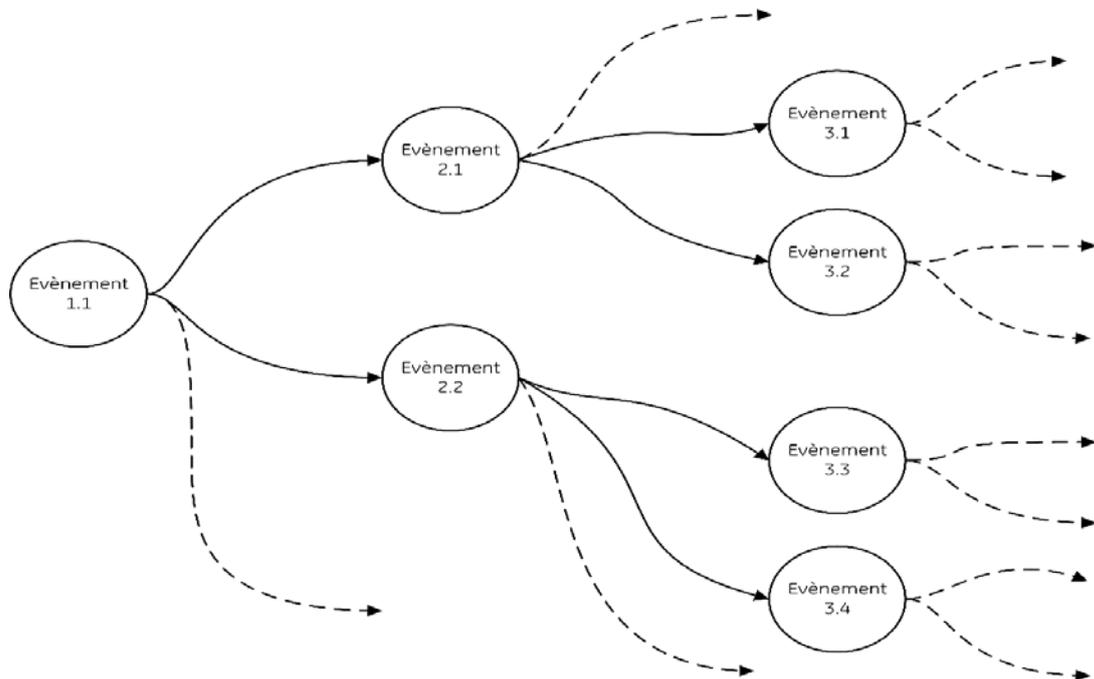


Figure I-3 : Schéma explicatif d'une propagation parallèle complexe

L'identification de la cause de propagation de l'évènement primaire est nécessaire pour mieux décrire le scénario d'accident domino. Elle doit être également identifiée pour tous les autres évènements de la chaîne domino simple ou parallèle complexe [3, 4].

Cependant, la propagation seule n'est pas suffisante pour décrire le phénomène des accidents dominos et ne justifie pas la prise en compte des accidents qui suivent le scénario primaire en tant qu'accidents dominos.

Ceci permet de définir la notion de **vecteur d'escalade**, qui est un élément fondamental dans l'étude des accidents dominos. Il est indispensable afin de considérer les scénarios d'accidents comme des scénarios dominos. En effet, afin d'obtenir un accident à effet domino il est impératif que les conséquences globales de cet accident soient plus graves que celles du scénario primaire pris seul.

De ce fait, la propagation et l'escalade des scénarios primaires sont obligatoirement associés pour définir l'accident domino.

Il existe deux types d'escalade :

- L'escalade directe : causée par les dommages directs des unités cibles par effet de rayonnement, surpression, ondes de choc ou projection de fragments.
- L'escalade indirecte : causée généralement par la perte de contrôle de l'installation à cause de la destruction de la salle de contrôle ou l'évacuation du personnel.

Les cibles dans les accidents dominos sont les installations qui ont le potentiel, si elles sont endommagées, de déclencher un scénario secondaire.

Afin de simplifier les événements dominos et faire lever l'ambiguïté par rapport aux caractéristiques de ces accidents, ils ont été classés en 4 catégories comme le montre le tableau I-4 [4].

Tableau I-4 : Les différentes catégories d'évènements dominos [4]

Catégorie de l'évènement domino	Sous-catégorie	Définition
1	Interne	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'évènement domino sont situés à l'intérieur de la même zone.
	Externe	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'évènement domino ne sont pas situés à l'intérieur de la même zone.
2	Direct	L'évènement domino est la conséquence directe de l'évènement précédent.
	Indirect	L'évènement domino n'est pas une conséquence directe de l'évènement qui le précède.
3	Temporel	L'évènement domino se produit dans le même équipement (ou installation) que l'évènement précédent, mais avec un retard.
	Spatiale	L'évènement domino se produit à l'extérieur de l'équipement où l'évènement précédent a eu lieu
4	En série	L'évènement domino se produit comme une seule chaîne d'accidents.
	En parallèle	L'évènement domino se produit sous la forme de plusieurs chaînes d'accidents.

Le danger dû aux effets dominos est bien connu et pris en compte dans les normes de sécurité et de la législation.

En effet, il est reconnu dans la législation européenne depuis la première directive Seveso (directive 82/501/CEE), qui exigeait l'évaluation des risques à effet domino dans toutes les

installations et l'obligation d'établir un rapport de sécurité. Cette directive a été ensuite remplacée en 2012 par l'article 9 de la directive Seveso-III (directive 2012/18/UE), consacrée aux effets dominos.

La directive Seveso-I exigeait une évaluation complète de la sécurité sur les sites et la nécessité d'évaluer la possibilité d'accidents domino était déjà citée, bien qu'à l'époque aucune approche technique ou outil spécifique n'existait pour permettre l'identification et l'évaluation de tels scénarios. Mais après la catastrophe de Mexico en 1984, probablement l'un des accidents à effet dominos les plus connus, des préoccupations spécifiques sur le risque d'escalade ont été suscitées. Dès lors, la démonstration de la gravité potentielle des accidents impliquant des effets dominos a conduit à des efforts importants pour la prévention des scénarios d'accidents dominos et les normes ainsi que la législation relative à la maîtrise des risques d'accidents majeurs comprennent désormais des mesures d'évaluation, de contrôle et de prévention des effets dominos.

En effet, plusieurs normes introduisent des mesures préventives, telles que les distances de sécurité ou l'isolation thermique, afin de contrôler et de réduire la probabilité d'événements dominos.

Cependant, les modèles d'évaluation des effets dominos exigent un niveau élevé de détail en ce qui concerne les données d'entrée. C'est cette raison, et la combinaison des probabilités extrêmement faibles de tels accidents, qui conduisent souvent à laisser de côté l'évaluation de la sécurité des activités industrielles, l'évaluation quantitative et la gestion des risques dus aux scénarios dominos.

I.3 Problématique :

LINDE GAS est une entreprise spécifique ayant la particularité d'avoir non seulement différents process avec un niveau de risque assez élevé mais en plus la présence permanente en quantités importantes de différents produits présentant des caractéristiques pour le moins très dangereuses. De plus l'entreprise se trouve dans une zone industrielle et est mitoyenne d'une autre entreprise Air liquid qui est également une entreprise à haut risque. Ces spécifications, font de LINDE GAS l'environnement propice au déclenchement d'un accident majeur à effet domino dont les conséquences en matière de vies humaines, de dommages matériels et d'impacts financiers seraient désastreuses.

Bien que le groupe LINDE ai une politique bien ficelée en matière de sécurité, l'étude d'effet domino étant un domaine assez récent et dont les méthodologies restent assez peu nombreuses et peu maîtrisés des ingénieurs, il n'y a pas d'étude dans ce sens au sein du groupe en Algérie, d'où la nécessité d'un recensement de tous les scénarios à effet domino crédibles, afin de juger si cette politique est en mesure d'y faire face.

Cela nous amène donc aux questions suivantes :

- Quelles sont les séquences d'accidents à effet domino qui pourraient toucher LINDE GAS ?
- Pouvons-nous élaborer une méthodologie d'étude des effets domino présentant le moins d'inconvénients et étant la plus complète possible ?

I.4 Méthodologie

I.4.1 Etude de l'existant

Afin de déterminer la méthodologie la plus adéquate, nous avons réalisé une revue de littérature sur le domaine des effets dominos.

Les résultats avec les limites de chaque méthode sont résumés dans le tableau I-5, [5].

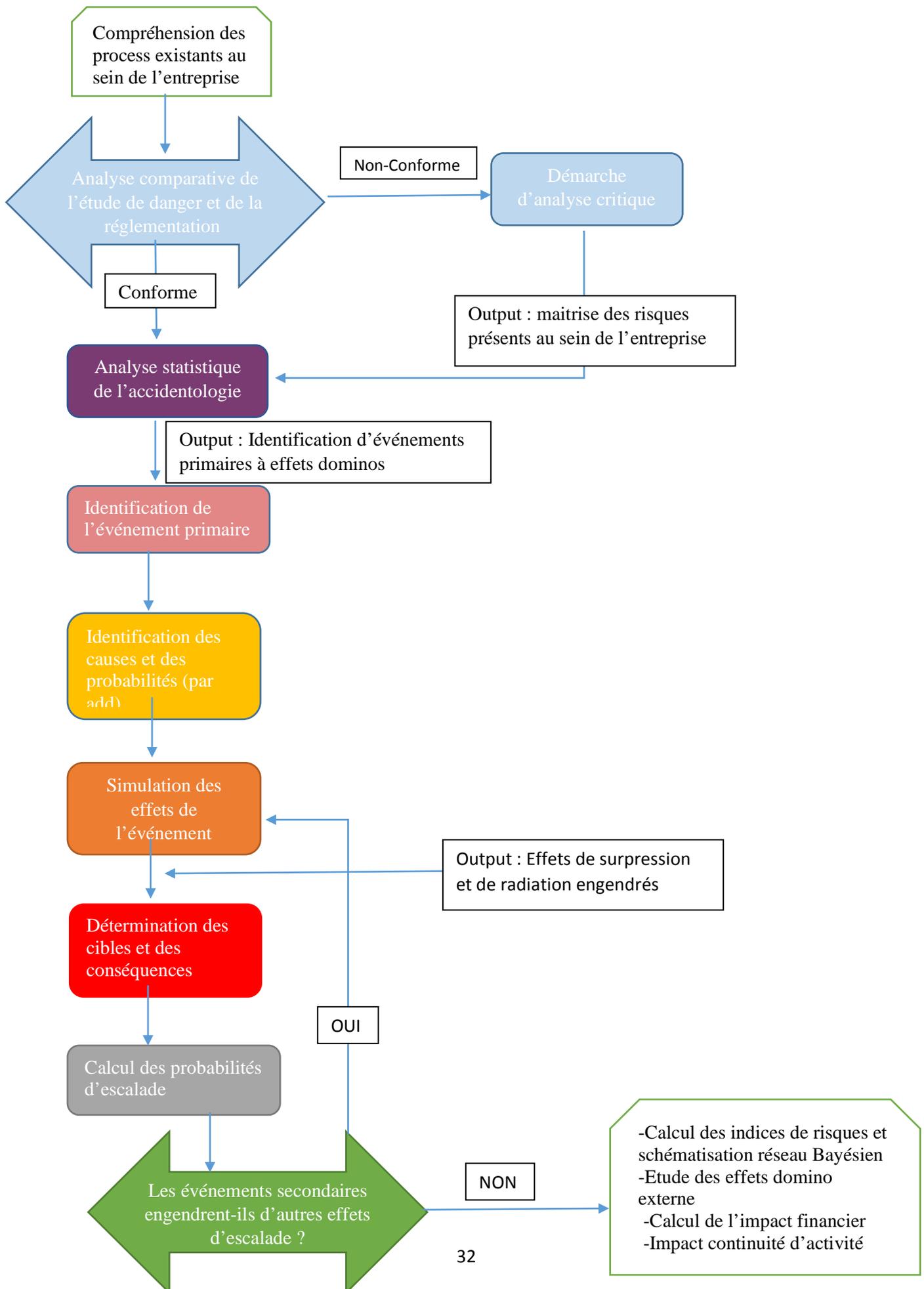
Tableau I-5 : Etude sur les méthodes existantes et leurs limites

Méthodes	Domaine d'application	Objet /Principe	Limites
Méthodologie DEA	Industrie (chimique)	D'une unité à une autre si possible	<ul style="list-style-type: none"> - Reste assujettie à la pertinence du découpage du système en unités, - Besoin de valeurs seuils plus génériques, - Ne considère pas le facteur humain.
Méthode MCAS	Industrie chimique matières toxiques et inflammables	Local à l'unité Classification des scénarios	<ul style="list-style-type: none"> - Ne considère pas la propagation d'effet domino inter-unités, - Se limite à la classification des scénarios primaires sans étudier les scénarios de degré plus élevés, - Ne considère pas le facteur humain comme un paramètre qui peut influencer le processus, - N'explique pas le processus de génération des scénarios.
Procédure ORA	Industrie (pétrochimique)	Estimation de risques	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifique à l'analyse des risques, - Ne traite pas à proprement parler des effets dominos.
Méthodologie ARAMIS	Industrie chimique et stockage	Identification des risques (nœud papillon)	<ul style="list-style-type: none"> - Ne traite l'aspect d'effet domino que partiellement, - Ne considère pas les risques d'origine naturels, - N'intègre pas le facteur humain.
Méthodologie HAZWIM	Industrie	Analyse des dangers	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifique au traitement des accidents dominos externes au site industriel, - Dépendant d'autres approches (Hazop what-it,...)
Algorithme FREEDOM (FREquency Estimation of DOMino accidents)	Industrie (système)	Comportement de système multi-unités, défaillance d'un équipement	<ul style="list-style-type: none"> - Traite les effets domino qu'en interne par rapport au site, - Ne considère pas les autres systèmes environnant, - Ne prend comme critère que la défaillance des composants.

Sur les six méthodes étudiées, nous remarquons que chaque méthode a certes ses avantages mais aussi des limites spécifiques. Nous pouvons par exemple citer la non considération du facteur humain, de la propagation d'effet dominos inter-unité ou des effets dominos externes, n'explique pas le processus de génération des scénarios. Ces limites sont un obstacle pour la réalisation d'une étude complète. Pour pallier à ce problème, nous allons proposer une nouvelle méthode qui prendrait en considération les points précédemment cités

I.4.2 Réalisation d'une méthode d'étude des effets dominos

Les observations précédentes nous amènent à la proposition d'une nouvelle méthode de travail que nous allons ensuite appliquer. Cette méthode est résumée dans le schéma explicatif suivant, chaque partie sera ensuite détaillée dans l'application de la méthode.



Chapitre II

ETUDE DES EFFETS DOMINOS INTERNES

II. ETUDE DES EFFETS DOMINOS INTERNES

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord essayer de détailler le process d'extraction des gaz de l'air qui se fait au sein de LGA afin de comprendre les risques qui peuvent en découler. Nous allons ensuite réaliser une critique de l'étude de danger pour faire ressortir les manques qui peuvent exister en matière de sécurité.

II.1 Compréhension du process existant à LGA

II.1.1 Présentation de l'Air Separation Unit (ASU)

Le site de LGA à Reghaïa est constitué des ateliers pour la production des différents gaz industriels, médicaux et mélanges, des ateliers de conditionnement, de la ré-épreuve, un parc de distribution bouteille, un bloc administration et de l'ASU. Cette dernière est le cœur de production du site, en effet elle collecte l'air ambiant afin d'obtenir, grâce à un procédé industriel, les différents gaz de l'air avec une grande pureté. A l'issue de ce procédé, l'air est décomposé en ses composants principaux ; Oxygène, azote et argon. A partir de cette unité, les gaz liquéfiés seront redistribués soit vers les ateliers de conditionnement bouteille ou bien pour la distribution en vrac grâce à des camions citernes qui pompent ces gaz à l'état liquide directement des réservoirs de stockage

II.1.2 Description du processus de séparation d'air

II.1.2.1 Récupération d'oxygène et d'azote

La séparation de l'air est basée sur un processus à basse température utilisant des adsorbants à tamis moléculaires pour nettoyer l'air avant sa pénétration dans la partie à basse température.

La poussière et d'autres particules contenues dans l'air sont éliminées grâce à un système de filtre d'air avant que l'air pénètre dans le compresseur d'air.

Le compresseur d'air qui est entraîné par un moteur électrique comprime l'air à environ 4,6 bar. Après le 3ème étage, l'air est refroidi dans un refroidisseur de sortie, puis refroidi encore à environ 20°C dans un refroidisseur d'air par l'eau refroidie de l'unité de réfrigération. L'eau condensée est éliminée de l'air par un séparateur d'eau en aval de l'unité de réfrigération. Un treillis en haut de la cuve du séparateur élimine l'eau atomisée de l'air.

Après le séparateur d'eau, l'air traverse l'un des adsorbents à tamis moléculaires où sont éliminés le CO₂, les hydrocarbures potentiellement dangereux et la vapeur d'eau résiduelle. L'un des deux adsorbents fonctionne pendant que l'autre est en cours de régénération. De l'azote impur provenant de la boîte froide est utilisé pour la régénération des adsorbents.

Ce gaz est chauffé dans le chauffage électrique et traverse l'adsorbent. Le cycle de chauffage est assisté par un accumulateur de chaleur qui est chargé durant les étapes de refroidissement, de pressurisation, de changement et de dépressurisation. Durant le cycle de refroidissement, l'adsorbent est refroidi par l'azote résiduaire.

Une fois la séquence de régénération terminée. L'adsorbent est pressurisé avant de passer au cycle d'adsorption.

Le changement de l'étape de régénération à celle du fonctionnement et vice-versa est contrôlé par un programme.

Après l'adsorbent à tamis moléculaire, une petite partie de l'air sec est nettoyé est prélevé en tant qu'air instrument.

En aval de l'adsorbent à tamis moléculaire, la quantité totale de l'air du processus et l'air recyclé provenant de la boîte froide sont ensuite comprimés à 33 bar par un turbocompresseur d'air de recyclage à 3 étages avec refroidissement. Après le dernier étage du compresseur de recyclage, l'air est refroidi dans un refroidisseur de sortie, puis comprimé encore à 49,6 bar par l'unité de compresseur/surpresseur à turbine de détente. Le flux de recyclage en aval du compresseur-surpresseur est ensuite refroidi dans un refroidisseur de sortie par de l'eau de refroidissement, puis refroidi encore par l'eau refroidie de l'unité de réfrigération dans le refroidisseur.

La quantité totale d'air comprimé pénètre dans la boîte froide où elle est refroidie par les flux de produit froids en tant qu'azote résiduaire, azote basse pression et sous pression, oxygène et une partie d'air de recyclage dans le principal échangeur de chaleur.

Une partie de l'air comprimé quitte le centre de l'échangeur de chaleur avec une température de -70°C. Ce flux est détendu dans la turbine de détente et génère la réfrigération requise pour le processus cryogénique. En aval de la turbine de détente, ce flux est divisé. Une partie est dirigée vers la colonne de pression et l'autre partie est recyclée vers le compresseur de recyclage.

L'autre partie de l'air comprimé est ensuite encore refroidie jusqu'à sa température de liquéfaction et directement détendu vers la colonne de pression.

Les produits traversant l'échangeur de chaleur principal sont chauffés à environ 30°C par l'air du processus à contre-courant.

Dans la colonne de pression, l'air du processus est pré-séparé en liquide enrichi en oxygène au fond et en azote pur en haut. Le reflux requis pour la rectification est généré par la condensation de l'azote gazeux contre l'oxygène bouillant dans le condenseur généré par la condensation de l'azote gazeux contre l'oxygène bouillant dans le condenseur. Une partie de l'azote liquide sert de reflux pour la colonne de pression, la partie restante est sous-refroidie dans le sous-refroidisseur et alimente la colonne basse pression dans laquelle elle sert de reflux.

L'azote liquide en excédent est dévié du haut de la colonne basse pression et envoyé dans le réservoir de stockage.

Une petite partie de l'azote gazeux sous pression est prélevée en haut de la colonne de pression et sert de gaz de purge et d'étanchéité pour l'unité de séparation d'air (ASU).

Une partie d'air liquide est prélevée d'un collecteur séparé dans la colonne de pression, puis sous-refroidie. Elle à améliorer la rectification dans la colonne basse pression.

Le liquide enrichi en oxygène du fond de la colonne de pression est également sous-refroidi dans le sous-refroidisseur et l'évaporateur d'argon puis est détendu dans le condenseur d'argon brut. Le liquide enrichi en oxygène sert de réfrigérant pour le condenseur d'argon brut et pour le condenseur d'argon pur. Le liquide en excédent du condenseur d'argon brut s'écoule par le trop-plein dans la colonne basse pression en tant qu'alimentation d'oxygène.

Dans la colonne basse pression, la séparation finale en oxygène liquide pur a lieu, en tant que produit inférieur et azote gazeux en haut de la colonne. Le produit d'oxygène liquide prélevé au fond la colonne basse pression est pompé par une pompe cryogénique et divisé en deux flux.

L'un des flux est directement dirigé via le sous-refroidisseur vers le réservoir de stockage d'oxygène. L'autre flux est introduit dans le condenseur. Une partie de l'oxygène gazeux prélevé dans le condenseur devient du gaz résiduaire d'oxygène et quant à l'autre alimente dans la colonne basse pression.

Le gaz d'azote pur en haut de la colonne basse pression est réchauffé dans le sous-refroidisseur et l'échangeur de chaleur principal, puis quitte la boîte froide en tant que produit LP-GAN, mais la conduite de produit LP-GAN est aveugle et s'échappe via la conduite d'évacuation de produit et le silencieux.

Le gaz résiduaire d'azote de la colonne basse pression est réchauffé dans le sous-refroidisseur et l'échangeur de chaleur principal et sert à régénérer les absorbeurs à tamis moléculaires. Ensuite le gaz résiduaire est évacué dans l'atmosphère.

II.1.2.2 Récupération de l'argon brut et pur :

Le gaz d'argon enrichi est dévié de la colonne basse pression et alimente le bas de la colonne d'argon brut T4110 où le gaz est séparé en liquide enrichi en oxygène en bas et en gaz enrichi en argon en haut. Le liquide dans le fond retourne dans la colonne basse pression.

Le gaz d'argon brut en haut va vers la colonne d'argon brut T4111 et se liquéfie dans sa totalité dans le condenseur d'argon brut contre l'air liquide enrichi en oxygène provenant de la colonne de pression. Le liquide d'argon brut sert de reflux pour la colonne d'argon brut T4111.

Le liquide du fond de T4111 est pompé vers la colonne d'argon brut T4110 où il sert également de reflux. Environ 3,4% du gaz d'argon brut en haut est dévié en tant que gaz et est ensuite dirigé vers la colonne d'argon pur. La concentration d'oxygène de l'argon brut répond déjà aux spécifications pour le produit argon (<1 vppm de gaz oxygène).

Dans la colonne d'argon pur, l'azote est séparé de l'argon brut. L'argon gazeux contenant de l'azote se liquéfie dans le condenseur d'argon pur contre l'air liquide enrichi du condenseur d'argon brut. L'azote est évacué dans l'atmosphère, l'argon liquéfié sert de reflux pour la colonne d'argon pur. En bas de la colonne d'argon pur, l'argon pur liquide est rebouillit dans l'évaporateur d'argon et sert de gaz ascendant dans la colonne d'argon pur. Le liquide en excédent est dévié en tant qu'argon liquide (LAR) vers le réservoir d'argon.

II.2 Critique de l'étude de danger

L'étude de dangers (EDD) est un principe de la sécurité industrielle et surtout une exigence réglementaire régit par le décret exécutif numéro 06-198, dont un préalable est l'inventaire des

objets et activités avec leurs dangers intrinsèques. C'est un bon moyen d'obtenir des informations sur les activités de l'entreprise et les risques identifiés au sein de cette dernière ainsi que les réponses apportées aux exigences réglementaires. Nous commencerons donc le travail par une critique de l'étude de danger. Cela nous permettra également d'apporter notre contribution aux éventuels manques de l'étude.

II.2.1 Contenu de l'étude de danger :

L'étude de danger a pour objet de préciser les risques directs ou indirects par lesquels l'activité de l'établissement classé met en danger les personnes, les biens et l'environnement, que la cause soit interne ou externe.

L'étude de danger doit permettre de définir les mesures d'ordre technique propre à réduire la probabilité et les effets des accidents ainsi que les mesures d'organisation pour la prévention et la gestion de ces accidents.

II.2.2 Cadre réglementaire algérien

En Algérie c'est le décret exécutif n°06-198 du 4 Joumada El oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 qui définit la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement (ICPE) [11].

Ce décret comporte deux articles, 14 et 28, portant sur les EDD. Selon l'article 14 de ce décret, l'EDD doit comporter les éléments suivants [6] :

- Présentation générale du projet ;
- Description de l'environnement immédiat du projet et du voisinage potentiellement affecté en cas d'accident comprenant les données physiques (géologie, hydrologie, météorologie et les conditions naturelles) et les données socio-économiques et culturelles (population, habitat, occupation des sols, activités économiques, voies de communication ou de transport et aires protégées) ;
- Description du projet et ses différentes installations (implantation, taille et capacité, accès, choix du procédé retenu, fonctionnement, produits et matières mises en œuvre...) en se servant au besoin de cartes (plan d'ensemble, plan de situation, plan de masse, plan de mouvement ...) ;

- Identification de tous les facteurs de risque générés par l'exploitation de chaque installation considérée. Elle doit tenir compte non seulement des facteurs intrinsèques propres aux installations mais également à l'environnement auquel la zone est exposée ;
- Analyse des risques et des conséquences au niveau de l'établissement classé afin d'identifier de façon exhaustive les événements accidentels pouvant survenir. Leur attribuer une cotation en terme de gravité et de probabilité permettant de les hiérarchiser avec la méthode d'évaluation des risques utilisée pour l'élaboration de l'étude de danger ;
- Analyse des impacts potentiels en cas d'accidents sur les populations (y compris les travailleurs au sein de l'établissement), l'environnement ainsi que les impacts économiques et financiers prévisibles;
- Modalité de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité et des moyens de secours.

Suivant l'article 28 du décret exécutif n°06-198, l'EDD a pour objectif de [6]:

- Préciser les risques directs ou indirects par lesquels l'activité de l'établissement classé met en danger les personnes, les biens et l'environnement, que la cause soit interne ou externe ;
- Définir les mesures d'ordre technique propres à réduire la probabilité et les effets des accidents ainsi que les mesures d'organisation pour la prévention et la gestion de ces accidents ;
- Procéder à l'information préventive sur les risques du public, du personnel et des exploitants des installations voisines ;
- Favoriser l'émergence d'une culture du risque au voisinage des établissements ;
- Servir de base à l'élaboration des règles d'urbanisation et des plans d'urgence.

II.2.3 Démarche de l'analyse critique des EDD

Dans cette partie nous allons exposer les différentes étapes constituant notre démarche de l'analyse critique des EDD.

Les différentes étapes d'une critique d'EDD sont résumées dans la figure II-1.

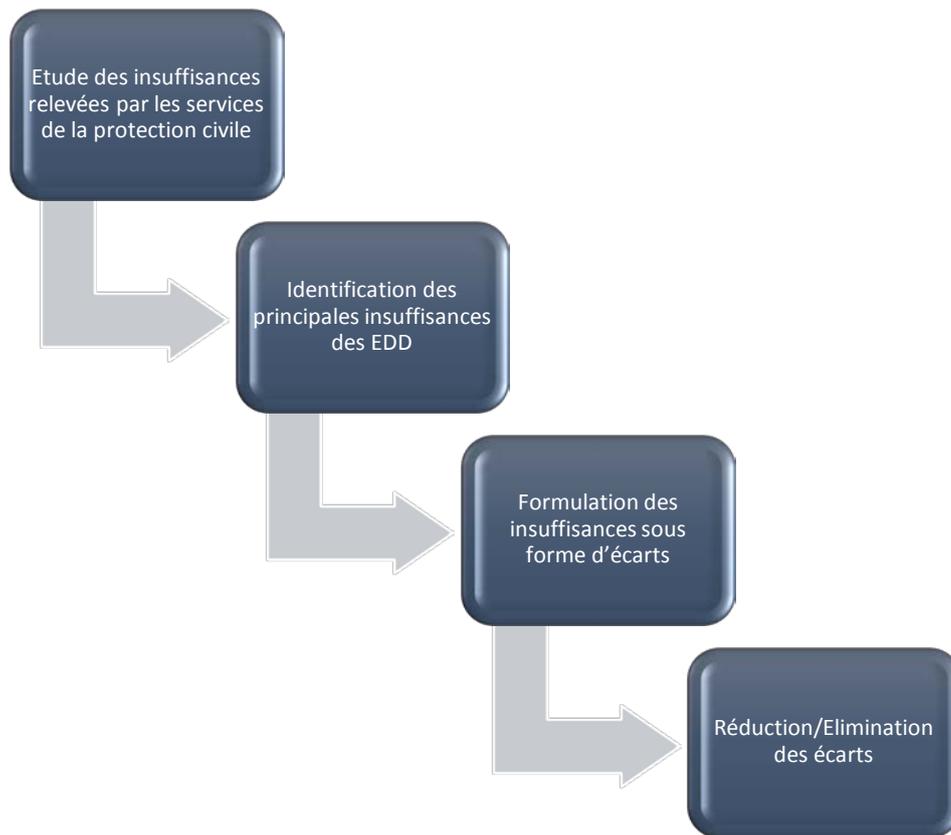


Figure II-1 : Etapes de la critique d'une EDD

Les étapes de la démarche sont développées ci-dessous [7] :

Étape 1 : Etude des insuffisances relevées par les services de la protection civile

Afin de mieux cibler notre critique nous allons nous baser sur des statistiques réalisées par les services de la protection civile au sujet des non conformités récurrentes dans les EDD déposées.

Étape 2 : Identification des principales insuffisances des EDD

Dans cette étape, nous avons caractérisé toutes les insuffisances du contenu de l'EDD, par rapport à ce qui a été mentionné dans l'article 14 du décret exécutif 06-198. Les insuffisances sont classées dans un tableau en fonction des chapitres développés dans l'EDD.

Étape 3 : Formulation des insuffisances sous forme d'écarts

La classification des écarts s'est faite en fonction des sous-écarts et des responsables de la mise en œuvre. Tous les écarts identifiés ont été classés par catégorie. Le schéma de la figure 3-2 explique la répartition de l'écart résultat.

Les types de sous écarts expliqués précédemment sont :

Écart mise en œuvre : c'est l'écart entre ce qui a été tracé comme objectif et ce qui a été fait dans l'étude de danger (le résultat).

Écart contenu : ce sont des chapitres qui n'ont pas été traités dans l'EDD et qui ont été essentiellement décrits dans le cadre réglementaire.

Écart réalisation : l'absence de toute évaluation des risques en utilisant des méthodes d'analyse (APR, AMDEC, ADD, Nœud papillon...) permettant de faire ressortir des scénarios plausibles susceptibles de se produire dans une installation bien déterminée. Cet écart peut être dû suite au mauvais déploiement d'une méthode d'analyse (la méthodologie suivie ne correspond pas à celle décrite dans la bibliographie).

Écart examen et approbation : c'est l'écart qui correspond aux critères d'examen qui n'ont pas été pris en considération lors de l'approbation de l'étude de danger.

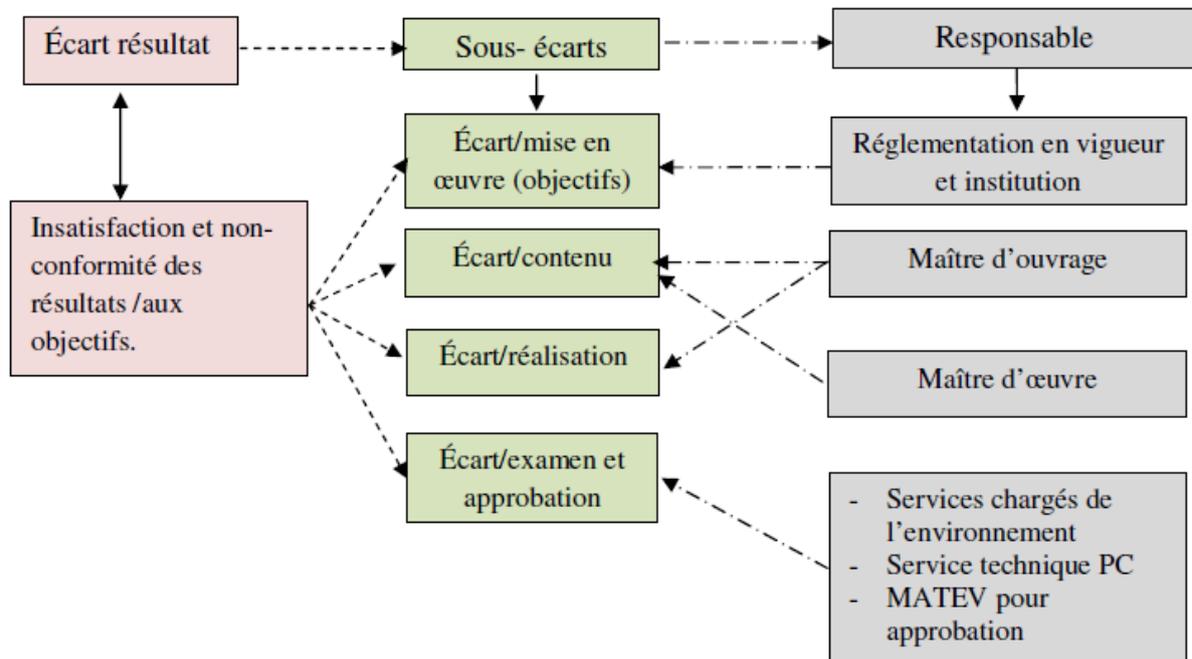


Figure II-2 Démarche de détermination des écarts

Étape 4 : Réduction/élimination des écarts

Cette dernière étape de la critique permet de nous renseigner sur les mesures à prendre en considération pour avoir une étude de danger conforme à la réglementation en vigueur.

II.2.4 Application de l'analyse critique de l'EDD

Étape 1 : Etude des insuffisances relevées par les services de la protection civile

Les résultats obtenus pour cette étape sont résumés dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Etat récapitulatif des dossiers traités par les services de la protection civile pour les ICPE

Année	Nombre de dossiers traités	Nombre de conformités	Taux de conformité
2011	3687	486	13%
2012	3896	623	16%
2013	5918	758	13%
	Total : 13501	Total : 1867	Total : 14%

Observation : la conformité est délivrée suite à la visite effectuée par les services de la protection civile à la demande du propriétaire une fois que le projet, objet de l'EIE/EDD, est achevé

Statistique de non conformités :

Sur un panel de 35 études de danger étudiées, les statistiques suivantes ont été calculées :

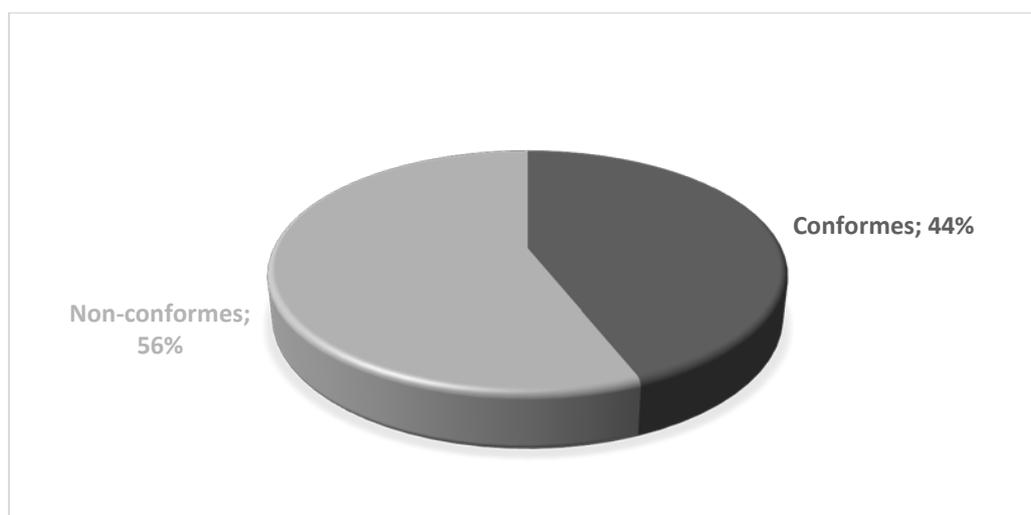


Figure II-3 Insuffisances de forme

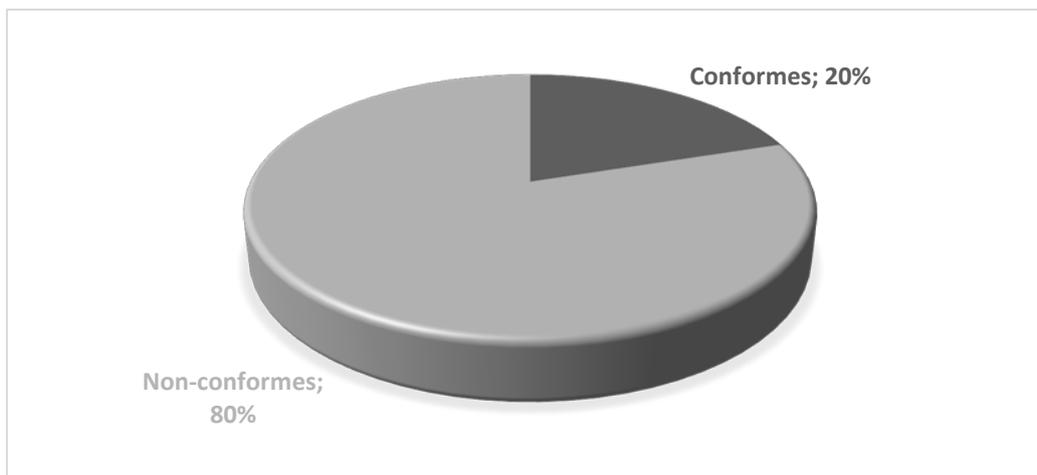


Figure II-4 : Insuffisances de fond

Les insuffisances les plus fréquentes relevées de cette étude sont l’omission des références de grilles, l’absence d’outils pertinents d’analyse de risque, le passage d’analyse qualitative à l’analyse quantitative ou encore l’absence de critère d’acceptabilité

Étape 2 : Identification des principales insuffisances de l’étude de danger LINDE GAS Reghaia. Les insuffisances relatives à chaque chapitre de l’EDD sont relevées dans le tableau II-2.

Tableau II-2 : Résumé de la critique de l’EDD

Contenu requis	Contenu de l’EDD	Ecart
Résumé non technique	Pas de résumé non technique	Absence du résumé non technique dans l’étude de danger
Description générale du projet	Description du projet	/
Description du projet et de ses installations	Activités, capacités, utilités, plan de masse, description des locaux, plan de situation, processus de production	Absence de l’accidentologie de ce type d’entreprise et de la politique HSE de LGA
Description de l’environnement	Géographie, géologie, pédologie, population, climat, faune et flore	-La répartition de la population dans le projet et dans la commune n’est pas mentionnée. -La description des industries avoisinante est inexistante or LGA est à proximité très réduite d’autres entreprises à

		haut risque
Identifications des facteurs de risque	Risque général des produits contenus dans l'entreprise	Absence de facteurs de risques intrinsèques propres aux installations mais également à l'environnement auquel la zone est exposée. L'origine des risques majeurs identifiés n'est pas mentionnée. Les conditions d'occurrence des risques majeurs ne sont pas citées.
Analyse du risque	Le document contient un historique d'accident d'entreprises utilisant un des produits que LINDE produit	-L'étude ne contient aucune analyse des risques ni même d'analyse préliminaire des risques (APR) - Aucun scénario d'accident n'a été réalisé -Absence de cotation du risque (probabilité, gravité) -Absence de méthode d'analyse des risques qu'elle soit qualitative ou quantitative.
Évaluation des risques majeurs	X	Aucune analyse des risques majeurs n'a été effectuée
Modalité de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité	Description de moyens de lutte anti incendie et quelques mesures préventives	-Aucune mesure de réduction de risques adéquate proposée.

Étape 3 : Formulation des insuffisances sous forme d'écarts

Les écarts soulevés sont essentiellement des écarts de contenus et des écarts de réalisation (Figure II-5).

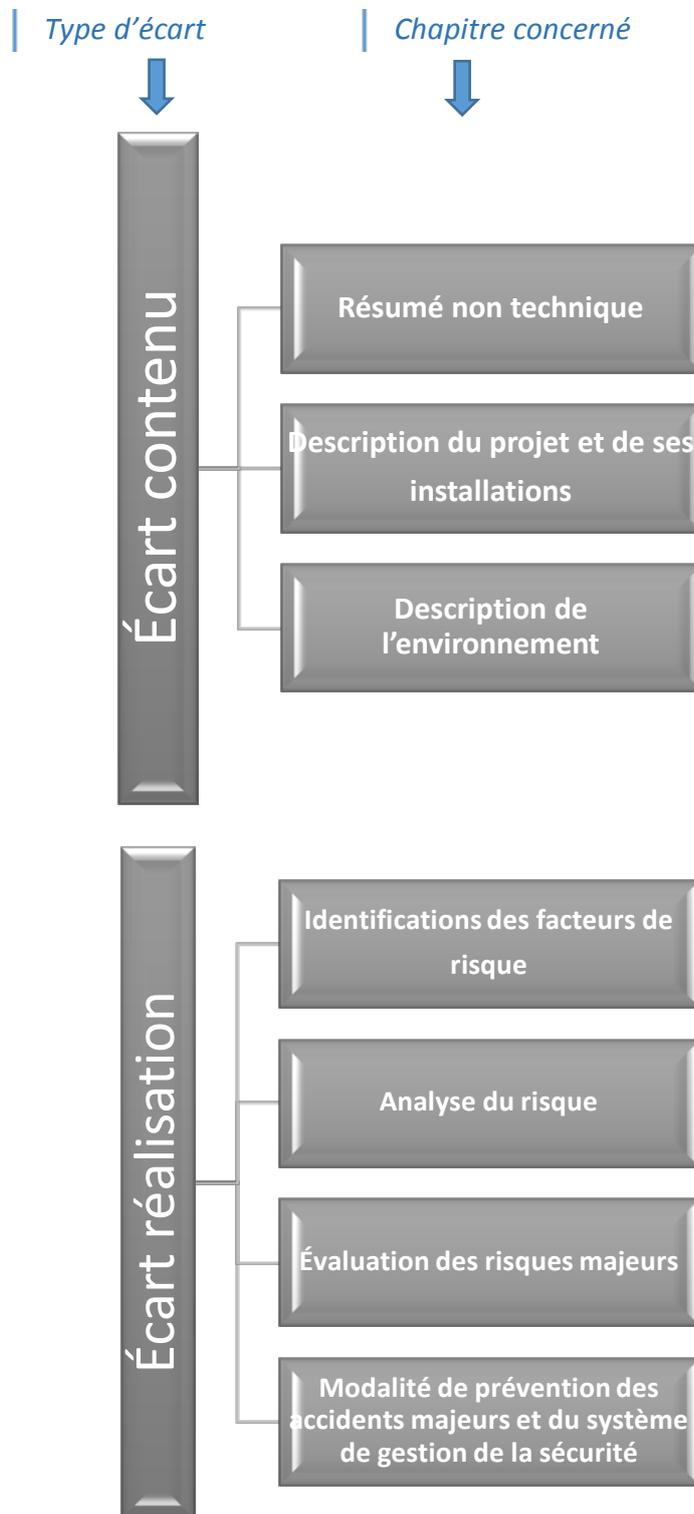


Figure II-5 : Schéma représentant les types d'écarts relevés

Étape 4 : Réduction/élimination des écarts

Cette étape sera partiellement réalisée car l'objectif global de notre étude n'est pas l'amélioration de l'étude de danger, mais la réalisation d'une méthode pour l'étude des effets dominos. Une grande partie de sa réalisation sera néanmoins acquise grâce aux résultats de l'étude qui sera effectuée.

A travers les deux étapes précédentes nous avons pu mieux cerner les caractéristiques de LGA, ce qui nous a permis de faire ressortir entre autre les zones critiques. Toutefois afin de pouvoir identifier les événements les plus susceptibles de créer des accidents dominos, nous allons nous référer à une analyse de l'accidentologie.

II.3 Analyse de l'accidentologie

Contrairement à la plupart des autres branches de la science et de la technologie, dans laquelle des expériences reproductibles fournissent la base pour la construction d'un cadre théorique, il est très difficile de réaliser de telles expériences dans le domaine de la prévision et la prévention des accidents.

Cette situation donne une grande importance à l'analyse des accidents passés dans l'industrie. Elle se fait par la reconstruction minutieuse des événements et l'identification de leurs événements déclencheurs, la séquence, et leurs conséquences. Ce qui peut donner lieu à des études comme la nôtre très utiles à l'élaboration de stratégies de prévention des accidents.

Comme la majorité des accidents majeurs dans le passé ayant causé un préjudice important pour les vies humaines et d'autres ressources ont impliqué un effet domino, nous nous sommes basés dans cette étude sur les exemples de plus de **224 accidents**.

II.3.1 Présentation du logiciel R

RStudio est un environnement de développement gratuit, libre et multiplateforme pour R, il est utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique. Il est disponible sous la licence libre AGPLv3, ou bien sous une licence commerciale, soumise à un abonnement annuel.

RStudio est disponible en deux versions : RStudio Desktop, pour une exécution locale du logiciel comme toute autre application, et RStudio Server qui, lancé sur un serveur Linux, permet d'accéder à RStudio par un navigateur web. Des distributions de RStudio Desktop sont disponibles pour Microsoft Windows, OS X et GNU/Linux.

RStudio a été écrit en langage C++, et son interface graphique utilise l'interface de programmation Qt.

RStudio intègre la possibilité d'écrire des notebooks combinant de manière interactive du code R, du texte mis en forme en markdown et des appels à du code Python ou Bash [8].

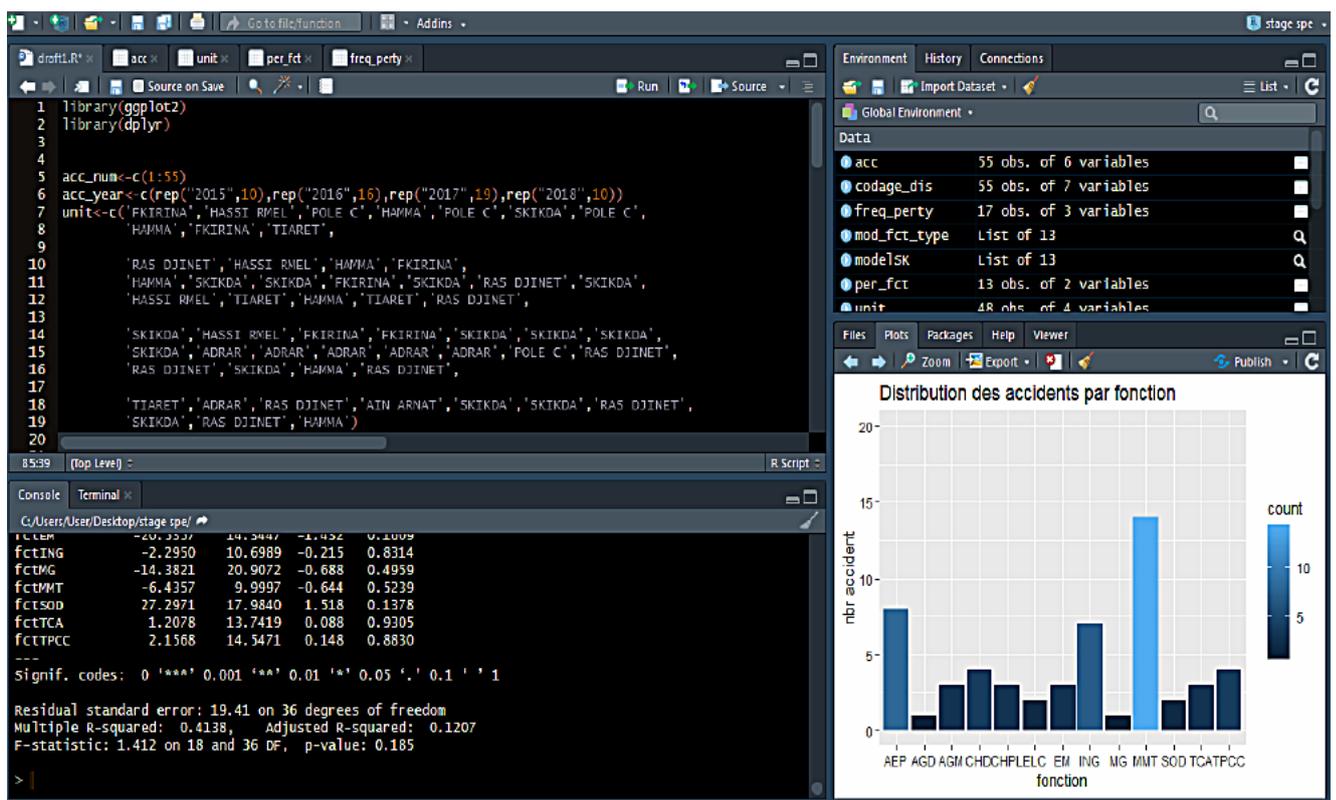


Figure II-6: Image de l'interface du logiciel R

II.3.2 Méthodologie

II.3.2.1 Acquisitions des données

Les accidents recueillis proviennent de la base de données ARIA et sont classés dans des tableaux dont le contenu des colonnes est comme suit :

Numéro ARIA	Code NAF	Pays	Département	Commune	Type Accident	Type évènement	Matières
-------------	----------	------	-------------	---------	---------------	----------------	----------

Equipements	Classe de danger CLP	Causes profondes	Causes premières	Conséquences	Echelle	URL	Contenu
-------------	----------------------	------------------	------------------	--------------	---------	-----	---------

II.3.2.2 Traitement des données

Les données qui ont été jugées utiles et prises en considération sont :

Numéro ARIA

Type accident

Matières

Causes

Conséquences humaines

Conséquences économiques

Conséquences environnementales

Rejets

Les données retenues sont nommées comme suit :

Tableau II-3 : Appellation des données retenues

Numéro ARIA	acc_num_year
Type accident	type_acc
Matières	source_produit
Causes	cause
Conséquences humaines	cons_hum_ARIA
Conséquences économiques	cons_eco_ARIA
Conséquences environnementales	cons_envi_ARIA
Rejets	rejet_matière_ARIA

A noté que le code écrit pour la visualisation de toutes les données comporte plus de **273 lignes**.

II.3.2.3 Visualisation :

Les figures II-7 à II-11, représentent les statistiques relatives aux types d'accidents, aux conséquences en fonction des types d'accidents, aux types d'accident en fonction des causes, aux types de produits mis en cause, et aux types de substances dangereuses impliquées dans les événements dominos.

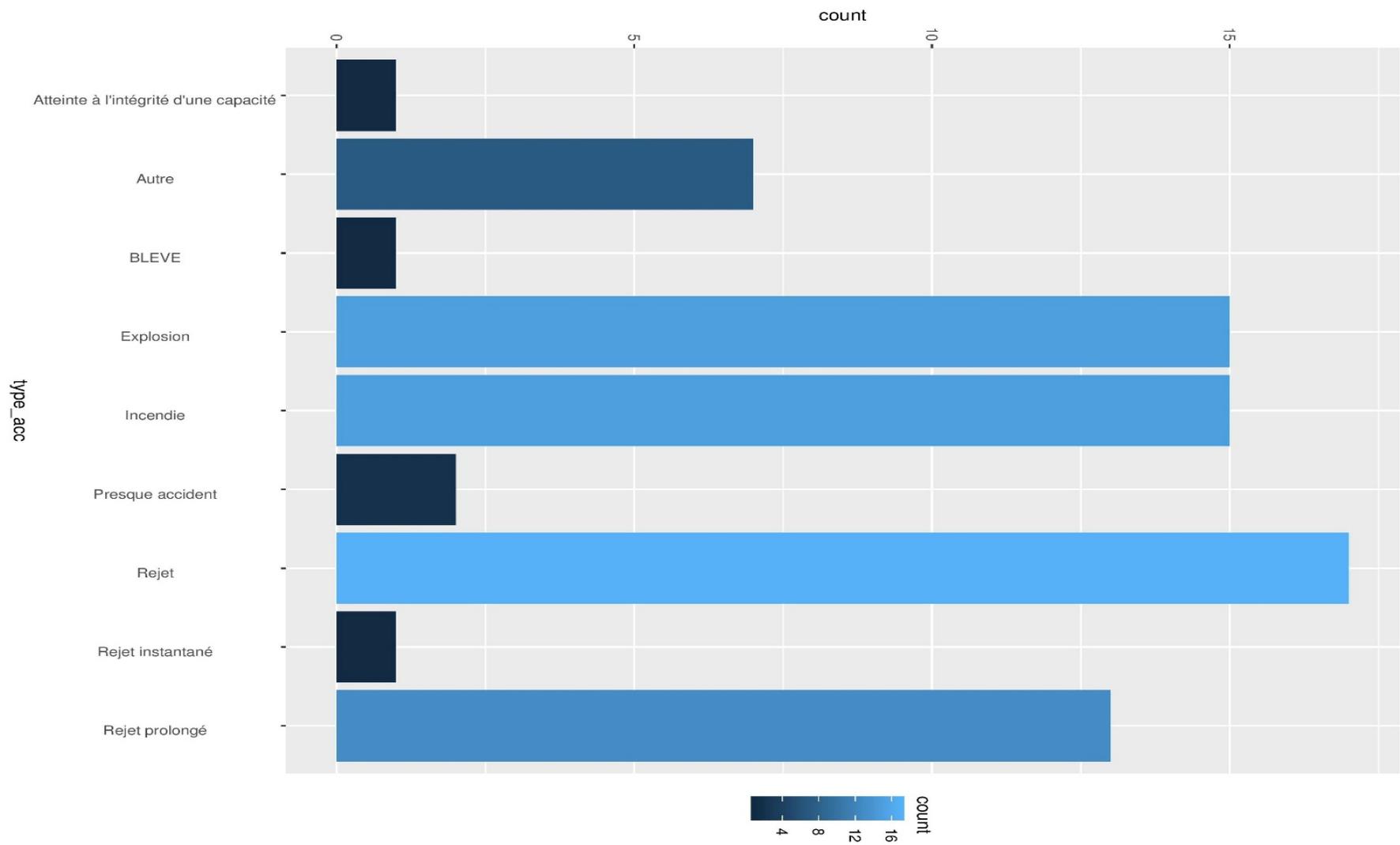


Figure II-7 : Statistiques sur les types d'accidents

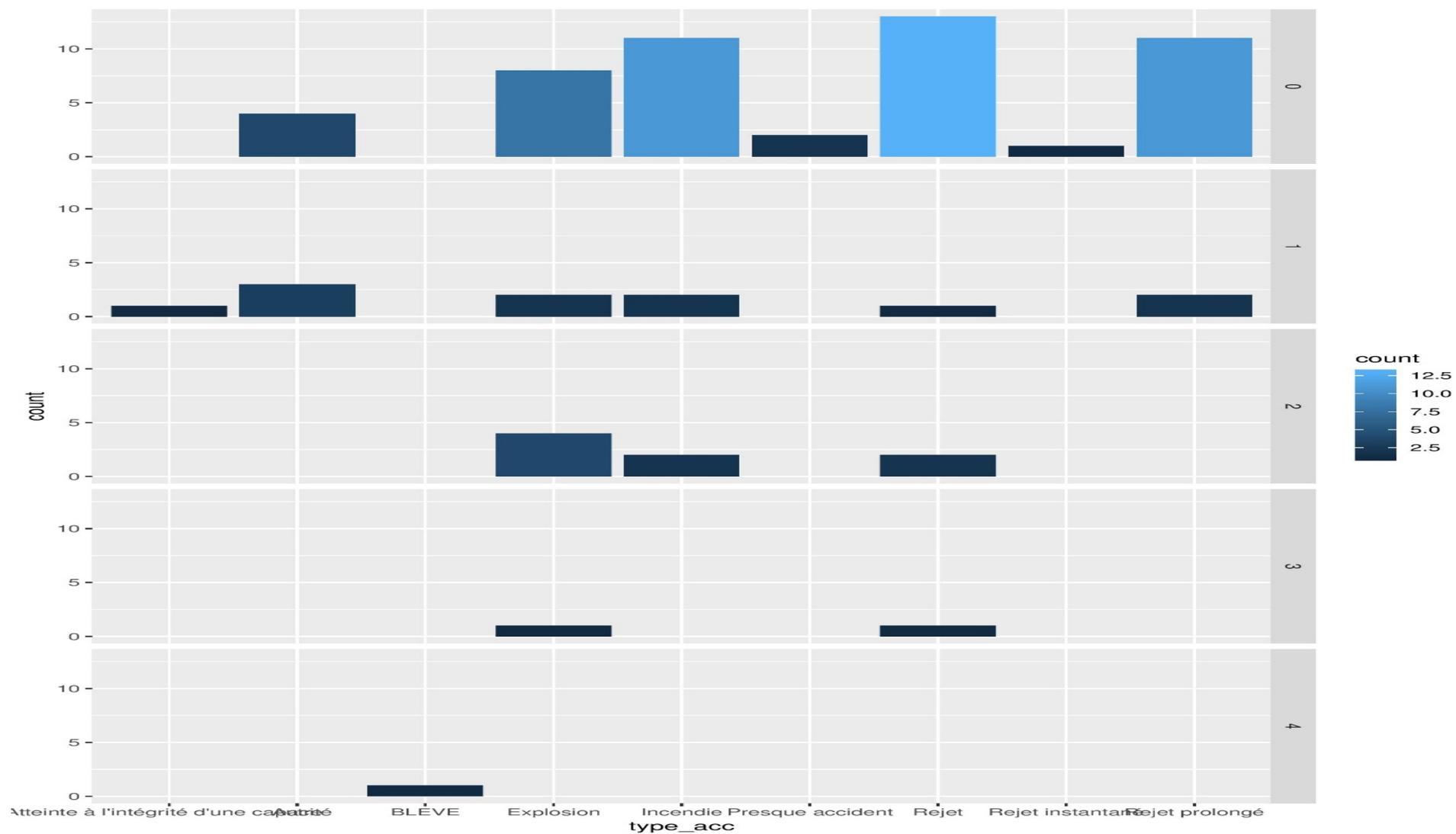


Figure II-8 : Statistiques sur les conséquences en fonction des types d'accidents

Ss

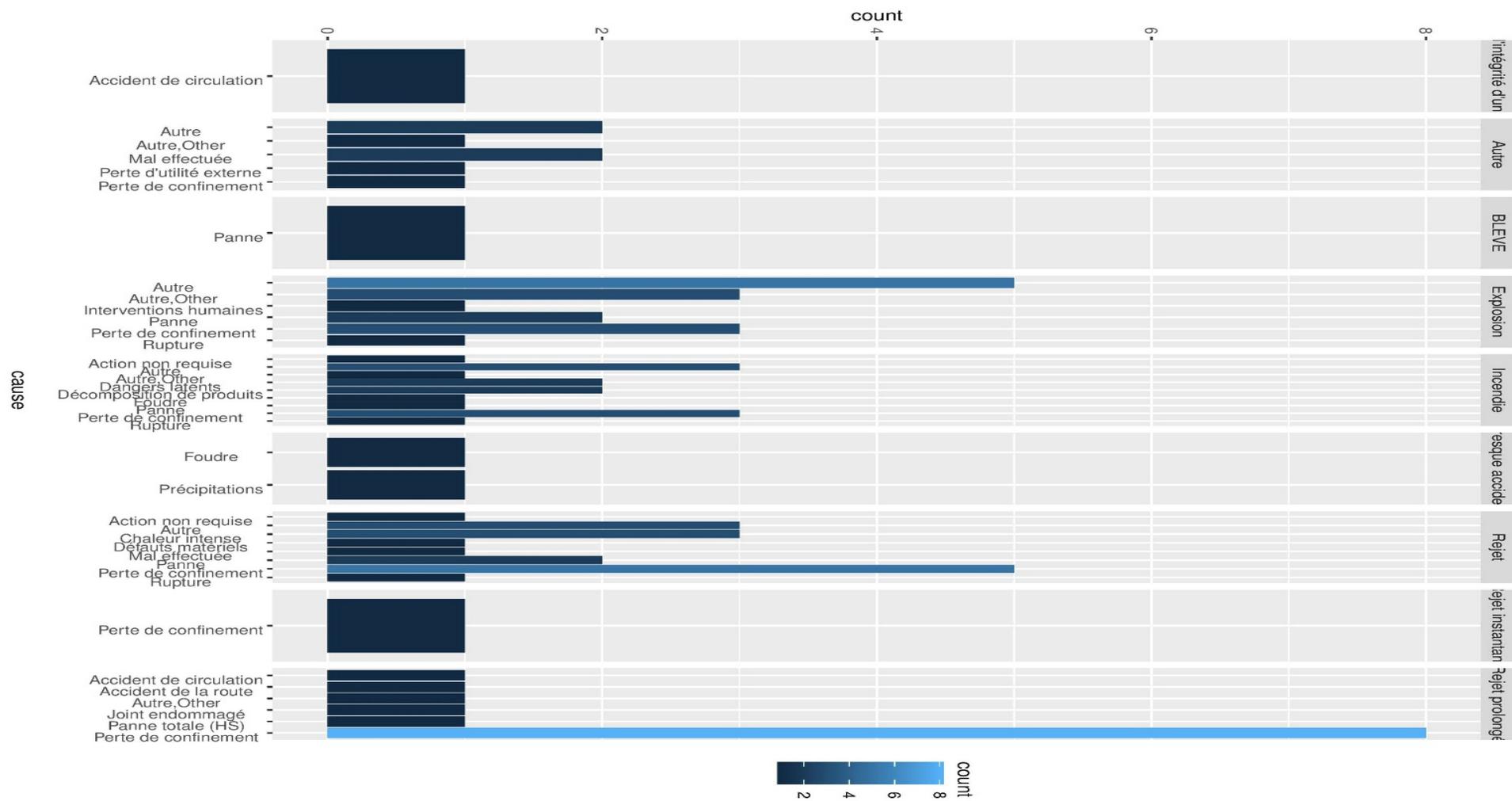


Figure II-9 : Statistiques sur les types d'accident en fonction des causes

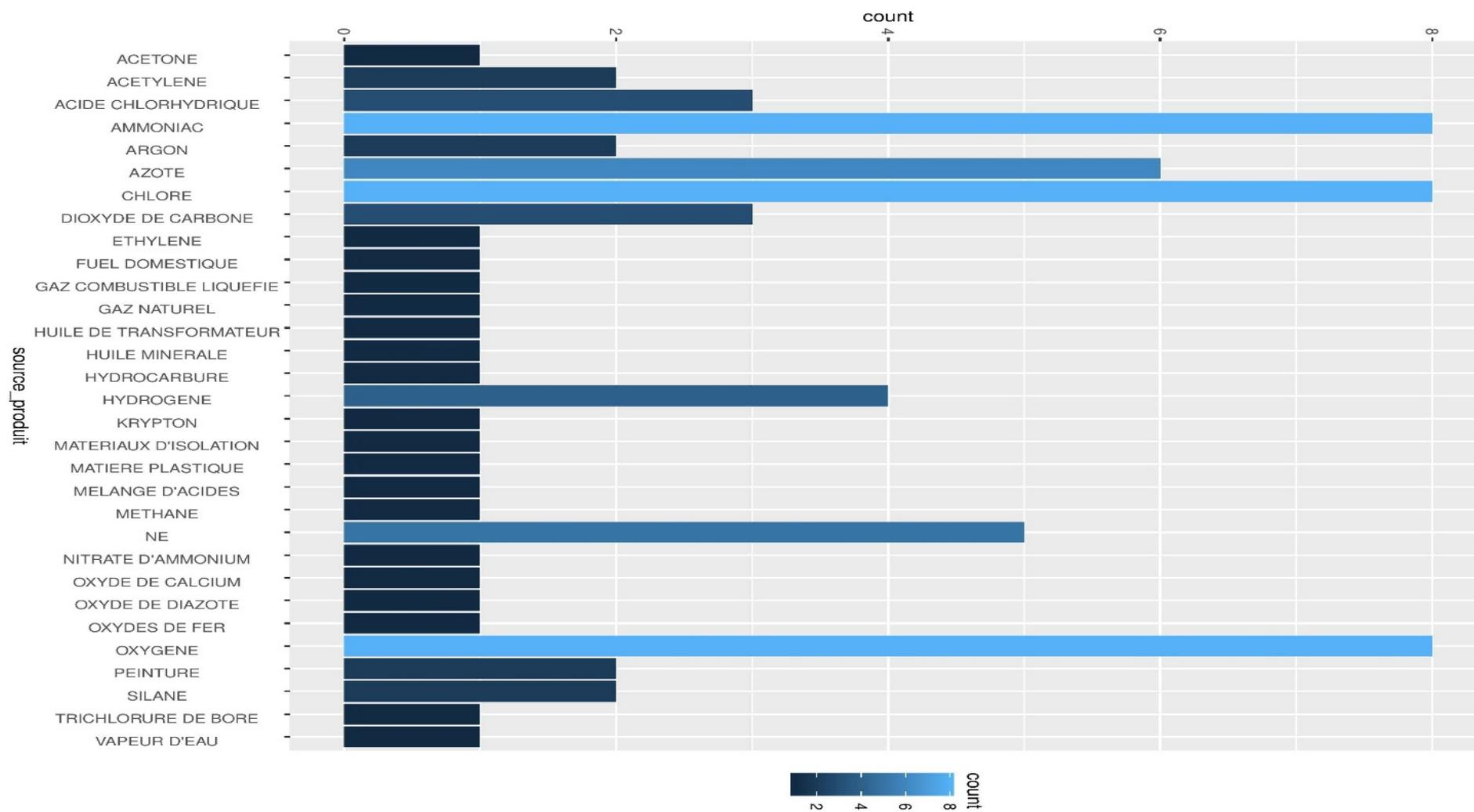


Figure II-10 : Statistiques sur les types de produits mis en cause

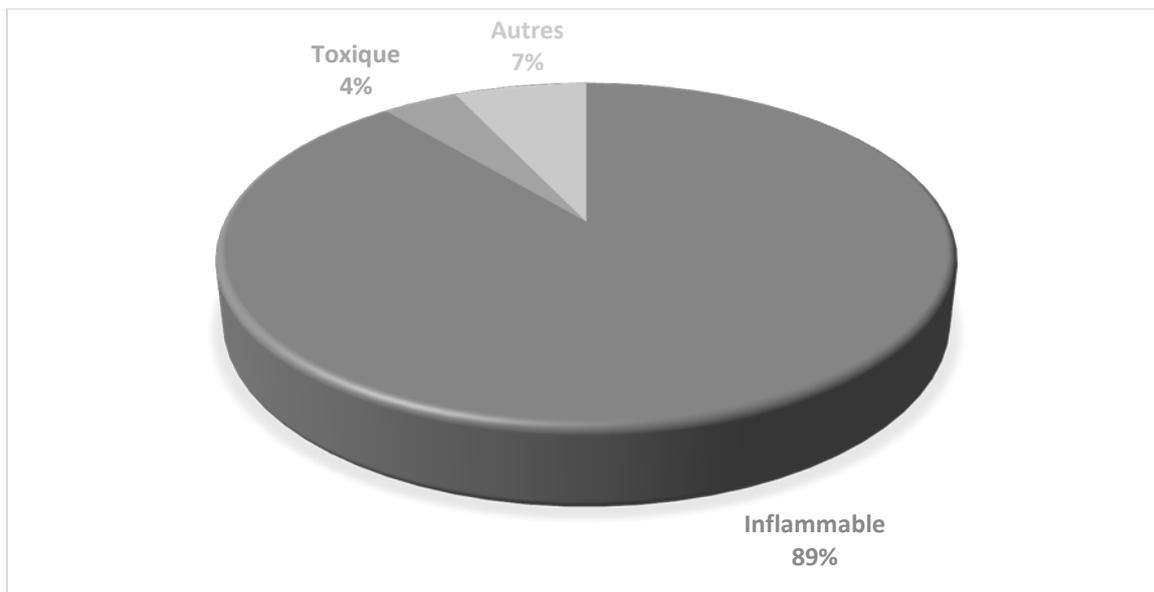


Figure II-11 : Types de substances dangereuses impliquées dans les événements dominos

Commentaire : Les substances inflammables sont associées à une très grande fraction (89%) de tous les événements dominos (Fig. II-11). Les produits pétroliers, hydrocarbures en aval et explosifs en phase condensée sont les substances les plus couramment impliquées. Les produits non-inflammables ont également provoqué des événements à effets dominos majeurs, comme ce fut le cas à Milligan, États-Unis en 1979 et à Chogging (Chine) en 2004; les deux impliquant le chlore. Même un produit extincteur comme le CO₂ a été associé à des effets dominos, comme ce fut le cas à Repcelak, en Hongrie, en 1969. Une des explosions majeures ayant eu lieu lors de la catastrophe de la raffinerie de Skikda, en Algérie en 2004 a été, selon tous les comptes rendus, causée par l'eau (surchauffe; explosion de chaudière).

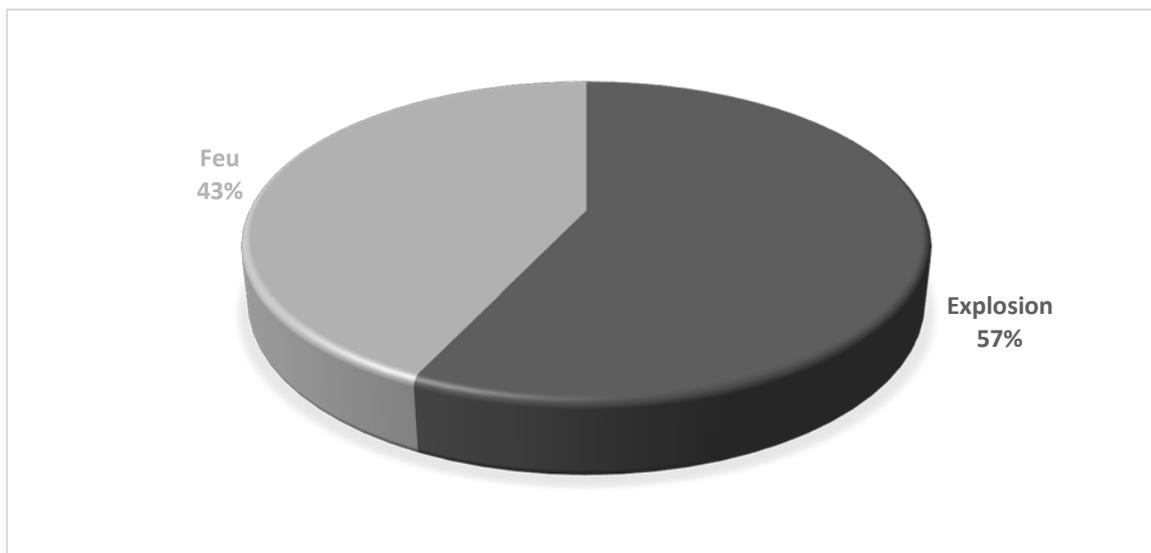


Figure II-12 : Types d'accidents primaires (initiateurs) impliqués dans les cas enregistrés d'effets dominos

Commentaire : Types d'accidents les plus susceptibles de précipiter un effet domino

Les événements enregistrés dans cette étude révèlent que l'explosion est la cause la plus fréquente d'effet domino, suivie du feu (Fig. II-12). C'est une statistique intéressante car, parmi les accidents isolés, la fraction la plus importante est celle du feu [9] [10]. Une explication de cette curieuse déviation dans les événements de dominos provient des données sur des types spécifiques d'explosions et d'incendies impliqués.

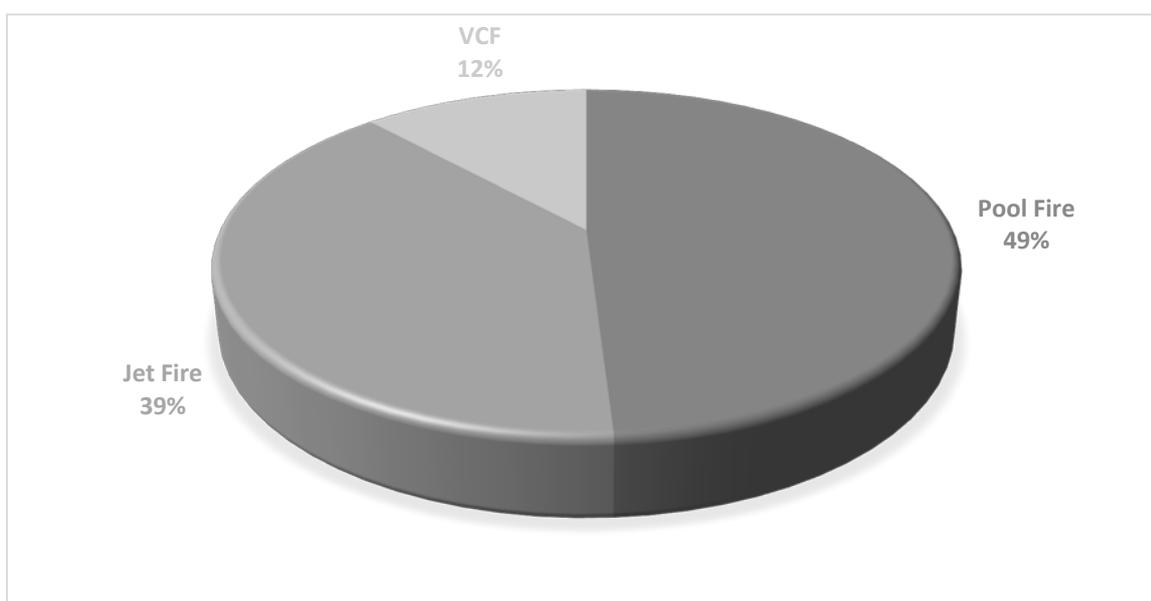


Figure II-13 : Types d'incendies impliqués dans le déclenchement de l'effet domino

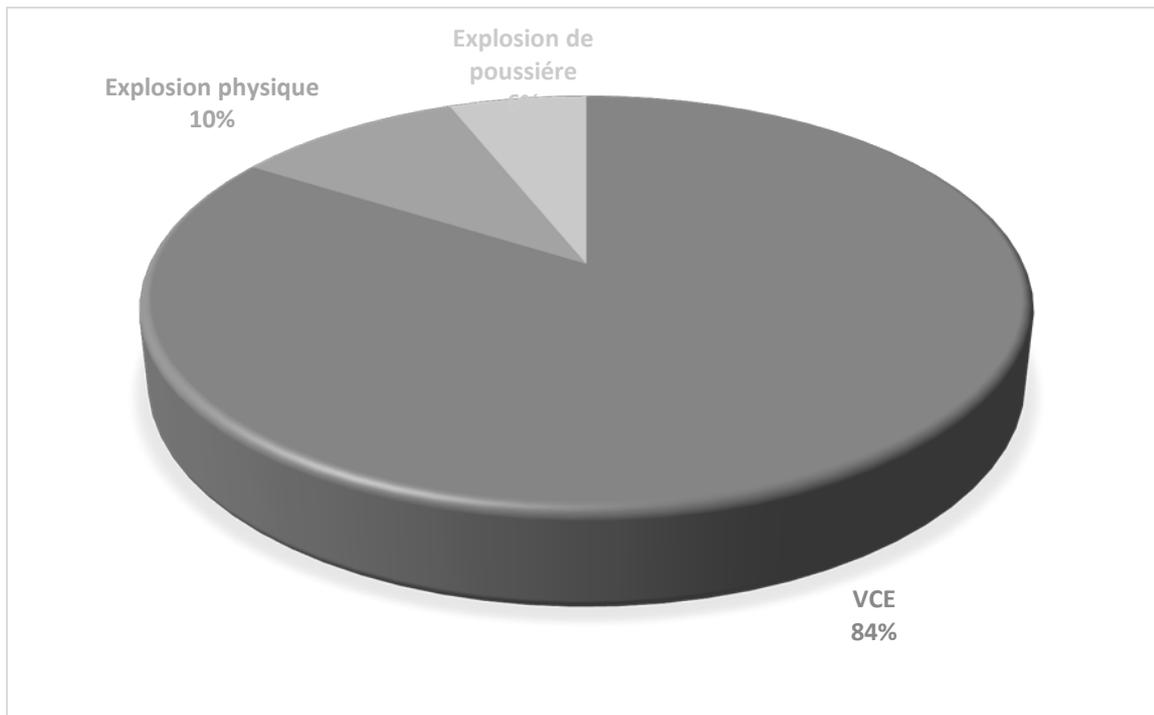


Figure II-14 : Types d'explosions responsables du déclenchement de l'effet domino.

Commentaire : Dans un grand nombre de références le type d'explosion ou de feu n'a pas été précisé, mais parmi les références où il l'a été, la distribution est comme celle représentée dans les figures II-13 et II-14. Parmi les dominos événements déclenchés par un incendie (**Fig. II-13**), la cause la plus fréquente a été le pool fire (feu de nappe 80%), suivi de VCF (feu de nuage de vapeur 12%). Parmi les événements dominos initiés par une explosion, le VCE (explosion de nuage de vapeur) a été la cause la plus fréquente (**Fig. II-14**). Ainsi, il peut être dit que, dans l'ensemble, les fuites de substances inflammables générant des VCF / VCE sont la cause la plus fréquemment responsable de l'effet domino dans l'industrie de transformation. Une enquête sur l'historique des accidents révèle également que même si le BLEVE est rarement l'initiateur d'accident dans une séquence de dominos, il est très souvent le résultat d'un VCF / VCE, et il devient un puissant propagateur de la chaîne des accidents comme cela s'est produit, par exemple, à Port Newark, aux États-Unis, en 1951; Feyzin, en France, en 1966; et Mexico, Mexique, en 1984.

Etant dans une entreprise où il y a des installations fixes dangereuses et également énormément de transport de produits par des camions, il est intéressant d'étudier les pourcentages d'accidents pouvant être initiés par ces types d'installations, et lors du transport.

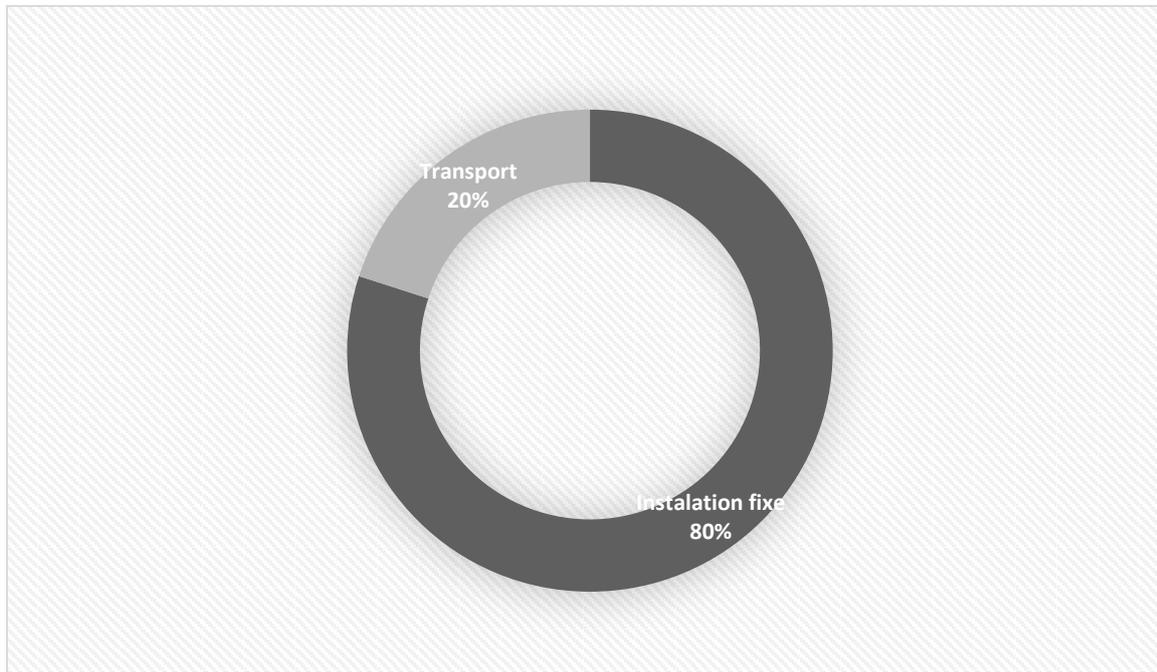


Figure II-15 : Événements Dominos survenant dans des installations fixes et pendant le transport.

Les quatre cinquièmes de tous les événements impliquant des effets dominos passés ont eu lieu sur des installations fixes (**Fig. II-15**). Parmi les 20% d'accidents survenus pendant le transport, la plus grande partie est survenue sur les routes suivies de près par les événements ferroviaires; et pipelines.

Conclusion :

Les trois étapes précédentes ont fait ressortir deux événements qui sont l'incendie et le VCE ainsi que 2 unités critiques concernés : le parc bouteilles d'acétylène et l'atelier CCAM . Nous allons donc nous pencher sur la partie calcul de ces événements redoutés.

II.4 Application de la méthode :

L'analyse de l'accidentologie ainsi que de l'étude de danger et donc des spécificités de Linde Gas Algérie nous permettent de faire ressortir les événements primaires suivants :

Tableau II-4 : Evénements primaires retenus

Evénement primaire	Unité concernée
VCE	Parc bouteilles acétylène
	Atelier CCAM (H ₂)
Incendie	Parc bouteilles acétylène
	Atelier CCAM (H ₂)

Le choix de ces événements c'est fait également au vu des caractéristiques très dangereuses de ces deux gaz (Tableaux II-5 et II-6).

Tableau II-5 : Comparaison des températures d'auto inflammation et d'énergie min d'inflammation de différents gaz

Gaz et vapeurs	Température d'auto – inflammation dans l'air (°C)	Energies minimales d'inflammation (µJ)
Acétylène	305	17
Acétone	535	1150
Butane	285	250
Ethane	510	250
Ethylène	485	70
Hydrogène	545	17
Hexane	225	288
Méthane	535	300
Méthanol	460	140
Monoxyde de carbone	600	30
Oxyde de d'éthyle	180	200
Propane	480	240
Essence 100/130	435	230

Tableau II-6 : Vitesse de combustion laminaire des gaz combustibles

Gaz combustible mélangé à l'air en proportion stœchiométrique	Vitesse de combustion laminaire S_{lad} (m/s)
Hydrogène	3,3
Méthane	0,4
Ethane	0,47
Propane	0,46
Butane	0,45
Pentane	0,46
Hexane	0,46
Heptane	0,46
Acétylène	1,66
Ethylène	0,8
Propylène	0,66
Butylène	0,51
Benzène	0,48
Cyclohexane	0,46
Ammoniac	0,07

Afin de déterminer les causes et les probabilités d'occurrences des événements primaires retenus, nous allons réaliser des arbres de causes.

II.4.1 Les arbres de défaillances

L'arbre de défaillances est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes. Cette méthode, aussi appelée arbre de pannes ou arbre de fautes, consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. L'arbre de défaillances est ainsi formé de niveaux successifs d'événements qui s'articulent par l'intermédiaire de portes logiques. En adoptant cette représentation et la logique déductive (allant des effets vers les causes) ainsi que la logique booléenne qui lui est propre, il est possible de remonter d'effets en causes de l'événement indésirable à des événements de base, indépendants entre eux et probabilisables.

II.4.2 Présentation du logiciel

Arbre Analyste est conçu par des ingénieurs spécialistes du domaine de la sûreté de fonctionnement dans le but de proposer un outil qui réponde aux mieux aux besoins des études.

L'interopérabilité est primordiale si on souhaite capitaliser les études de Sûreté de fonctionnement. Arbre Analyste respecte le standard Open-PSA permettant ainsi de s'assurer d'une parfaite interopérabilité.

Les algorithmes de calculs s'améliorent et entraînent donc des évolutions dans les moteurs de calculs. Arbre Analyste utilise le moteur XFTA permettant ainsi de profiter des dernières évolutions en la matière.

Arbre Analyste est libre d'utilisation. Il peut être téléchargé, distribué et utilisé sans aucune limite.

Comment fonctionne Arbre-Analyste ?

Arbre-Analyste est construit autour de deux piliers :

- Open-PSA

Le format d'enregistrement utilisé respecte le standard Open-PSA. Open-PSA définit un formalisme XML permettant de décrire un arbre de défaillance. Il a pour but une interopérabilité complète.

- XFTA

Le moteur de calcul utilisé pour effectuer les analyses probabilistes des arbres de défaillances est XFTA. Il est développé par M. Rauzy [11].

Les arbres construits ont donné les résultats représentés sur les figures II-16 à II-19.

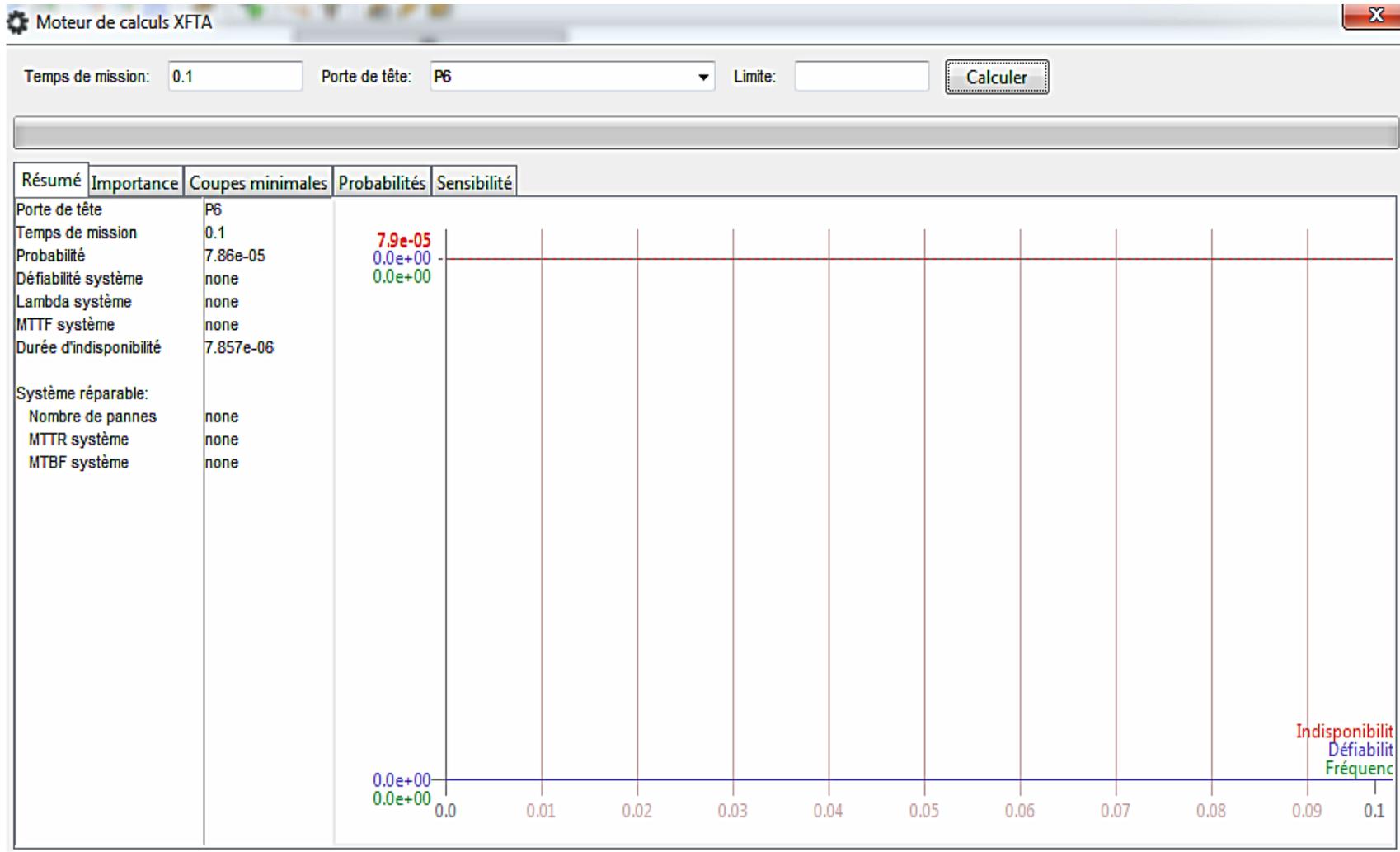


Figure II-16 : Probabilité d'occurrence d'une explosion de bouteille d'acétylène calculée par Arbre Analyste

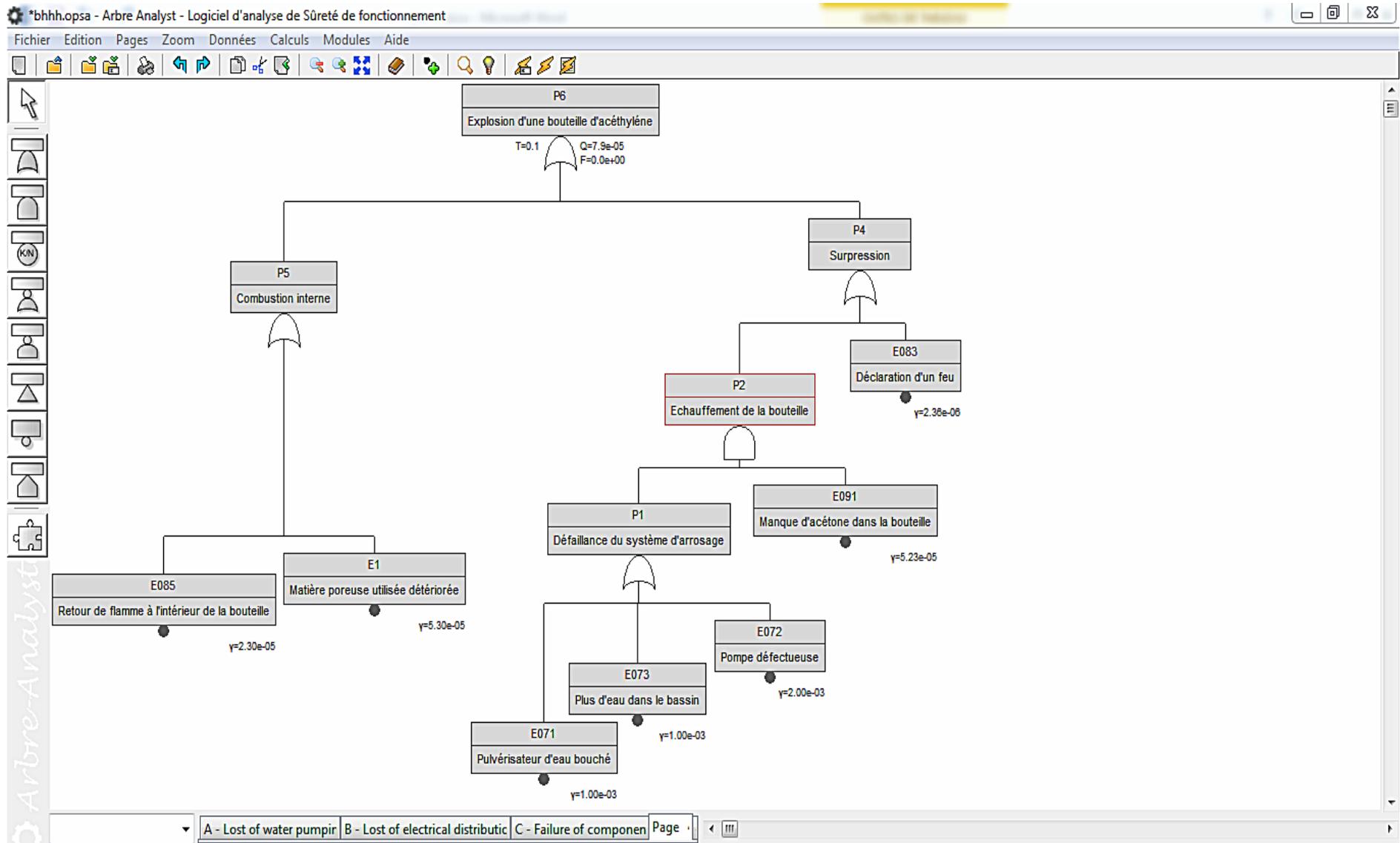


Figure II-17 : Arbre de défaillance d'une explosion de bouteille d'acétylène

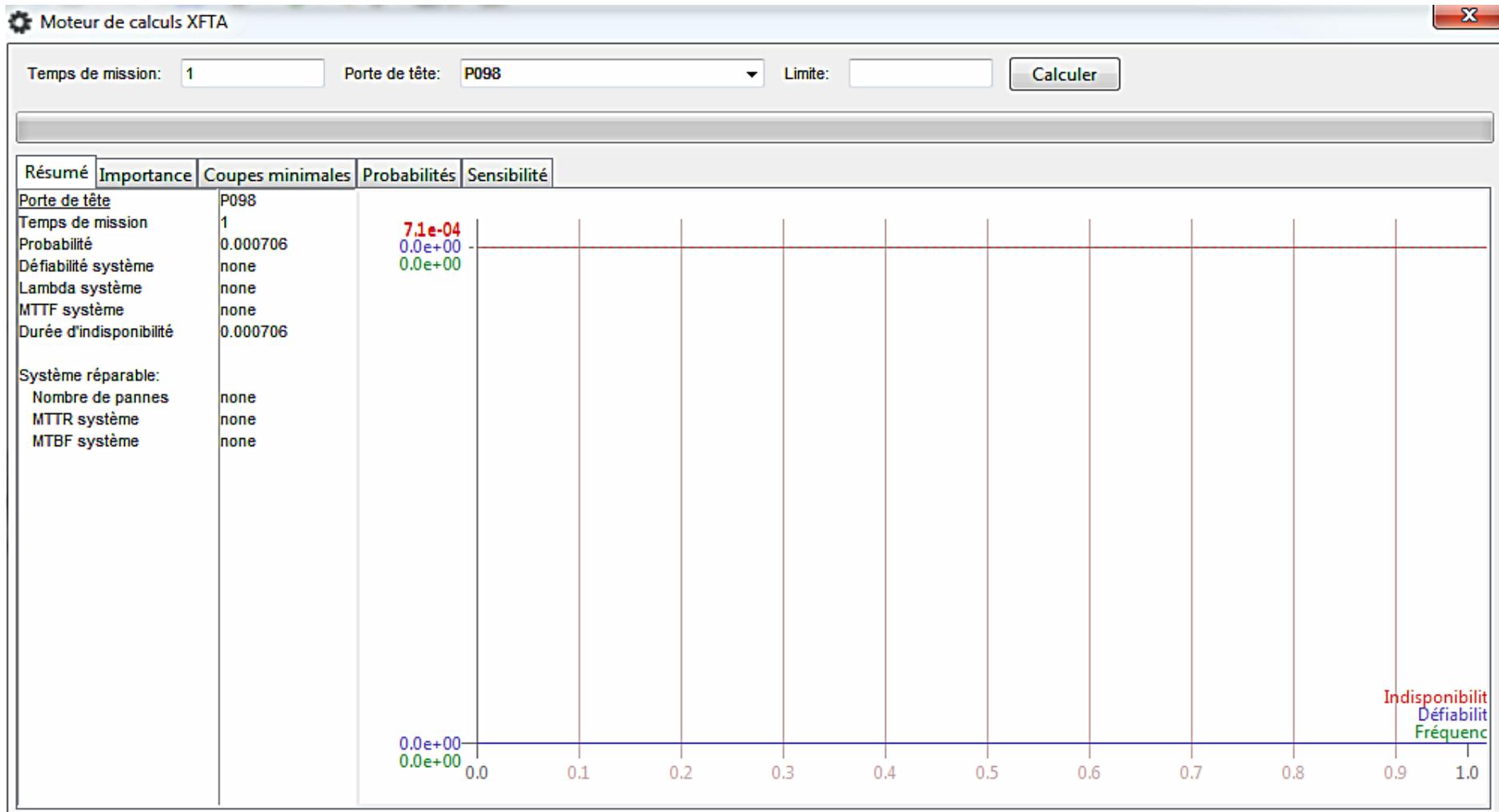


Figure II-18 : Probabilité d'occurrence d'une fuite sur une bouteille calculée par Arbre Analyste

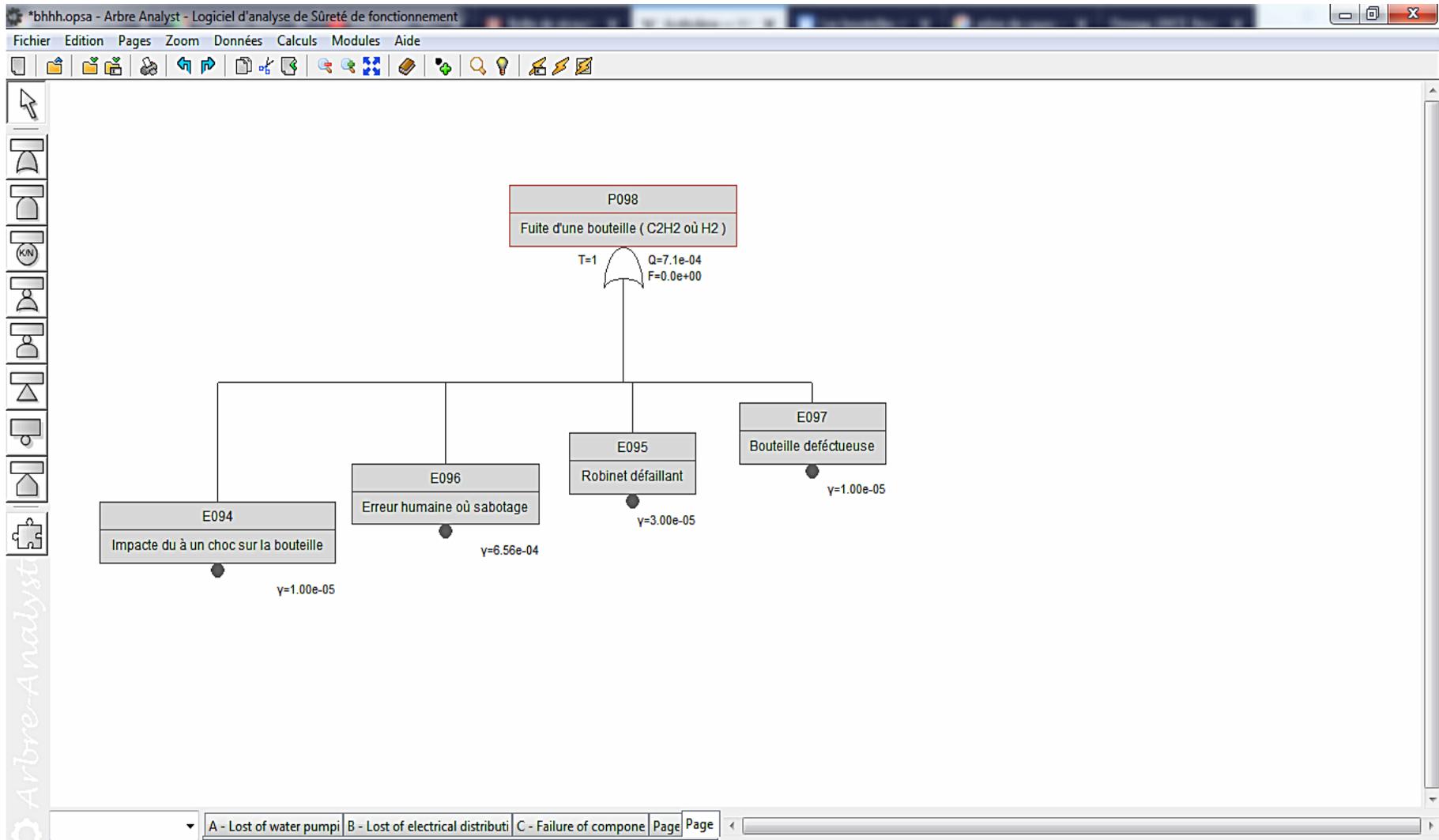


Figure II-19 : Arbre de défaillance d'une fuite de bouteille

Les arbres de défaillance ont permis de faire ressortir deux probabilités qui sont celle de l'explosion d'une bouteille d'acétylène qui est de $7.9 \cdot 10^{-5}$ et celle d'une fuite d'une bouteille qui est de $7.1 \cdot 10^{-4}$ que nous utiliseront plus tard dans nos calculs.

L'étape suivante est donc la simulation des effets engendrés par les événements primaires identifiés.

Les simulations permettront entre autres, l'élaboration d'une carte des effets physiques mais également, grâce à la comparaison des valeurs obtenues par rapport aux seuils d'escalade, à évaluer les vecteurs d'escalade et déduire s'il y aura propagation des effets ou non.

Ces mêmes valeurs seront ensuite comparées aux seuils limites pour les personnes et les structures afin d'estimer la gravité de l'accident à effet domino à travers le calcul des indices de risques développés plus tard.

Les seuils des effets de radiation thermique sur l'homme et les structures, référencés dans la littérature sont donnés dans les tableaux II-7 et II-8.[12]

Tableau II-7 : Seuils des effets de radiation thermique sur l'homme

Types d'effets constatés		Flux radiatifs (kw/m ²)
Durée du phénomène > 2min	Létaux	5
	Irréversibles	3
Durée du phénomène < 2min	Létaux (100 %)	6000-7000
	Brûlures du 3ème degré superficielles	2600
	Létaux (50 %)	2000 – 2200
	Brûlures du 2ème degré sévères	1200
	Létaux (1 %)	1000
	Irréversibles	600
	Brûlures superficielles du 2ème degré	700
	Brûlures du 1er degré	200
	Seuil de douleur	85

Tableau II-8 : Seuils des effets de radiation thermique sur les structures

Dégâts constatés	Flux de radiation thermique (Kw/m ²)
Bris de vitres	5
Apparitions d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles en présence d'une source d'ignition	10
Limite de tenue des structures pour une exposition prolongée, hors structure béton	16
Tenue du béton pendant plusieurs heures	20
Auto-inflammation du bois	35
Propagation du feu à des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, même refroidis	36-100
Rupture ou destruction des éléments en acier	100
Ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200

Les seuils des effets de surpression sur l'homme et sur les structures, référencés dans la littérature, sont donnés dans les tableaux II-9 et II-10.

Tableau II-9 : Seuils des effets de surpression sur l'homme

Types d'effets constatés	Surpression (mbar)
Effets irréversibles indirects	20
Effets Irréversibles directs	50
Effets létaux indirects	150
Détérioration des tympanes	340
Effets létaux directs	1000

Tableau II-10 : Seuils des effets de surpression sur les structures

Dégâts constatés	Surpression (mbar)
Destruction de 10% des vitres	20
Dégâts légers aux structures et destruction de 75% des vitres	50
Destruction totale des vitres et démolition partielle des structures	70
Dommmages mineurs aux structures métalliques	100
Effondrement partiel des murs	140
Limite inférieure des dégâts graves aux structures	160
Destruction de 50% des murs en brique ou parpaing	170
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage, rupture des structures autoportées industrielles (seuil d'effet dominos)	200

Rupture de canalisation, destruction des poteaux	350
Renversement des wagons chargés, destructions des murs en brique d'une épaisseur de 20 à 30 cm	500
Destruction des murs en béton armé, dommage graves des machines situées dans les bâtiments industriels.	700
Destructions totale des structures	830

Les seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique, sont donnés dans le tableau II-11.

Tableau II-11 : Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique

Vecteur d'escalade	Equipement cible	Seuil d'escalade
Radiation thermique	Atmosphérique	15 kW.m ⁻² durant 10 min
	Pressurisé	50 kW.m ⁻² durant 10 min
Surpression	Atmosphérique	22 kPa
	Pressurisé	17 kPa
	Allongé (toxique)	16 kPa
	Allongé (inflammable)	31 kPa
	Auxiliaire (toxique)	37 kPa
	Auxiliaire (inflammable)	Non disponible dans la littérature

II.4.2.1 Evaluation des effets

II.4.2.1.1 Événement primaire 1 : VCE au niveau de l'atelier CCAM

L'événement prit en considération est la fuite d'une bouteille d'hydrogène. Pour faire ressortir les causes pouvant mener à cet événement, nous allons rassembler les informations de base sur l'hydrogène afin de les étudier et faire ressortir une APR.

Caractéristiques de l'hydrogène :

Dangers physiques : Gaz inflammable -Catégorie 1 -Danger (H220) ; Gaz sous pression -Gaz comprimé.

Mention de danger : H220 : Gaz extrêmement inflammable ; H280 : Contient un gaz sous pression; peut exploser sous l'effet de la chaleur.

Mentions de mise en garde-Prévention :

P210 : Tenir à l'écart de la chaleur/des étincelles/des flammes nues/des surfaces chaudes. Ne pas fumer

-Intervention :

P377 : Fuite de gaz enflammé : Ne pas éteindre si la fuite ne peut être arrêtée sans risque ;

P381 : Éliminer toutes les sources d'ignition si cela est faisable sans danger.

Risques spécifiques : L'exposition prolongée au feu peut entraîner la rupture et l'explosion des récipients.

Manipulation : Prendre des mesures de précaution contre les décharges électrostatiques. Empêcher l'aspiration d'eau dans le récipient. Purger l'air de l'installation avant d'introduire le gaz. Interdire les remontées de produits dans le récipient. Utiliser seulement l'équipement spécifié approprié à ce produit et à sa pression et température d'utilisation. Contacter le fournisseur de gaz en cas de doute. Maintenir à l'écart de toute source d'inflammation (y compris de charges électrostatiques). Se reporter aux instructions du fournisseur pour la manipulation du récipient.

Stockage : Stocker le récipient dans un endroit bien ventilé, à température inférieure à 50°C. Entreposer à l'écart des gaz oxydants et d'autres oxydants.

Matières incompatibles : Peut former un mélange explosif avec l'air. Peut réagir violemment avec les oxydants. Air, Oxydant.

Ces informations ont été utilisées pour construire l'APR suivante :

Tableau II-12 : APR sur l'hydrogène au niveau de l'atelier CCAM

Événements redoutés	Conséquences	Barrières de prévention existantes	Phénomènes dangereux	Barrières de protection existantes
Défaillance d'un robinet	-Perte de confinement -Emission d'un produit inflammable à l'atmosphère	Remplacement des robinets des bouteilles tous les 10 ans en même temps que l'épreuve	-Feu de jet -Explosion UVCE	Pas de détection possible
Défaillance d'un flexible de branchement (usure)	-Perte de confinement du flexible -Emission d'un produit inflammable à l'atmosphère	Changement des flexibles tous les 5 ans	-Feu de jet -Explosion UVCE	Pas de détection possible
Agressions externes liées au transport : Enlèvement d'un cadre non débranché par un chariot	-Perte de confinement du flexible -Emission d'un produit inflammable à l'atmosphère	-	-Feu de jet -Explosion UVCE	Pas de détection possible

Suite à la construction de l'APR, nous avons procédé à la simulation des effets. Le modèle utilisé pour la modélisation PHAST® est le modèle TNT.

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau II.13.

Tableau II-13 : Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « VCE au niveau de l'atelier CCAM »

Combustible	Hydrogène
Quantité	10 kg
Condition météorologique	1.5/F,1.5/D,5D
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimale	0
Distance maximale	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation dans les deux cas sont représentés dans les figures II-20 et II-21.

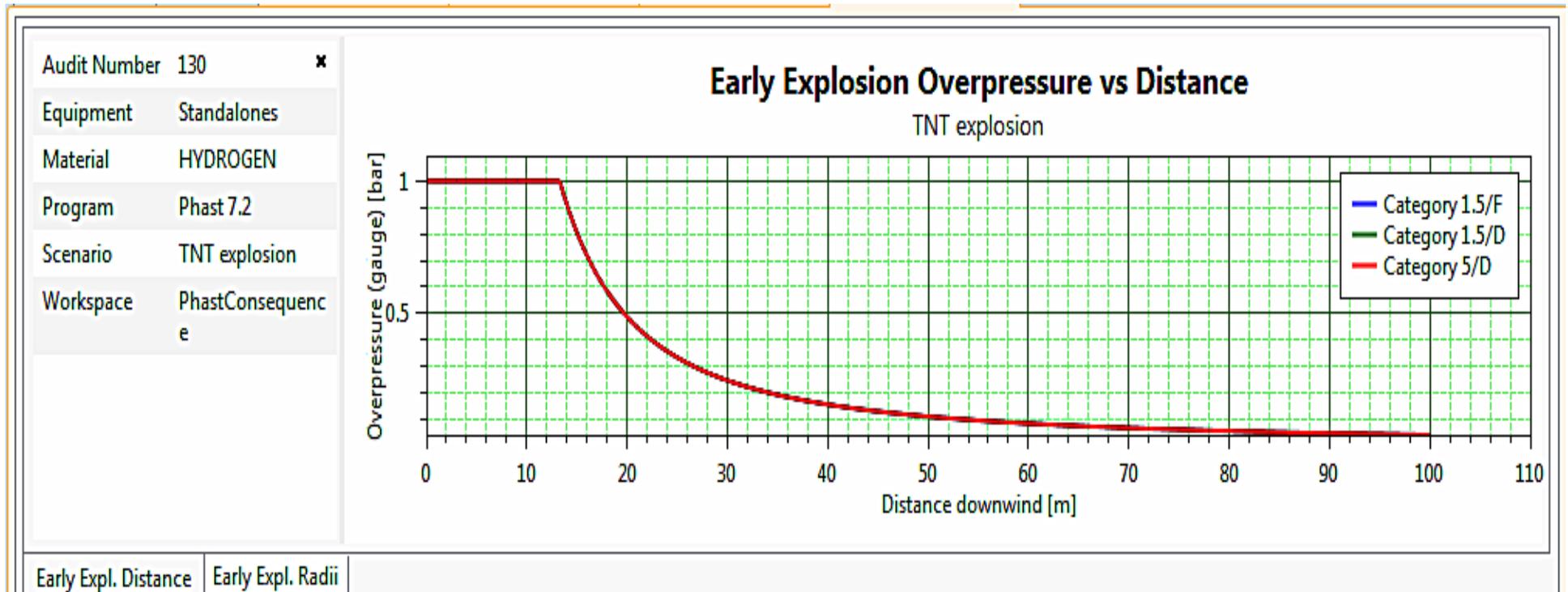


Figure II-20 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement VCE au niveau de l'atelier CCAM



Figure II-21 : Propagation de l'effet de surpression pour l'événement VCE au niveau de l'atelier CCAM

Interprétation :

La simulation montre que l'explosion engendrera de graves effets de surpression. Ainsi nous aurons un $\Delta P = 1$ bar qui est l'effet maximal à environs 14 m tout autour de la zone de l'atelier. Nous aurons également un $\Delta P = 0.2$ bar dans un rayon de 33 m autour de l'atelier. Cette dernière est la valeur seuil des effets dominos qui engendrent la rupture des réservoirs de stockage, et la rupture des structures autoportées industrielles. Cet effet touchera-aussi les deux réservoirs d'oxygène liquide et d'azote liquide comme le montre la figure II-21.

II.4.2.1.2 Événement primaire 2 : Jet fire atelier CCAM

La même méthodologie a été suivie pour l'événement primaire 2 : Jet fire dans l'atelier CCAM.

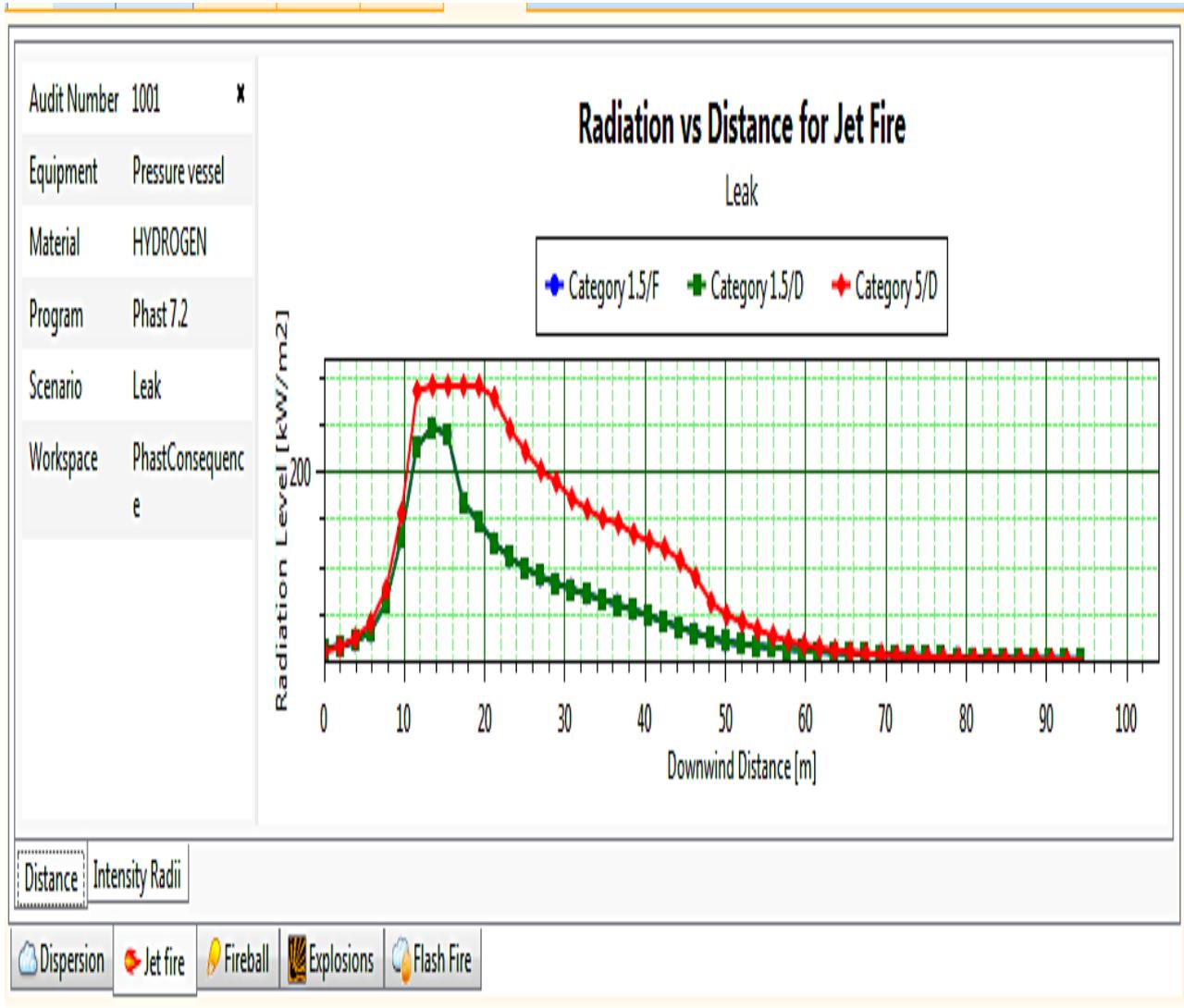


Figure II-22 : Effet de radiation en fonction de la distance pour l'événement Jet fire au niveau de l'atelier CCAM

Interprétation :

La simulation montre que la configuration de vent 5/D est la plus susceptible d'engendrer de forts effets. Les effets de radiation thermique sont maximaux de 10 à 20 m du lieu du déclenchement du jet fire, ils atteignent ainsi la valeur de 300 kw /m² qui est un niveau de destruction de toutes les structures.

On remarque également que le niveau de radiation de 100 kw/m² qui équivaut à une rupture ou destruction des éléments en acier est atteint jusqu'à une distance de 45 m.

II.4.2.1.3 Événement primaire 3 : VCE au niveau du parc bouteilles

L'évènement qui va maintenant être étudié est un VCE au niveau du parc bouteilles causé par la fuite d'une bouteille d'acétylène. Cet événement a été sélectionné compte tenu de l'analyse de l'acétylène :

Les bouteilles d'acétylène

La particularité d'une bouteille d'acétylène est qu'elle continue à rester dangereuse même si la cause principale du sinistre est traitée (cas d'un incendie d'atelier mécanique dans lequel ont été exposées une ou plusieurs bouteilles. Il faudra prendre le plus grand soin des bouteilles non explosées, une explosion ultérieure n'étant pas à écarter totalement).

Dans les lignes qui suivent, nous présenteront de quelle façon l'acétylène est conditionné et la description de situations accidentelles en tentant d'expliquer les différents mécanismes mis en jeu.

Au-delà des fiches réflexes existantes, il convient de bien comprendre ces phénomènes et les paramètres qui les influencent.

Utilisation de l'acétylène

En dehors de l'industrie chimique, l'acétylène est très utilisé pour réaliser des soudures ou de la découpe de métaux. Ainsi, on en trouve dans beaucoup de secteurs. L'utilisation la plus connue est celle associée à l'oxygène en plomberie: postes oxy-acétylénique, constitués d'un ensemble de deux bouteilles en acier, une d'acétylène et une d'oxygène.

L'acétylène est utilisé, car associé à l'oxygène, il permet d'obtenir des températures très élevées permettant la réalisation de soudure ou de brasure sur tout type de métaux. Les températures atteintes dépassent les 2500 °C pour les combustions stœchiométriques dans l'air et peuvent atteindre plus de 3000 °C en association avec de l'oxygène pur. C'est ce qui constitue également sa dangerosité.

Conditionnement

L'acétylène est un composé très instable, qui ne demande qu'à se décomposer à la moindre sollicitation (température, pression). Ainsi, son mode de stockage est différent de celui des autres gaz. On le retrouvera dans des bouteilles en acier, dissout dans un solvant (comme pour l'eau gazeuse, le CO₂ est dissout dans l'eau). Ce moyen de stockage permet de maintenir une faible pression dans les bouteilles, comparativement aux autres gaz et à stabiliser le produit.

Le solvant utilisé est très souvent l'acétone, solvant oxygéné, très inflammable. C'est le solvant utilisé chez LINDE GAS ALGERIE.

Afin de stabiliser encore le produit et de parer à un éventuel début de décomposition dans la bouteille, cette dernière est en plus remplie d'une matière poreuse afin de limiter les mouvements de liquide et de gaz à l'intérieur. Cette matière poreuse a notamment pour rôle de contenir un éventuel début de décomposition à l'intérieur de la bouteille.

Nous avons donc affaire à une bouteille en acier similaire à celui utilisé pour d'autres gaz, mais rempli d'un solide poreux, lui-même imbibé d'acétone et dans laquelle on aura injecté de l'acétylène qui sera dissout dans le solvant. Les "trois" états de la matière sont donc présents à l'intérieur de la bouteille.

La pression de stockage dans la bouteille est de 15 bars environ à la livraison. Le fait d'ouvrir le robinet de la bouteille va libérer le gaz, un peu à l'image de ce qui se passe lorsqu'on ouvre une bouteille d'eau pétillante.

Pour des utilisations plus importantes, les bouteilles peuvent être contenues dans ce que l'on appelle un "cadre" et reliées entre elle. Cette technique permet de pouvoir disposer d'un débit plus important en sortie pour des utilisations industrielles.

Propriétés physico-chimiques

A température ambiante et pression normale, l'acétylène est un gaz. Ce gaz possède la particularité d'être instable et tend à se décomposer en carbone et hydrogène, ce qui le rend très dangereux et extrêmement inflammable.

Risques

Les risques de l'acétylène sont liés essentiellement à son inflammabilité et à son instabilité. Son mode de conditionnement engendre également un risque qui peut être immédiat ou différé dans le temps, ce qui complique fortement le mode d'intervention dans pareils cas.

Explosion dans un incendie

Lorsqu'une bouteille d'acétylène est prise dans un incendie, elle risque fort de libérer le gaz qu'elle contient. La pression d'épreuve des bouteilles d'acétylène est de 60 bars, soit à peu près 4 fois la pression de service. En règle générale, les bouteilles d'acétylène sont équipées d'un ou plusieurs bouchons fusibles qui fondent à environ 100 °C ce qui peut limiter le risque d'explosion dans un incendie, mais toutes les bouteilles ne sont pas équipées et on a déjà vu des bouteilles exploser avec leur bouchon fusible intact. Cela peut se produire par exemple lorsque la bouteille est soumise à une flamme sur une petite partie de sa surface, loin du bouchon fusible. Si localement la température dépasse les 400 °C, la décomposition du gaz s'amorce et la bouteille monte en pression et se déchire à proximité de la partie chauffée. La présence de matière poreuse dans la bouteille va empêcher la propagation de la chaleur au travers de celle-ci et donc limiter l'efficacité du bouchon fusible.

Fuite enflammée

Comme pour toute fuite de gaz, il n'est pas recommandé d'éteindre la flamme sans arrêter la fuite simultanément. Toutefois, cette extinction peut être réalisée si on est certain qu'il n'y a pas de point chaud à proximité et que l'environnement est largement ventilé.

Après avoir contrôlé que la bouteille est froide (avec une caméra thermique par exemple ou par un court jet diffusé sur la bouteille), il peut être envisagé de s'approcher pour fermer le robinet si ce dernier est manœuvrable facilement. Il faut faire attention, si une autre bouteille est impactée par la flamme ou que la bouteille apparaît chaude à la caméra thermique (ou que l'eau de refroidissement semble s'évaporer à la surface de la bouteille), toute approche est à proscrire et il convient alors de protéger ce que l'on peut et de s'abriter derrière des obstacles en attendant l'explosion ou la vidange de la bouteille. Une bouteille qui a chauffé reste dangereuse tant qu'elle est chaude et jusqu'à 24 heures après avoir été "refroidie". Il convient donc de poursuivre le refroidissement de la bouteille même si le sinistre semble terminé. En pratique, la bouteille froide est fermée et plongée dans un récipient d'eau ou mieux dans une rivière ou un étang pendant 24 heures avant d'être transportée vers un centre de retraitement de déchets ou récupérée par le propriétaire de l'emballage. A noter qu'une bouteille qui reste fuyarde aura plus de chance de s'échauffer qu'une bouteille correctement fermée.

Combustion interne

L'acétylène est très instable et reste combustible ou dégradable même à l'intérieur de la bouteille, sans nécessairement d'apport d'oxygène (la LSE est de 100%). C'est le cas lorsqu'il se produit un retour de flamme dans la bouteille et qu'une combustion interne s'amorce et se propage dans la bouteille si rien n'est fait. Une bouteille exposée à la chaleur peut réagir dans les mêmes conditions et se mettre à "brûler" à l'intérieur.

Cette réaction de combustion interne est heureusement fortement ralentie par la présence de matière poreuse à l'intérieur de la bouteille.

En cas de retour de flamme, le soudeur a pour consigne de fermer immédiatement la bouteille afin de limiter l'accident et de permettre à la masse poreuse de jouer tout son rôle pour stabiliser la dégradation du produit.

Si le robinet n'est pas fermé et que la fuite perdure, il s'échappe de la bouteille une fumée noire, caractéristique d'une combustion incomplète de produit à l'intérieur (combustion en manque d'oxygène). L'appel de produit provoqué par ce robinet ouvert va avoir tendance à faire migrer le gaz dissous depuis le bas de la bouteille vers la sortie, et donc va contribuer à alimenter en combustible la zone fragilisée (zone qui commence à chauffer et donc à dégrader l'acétylène). La réaction va donc s'amplifier jusqu'à devenir dangereuse pour l'intégrité de la bouteille et donc des intervenants où témoins de l'accident.

Une erreur souvent faite par les intervenants est de laisser fuir la bouteille afin d'éviter une surpression et se préserver de l'explosion. C'est une erreur grave, qui va à l'encontre de l'objectif recherché. Un robinet de bouteille de gaz n'est en aucune façon une soupape de surpression, il n'est absolument pas dimensionné pour jouer ce rôle. D'autre part, la fuite va entraîner la migration du gaz au travers des zones chaudes de la bouteille et empêcher la masse poreuse de jouer son rôle de stabilisateur. L'explosion de la bouteille est alors plus probable que dans le cas où celle-ci serait fermée.

Simulation des effets :

Le modèle utilisé pour la modélisation PHAST® est le modèle TNT.

Les données introduites dans le logiciel sont répertoriées dans le tableau II-14.

Tableau II-14 : Données introduites dans le logiciel PHAST® pour l'événement primaire « VCE au niveau du parc bouteilles

Combustible	Hydrogène
Quantité	6.66 kg
Condition météorologique	1.5/F,1.5/D,5D
Rendement de l'explosion	50 %
Distance minimale	0
Distance maximale	50 m
Pas	0.2 m

Les résultats de la propagation dans les deux cas sont représentés dans les figures II-23 et II-24.

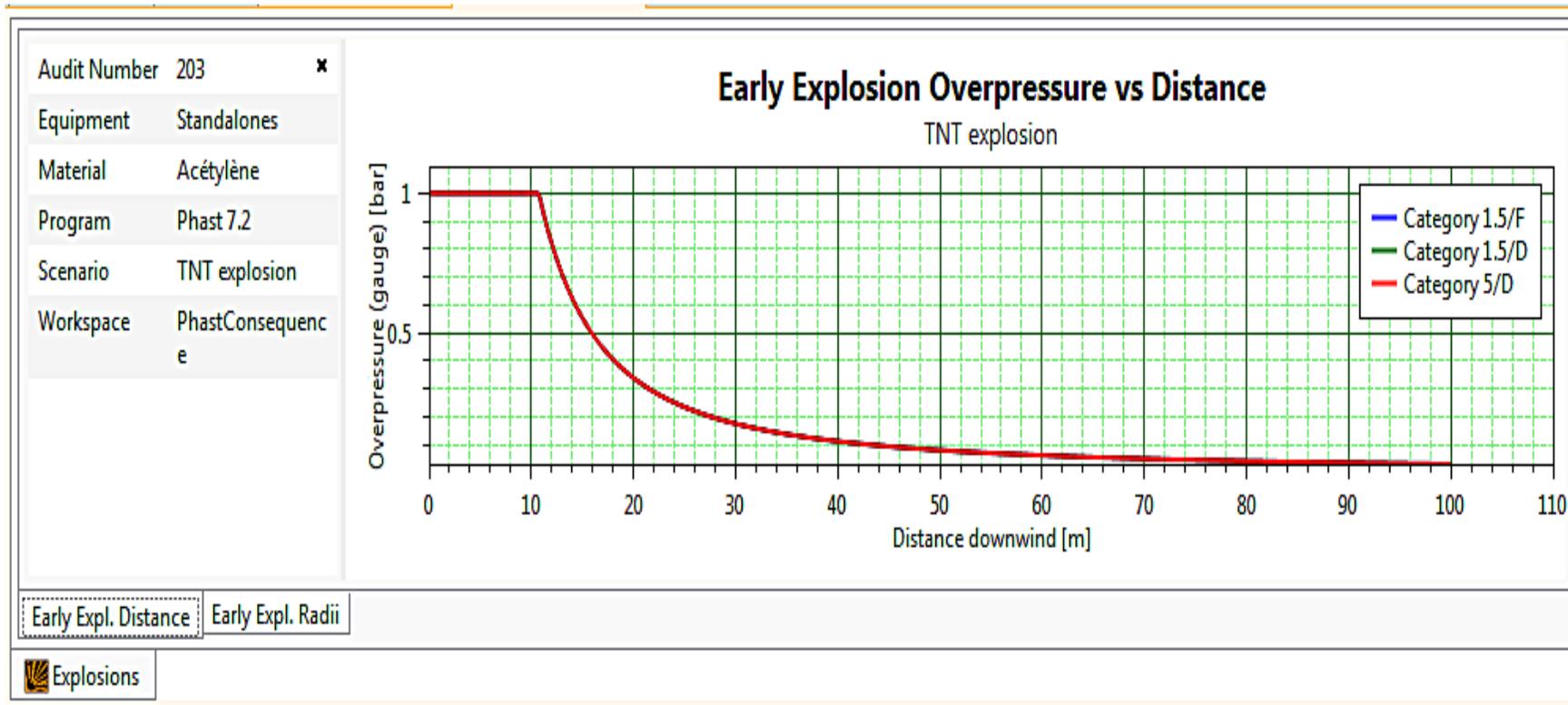


Figure II-243 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement VCE au niveau du parc bouteilles



Figure II-254 : Propagation des effets de surpression pour l'événement VCE au niveau du parc bouteilles

Interprétation :

La simulation montre que l'explosion engendrera de graves effets de surpression. Ainsi nous aurons un $\Delta P = 1$ bar qui est l'effet maximal à environs 12 m tout autour de la zone de l'atelier. Nous aurons également un $\Delta P = 0.2$ bar dans un rayon de 28 m autour de l'atelier et qui est la valeur seuil des effets dominos qui engendrent la rupture des réservoirs de stockage, et la rupture des structures autoportées industrielles.

Cet effet touchera ainsi les deux réservoirs d'oxygène liquide et d'azote liquide comme le montre la figure II-24.

II.4.2.1.4 Événement primaire 4 : Jet fire au niveau du parc bouteilles

Événement : fuite d'une bouteille d'acétylène

Simulation des effets :

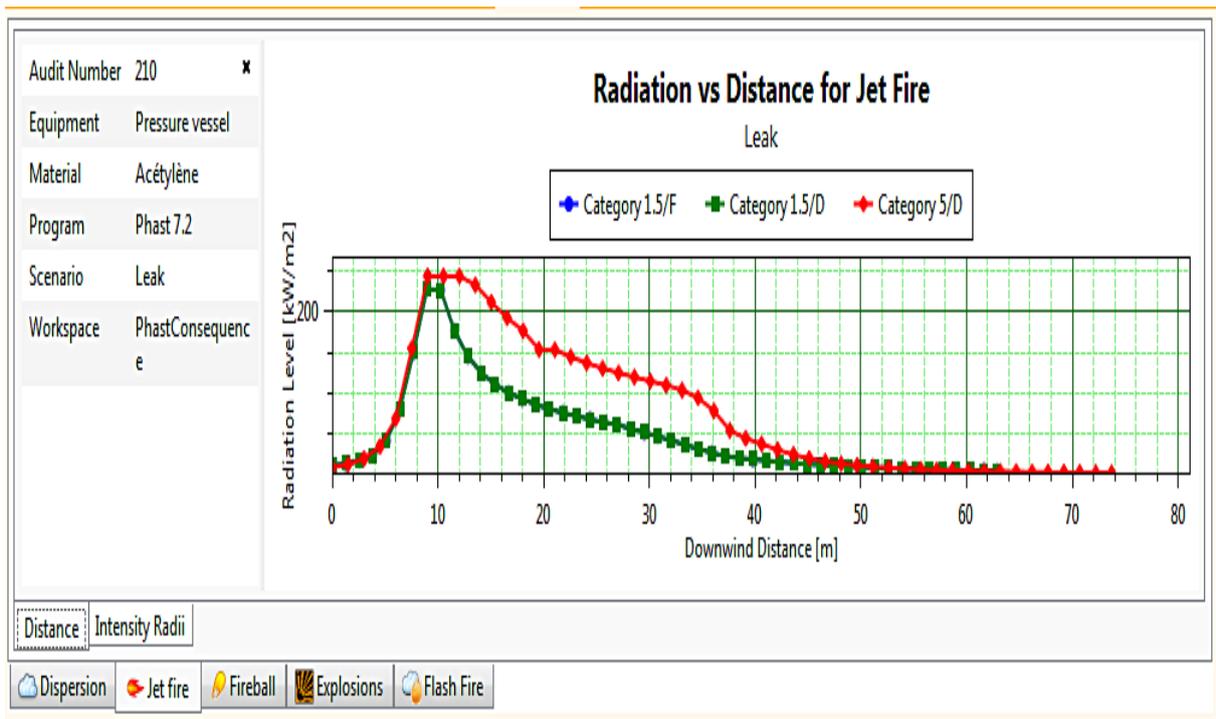


Figure II-265 : Effet de radiation en fonction de la distance pour l'événement jet fire au niveau du parc bouteilles

Interprétation :

La simulation montre que la configuration de vent 5/D est la plus susceptible d'engendrer de forts effets. Les effets de radiation thermique sont maximaux à 10 m du lieu de déclenchement du jet fire, ils atteindront ainsi la valeur de 250 kw /m² qui est un niveau de destruction de toute les structures.

On remarque également que le niveau de radiation de 100 kw/m² qui équivaut à une rupture ou destruction des éléments en acier est atteint jusqu'à une distance de 35 m.

II.4.3 Calculs :

La méthode de calcul qui va être adoptée dans ce travail n'est pas une méthode conventionnelle préétablie. C'est une méthode que nous avons développée en nous inspirons de différents travaux d'articles et de références scientifiques des quelles sont tirés les relations mathématiques utilisées.

II.4.3.1 Méthodologie de calcul

Il convient de noter que, dans ce qui suit, les scénarios secondaires seront définis de manière à considérer qu'ils se produisent de façon simultanée avec l'événement principal, même si en réalité, ils se déroulent en séquence (uniquement quelques secondes à quelques minutes après l'événement primaire, en fonction du vecteur d'escalade primaire et de l'intensité des pertes au niveau de l'unité secondaire endommagée par l'événement primaire).

Dans une présentation complexe, un seul événement primaire peut généralement déclencher simultanément plusieurs événements secondaires. Cela a été documenté dans plusieurs accidents passés (on peut facilement le constater dans la base de données utilisée pour notre analyse d'accidentologie). Dans ce cadre, l'équation proposée est toujours valide, donnant la probabilité globale qu'un événement secondaire donné soit initié par l'événement principal considéré. Toutefois, les fréquences des scénarios de dominos doivent être calculées en tenant compte de la possibilité que plusieurs scénarios secondaires soient déclenchés par le même événement principal.

Il faut noter que si nous ne considérons pas la possibilité d'une nouvelle escalade simultanée d'événements secondaires, cela veut dire que nous considérons que ces événements ne sont pas liés à l'événement primaire et donc indépendant d'un point de vu probabiliste. Par conséquent, il faut considérer cette possibilité et donc si N événements secondaires sont

probabilité d'un scénario secondaire donnée par une combinaison générique m de k événements secondaires (k N) est la suivante :

$$P_d^{(k,m)} = \prod_{i=1}^N [1 - P_{d,i} + \delta(i, J_m^k)(2 * P_{d,i} - 1)] \quad (2.1)$$

Où $P_{d,i}$ est la probabilité d'escalade pour le i-ème événement secondaire. J_m^k est un vecteur dont les éléments sont les index de la même combinaison de k événements secondaires. La fonction $\delta(i, J_m^k)$ est définie comme suit :

$$\delta(i, J_m^k) = \begin{cases} 1 & i \in J_m^k \\ 0 & i \notin J_m^k \end{cases} \quad (2.2)$$

Calcul de la probabilité d'escalade pour chaque cible

Pour l'estimation de la probabilité d'escalade, l'équation suivante sera utilisée :

$$P_{i,j} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{i,j} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad (2.3)$$

Avec :

$P_{i,j}$: Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i

$Y_{i,j}$: Fonction Probit.

Définition d'une fonction probit

La fonction Probit $Y_{i,j}$ est définie comme étant la réciproque de la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Afin de démontrer d'où l'expression des fonctions Probit a été déduite, l'hypothèse suivante a été établie :

$Y_{i,j}$ est une variable aléatoire avec une moyenne de 5 et une variance de 1. (Eisenberg et al., 1975). Pour un facteur d'endommagement ou de blessure X qui correspond à la distribution log-normale : $X \rightarrow \log N(\mu, \sigma^2)$

La fonction Probit s'écrit plus communément sous la forme :

$$Y_{i,j} = k_1 + k_2 \ln(x) \quad (2.4)$$

Il existe une relation qui relie la probabilité P à la fonction Probit Y et qui est donnée par l'Eq. Suivante :

$$P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.5)$$

La détermination d'une équation du type général donné par l'Eq. (2.6) est facilement démontrée en considérant d'abord une distribution normale.

Soit X une variable aléatoire qui suit la loi normale de paramètre μ et σ^2

$$X \rightarrow N(\mu, \sigma^2)$$

Définie par sa fonction densité f

$$f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

Et sa fonction de répartition F

$$F = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.7)$$

En sachant que la fonction de répartition dans le cas continu est égale à la probabilité, c'est-à-dire : $F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$

$$\Rightarrow P = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2.8)$$

L'égalité entre les équations (2.5) et (2.8) nous donne :

$$\begin{cases} Y_{i,j} - 5 = x = u \\ \frac{x-\mu}{\sigma} = u \end{cases} \Rightarrow Y_{i,j} = \frac{x-\mu}{\sigma} + 5 = \left(5 - \frac{\mu}{\sigma}\right) + \frac{1}{\sigma} x$$

$$Y_{i,j} = k_1' + k_2' \ln(x) \quad (2.9)$$

Avec

$$\begin{cases} k_1' = 5 - \frac{\mu}{\sigma} \\ k_2' = \frac{1}{\sigma} \end{cases}$$

Même chose pour la distribution log-normale:

$$Y_{i,j} = k_1 + k_2 \ln(x) \quad (2.10)$$

Avec

$$\begin{cases} k_1 = 5 - \frac{\mu'}{\sigma} \\ k_2 = \frac{1}{\sigma} \end{cases}$$

L'équation (2.10) est la forme la plus généralement utilisée pour la fonction Probit.

L'approche Probit est utilisée pour l'évaluation quantitative des risques à effet dominos dus à la surpression et à la radiation thermique. Les modèles Probit ne dépendant pas des valeurs seuils de dommage, ils peuvent donc facilement être modifiés pour tenir compte des catégories spécifiques d'équipements. Par conséquent, l'analyse des probits a été appliquée à la fois pour réviser les modèles existants et pour développer davantage les modèles probabilistes pour les dommages causés à des catégories spécifiques d'équipements.

- **Application des fonctions Probit dans l'évaluation de l'impact des effets physiques**

En 1975, Eisenberg et ses collaborateurs ont d'abord utilisé un modèle simplifié pour évaluer la probabilité de blessures pour l'être humain et les dommages causés aux équipements par les effets de surpression et de radiation.

Les auteurs ont ensuite défini des fonctions Probit pour relier les dommages causés à l'équipement par la surpression statique de pointe ΔP° .

$$Y = k_1 + k_2 \ln (\Delta P^o) \quad (2.11)$$

Le modèle d'Eisenberg et ses collaborateurs était basé sur l'évaluation expérimentale du déplacement de l'équipement avec la déformation et la rupture subséquente des connexions, ne tenant pas compte de la défaillance catastrophique directe de l'équipement.

Les résultats obtenus sont:

$$\begin{cases} k_1 = -23.8 \\ k_2 = 2.92 \end{cases}$$

L'approche Probit a ensuite été suivie par d'autres auteurs comme Khan et Abbasi, 1998 [13], qui ont proposé une fonction Probit similaire à l'équation d'Eisenberg, mais substituant la surpression statique à la pression totale (la somme de la pression statique et dynamique). Khan et Abbasi donnent les mêmes coefficients de Probit d'Eisenberg, ce qui est compréhensible car, la pression dynamique est négligeable pour la plupart des explosions industrielles.

Plus récemment, Cozzani et Salzano (2005) ont élaboré un ensemble étendu de données concernant l'explosion dans le milieu de l'industrie que Zhang et Jiang ont affiné en 2008 pour faire ressortir des fonctions Probit pour les effets de radiation thermique et de surpression au niveau de différents types d'équipements.

Ainsi, des fonctions différentes sont utilisées selon l'effet physique et le type d'équipement étudiés. Une étude récente (Sun et al. 2013) montre la validité et la rationalité des modèles Probit pour l'étude des effets dominos causés par des ondes de surpression dans l'industrie chimique. Concernant l'effet des radiations thermiques, la fiabilité des modèles de calcul de probabilité d'escalade présentés, a été démontrée lors de leur application à plusieurs cas d'études, notamment celle réalisée par Landucci (Landucci et al. 2012).

Les modèles proposés par Zhang et Jiang reconnus comme étant les plus fiables, ils seront donc utilisés pour la suite de notre étude. En effet, ce qui importe dans l'étude des effets dominos, c'est l'évaluation de la propagation au niveau des équipements et donc la vulnérabilité de ces derniers et non la vulnérabilité de l'Homme par rapport aux effets physiques.

Tableau II-15 : Modèles de vulnérabilité

Effets physiques	Equipements cibles	Modèles de vulnérabilité
Radiation thermique	Atmosphérique	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{ttf})$ $\ln(\text{ttf}) = -1.13 \ln(I_{i,j}) - 2.67 \times 10^{-5} V + 9.9$
	Pressurisé	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{ttf})$ $\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845 V^{0.032}$
Surpression	Atmosphérique	$Y_{i,j} = -9.36 + 1.43 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Pressurisé	$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \times \ln(\Delta P_{i,j})$
	Allongé (tour de distillation...)	$Y_{i,j} = -28.07 + 3.16 \times \ln(\Delta P_{i,j})$

Tels que :

i : équipement source de l'accident.

j : équipement cible.

$Y_{i,j}$: fonction Probit.

ttf : temps-avant-défaillance (s).

V : volume de l'équipement (m³).

$I_{i,j}$: intensité des radiations thermique (kW.m⁻²).

$\Delta P_{i,j}$: surpression statique maximale en kPa

Concernant les effets de projection de fragments, du fait qu'aucun modèle de vulnérabilité précis n'existe pour l'estimation des dommages causés sur la cible, seule une estimation qualitative de la propagation peut être obtenue [15].

II.4.3.2 . Identification des cibles et calcul des probabilités d'escalade

Pour le calcul de la probabilité d'escalade de chaque cible, la fonction Probit appropriée à chaque cible est utilisée afin d'appliquer la relation (2.3).

Pour rappel :

$$P_{i,j} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{i,j} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad (2.3)$$

$P_{i,j}$: Probabilité que l'équipement j soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement i ,

$Y_{i,j}$: Fonction Probit.

II.4.3.2.1 Détermination des scénarios secondaires

Les Scénarios secondaires et vecteurs d'escalade sont résumés dans le tableau II-16.

Tableau II-16 : Scénarios secondaires et vecteurs d'escalade

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles	
		Equipements	Type
VCE hydrogène atelier CCAM	Surpression	Réservoir d'oxygène liquide	Pressurisé
		Réservoir d'azote liquide	Pressurisé
VCE d'acétylène parc bouteilles	Surpression	Réservoir d'oxygène liquide	Pressurisé
		Réservoir d'azote liquide	Pressurisé

II.4.3.2.2 Calculs :

1) Bouteille hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'oxygène liquide par VCE H₂

$$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{i,j}) \text{ avec } \Delta P = 27.8$$

$$Y_{i,j} = -8.39$$

$$P_{i,j} = 3.14 * 10^{-10}$$

2) Bouteille hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'azote liquide par VCE H₂

$$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{i,j}) \text{ avec } \Delta P = 24.6$$

$$Y_{i,j} = -8.61$$

$$P_{i,j} = 2.19 * 10^{-10}$$

3) Bouteille d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'oxygène liquide par VCE C₂H₂

$$Y_{ij} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{ij}) \text{ avec } \Delta P = 25.3$$

$$Y_{ij} = -8.56$$

$$P_{ij} = 2.38 * 10^{-10}$$

4) Bouteille d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'azote liquide par VCE C₂H₂

$$Y_{ij} = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta P_{ij}) \text{ avec } \Delta P = 23.6$$

$$Y_{ij} = -8.69$$

$$P_{ij} = 1.93 * 10^{-10}$$

II.4.3.2.3 Détermination des scénarios tertiaires :

Les Scénarios tertiaires et vecteurs d'escalade sont résumés dans le tableau II-17.

Tableau II-17 : Scénarios tertiaires et vecteurs d'escalade

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles	
		Equipements	Type
Synergie VCE + incendie réservoir d'oxygène liquide	Radiation thermique	Incendie au niveau de la tour ASU	Pressurisé
			Pressurisé
Synergie VCE + incendie réservoir d'azote liquide	Radiation thermique	Incendie au niveau de la tour ASU	Pressurisé
			Pressurisé

1) Bouteille hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'oxygène liquide par VCE H₂
→ Incendie au niveau de la tour ASU.

$$Y_{ij} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{ij}) + 8.845V^{0.032} = 5.65$$

$$Y_{ij} = 2.10$$

$$P_{ij} = 8.66 * 10^{-3}$$

2) Bouteille hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'azote liquide par VCE H₂
→ Incendie au niveau de la tour ASU.

$$Y_{ij} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{5.41}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{2.55}$$

$$P_{i,j} = \mathbf{0.018}$$

3) Bouteille d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'oxygène liquide par VCE H₂
 → Incendie au niveau de la tour ASU.

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.04}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{1.38}$$

$$P_{i,j} = 2.69 * 10^{-3}$$

4) Bouteille d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'azote liquide par VCE H₂
 → Incendie au niveau de la tour ASU.

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.27}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{0.96}$$

$$P_{i,j} = 1.35 * 10^{-3}$$

II.4.3.2.4. Détermination des scénarios quaternaires :

Les Scénarios quaternaires et vecteurs d'escalade sont résumés dans le tableau II-18.

Tableau II-18 Scénario quaternaire et vecteurs d'escalade

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles	
		Equipements	Type
Synergie des scénarios	Projection et radiation thermique	Bloc administratif	atmosphérique

$$Y_{i,j} = \mathbf{1.05}$$

$$P_{i,j} = 2.12 * 10^{-3}$$

Evénements primaires 2 et 4

Détermination des scénarios secondaires

Tableau II-19 : Scénarios secondaires et vecteurs d'escalade événements 2 et 4

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles	
		Equipements	Type
Jet fire hydrogène atelier CCAM	Radiation thermique	Réservoir d'oxygène liquide	Pressurisé
		Réservoir d'azote liquide	Pressurisé
Jet fire d'acétylène parc bouteilles	Radiation thermique	Réservoir d'oxygène liquide	Pressurisé
		Réservoir d'azote liquide	Pressurisé

1) Jet fire hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'oxygène liquide

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.41}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{0.70}$$

$$P_{i,j} = 8.86 * 10^{-4}$$

2) Jet fire hydrogène atelier CCAM → Réservoir d'azote liquide

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.20}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{1.09}$$

$$P_{i,j} = 1.67 * 10^{-3}$$

3) Jet fire d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'oxygène liquide

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.53}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{0.48}$$

$$P_{i,j} = 6.19 * 10^{-4}$$

4) Jet fire d'acétylène parc bouteilles → Réservoir d'azote liquide

$$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \ln(\text{ttf})$$

$$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845V^{0.032} = \mathbf{6.28}$$

$$Y_{i,j} = \mathbf{0.95}$$

$$P_{i,j} = 1.33 * 10^{-3}$$

D'après les conditions de l'événement primaire, cet événement secondaire pourra être géré et n'engendre pas d'événement tertiaire.

Les calculs de probabilités étant fait, nous allons nous intéresser à la réalisation des réseaux bayésiens des événements cités.

II.4.4 Réalisation des réseaux bayésiens

II.4.4.1 Définition d'un réseau bayésien

Un réseau bayésien est un modèle graphique dans lequel les nœuds représentent des variables reliés par des arcs dirigés (causaux). Les arcs dénotent des dépendances ou des relations de cause à effet entre les nœuds liés, tandis que les probabilités conditionnelles assignées aux nœuds déterminent le type et la force de ces dépendances.

Les nœuds à partir desquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds parents, alors que les nœuds vers lesquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds enfants. Tel que, un nœud peut être simultanément l'enfant d'un nœud et le parent d'un autre nœud.

Les nœuds sans parent et les nœuds sans enfant sont appelés respectivement nœuds racines et nœuds feuilles (Jensen et Nielsen, 2007).

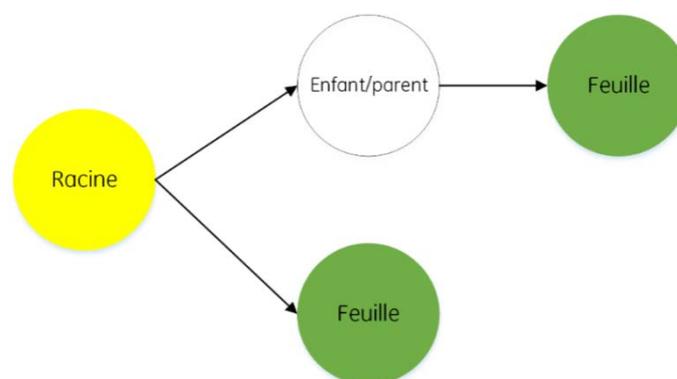


Figure II-27 Composantes d'un réseau Bayésien

Dans le cas de l'étude des effets dominos au niveau de LGA la disposition des différentes unités des process seront considérées comme un ensemble de variables ; c'est-à-dire que

chaque variable représente une unité ou un élément de l'équipement, selon le niveau de détail de l'analyse.

Un réseau bayésien peut donc être utilisé pour modéliser qualitativement et quantitativement l'influence des unités les unes sur les autres via les arcs causaux et les probabilités conditionnelles, pour estimer la probabilité d'un effet domino à différents niveaux.

Il étend la distribution de probabilité commune d'un ensemble de nœuds liés, par exemple :

$$U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

En d'autres termes, en ne considérant que les dépendances locales, en factorisant la distribution des probabilités communes comme la multiplication des probabilités des nœuds compte tenu de leurs parents immédiats (Khakzad et al., 2013).

II.4.4.2 Identification des séquences dominos

Afin de modéliser la propagation probable d'un effet domino, les étapes suivantes sont suivies :

Étape 1: Un nœud sera affecté à chaque unité du process.

Avant d'appliquer la méthode à notre cas d'étude, l'exemple d'une usine de 6 unités (les colonnes de distillation, les réservoirs de stockage atmosphérique, les réservoirs de stockage sous pression, etc.) sera présenté dans ce qui suit (**Fig. II-27**).

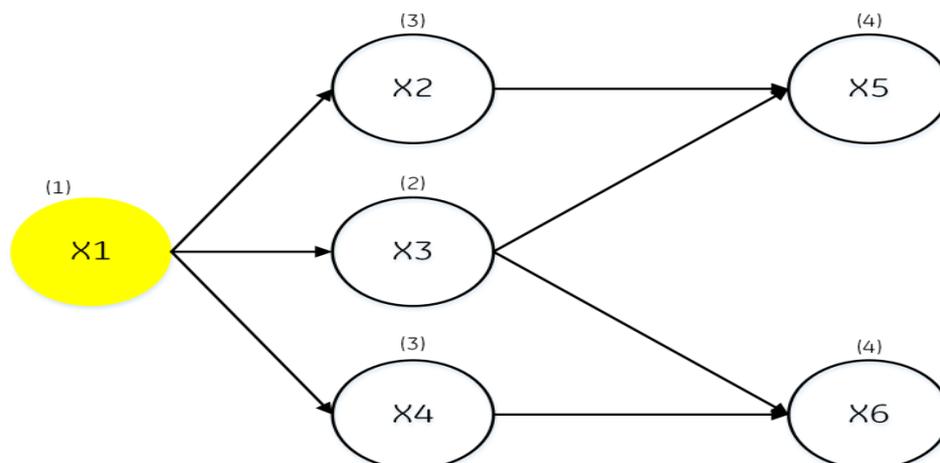


Figure II-287 : Modèle de propagation probable d'un effet domino dans une usine à six unités

Étape 2: Identification de l'unité primaire où l'accident primaire a lieu. Elle est schématisée en jaune (nœud racine) dans la figure **II-27**.

Étape 3: Une fois les vecteurs d'escalade et les cibles identifiés à l'aide des valeurs seuil d'escalade (comme expliqué dans la section I.2.2.1.4.), les probabilités d'escalade des unités secondaires vont être calculées compte tenu de l'événement primaire, c'est-à-dire $P(X_2/X_1)$, $P(X_3/X_1)$ et $P(X_4/X_1)$. Telles que, les unités ayant la probabilité d'escalade la plus élevée sont choisies comme unités secondaires (par exemple, X_3 dans la figure **II-27**).

Puisque les événements secondaires sont causés par l'événement primaire, un arc causal doit être dirigé de X_1 à X_3 , montrant que l'occurrence de X_3 est conditionnelle à l'occurrence de X_1 . En rappelant que pour le cas de LGA la probabilité d'escalade se calcule à l'aide des fonctions Probit.

Étape 4: En remplaçant l'unité primaire par les unités secondaires, l'étape 3 est répétée pour déterminer les unités tertiaires potentielles (par exemple : X_2 et X_4), les unités quaternaires potentielles (par exemple : X_5 et X_6) et ainsi de suite.

Dans cet exemple, X_2 et X_4 (X_5 et X_6) ont les mêmes probabilités d'escalade et sont tous deux sélectionnés comme unités tertiaires (quaternaires).

Il convient de noter que lorsqu'on répète la même procédure pour les unités secondaires ou les unités d'ordre supérieur, il faut tenir compte des **effets synergiques**.

On entend par effet de synergie que les vecteurs d'escalade des unités nouvellement engagées (d'ordre i) coopèrent avec ceux des unités déjà engagées (d'ordre $i-1$) pour avoir un impact sur les unités d'ordre supérieur (d'ordre $i + 1$) qui n'avaient pas dépassé les critères de seuil dans les niveaux précédents.

Par exemple, dans la figure II-27, X_2 et X_3 coopèrent entre eux (c'est-à-dire que leurs vecteurs d'escalade sont superposés) pour déclencher un accident dans X_5 .

Ainsi, les arcs causaux doivent être dirigés de X_2 et X_3 vers X_5 , montrant la dépendance conditionnelle de ces derniers par rapport aux premières unités. Par conséquent, lors de l'attribution de la probabilité conditionnelle d'escalade de X_5 due à l'effet synergique, $P(X_5/X_2, X_3)$ est également calculée à l'aide des fonctions Probit mais en **sommant les vecteurs d'escalade**.

Une fois le modèle de propagation probable de l'effet domino développé sous la forme d'un réseau bayésien, la probabilité de l'événement primaire et les probabilités conditionnelles des autres événements calculées, la distribution conjointe des probabilités des événements contribuant à l'effet domino peut être calculé.

Pour l'exemple de la figure II-27, la distribution de probabilité conjointe des événements qui contribuent à l'effet domino $U = \{X_1, \dots, X_6\}$ est calculée comme suit :

$$P(U) = P(X_1)P(X_3/X_1)P(X_2/X_1, X_3)P(X_4/X_1, X_3)P(X_5/X_2, X_3)P(X_6/X_3, X_4) \quad (2.12)$$

Il est à noter qu'en choisissant un autre point de départ plutôt que X_1 , on obtiendrait un réseau bayésien différent et, par conséquent, une distribution de probabilité commune différente de celle montrée dans l'équation (2.12)

En supposant que X_1 est l'unité primaire et selon la figure II-27, la chronologie ou l'ordre séquentiel probable des événements serait $X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$ (ou X_4) $\rightarrow X_5$ (ou X_6).

En connaissant le modèle de propagation d'un effet domino, sa probabilité d'occurrence à différents niveaux peut être estimée. Généralement, la probabilité de l'effet domino est calculée comme la multiplication de la probabilité de l'événement primaire et de la probabilité d'escalade. Pour qu'il y ait un effet domino au premier niveau, il est nécessaire que l'accident dans l'unité primaire se propage dans au moins une des unités secondaires voisines. Par exemple, sur la figure II-27, en considérant X_3 comme unité secondaire, la probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être calculée comme suit :

$$P_{\text{Niveau1}} = P(X_1)P(X_3/X_1) \quad (2.13)$$

De même, l'effet domino ne pourrait passer au deuxième niveau que si au moins l'une des unités tertiaires X_2 ou X_4 est touchée par l'accident de premier niveau. Par conséquent, la probabilité de l'effet domino de deuxième niveau est calculée comme suit :

$$P_{\text{Niveau2}} = P(X_1)P(X_3/X_1)P(X_2 \cup X_4 / X_1, X_3) \quad (2.14)$$

Pour tenir compte de l'union de X_2 et X_4 représentée dans Eq. (2.14), la figure **II-28** peut être modifiée en ajoutant le nœud auxiliaire L_1 de telle sorte que $L_1 = X_2 \cup X_4$ (**Fig. II-29**).

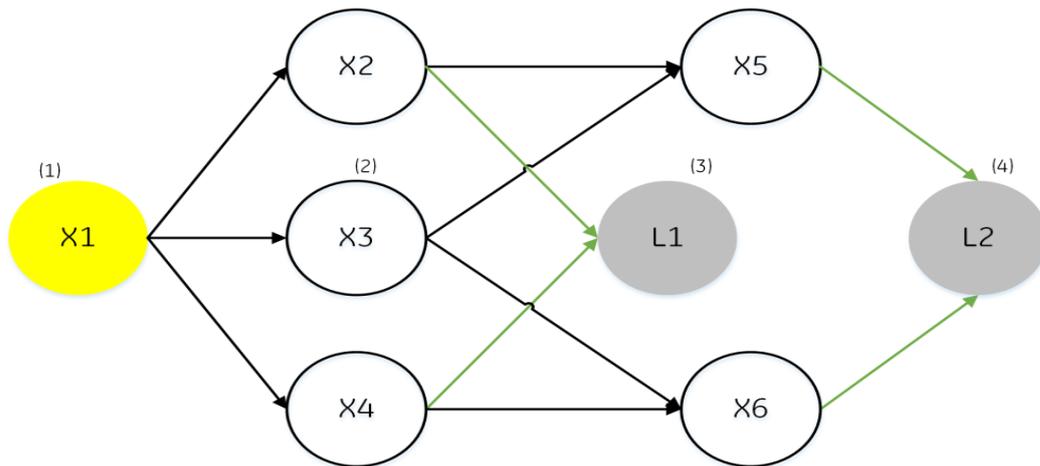


Figure II-29 : Réseau bayésien modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L1 et L2

Ainsi, X_2 et X_4 sont reliés à L_1 à l'aide d'arcs causaux de porte logique « OU », ce qui donne la table de probabilité conditionnelle présentée dans le tableau II-20 pour le nœud L_1 .

Tableau II-20 : Table des probabilités conditionnelles attribuées au nœud auxiliaire L_1 montrant sa dépendance conditionnelle à l'égard de ses parents par le biais d'une porte logique «OU»

Unités		$P(L_1/X_2, X_4)$	
X_2	X_4	Accident	Absence d'accident
Accident	Accident	1	0
Accident	Absence d'accident	1	0
Absence d'accident	Accident	1	0
Absence d'accident	Absence d'accident	0	1

La probabilité de L_1 est égale à la probabilité de propagation de l'effet domino au deuxième niveau, c'est-à-dire la probabilité qu'au moins une des unités tertiaires X_2 ou X_4 soit impliquée dans l'accident. De même, pour que l'effet domino passe au troisième niveau, il est nécessaire que l'accident dans les unités tertiaires se propage dans au moins une des unités quaternaires. [14]

La probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être estimée comme le produit de $P(X_1)$ et $P(X_3/X_1)$. Ainsi, si DL_1 (Domino Level 1) est connecté à X_1 et X_3 par des arcs causaux de porte logique « ET », $P(DL_1)$ serait égal à la probabilité de l'effet domino de

premier niveau. Cela implique que pour que l'effet domino de premier niveau se produise, non seulement l'événement primaire X_1 mais aussi l'événement secondaire X_3 sont nécessaires.

De même, si DL_2 est connecté aux nœuds DL_1 et L_1 par des arcs causaux de porte logique « ET », $P(DL_2)$ serait égal à la probabilité de l'effet domino de deuxième niveau. Cela indique que pour que l'effet domino de deuxième niveau se produise, l'effet domino de premier niveau (c.-à-d. DL_1) et au moins un des événements tertiaires, c.-à-d. L_1 se produisent. Même chose pour le niveau 3. (Voir figure II-30)

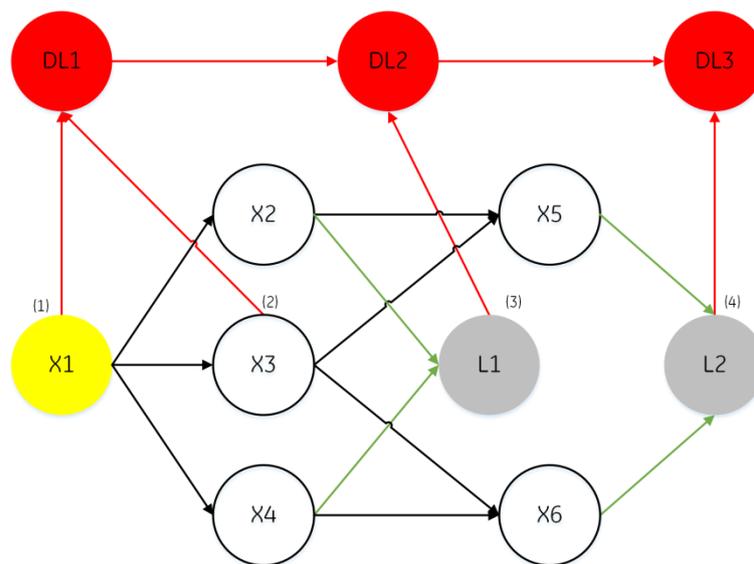


Figure II-31 Réseau bayésien modifié pour incorporer les 3 niveaux d'effet domino et l'union des événements tertiaires et quaternaires

II.4.4.3 Présentation du logiciel AGENARISK

AGENARISK utilise les derniers développements du domaine de l'intelligence artificielle bayésienne et du raisonnement probabiliste pour modéliser des problèmes complexes et risqués et améliorer la manière dont les décisions sont prises.

Il est utilisé pour établir des prévisions, effectuer des diagnostics et prendre des décisions en combinant des données et des connaissances sur les dépendances causales complexes et autres dans le monde réel.

AgenaRisk est aussi utilisé pour modéliser divers problèmes comportant des risques et des incertitudes, notamment les risques opérationnels, l'analyse actuarielle, l'analyse des informations, la sécurité et la fiabilité des systèmes, les risques pour la santé, les risques liés à la cyber sécurité et la planification financière stratégique.

II.4.4.4.1 Scénario 1

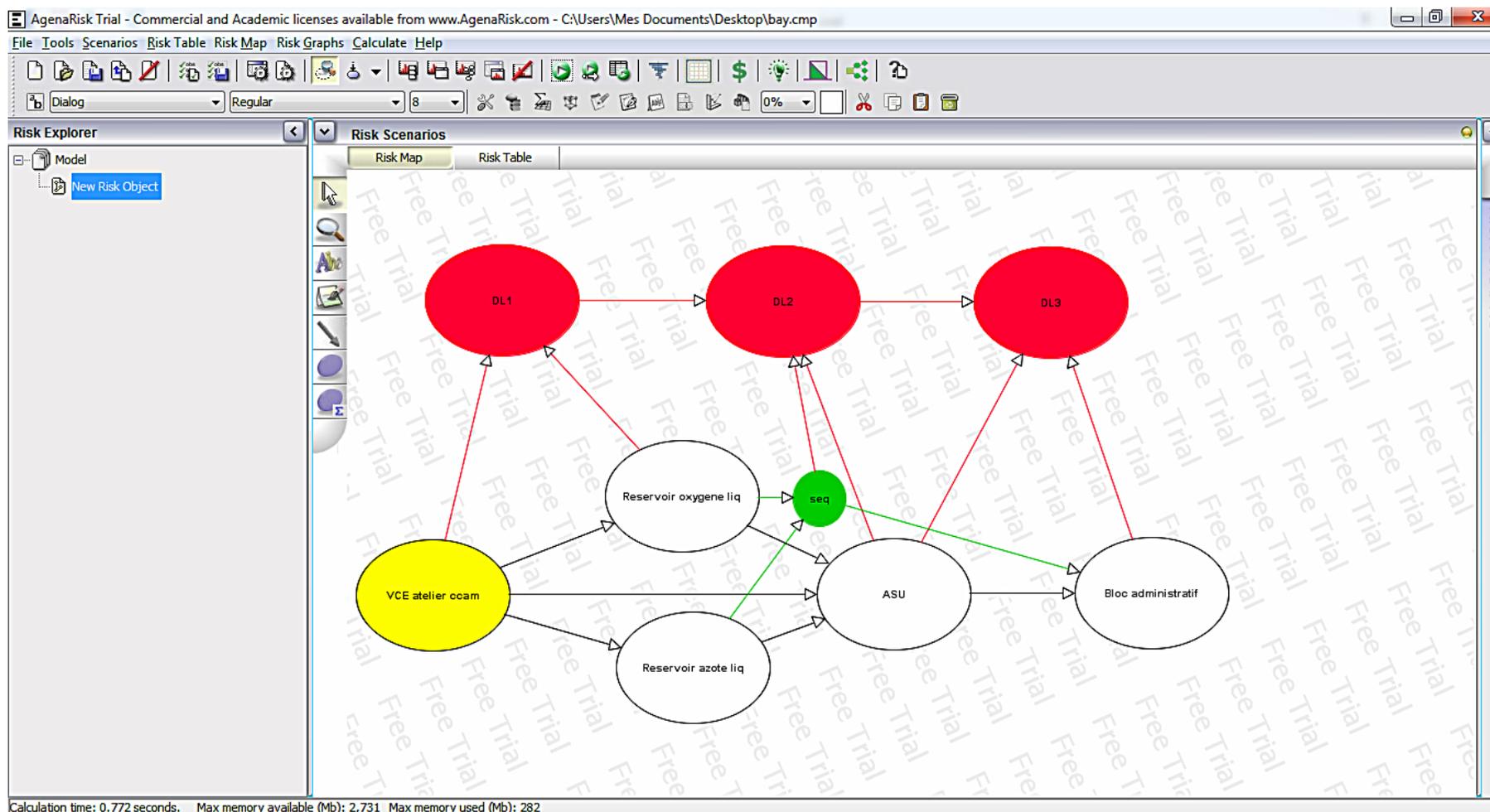


Figure II-32 : Réseau bayésien du scénario 1

II.4.4.2 Scénario 2

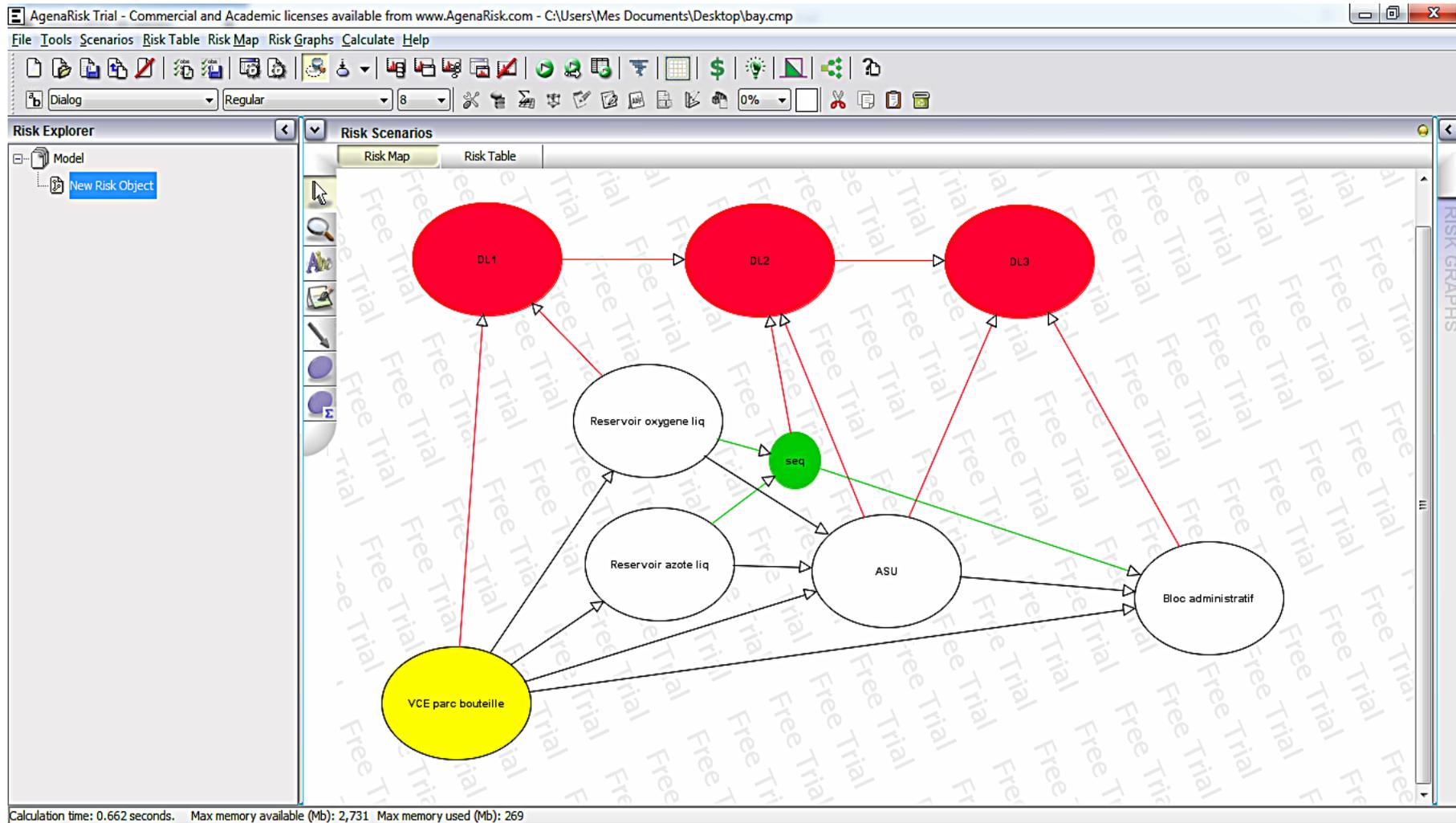


Figure II-33 : Réseau bayésien du scénario 2

II.4.4.3 Scénario 3

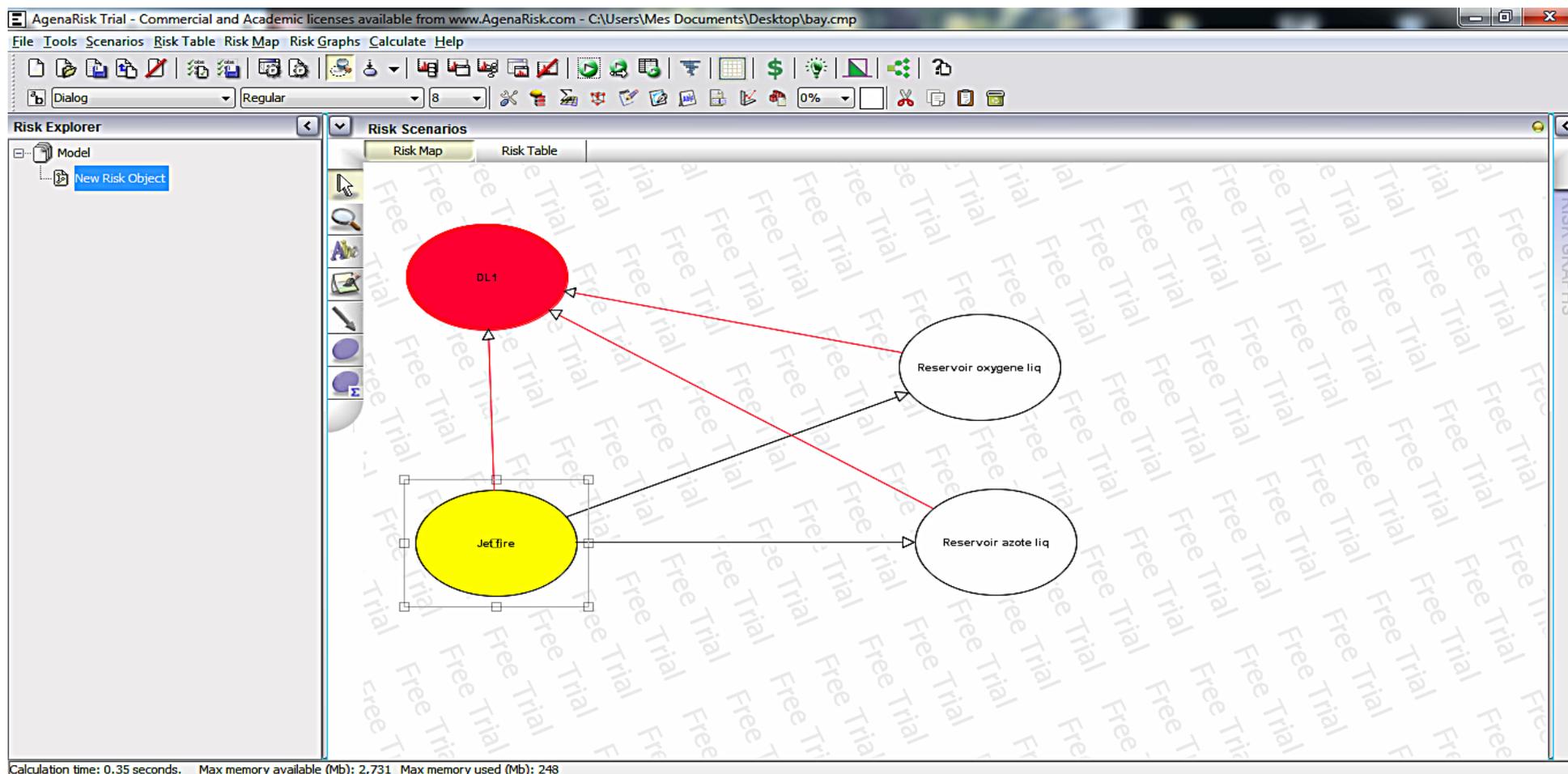


Figure II-34 : Réseau bayésien du scénario 3

II.4.5 Calcul des probabilités de combinaison

Evènement primaire de risque :

VCE au niveau du parc bouteilles $7.1 * 10^{-4}$

Evénements engendrés :

Tableau II-21 : Probabilités des événements

Evènement	Numéro de l'évènement	Probabilité
<i>Destruction du réservoir d'oxygène liquide</i>	1	$3.14 * 10^{-10}$
<i>Destruction du réservoir d'azote liquide</i>	2	$2.19 * 10^{-10}$
Incendie au niveau de la tour ASU	3	$18 * 10^{-3}$
Destruction du bloc administratif	4	$2.12 * 10^{-3}$

Pour rappel

$$P_d^{(k,m)} = \prod_{i=1}^N [1 - P_{d,i} + \delta(i, J_m^k)(2 * P_{d,i} - 1)] \quad (2.1)$$

Où $P_{d,i}$ est la probabilité d'escalade pour le i-ème événement secondaire. J_m^k est un vecteur dont les éléments sont les index d'une même combinaison de k événements secondaires. La fonction $\delta(i, J_m^k)$ est définie comme suit :

$$\delta(i, J_m^k) = \begin{cases} 1 & i \in J_m^k \\ 0 & i \notin J_m^k \end{cases} \quad (2.2)$$

Tableau II-22 : Probabilités des combinaisons d'évènements

1	2	3	4	Probabilité de la combinaison
*				$2.05 * 10^{-14}$
*	*			$4.48 * 10^{-23}$
*		*		$4 * 10^{-15}$
	*	*		$1.42 * 10^{-14}$
*	*	*		$8.8 * 10^{-25}$
*			*	$3.2 * 10^{-16}$
	*		*	$3 * 10^{-17}$
*	*		*	$1.02 * 10^{-25}$
*	*	*	*	$1.84 * 10^{-27}$

D'un point de vue quantitatif, les probabilités obtenues sont relativement acceptables. Elles nous renseignent également sur les combinaisons d'accidents les plus probables.

L'étape suivante sera le calcul du risque individuel à l'aide des probabilités obtenues

II.4.6 Risque individuel

Le risque individuel exprime le risque encouru par une personne simple exposée à un danger dans la zone d'effet potentiel d'un incident ou d'un ensemble d'incidents. Il faut signaler que l'ampleur de tout incident, en termes de nombre de personnes impactées par un seul événement, n'affecte pas le risque individuel.

Les mesures du risque individuel peuvent être des nombres simples, des tableaux de nombres ou divers graphiques.

Les mesures de risque individuel couramment utilisées comprennent les contours de risques individuels et montrent la répartition géographique du risque individuel. Les courbes de risque sont calculées à partir des prévisions fréquence d'un événement susceptible de causer le niveau de préjudice spécifié à un endroit spécifié, que quelqu'un soit ou non présent à cet endroit pour subir ce préjudice. Ainsi, le risque individuel des cartes de contour sont générés en calculant le risque individuel à chaque emplacement géographique en supposant que quelqu'un sera présent, sans protection (par exemple, en plein air), et soumis au risque 100 % du temps (exposition annuelle de 8760 heures par an).

C'est dans cette configuration ci que nous avons travaillé.

II.4.6.1. Calcul du risque individuel

La relation utilisée est inspirée de la relation donnée par Abdelhamid 2010 FrEEDOM [3] et adaptée à des installations au lieu d'équipements pour la relation initiale. L'avantage de cette relation est qu'elle prend en compte les effets dominos.

$$IR = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Fi * Pi,j * Pj \quad (2.17)$$

Le calcul donne une fréquence de risque individuelle de $5.63 * 10^{-5}$

Cette valeur peut être interprétée comme assez élevée d'où l'importance du système de sécurité au sein de LGA.

Les contours du risque individuel ont été fixés sur la base des seuils des effets de suppression et de radiation thermique donnés précédemment et des simulations effectuées.



Figure II-35 : Illustration du risque individuel sur le site de LGA

Chapitre III

ETUDE DES EFFETS DOMINOS EXTERNES

III. ETUDE DES EFFETS DOMINOS EXTERNES

Beaucoup d'industries sont sujettes à la production, stockage et traitement de quantités importantes de substances dangereuses et parmi elles : LINDE GAS Algérie. Ainsi, elles maintiennent le risque d'accidents déclenchant une réaction en chaîne d'incidents majeurs dans les centrales adjacentes. Ces chaînes d'accidents sont appelées effets dominos. Du point de vue d'une entreprise, les risques d'accidents dominos peuvent être internes ou externes dans la nature. Les effets dominos internes proviennent dans les locaux de l'entreprise, alors que les accidents externes sont induits par les entreprises voisines. Ainsi les effets dominos internes sont généralement comptabilisés par la conception d'un système de gestion de la sécurité de l'entreprise, les effets dominos externes ne le sont pas.

Des études empiriques récentes réalisées par Reniers, Dullaert, Soudan, et al. (2005) illustre le fait que les responsables de la sécurité reconnaissent l'importance de la coopération transfrontalière entre les entreprises pour la réduction des risques dominos. L'absence d'un cadre général pour la prévention des accidents extérieurs communs, la crainte des coûts élevés d'inspection des risques communs et l'analyse des risques, sont présentés comme les principales objections contre la coopération de sécurité inter-entreprises.

LINDE GAS Reghaia étant une entreprise se trouvant dans une zone industrielle, elle est directement impliquée dans ce genre de risques. En effet, il se trouve qu'elle est voisine direct avec une autre entreprise opérant dans le même secteur et concurrente AIR LIQUIDE. Un mur seulement sépare les deux géants de l'industrie de gaz de l'air comme le montre la figure III-1.



Figure III-1 Image satellite de l'emplacement de LGA et AIR LIQUIDE

C'est pour cela que nous allons nous pencher sur l'étude des effets dominos externes que pourrait causer une entreprise sur l'autre. Pour ce faire, nous proposons l'application de la méthode HAZWIM.

III.1 Prévention des accidents dominos externes (EDAP) Proposition de cadre Hazwim

III.1.1 La gestion multi-entreprise

La gestion multi-entreprise diffère essentiellement de la gestion unique de l'entreprise par le montant qu'ont à leur disposition les gestionnaires d'information. Un autre problème est que les différentes perspectives organisationnelles doivent être combinées. Comme l'explique Hovden (refe1998) chaque cadre ou perspective fournit une façon d'interpréter les événements et les actions, et chacun implique une orientation différente avec des conséquences pour le

choix des stratégies et approche de la gestion efficace. Par conséquent, ce qui porte ces points de vue ensemble n'est pas une tâche facile. Il devrait n'y avoir aucun problème de communication ou de malentendus entre les parties concernées. Par conséquent, une stratégie de gestion des risques doit être élaborée pour être sûr que le personnel responsable des différentes parties communique avec le même savoir-faire, au même niveau, et sur les mêmes problèmes de sécurité.

A cet effet, un aperçu de la gestion des risques inter-entreprises basé sur un modèle unique de société de la Australie / Nouvelle-Zélande standard (1999) peut être développé.

Cet aperçu peut être utilisé pour l'élaboration d'un cadre qui favorise l'échange d'informations inter-entreprises sur les effets de dominos externes. Fournir une situation où communication et conflits sont réduits au minimum, les procédures d'analyse des risques et de leurs résultats doivent être compris par les différents experts concernés par l'étude. Dans la section suivante, un cadre est élaboré basé sur la vue d'ensemble de la gestion des risques inter-sociétés et selon des procédures bien connues.

III.1.2 Le cadre Hazwim EDAP

L'objectif d'un cadre de prévention des accidents dominos externes est de faciliter la structuration hors site d'une coopération de prévention d'effets dominos entre les entreprises de manipulation ou stockage de substances dangereuses. Le cadre devrait inclure une analyse des risques dominos externes solide consistant en deux étapes fournissant des informations clés pour la gestion externe des risques dominos : identification et évaluation externe des risques d'effets.

La combinaison de Haz (analyse hazop), W chapeau- I (l'analyse des risques) et de la f M Atrix dans un cadre Hazwim permet de constituer un outil de méta-technique pour optimiser l'organisation de discuter des performances d'analyse des risques de processus par les employés des entreprises voisines dans une zone industrielle.

Avant la première étape du cadre EDAP, les animateurs Hazwim et chefs de projet expérimentés doivent être nommés dans chaque entreprise. Dans la première étape du cadre, ces animateurs et les responsables du projet dans chaque entreprise doivent définir la portée de l'étude des effets dominos externes. Dans la deuxième étape, une étude technique initiale est effectuée par chaque entreprise pour identifier le potentiel par installation (faisant partie de

la zone de portée) pour les effets dominos et leurs conséquences. Par conséquent, une hiérarchisation est faite et les installations sont classées par ordre de danger décroissant. Dans l'étape suivante, l'ingénieur de projet de l'entreprise met en place le calendrier d'organisation de la zone de portée de sa propre entreprise en utilisant les données de classification et. Si elle n'est pas la première fois que l'installation est à l'étude, le régime Hazwim utilisé précédemment pour l'installation permet de décider si une Hazop ou une analyse par simulation est nécessaire. Une fois que les équipes sont sélectionnées, une visite dans la zone de portée des entreprises voisines est organisée. Les participants au projet Hazwim exécutent ensuite la sixième étape du cadre Hazwim. Cette étape finale du cycle cadre est terminée lorsque chaque installation qui a été retenue pour enquête sur la prévention des effets dominos a été analysé [17]

III.1.2.1 Étape 1: Définir la portée et la zone de portée d'une étude de la zone industrielle de sécurité domino externe

Le succès de la mise en œuvre du cadre domino d'analyse des risques dépend des accords mutuels des deux entreprises. Le niveau des détails de l'Hazop et de What-Si des analyses à effectuer doit rester dans des limites raisonnables défini par le niveau de contrôle formel que la gestion de la sécurité doit exercer. L'objectif de l'étude de sécurité domino externe par installation, comme la vérification de la conception de la sécurité d'une installation, de décider où construire de nouveaux éléments d'installation ou de faire des adaptations, améliorer la sécurité d'une installation existante, etc, joue un rôle clé pour établir la zone à mettre au point. La portée de l'étude devrait donc décrire les types de risques et de contrôles des risques dans les différentes installations concernées par l'équipe Hazop / What-If. Par exemple, si le cadre Hazwim est utilisé pour déterminer la zone pour construire une nouvelle installation ayant un minimum d'impact sur la sécurité publique, il devrait être centré sur les écarts des paramètres du processus qui entraînent des risques hors site mettant en danger un espace public. Les limites physiques du cadre EDAP devraient être explicites pour faire en sorte que l'exercice reste concentré. Cependant, être trop spécifiques peut également être dangereux car cela peut conduire à négliger d'importantes séquences d'accidents. A la fin de cette étape, la zone d'identification portée concrétisées peut s'étendre

III.1.2.2 Étape 2: Etude initiale sur les effets dominos

Chaque installation dans une zone industrielle est un fil potentiel de ses environs. Par conséquent, la zone d'installation entière doit être prise en compte dans l'analyse. La mise en

œuvre de chaque régime Hazwim est influencée par des corrélations dangereuses entre le processus d'installations des risques d'une part et une autre installation, une unité de traitement où un ensemble d'unités de traitement. Les interactions potentielles entre les parties d'unités ou des installations, qui ne peuvent être dangereuses en soi, peuvent causer d'autres risques qui s'enchainent et se traduisent par une séquence d'accidents.

Notre étude ultérieure a permis de faire ressortir l'unité critique pour les effets dominos. Il s'agit de l'atelier d'oxyde d'éthylène se trouvant en contact direct avec le mur séparant les deux entreprises. Une simulation des effets de surpression et effets thermiques d'une explosion de cette unité a été effectuée avec le logiciel PHAST. Les résultats sont représentés dans les figures III-2 et III-3:

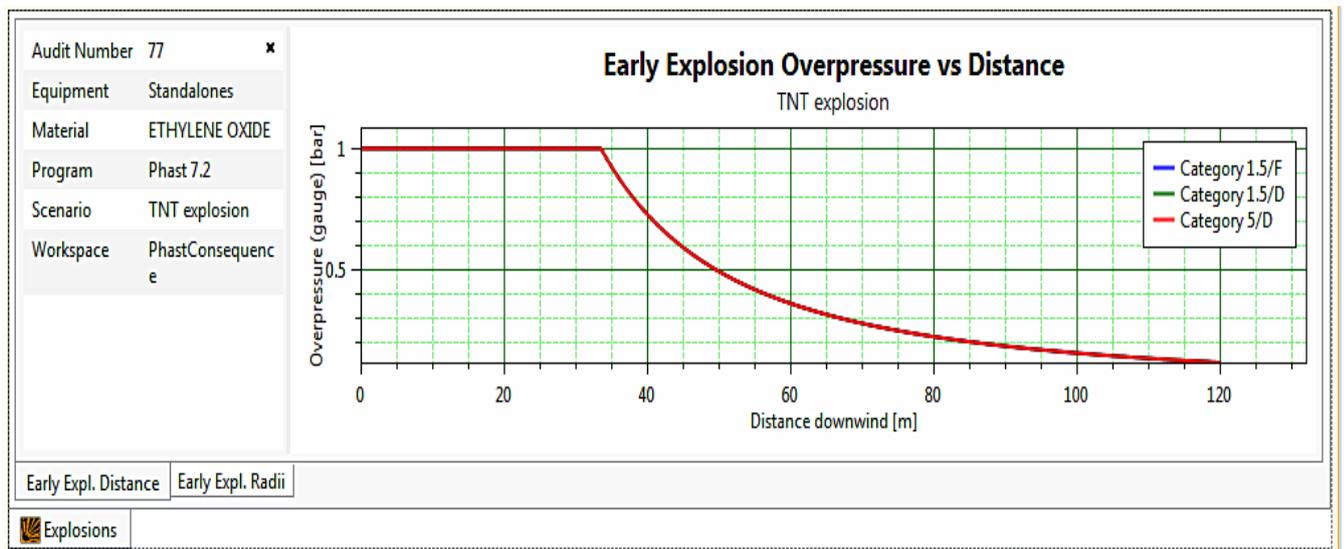


Figure III-2 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement VCE au niveau de l'atelier d'oxyde d'éthylène



Figure III-3 : Propagation des effets de surpression pour l'événement VCE au niveau de l'atelier d'oxyde d'éthylène

III.1.2.3 Etape 3: le calendrier d'organisation

La nécessité d'une flexibilité dans l'application des régimes Hazwim sur diverses installations et l'implication des différentes parties conduisent à une situation complexe dans laquelle les conditions de temps, les responsabilités et les compétences doivent être bien définies. Le chef de projet Hazwim de chaque usine prévoit chronologiquement les différentes étapes du régime Hazwim pour les installations de l'usine située dans la zone considérée.

Les installations dans la zone à vérifier sont répertoriées et pour chaque installation un tableau récapitulatif est fait. Ce tableau récapitulatif contient au moins les données estimées suivantes : le niveau de danger relatif de chaque installation, le temps nécessaire pour effectuer une Hazop ou une What-If procédure sur l'installation et la distance à toutes les autres installations de l'entreprise. Le niveau de danger relatif est calculé en fonction des contours de risque d'information rédigé comme expliqué dans le paragraphe précédent.

Il est évident que la distance entre les installations respectives doit être un facteur contribuant au potentiel d'occurrence d'un événement domino, car l'ampleur des effets de conséquence se réduit selon une certaine fonction de la distance de la source.

Sur la base de ces données d'installation, un calendrier d'optimisation pour enquêter sur le danger domino externe dans la zone de portée peut être tiré.

III.1.2.4 Étape 4: Composition de la Hazop et de la What-If équipes dans chaque entreprise

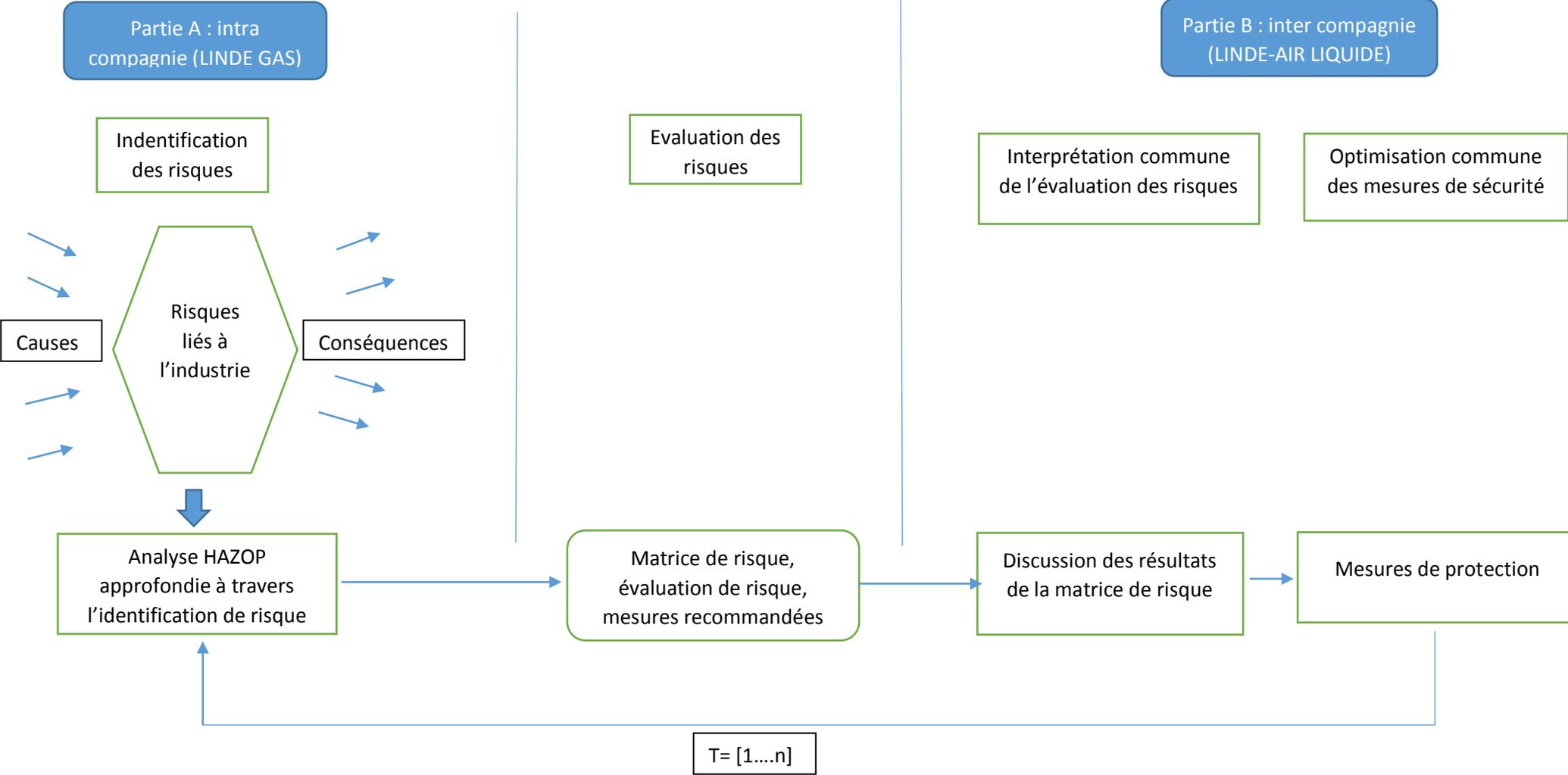
La clé du succès et l'efficacité dans l'exécution d'un cadre de prévention domino externe solide est la compétence appropriée des membres de l'équipe. Les animateurs de Hazwim doivent se familiariser avec les méthodes Hazop et What-If analyse ainsi qu'avec la méthode d'évaluation de la matrice des risques.

Ils devraient également avoir une connaissance des processus et de la maintenance des installations situées dans les locaux de leur entreprise. Membres à temps partiel comme les ingénieurs de processus et les ingénieurs de maintenance des installations à examiner, ils devraient être disponibles pour tout appel à l'aide et d'informations. Différentes situations doivent être prises en considération lors de la composition d'une Hazop adaptée / What-If équipe. Par entreprise deux procédures d'identification des risques doivent être effectués, donc théoriquement deux équipes sont nécessaires. Étant donné que les procédures sont effectuées à des moments différents dans le temps et les deux équipes possèdent également à peu près les mêmes caractéristiques et fonctions, la même équipe peut agir comme une équipe de Hazop et réduite en équipe What-If. De cette façon, les deux types d'études sont menées principalement par le même personnel expérimenté.

III.1.2.5 Étape 5: Explication visite du site

Un examen élémentaire des caractéristiques techniques des installations voisines est nécessaire. L'accent sera mis sur les risques qui peuvent conduire à des accidents dominos hors site. L'examen permettra aux membres de l'équipe d'imaginer d'éventuels écarts, des hypothèses et des questions sur le fonctionnement de l'installation examinée et les installations adjacentes. Par conséquent, une visite explicative des installations adjacentes du site est indispensable. Cette visite guidée est organisée une fois que tous les membres de l'équipe sont choisis.[17] Elle permettra la collecte d'informations spécifiques sur les contours des risques et des substances dangereuses.

Étape 6: Schéma de la procédure Hazwim



Le schéma de la procédure Hazwim combine les risques techniques identification de Hazop et analyse par simulation avec la technique d'évaluation des risques de la matrice des risques, comme le montre la figure ci-dessus. Il y est décrit comment les caractéristiques complémentaires des trois techniques peuvent être utilisées pour les intégrer dans une combinaison optimale et de décider des actions qui peuvent être prises pour arrêter le développement des incidents majeurs externes.

La partie A de la figure se compose d'une identification de risques. Dans notre cas, il s'agit de l'atelier d'oxyde d'éthylène de LIND GAS et une unité qui reste à déterminer pour AIR LIQUIDE.

L'analyse se fait exclusivement par le personnel de chaque entreprise. L'exercice d'identification est caractérisé par une structure de nœud papillon. La partie centrale dans le nœud papillon est le danger, le côté gauche du nœud papillon décrit comment les événements et les circonstances, soit de façon isolée où en combinaison, peuvent libérer un danger avec le potentiel de dommages aux biens, aux personnes ou à l'environnement. Le côté droit représente les différents scénarios qui pourraient se développer de l'événement indésirable.

La première étape du processus Hazwim, consiste à déterminer toutes les causes possibles de danger et les conséquences de danger, elle est effectuée en utilisant la procédure Hazop étendue avec domino. Les résultats de l'Hazop comprennent généralement une liste de recommandations qui répondent aux problèmes potentiels identifiés. Malheureusement, les résultats ne fournissent aucune orientation aux décideurs quand les problèmes potentiels sont plus importants. L'étape suivante du processus est une évaluation des risques liés aux actions recommandées. Cette partie a été effectuée et la HAZOP suivante en est ressortis ;

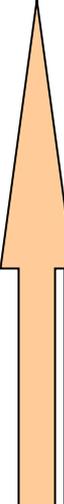
La maille choisie est l'atelier d'oxyde d'éthylène car c'est le système plus apte à générer des effets dominos externes.

Les paramètres sélectionnés sont la pression, la température, la concentration de CO₂.

Nous n'avons pas l'habitude de déterminer la criticité dans la HAZOP mais dans ce travail nous avons suivi le modèle de LGA qui en ajoute l'analyse quantitative de la criticité.

Dans cette HAZOP la criticité va être calculée en s'appuyant sur la matrice suivante :

Tableau III-1 : Matrice d'évaluation des risques



MATRICE D'EVALUATION DES RISQUES			Gravité				
			MINEUR	MODERE	SERIEUX	MAJEUR	CATASTROPHIQUE
			Blessure légère – simple inconfort premiers soins peuvent être donnés	Traitement médical (sans effets)	Arrêt de travail avec rémission complète.	Arrêt de travail avec lésion permanente, invalidité ou maladie	Incident extrêmement grave pouvant être mortel ou décès
probabilité	FREQUENT	0 à 1 par semaine	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Extrêmement élevé
	OCCASIONNEL	1 par semaine à 1 par mois	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	Extrêmement élevé
	POSSIBLE	1 par mois à 1 par an	Faible	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé
	RARE	dans 1 à 10 par ans	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Elevé
	IMPROBABLE	plus de 10 ans	Extrêmement faible	Faible	Faible	Moyen	Moyen

Item	Déviati	Causes	Conséquences	F	G	C	Barrières de sécurité	Recommandations/Actions Correctives	F	G	C
1.1	Plus de pression dans le fût ETO	Ouverture simultanée des vannes V14 (CO2) et V12 (ETO) Pression d'azote élevée à l'entrée du fût Défaillance de la vanne Source de chaleur externe	Rupture du fût Explosion Fatalité	2	5	10 H	Indicateur de pression à l'entrée et à la sortie du fût Inspection visuelle Réseau anti incendie Fût à l'intérieur du local Manodétendeur à la sortie du cadre	REC. Contrôle réglementaire des IEM REC. Check-list de contrôle REC. Formation des opérateurs	1	5	5 M
1.2	Plus de pression d'azote à l'entrée du fût	Défaillance du manomètre PCV 53	Surpression du fût Explosion Fatalité	2	5	10 H	Manodétendeur à la sortie du cadre	REC. Explorer la possibilité d'installer un compresseur ATEX pour stabiliser la pression d'entrée REC. Contrôle réglementaire des IEM REC. Check-list de contrôle	1	5	5 M
1.3	Plus de T° dans le laveur (Scrabber)	Ouverture simultanée des vannes V13 (Purge) et V12 (ETO)	Le fût ETO se vide dans le laveur Surchauffe et débordement du laveur Blessures et effets sur la santé	2	4	8 M	Thermomètre Indicateur de niveau avec alarme sonore/lumineuse Arrêt automatique de la pompe Arrêt d'urgence Electrovannes à fermeture automatique	REC. Contrôle réglementaire des IEM REC. Check-list de contrôle REC. Formation des opérateurs	1	4	4 L
1.4	Plus de concentration de CO ₂ dans le laveur	Vannes défaillante Erreur humaine	Surpression dans le laveur Rupture du laveur Déversement d'acide ou d'éthylène Glycol Fatalité	2	5	10 H	Electrovannes à fermeture automatique Transmetteur de pression	REC. Check-list de contrôle REC. Formation des opérateurs	1	5	5 M

1.5	Plus de concentration d'ETO dans l'atelier	Fuite dans le panel de remplissage Fuite dans le Scrabber lors du traitement Défaillance du flexible ou du robinet de la bouteille	Lésions sur la peau/yeux Inhalation d'un produit toxique	2	4	8 M	Vérification des flexibles Alarme sonore Arrêt d'urgence Extracteurs	REC. Check-list de contrôle REC. Formation des opérateurs REC. EPI adéquats	1	4	4 L
1.6	Ajout d'acide plutôt que l'eau dans le Scrabber	Erreur humaine Manque de formation Non-respect de la procédure	Réaction exothermique Dégagement de chaleur explosion du laveur	2	5	10 H	Instructions	REC. Etablir une instruction/procédure 'vidange du Scrabber' REC. Formation des opérateurs	1	5	5 M

Tableau III-2 : HAZOP de l'atelier d'oxyde d'éthylène

Dans la partie B du processus Hazwim, les résultats de la partie A sont discutés par les responsables de la sécurité des deux usines afin de décider des mesures de prévention à prendre. La partie B est donc une question de gestion inter-compagnie.

Après **n** analyses enquêtant sur les risques de l'installation, il est nécessaire d'effectuer une analyse par simulation. L'identification de risques plus approfondie par analyse Hazop est exécutée pour assurer ensuite une sécurité domino externe optimale.

Le processus Hazwim est donc un schéma standardisé mais flexible. Le temps durant lequel le personnel des frontières doit être adapté dépend de différents facteurs et diverses circonstances.

Dans cette proposition d'installation du cadre HAWZIM nous avons expliqué le cheminement de la méthodologie et réalisé uniquement la partie liée à LGA . Afin de pouvoir appliquer toute la méthodologie, une collaboration avec l'entreprise voisine AIR LIQUID est impérative et devra se faire ultérieurement.

Chapitre IV

Impact financier, impact indirecte et proposition d'implémentation d'un plan de continuité d'activité

Impact financier, impact indirecte et proposition d'implémentation d'un plan de continuité d'activité

III.2 Impact financier :

Coût de l'occurrence de la séquence domino :

En termes d'installations

Type d'installation en cause	Coûts des dégâts
Destruction bac d'oxygène liquide	945.000.000 DA
Destruction bac d'azote liquide	630.000.000 DA
Endommagement de l'ASU	1.155.000.000 DA
Endommagement du bloc administratif	13.000.000 DA
Autres coûts divers liées aux effets	210.000.000 DA

En termes de produit :

Quantité stockés en moyenne sur site :

Oxygène : 1.000.000 litres

Azote : 500.000 litres

Oxyde d'éthylène : 6* 700 kg

Produit	Coûts
Oxygène	25.000.000 DA
Azote	7.500.000 DA
Oxyde d'éthylène	480.000 DA

En termes de jour d'arrêt de production

Capacité de production :

Oxygène : 4275 L/h marchant 24h/24

Azote 1695 L/h marchant 24h/24

Argon 70 L/h marchant 24h/24

Durée d'arrêt \ produits	Oxygène	Azote	Argon
1 journée	2.565.000 DA	610.200 DA	554.400 DA
1 semaine	17.955.000 DA	4.271.400 DA	3.880.800 DA
2 semaines	38.475.000 DA	9.153.000 DA	8.316.000 DA
1 mois	76.950.000 DA	18.306.000 DA	16.632.000 DA
3 mois	230.850.000 DA	54.918.000 DA	49.896.000 DA

III.3 Impact indirecte

Dans la majorité des cas nous nous intéressons uniquement à l'impact direct de la catastrophe. Or ces accidents majeurs peuvent avoir de lourdes conséquences sur d'autres industries et secteurs. C'est le cas pour LGA car comme nous l'avons montré l'entreprise est mitoyenne de AIR LIQUID et ce sont les deux seuls fournisseurs des produits de gaz de l'air pour la région d'Alger et ses environs. Un événement domino qui toucherait les deux entreprises et engendrerait un arrêt de production serait très dangereux pour plusieurs secteurs qui eux-mêmes pourraient engendrer une séquence domino sur d'autres secteurs. Pour mieux voir l'effet sur les industries voici la liste de certains clients que LGA fournit en produit :

Tableau 0-1 Client LGA par produit

Oxygène	Azote	C02
Algesco	Algesco	Baticim
BATICIC	Cdta Centre Developpement Des Technologies	EMB BAG
Cdta Centre Developpement Des Technologies	Comena Crna Centre De Recherche Nucleaire D.alger	Eurl Algad
Cosider Travaux Public Utps Rouiba	Enap Upl Lakhdaria	SIMAF
Ecm Sidi Moussa	Eniem	Snv Lavalin Intern Hadjret Ennous
Engtp Reghaia	Hcr Udts	Snvi Cir
Eniem	Mdn Base Aerienne Ain Oussera	Snvi Cvi Complexe De Vehicule Industriel
Epe Electro Industrie	Mdn Ctsa	Snvi Epe Spa For
Mdn Base Aerienne Ain Oussera	Sarl Stic	SPA EMB BAG
Mdn Bcl Beni Mered	Snvi Cvi Complexe De Vehicule Industriel	Spa Fruital II
Sarl Groupe Mokabli Pour Les Grands Travaux	Sonatrach Activite Aval	ABC PEPSI
Snvi Cir	Spa El Sewedy Cables	Hamoud Boualem
Snvi Cvi Complexe De Vehicule Industriel	Spa Emb Fbf	Sarl MGB Royal
Snvi Epe Spa For	Spa Mediterranean Float Glass Mfg	SPA TENES LILMIYAH
Somabe Filaile Enmtp		UTE DESSALADORA TENES CONSTRUCTION
Spa Alieco		Tala Boghni
Spa Alrim		Taiba Food
Spa Erc Ex (erwa Urd)		Eurl Boisson Bouchra
		Liberta

La liste des hôpitaux que LGA fournit sont dans le tableau 0-2

Tableau 0-3 Liste des hôpitaux clients de LGA

HOPITAUX	
Centre National de toxicologie	EPE/SPA Saidal Medea
Centre Piere Marie Curie	EPH Aflou
CHU Bab El Oued	EPH Ain Defla
CHU Béni Messous	EPH BIRTRARIA
CHU Douera	EPH BORDJ MENAEL
CHU Hopital Mustapha	EPH BOUFARIK
CHU Nafissa Hamoud, Parnet	EPH DJELFA
CHU Nedir Mohamed	EPH EL ATTAF
Clinique Chahrazad	EPH HASSI BAH BAH
CMCI Bousmail	EPH HASSI BAH BAH
CNIAAG	EPH Kouba
EHS Ben Aknounge	EPH LAGHOUAT
EHS CAC Blida	EPH LAGHOUAT
EHS Dr Maouche Mohand Amokrane	EPH LAGHOUAT
EHS Draa Ben Khedda	EPH MEFTAH
EHS Kettar	EPH MESSAD
EHS Laghouat	EPH MILIANA
EHS Laghouat	EPH ROUIBA
EHS Mohamed Abderrahmani	EPH ROUIBA
Ehs Mere et enfant de Djelfa	EPH Sidi Ghiles
EHS Sbihi Tassadit	EPH THENIA
EPE/SPA Saidal Medea	EPH THENIA
	EPH ZERALDA
	HUMC Salim Zemirli
	HUMC Salim Zemirli
	Institut du Rein Blida

Comme nous pouvons le voir par les tableaux **0-1 et 0-4** les secteurs touchés sont diverses : bâtiment, construction et travaux publics, chimie, automobile, compagnies pétrolières, agroalimentaire et surtout santé. Un arrêt de production pourrait donc avoir de très grosses conséquences.

C'est pour ceci qu'il est primordial de mettre en place un plan de continuité d'activité.

III.4 Plan de continuité d'activité (PCA)

La nature, la fréquence et le coût des crises ont sensiblement évolué au cours des vingt dernières années. On comprend sans doute mieux aujourd'hui à quel point sont étroitement imbriquées les différentes dimensions de ces événements qui perturbent très fortement le fonctionnement de nombreuses organisations, publiques et privées, avec des conséquences allant jusqu'à la cessation définitive d'activité. Les retours d'expérience des grandes crises récentes montrent que les organisations ayant entrepris une démarche préalable visant à garantir la continuité de leur activité sont les plus résilientes face aux événements déstabilisants.

Bien qu'il soit utopique de chercher à tout prévoir et maîtriser, le responsable d'une organisation – publique ou privée – se doit de concevoir et mettre en œuvre des stratégies de protection permettant d'éviter certains événements, ou tout du moins d'en limiter les effets directs sur les objectifs de l'organisation, et d'assurer la continuité de l'activité malgré la perte de ressources critiques. C'est dans ce sillage que nous proposons la mise en place d'un PCA au sein de LGA.

Les contraintes économiques imposent de devoir justifier les dépenses, y compris celles qui concernent les actions à entreprendre dans le domaine de la sécurité, et de pouvoir prioriser ces dépenses dans le cadre d'une stratégie globale. Il faut par conséquent disposer d'outils méthodologiques permettant d'optimiser l'efficacité de ces actions, en cohérence avec les objectifs de l'organisation. Des outils existent déjà pour couvrir séparément plusieurs domaines indissociables : la gestion de risque, la gestion de crise, l'intervention, le maintien et la reprise d'activité. La démarche de continuité de l'activité est le moyen d'associer de manière globale et cohérente tous ces domaines

L'ISO 22301:2012 spécifie les exigences pour planifier, établir, mettre en place et en œuvre, contrôler, réviser, maintenir et améliorer de manière continue un système de management documenté afin de se protéger des incidents perturbateurs, réduire leur probabilité de survenance, s'y préparer, y répondre et de s'en rétablir lorsqu'ils surviennent.

Les exigences spécifiées dans l'ISO 22301:2012 sont génériques et prévues pour être applicables à toutes les organisations, ou parties de celles-ci, indépendamment du type, de la taille et de la nature de l'organisation. Le champ d'application de ces exigences dépend de l'environnement et de la complexité de fonctionnement de l'organisation.

Cette norme appartient à une catégorie bien particulière : les "management systems" ou "systèmes de management". Cela signifie qu'elle se concentre sur la manière de se rapprocher volontairement d'un état cible décidé. Autrement dit, elle présente des dispositifs à mettre en place pour permettre d'améliorer la situation en matière de continuité de l'activité. Ce type de norme s'appesantit beaucoup plus sur le fait de se rapprocher d'une cible de bonnes pratiques que sur les bonnes pratiques elles même. Ceux qui y recherchent des "recettes" en auront pour leurs frais.

Pour montrer l'avantage financier que peut présenter le PCA nous proposons la figure 0-1 (la notion de durée maximale d'interruption de service acceptable (DMIA) sera définis dans le point **0.3.6**)

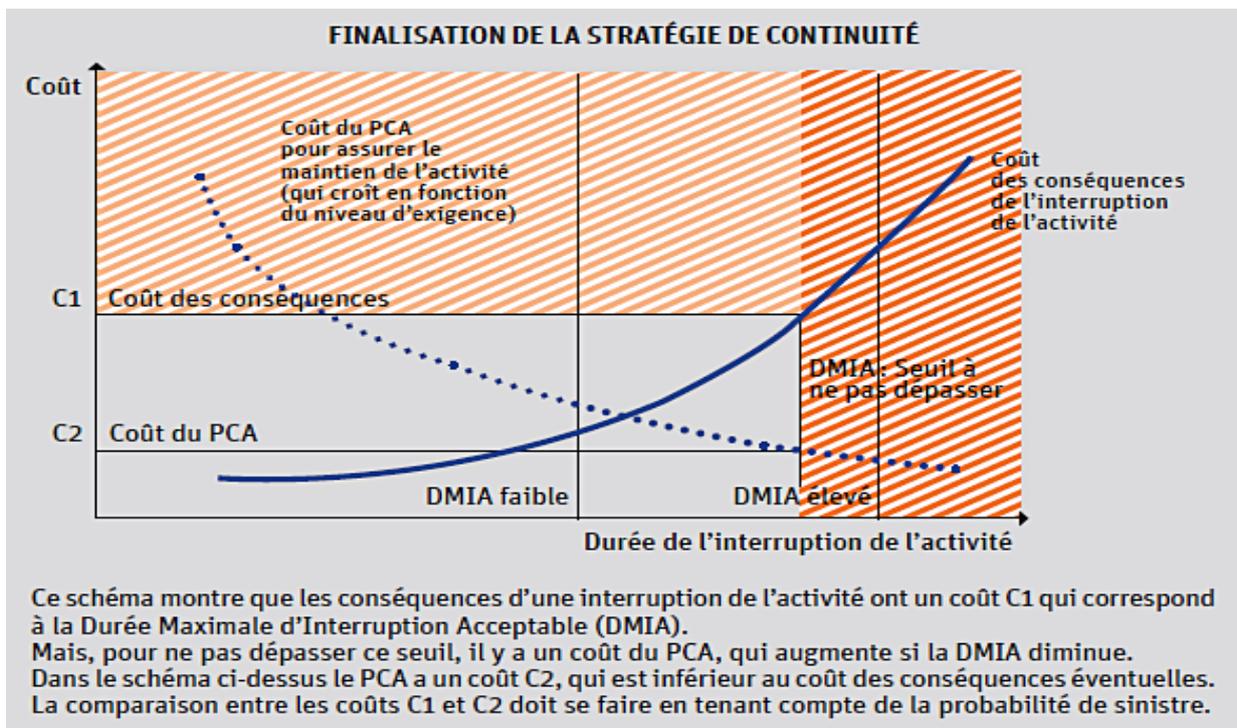


Figure 0-2 Comparaison des coûts du PCA et des conséquences d'une catastrophe

III.4.1 Compréhension de l'organisation et de son contexte

Avant de commencer un projet PCA il est indispensable de comprendre l'organisation : son activité, ses objectifs, ses valeurs, sa stratégie, son environnement interne et externe.

Cette première action est essentielle et conditionne l'efficacité d'ensemble de la démarche. Elle vise à préciser le périmètre géographique et fonctionnel de l'organisation qui doit être pris en compte, puis à identifier tout ce qui peut orienter les choix en rapport avec la spécificité de l'organisation. Notamment, il convient de prendre en compte aussi bien le contexte externe (demande des actionnaires, des autorités chargées de la réglementation et du contrôle, contrats existants et niveaux d'exigence associés, environnement politique, social, culturel, juridique, économique et financier, dépendances, etc.), que le contexte interne (histoire et culture de l'organisation, style de gouvernance et de pilotage, politique interne de gestion des ressources humaines, informatiques, matérielles et immatérielles, stratégie et objectifs internes, organisation, processus, système d'information, flux, etc).

Cette première étape doit permettre :

- de définir un PCA cohérent avec la stratégie de l'organisation,
- d'identifier les relations avec les parties prenantes (clients, fournisseurs, autorités administratives...),
- de lister les besoins et attentes de ces parties prenantes,
- de lister les exigences légales, réglementaires et contractuelles ayant un lien avec la continuité d'activités,
- de définir les facteurs internes et externes qui peuvent influencer le PCA.

III.4.2 Définition d'un périmètre

Définir le périmètre est un préalable indispensable à la mise en œuvre d'un SMCA (système de management de continuité d'activité. Avec un périmètre organisationnel, fonctionnel et physique clair il est plus facile d'obtenir l'appui de la Direction et de commencer à mobiliser les parties concernées.

Toutes exclusions du périmètre doit être justifiée.

Le périmètre organisationnel représente les directions, services, filiales pris en compte.

Le périmètre fonctionnel concerne les produits et/ou services concernés (souvent liés au périmètre organisationnel).

Le périmètre physique regroupe tous les emplacements physiques, à la fois internes et externes, qui sont inclus dans le SMCA.

Une fois le périmètre identifié et clairement délimité il convient de le communiquer dans l'organisation.

III.4.3 Obtenir l'implication et l'engagement de la Direction

Toute réussite d'un projet SMCA est assujettie à une forte implication de la Direction.

L'engagement de la Direction peut s'obtenir de différentes façon (liste non exhaustive) :

- participation de la Direction au Comité de Pilotage SMCA,
- signature de la politique SMCA par le top management,
- allocation des ressources pour le projet,
- le PCA est directement rattaché à la Direction Générale,
- le « sponsor » du projet SMCA est un membre de la Direction.

III.4.4 Politique et objectifs du PCA

La Direction de l'organisation doit établir et démontrer son adhésion à la politique de continuité des activités.

Cette politique doit inclure ou faire référence :

- aux objectifs de continuité des activités de l'organisation,
- au périmètre du plan de continuité des activités, en précisant les exclusions.

En plus de recevoir l'adhésion de la Direction de l'organisation, cette politique de continuité des activités doit :

- être communiquée à toute personne travaillant pour, ou en lien étroit avec l'organisation,
- être révisée à intervalles réguliers ou lorsqu'un changement significatif intervient dans l'organisation.

La définition du périmètre et des objectifs doit intégrer les points suivants :

- exigences pour la continuité des activités,
- objectifs organisationnels et obligations,
- niveaux de risques acceptables,
- devoirs statutaires, réglementaires et contractuels,
- intérêts des parties prenantes.

III.4.5 Mise à disposition des ressources

L'organisation doit déterminer et mettre à disposition les ressources nécessaires pour établir, mettre en œuvre et maintenir le SMCA.

L'organisation des acteurs du PCA et leur rôle au sein du plan doivent être définis et documentés.

La Direction de l'organisation doit désigner un responsable en charge de la politique PCA et de sa diffusion. D'autres personnes doivent être désignées pour gérer le suivi et la maintenance du SMCA.

III.4.6 Compétences

L'organisation doit s'assurer que l'ensemble des acteurs désignés du PCA dispose des compétences nécessaires pour assumer le rôle qui leur est assigné.

Cela implique de :

- déterminer les compétences de ces personnels,
- assurer leur formation spécifique au PCA,
- s'assurer des résultats de ces formations,
- d'assurer des mises à jour régulières des niveaux de compétences dans le cadre du PCA.

7. Contrôle et gestion documentaire

Concernant la documentation, des contrôles doivent être établis pour s'assurer :

- qu'elle reste lisible, aisément identifiable et traçable,
- qu'elle est stockée, protégée et disponible.

Ces contrôles doivent également permettre de s'assurer que :

- les documents ont été approuvés et validés,
- les documents ont été révisés, mis à jour et revalidés,
- les mises à jour et modifications apportées sont identifiables,
- les documents d'origine externe sont identifiés et leur diffusion contrôlée,
- les documents devenus obsolètes sont retirés ou clairement identifiés par rapport aux documents maintenus.

Pour maintenir l'activité au niveau exigé par les objectifs et obligations identifiés, les processus doivent répondre à des objectifs de sécurité, que l'on appelle « attentes » ou « besoins » et qui doivent être identifiés.

À partir des discussions avec les responsables des métiers, il est possible de dégager des attentes, qui peuvent être sériées par critères, sous la forme D.I.C.T.E.S :

Disponibilité, continuité de service, régularité, résistance aux dysfonctionnements et aux ruptures, robustesse. Ceci doit pouvoir être mesurable, par exemple en termes de fiabilité des prestations.

Intégrité, c'est-à-dire que le service/produit livré est bien celui attendu, dans l'état prescrit. Si ce n'est pas le cas, le service n'est pas rendu, conduisant à un arrêt (plus ou moins long) du service.

Confidentialité, protection des informations sensibles. Une perte de confidentialité peut conduire à l'arrêt de certaines activités très sensibles, voire à la faillite de certaines organisations (cf. les cas présentés en annexe).

Traçabilité, visibilité, connaissance des événements. La traçabilité peut être indispensable pour permettre d'assurer des prestations (par exemple le transport de matières dangereuses).

Évolutivité, capacité à s'adapter aux changements et à l'environnement et donc à assurer la robustesse. L'absence d'évolutivité peut conduire à l'arrêt dans des contextes changeants.

Sûreté, capacité à limiter les effets d'actes malveillants.

Lors de cette étape, il est souhaitable de quantifier le niveau du besoin de continuité, en utilisant trois indicateurs :

1. Le niveau de service minimum (une perte de service qui maintient le fonctionnement au-dessus de ce seuil affecte peu le service final. A contrario une perte de niveau de service en dessous de ce seuil est considérée comme une indisponibilité). Ce seuil peut être défini comme un pourcentage de conformité minimum ou un pourcentage de produits/services commandés livrés à la date/heure convenue. Durant la phase de reprise d'activité après un sinistre, il est possible de définir des seuils plus faibles, en mode dégradé.

2. Le niveau d'indisponibilité minimum. Tout arrêt de durée inférieure à ce niveau est tolérable. Pour des indisponibilités de courtes durées et relativement fréquentes l'exigence est exprimée en durée maximale d'interruption et en fréquence maximale, ce qui se combine en pourcentage de temps d'indisponibilité pendant une durée significative. Pour ce qui concerne un sinistre, rare par définition, la mesure se fait par la durée maximale d'interruption de service acceptable (DMIA).

3. Les ressources qui restent indispensables pour permettre la reprise de l'activité. Elles peuvent s'exprimer en quantité de stock à préserver, de locaux de repli, ou de niveau de mise à jour des données sauvegardées (ce qui revient à définir la perte de données maximale admissible, depuis la dernière sauvegarde).

Pour illustrer la notion de DMIA, on peut citer l'exemple du processus de livraison ou de fourniture de certains produits ou services sensibles qui ne peut accepter un délai de retard (DMIA) supérieur à 12 heures (ce peut être le cas d'une livraison de médicaments), ou supérieur à 30 minutes (une intervention de service d'urgence par exemple). Dans un autre domaine, on peut citer l'exemple d'un processus de paye qui ne peut pas accepter un retard (DMIA) supérieur à trois jours, en mode dégradé (avec un versement de provisions sur salaires). Cette possibilité de pouvoir fonctionner en mode dégradé permet une interruption maximale (DMIA) du fonctionnement normal de plusieurs mois. Une autre formulation consiste à dire que la durée maximale de fonctionnement en mode dégradé est de plusieurs mois.

Le mode dégradé est souvent présenté comme un palliatif sans qu'il y ait une analyse précise de son contenu. Cependant, pour tout mode dégradé il convient de :

- Définir les circonstances de sa mise en place. Intégrer les aspects réglementaires spécifiques au mode dégradé, et notamment les modifications envisageables des textes réglementaires dans des circonstances exceptionnelles.
- Définir des procédures spécifiques et des mesures d'ordre juridique. Pouvoir transférer le personnel sur des postes nouveaux.
- Faire éventuellement appel à l'intérim.
- Respecter les textes réglementaires spécifiques (comme dans le domaine du transport de voyageurs ferroviaire ou aérien, avec des dispositifs permettant d'adapter les moyens de transport aux ressources humaines disponibles, dans le cadre d'un dialogue social).
- Disposer de solutions de dernier secours, connues et rapidement mises en œuvre

III.5 Business Impact Analysis (BIA)

Cette phase de la mise en œuvre du SMCA doit permettre d'identifier les activités critiques de l'organisation et les ressources minima nécessaires pour fonctionner en mode dégradé, de comprendre les menaces qui pèsent sur ses activités et de déterminer des actions appropriées pour minimiser voire annuler les risques identifiés.

a) Les objectifs d'un BIA

Le BIA doit permettre :

- d'obtenir une compréhension des produits et services clés de l'organisation ainsi que des processus dont ils dépendent,
- de déterminer les activités prioritaires pour l'organisation et leur délai maximum d'interruption,
- d'identifier les ressources clés nécessaires à la continuité et à la relève des activités,
- d'identifier les dépendances (internes et externes).

b) Les étapes du BIA

Les principales étapes pour réaliser une étude d'impact sur les activités sont les suivantes :

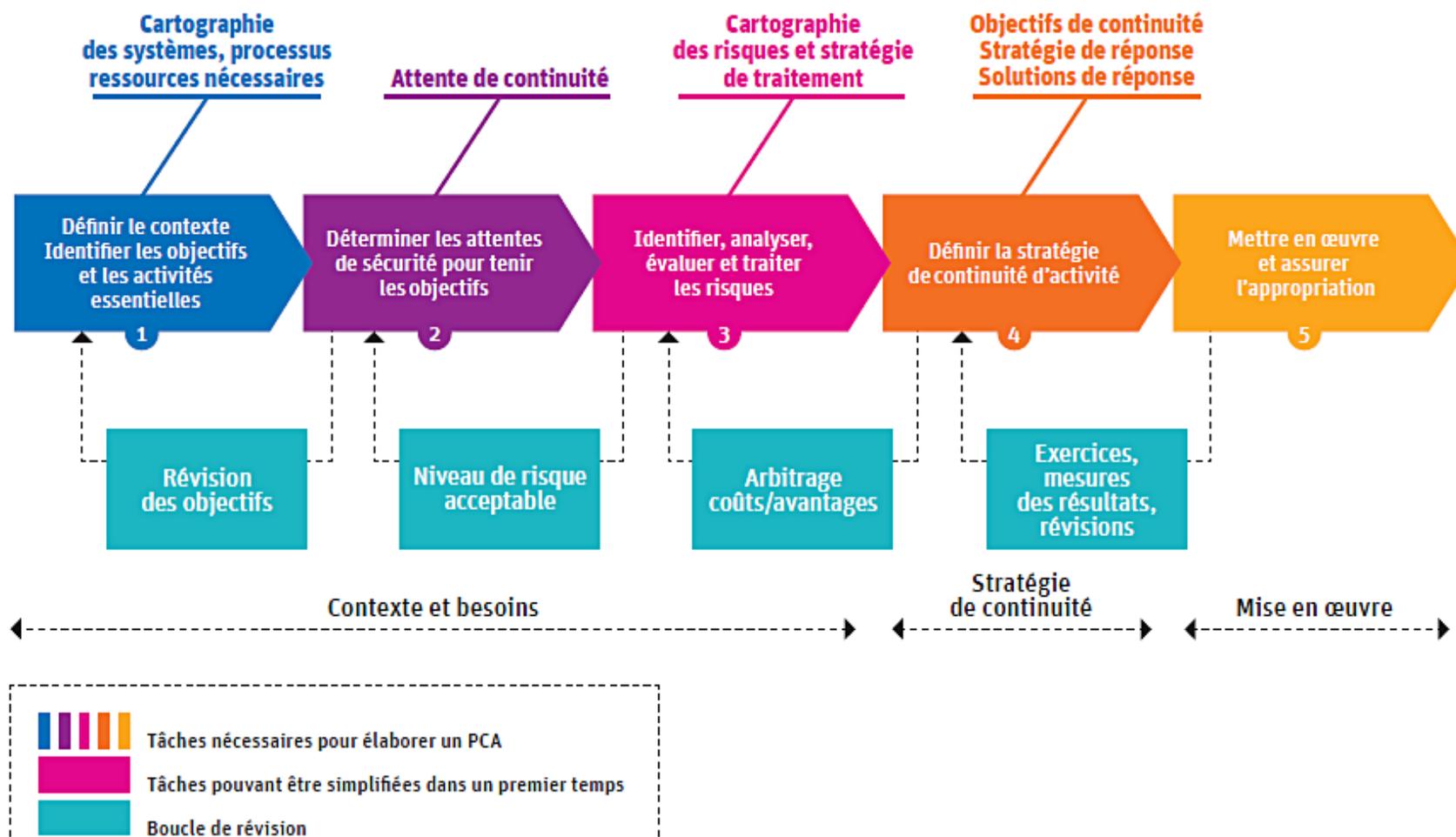
- identifier les activités et processus critiques de l'organisation,
- analyser les impacts qui résulteraient d'un arrêt de ces activités et processus critiques (sur une échelle de 1 à 4) et déterminer comment ces impacts évolueraient dans le temps en cas d'arrêt prolongé,
- établir le temps d'arrêt ou d'indisponibilité maximum supportable (Tams/Tims) – Maximum tolerable period of disruption – des processus et activités critiques,
- identifier et considérer toute autre activité critique dépendant des fournisseurs et autres parties prenantes,
- estimer le délai cible de rétablissement (RTO : Return Time Objective) des activités après un sinistre (délai toujours inférieur à la période maximum tolérable d'arrêt),

Réalisation d'un BIA pour LGA :

Tableau 0-5 BIA LGA

1 journée	1 à 3 jours	3 à 7 jours	1 à 2 semaines	1 mois	3 mois	Produits
1	2	2	2	3	4	Oxygène
1	1	2	2	3	3	Azote
1	1	2	2	3		Argon
1	1	1	2	3	3	Oxyde éthylène
1	1	1	1	3	3	CO2

Démarche de réalisation



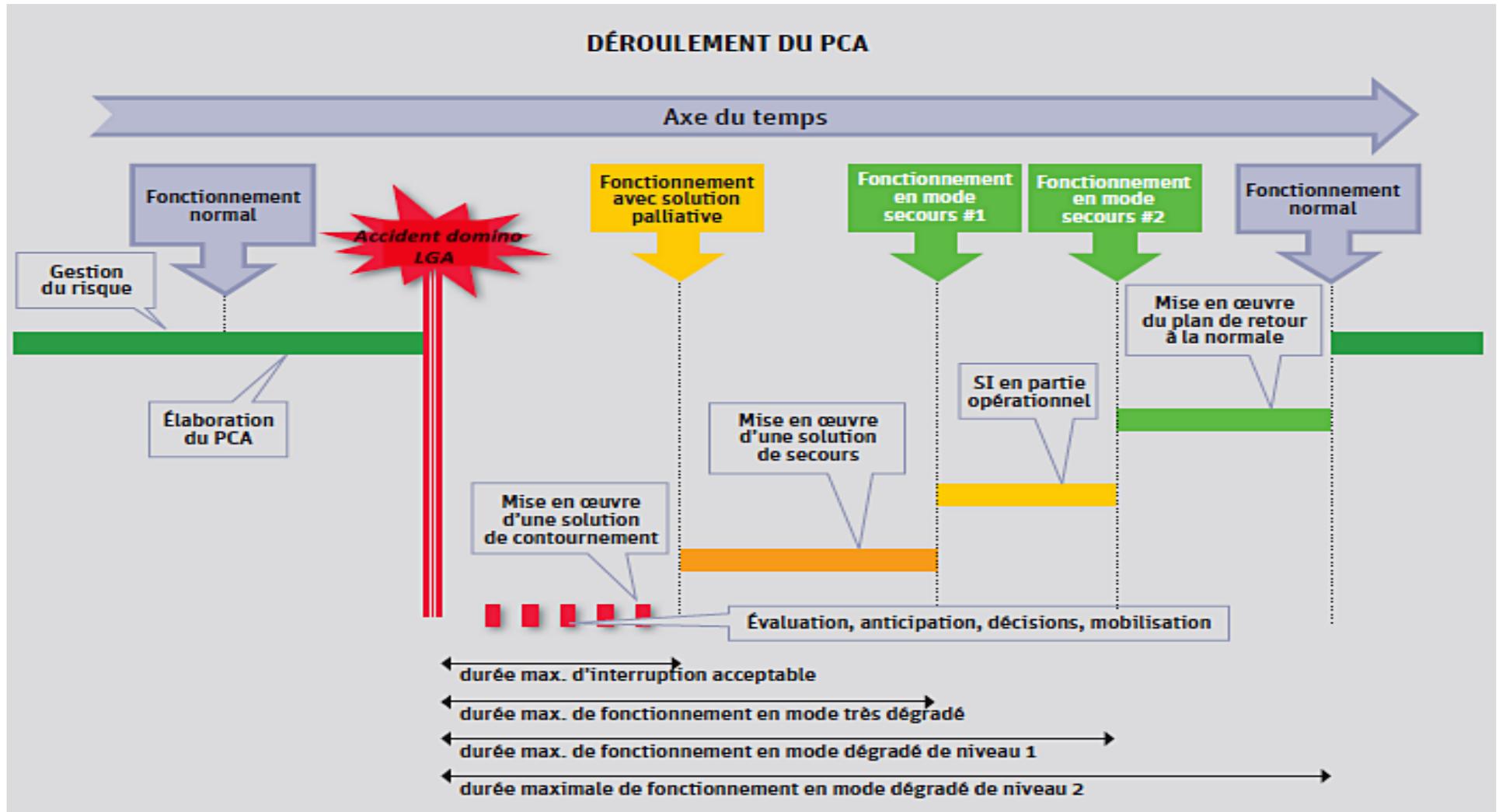


Figure 0-3 Déroulement du PCA après l'événement domino au sein de LGA

Conclusion générale

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'élaboration d'une méthodologie d'étude des effets dominos et son application au niveau de LGA, situé à Réghaia. Pour ce faire, nous avons procédé comme suit :

La première partie du travail c'est faite en analysant plusieurs méthodes existantes d'étude des effets dominos et de leurs limites. Nous nous sommes basés sur cela afin de réaliser une méthode qui regroupe le moins de limites possibles. Une fois la méthode posée, nous sommes ensuite passés à son application. Nous avons effectué une étude critique de l'étude de danger existante puis nous avons enchaîné avec une analyse de l'accidentologie liée aux entreprises ayant des produits de même type que LGA et des accidents à effets dominos, l'analyse s'est faite sur la base de 224 accidents. De ces étapes nous avons pu déterminer les événements primaires les plus susceptibles d'engendrer des effets dominos au sein de LGA et qui sont :

- VCE au niveau de l'atelier CCAM (cause hydrogène).
- VCE au niveau du parc bouteilles d'acétylène.
- Incendie au niveau de l'atelier CCAM (cause hydrogène).
- Incendie au niveau du parc bouteilles d'acétylène.

Grace aux simulations à l'aide des logiciels nous avons pu déterminer les effets de ces événements et la chaîne d'événements qu'ils engendreront ainsi que le niveau de celle-ci. Nous avons ainsi construit 3 réseaux bayésiens.

Des calculs sur les probabilités d'occurrences des événements ont été faits et suivis de calculs de probabilités de combinaisons d'événements. Enfin nous avons pu déterminer l'indice de risque individuel qui permet de délimiter les zones où toute personne présente est touchée par l'effet. Ces données permettront ainsi une évaluation très concrète du risque.

Une autre partie a été consacrée aux effets dominos externes, nous y avons appliqué un cadre nommé HAZWIM qui permet d'apporter des solutions solides aux accidents dominos externes. Nous avons appliqué la partie qui concerne LGA et détaillé la partie que doit effectuer l'entreprise en collaboration avec AIR LIQUID.

Nous avons achevé cette étude par la présentation de l'impact financier des événements dominos présentés qui s'élèverait à plus de 2.000.000.000 DA en terme d'installation et plus

de 2.700.000 DA journalière en pertes brutes en terme de production à l'arrêt. Nous avons également montré l'impact indirect de ces événements dominos sur d'autres entreprises et enfin nous avons proposé l'implémentation d'un plan de continuité d'activité.

Nous tirons beaucoup d'enseignements de ce travail, notamment la complexité de détermination de manière précise le flux du risque du fait que c'est une fonction multiparamétrique extrêmement complexe de tous les facteurs circonstanciels entourant la source de l'événement. Nous avons également pu constater que le domaine de l'étude des effets dominos est assez récent et qu'il reste beaucoup de travail à y effectuer.

Bibliographie

- [1] ARIA : Analyse, Recherche et Information sur les Accidents ; Retour d'expériences sur les accidents technologiques.
- [2] Documents internes LGA
- [3] Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S.A., 2010. A new method for assessing domino effect in chemical process industry. *Journal of Hazardous Materials* 182, 416–426.
- [4] Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S., 2005. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials* 127, 14–30.
- [5] Farid Kadri, Eric Chatelet, Babiga Birregah 2011. Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils. Workshop interdisciplinaire sur la sécurité globale, 1-15.
- [6] Journal officiel de la république Algérienne N°37, Dimanche 8 Joumada El Oula 1427 Correspondant au 4 juin, Décret exécutif n° 06-198 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement, Edition original, p.8.
- [7] SAADIS, 18 Décembre 2015. Développement et validation d'une approche globale, dynamique et participative d'évaluation environnementale stratégique. Doctorat de l'Université El Hadj Lakhdar BATNA, Institut d'Hygiène et de Sécurité Industrielle, p.44.
- [8] http://www.biostatisticien.eu/springeR/livreR_presentation.pdf , consulté le 25/05/2019 à 15h00.
- [9] Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999a). Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 361-378.
- [10] Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999b). Assessment of risks posed by chemical industries application of a new computer automated tool MAXCRED-III. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12(6), 455-469
- [11] www.arbre-analyste.fr , consulté le 28/05/2019 à 13h00.
- [12] INERIS, 2004, Guide technique relatif aux valeurs seuils des effets des phénomènes accidentels des installations classées
- [13] Khan F.I., and Abbasi S.A., 1998, Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress-AIChE*, 17(2):107-113.

[14] Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., 2011. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Journal of Reliability Engineering and System Safety*. 96, 925–932.

[15] Hind Bouchra MENAI & Tiziri AIT MESSAOUD, Juin 2018.. Etude des effets dominos et optimisation de la surveillance des paramètres critiques des Process à haut risque - cas du centre de maintenance BHGE-ALGESCO. Mémoire de fin d'études. Département de Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

[16] Bahman Abdolhamidzadeh a, Tasneem Abbasi b, D. Rashtchian a, S.A. Abbasi, 2010, Domino effect in process-industry accidents an inventory of past events and identification of some patterns.20p.

[17] G.L.L. Reniersa, W. Dullaertb, B.J.M. Alec., K. Soudana, 2005, Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim

Annexes

Annexe 1 : Base de données accidents liés au gaz de l'air (Aria)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Numéro ARI	Pays	Commune	Type Accide	Type évèn	Matières	Equipement	Classe de da	Causes prof	Causes prem	Conséquenc	Echelle	URL	Contenu
2	51934	FRANCE	JOUE-LES-TO	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7664-41-7]	A Emballage,P	Press. Gas,Press. Gas,Ox.		Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	A 14h20, dan
3	51371	FRANCE	BEZIERS	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[7647-01-0-A	A Emballage,P	Water-react.	Ergonomie in	Mal effectué	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 11h30, u
4	51199	FRANCE	FOS-SUR-ME	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[1333-74-0]	F Compresseu	Press. Gas,Press. Gas,Flan		Autre,Other	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 1h25, l'e
5	50778	FRANCE	FOS-SUR-ME	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fire	[7782-44-7]	C Compresseu	Ox. Gas 1,Ox. Gas 1,Press.		Perte de con	CONSÉQUEN	2H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 8h30, ur
6	50683	FRANCE	PORTET-SUR	IC,CLASSIFIE	Rejet instant	[10024-97-2]	AUTOMATE E	Ox. Gas 1,Ox. Gas 1,Press.		Panne,Malfu	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Le disque de
7	50206	FRANCE	DUNKERQUE	ASP,PE,AUTF	Rejet prolong	[A-M087]	GA Réservoir,tai	Press. Gas,Press. Gas,Acu		Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 9 h, une
8	50089	FRANCE	KILSTETT	TMDROUTE,1	Atteinte à l'i	[7727-37-9]	A Citerne de tr	Press. Gas,Press. Gas,Res		Accident de	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 2h15 sur
9	50674	FRANCE	BEZIERS	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[7664-41-7]	A Réservoir,tai	Press. Gas,Pr	Procédures	Chaleur intense,Heat wav	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 14 h, de	
10	50099	FRANCE	LILLEBONNE	CANATMD,P	Rejet prolong	[7727-37-9]	A Tuyauterie (	Press. Gas,Pr	Identificatio	Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Caractéristiq
11	49493	FRANCE	LE BLANC-MI	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fire	[A-M043]	PE Bac,Tank,Filt	Press. Gas	Procédures	Décompositi	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 3h25, da
12	49492	FRANCE	LE BLANC-MI	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fire	[A-M043]	PE Bac,Tank	Press. Gas	Identificatio	Décompositi	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 1h40, da
13	49026	FRANCE	SANDOUVILL	CANATMD,P	Rejet prolong	[7727-37-9]	A Piquage,pipe	Press. Gas,Press. Gas,STO		Perte de confinement , ét	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Lors de trava	
14	48104	FRANCE	VILLENEUVE-	IC,CLASSIFIE	Presque acci	[1305-78-8]	C Pompe,Pum	Skin Irrit. 2,Skin Irrit. 2,Eye		Précipitations,Pre	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usi	
15	49031	FRANCE	NOORDPEEN	CANATMD,P	Rejet prolong	[7782-44-7]	C Tuyauterie (	Ox. Gas 1,Ox. Choix des éc		Perte de confinement , ét	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Une fuite est	
16	47862	FRANCE	CHALON-SUF	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[10294-34-5]	Pompe,Pum	Press. Gas,Pr	Identificatio	Panne totale	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Une légère fi
17	50661	FRANCE	MITRY-MORY	IC,CLASSIFIE	Rejet instant	[7782-50-5]	C Citerne de tr	Skin Irrit. 2,S	Organisation	Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Suite à la réc
18	47641	FRANCE	MITRY-MORY	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7647-01-0-A	A Emballage,P	Press. Gas,Skin Corr. 1B,Sl		Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usi
19	47155	FRANCE	SASSENAGE	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[51602-38-1]	A Emballage,P	Ox. Liq. 1,Ox. Liq. 1,Ox. Li		Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Sur le parkin
20	46772	FRANCE	SANDOUVILL	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[7664-41-7]	A TRAITEMENT	Press. Gas,Press. Gas,Acu		Joint endommagé,Damag	0H, 0En, 0Ec,	https://www	De l'ammoni	
21	46767	FRANCE	SAINT-QUEN	ASP,PE,IC,CL	Explosion,Ex	[67-64-1]	AC Emballage,P	Press. Gas,Press. Gas,Flan		Perte de con	Blessés emp	2H, 0En, 0Ec,	https://www	A 9h30, un ch

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
22	46459	FRANCE	PORTET-SUR	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fire	[7440-37-1] /	Armoire - tal	Ox. Gas 1,Ox	Organisation	Dangers late	Blessés emp	1H, 1En, 2Ec,	https://www	Dans une usir
23	46408	FRANCE	LIMAY	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fire	[67-64-1] ACI	Emballage,P	Press. Gas,P	Procédures €	Dangers late	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usir
24	46091	FRANCE	MITRY-MORY	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7782-50-5] C	Emballage,P	Skin Irrit. 2,S	Ergonomie in	Perte de con	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usir
25	45525	FRANCE	RICHEMONT	IC,CLASSIFIED	INSTALLATI	[A-M001] HU	Transformat	Aquatic Chronic 3,Aquatic Chronic 3			CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	L'incendie d'u
26	45132	FRANCE	VILLENEUVE	ASP,PE,IC,CL	Explosion pr	[7440-37-1] /	Emballage,Packaging	Choix des éc		Rupture,Fail	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usir
27	44432	FRANCE	RICHEMONT	IC,CLASSIFIED	Explosion,Ex	[] INCONNU	Onduleur redresseur,Inverter - rectifie			Panne,Malfu	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Un transform.
28	44248	FRANCE	PARDIES	IC,CLASSIFIED	Incendie,Fire	[] INCONNU	Armoire - tal	Skin Corr. 1B	Gestion des	Panne,Malfu	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une unit
29	43512	FRANCE	PORTET-SUR	ASP,PE,IC,CL	Explosion,Ex	[7782-44-7] C	Emballage,P	Ox. Gas 1,Ox. Gas 1,Press. Gas,Press. G			CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 12h20 da
30	44391	ETATS-UNIS	LA PORTE	ASP,PE,IC,CL	Explosion,Ex	[] INCONNU / INDETERMINE					air,air,Blessé	2H, 0En, 0Ec,	https://www	Une explosio
31	42269	FRANCE	RICHEMONT	ASP,PE,IC,CL	Autre,Other,	[A-M038] M/	Dispositif de dégazage,De	Gestion des		Vent,Wind,F	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Lors du redén
32	42107	FRANCE	MARTIGUES	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[1333-74-0] F	Citerne de tr	Press. Gas,Press. Gas,Flan		Perte de confinement , ét	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Une fuite d'hy	
33	41979	FRANCE	MARTIGUES	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7782-50-5] C	Emballage,P	Skin Irrit. 2,Skin Irrit. 2,Ox		Perte de confinement , ét	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une enti	
34	42106	FRANCE	FOS-SUR-ME	IC,CLASSIFIED	Incendie,Fire	[8006-14-2] GAZ NATUREL	Press. Gas,Press. Gas,Flam. Sol 2,Flam.				CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Sur une plate
35	39536	FRANCE	MARTIGUES	ASP,PE,IC,CL	Explosion pr	[7782-50-5] C	Réservoir,tal	Skin Irrit. 2,S	Identificatio	Perte de con	Blessés emp	2H, 0En, 1Ec,	https://www	A 8h47, sur ur
36	39495	FRANCE	SASSENAGE	IC,CLASSIFIED	Rejet prolong	[7732-18-5-GAZ] VAPEUR	Ox. Liq. 2					0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usir
37	38970	FRANCE	MOISSY-CRA	IC,CLASSIFIED	Rejet prolong	[7727-37-9] /	Citerne de tr	Press. Gas,Press. Gas,STO		Accident de	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usir
38	38436	FRANCE	RICHEMONT	CANATMD,P	Explosion pr	[7782-44-7] C	Tuyauterie (	Ox. Gas 1,Ox	Organisation	Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 2Ec,	https://www	Enfouie depu
39	36165	FRANCE	MARTIGUES	ASP,PE,IC,CL	Rejet de mat	[7782-50-5] C	Pompe,Pum	Skin Irrit. 2,S	Formation et	Action non r	air,air,CONSI	2H, 0En, 0Ec,	https://www	Du chlore liqu
40	38402	FRANCE	JARRIE	IC,CLASSIFIED	Autre,Other,	[] INCONNU / INDETERMII	Ox. Liq. 2	Procédures €		Foudre,Light	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Lors d'un orag
41	35883	FRANCE	PORT-JEROM	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[A-C018] HYC	Réservoir,tal	STOT SE 1	Organisation	Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 1En, 0Ec,	https://www	Une fuite d'hy
42	34845	FRANCE	BASSENS	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fire	[74-86-2] ACI	Emballage,P	Press. Gas,P	Gestion des	Perte de con	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Un employé c

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
43	34835	FRANCE	RICHEMONT	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[A-M025] FL	Onduleur redresseur,Inve		Gestion des risques,Risk r		CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Une explosior
44	34478	FRANCE	SASSENAGE	IC,CLASSIFIE	Autre,Other	[] INCONNU / INDETERMI		Ox. Liq. 2	Gestion des	Mal effectu	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une entr
45	36725	FRANCE	MOISSY-CRA	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fir	[7439-90-9] KRYPTON,[74		Press. Gas,Pi	Gestion des risques,Risk r		CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Un départ de f
46	33963	FRANCE	PORCHEVILL	ASP,PE,IC,CL	Explosion,Ex	[7803-62-5] S	Emballage,P	Press. Gas,Pi	Formation et	Autre,Other	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin
47	32695	FRANCE	SANDOUVILL	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fir	[A-C021] MA	Echangeur d	STOT SE 1	Formation et	Action non r	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Un feu se décl
48	30887	FRANCE	ROGNAC	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7727-37-9] A	Emballage,P	Press. Gas,Press. Gas,Flam. Sol 2,Acute			BLESSES TOT	2H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin
49	30375	FRANCE	SALAISE-SUR	ASP,PE,IC,CL	Autre phéno	[7727-37-9] AZOTE		Press. Gas,Pi	Gestion des	Perte d'utilit	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin
50	30325	FRANCE	DENAIN	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fir	[74-85-1] ET	Réservoir,ta	Press. Gas,Press. Gas,Acu		Foudre,Light	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Un feu se décl
51	30157	FRANCE	JARRIE	ASP,PE,IC,CL	Autre,Other	[A-C028] OXYDES DE FER,[		Ox. Liq. 2	Gestion des	Mal effectuée,Yet poorly	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin	
52	26146	FRANCE	JARRIE	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[7664-41-7] A	Clapet,Ched	Press. Gas,Pi	Procédures e	Perte de con	Blessés emp	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Une fuite de 1
53	25494	FRANCE	SALAISE-SUR	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fir	[1333-74-0] F	Emballage,P	Press. Gas,Pi	Ergonomie in	Rupture,Fail	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin
54	24872	FRANCE	JOUE-LES-TO	ASP,PE,IC,CL	Rejet prolong	[124-38-9] DI	Dispositif de	Ox. Gas 1,Ox. Gas 1,Press.		Chaleur inte	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Alertés par un
55	25587	FRANCE	SAINT-YRIE	ASP,PE,IC,CL	Rejet de mat	[124-38-9] DI	Emballage,Packaging		Gestion des	Chaleur inte	CONSEQUEN	3H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans la cour d
56	29220	ALLEMAGNE	LAICHINGEN	IC,CLASSIFIE	Incendie,Fir	[7782-44-7] C	Vanne robin	Ox. Gas 1,Ox	Ergonomie in	Froid intense	CONSEQUEN	2H, 0En, 1Ec,	https://www	Une fuite d'ox
57	21868	FRANCE	DOUAI	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[6484-52-2-E	Bac,Tank,Var	Ox. Liq. 3,Ox	Organisation	Défauts mat	CONSEQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans un établ
58	21119	FRANCE	GRAND-COU	IC,CLASSIFIE	Rejet de mat	[7664-41-7] AMMONIAC		Press. Gas,Pi	Gestion des risques,Risk r		CONSEQUEN	0H, 1En, 0Ec,	https://www	Un rejet d'am
59	20156	FRANCE	VITRY-SUR-S	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[68476-30-2]	Réservoir,ta	Carc. 2,Carc. 2,Press. Gas		Perte de con	CONSEQUEN	0H, 1En, 0Ec,	https://www	Des hydrocarb
60	16632	FRANCE	CHALON-SUF	ASP,PE,IC,CLASSIFIED INS		[7782-50-5] C	Capteur,Sen	Skin Irrit. 2,Skin Irrit. 2,Ox. Gas 1,Ox. G		BLESSES TOT	1H, 0En, 0Ec,	https://www	Sur un site en	
61	15208	FRANCE	CHALON-SUF	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fir	[7803-62-5] S	Emballage,P	Press. Gas,Pi	Procédures e	Autre,Other,	CONSEQUEN	0H, 0En, 2Ec,	https://www	Sur un site cor
62	16072	FRANCE	PIERRELATTE	IC,CLASSIFIE	Rejet de mat	[7782-44-7] C	Actionneur a	Ox. Gas 1,Ox. Gas 1,Press.		Panne,Malfunction,Perte	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Sur un site pro	
63	10316	ALLEMAGNE	HÜRTH	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[7782-50-5] C	Capteur,Sen	Skin Irrit. 2,S	Choix des éc	Panne,Malfu	BLESSES TOT	1H, 0En, 1Ec,	https://www	Dans une unit,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
64	8882	ROYAUME-U	MANCHESTE	IC,CLASSIFIE	Rejet de mat	[74-82-8] ME	Dispositif de	Press. Gas,Pr	Identificatio	Rupture,Fail	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans la zone c
65	194	ETATS-UNIS	LAKE CHARLE	IC,CLASSIFIE	Rejet de mat	[7664-41-7]	Actionneur a	Press. Gas,Press.	Gas,Acute Tox. 3 (inh	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Vers 2 h 30, à l	
66	64	NORVEGE	PORSGRUNN	ASP,PE,IC,CL	Explosion,Ex	[7647-01-0-A	Tuyauterie (	Skin Irrit. 2,S	Gestion des risques,Risk r	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Une explosior
67	18107	FRANCE	RICHEMONT	ASP,PE,IC,CL	Incendie,Fir	[7782-44-7]	Vanne robin	Ox. Gas 1,Ox	Gestion des risques,Risk r	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une souf	
68	2062	ETATS-UNIS	CLINTON	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[7664-41-7]	AMMONIAC,[	Press. Gas,Press.	Gas,Acute Tox. 3 (inh	BLESSES TOT	2H, 0En, 0Ec,	https://www	Une fuite de g
69	6688	ETATS-UNIS	CLEVELAND	IC,CLASSIFIE	Rejet prolong	[7782-50-5]	Réservoir,ta	Skin Irrit. 2,Skin Irrit. 2,Ox	Perte de con	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Un réservoir c	
70	7645	HONGRIE	REPCELAK	IC,CLASSIFIE	BLEVE,BLEVE	[124-38-9] D	Captur,Sensor,Réservoir	Choix des éc	Froid intense	BLESSES GRA	4H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une usin	
71	18108	FRANCE	RICHEMONT	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[7782-44-7]	Clapet,Check	Ox. Gas 1,Ox	Gestion des	Intervention	CONSÉQUEN	0H, 0En, 0Ec,	https://www	Dans une unit
72	5133	JAPON	NC	IC,CLASSIFIE	Explosion,Ex	[7664-41-7]	AMMONIAC,[	Press. Gas,Press.	Gas,Acute Tox. 3 (inh	air,air,BLESS	3H, 0En, 0Ec,	https://www	Une explosior
73	20766	FRANCE	NC	IC,CLASSIFIE	INSTALLATI	[1333-74-0]	HYDROGENE	Press. Gas.Press.	Gas.Flam. Gas 1.Flam.	BLESSES TOT	1H. 0En. 0Ec.	https://www	Dans une unit	

Annexe 2 : Base de données accidents à effet dominos [16]

Accidents involving domino effect, 1917–2009 (F: fire; MaE: major explosion; MiE: minor explosion).

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
1.	1917	Ashton, UK	Explosives factory/ nitrator	Spillage of hot HNO ₃ → F → MaE → F	46	>120	Some 100 houses demolished	Billings & Copland, 1992
2.	1917	Novo Scotia, Canada	Ammunition ship	Collision with another ship → F → MaE	1800	8000	500 Totally blinded; massive property damage	Assheton, 1930
3.	1933	Neunkirchen, Germany	Gasholder/towns gas	MiE → rupture of pipeline → F → MaE	65	"Several hundred"		Kier & Muller, 1983
4.	1936	Saint Chamas, France	TNT production unit/TNT	F → MaE	53	150		MHIDAS, 2009
5.	1943	Ludwigshafen, Germany	BASF works/rail tank car	Leak → VC → MaE	57	439		Marshall, 1987; Nash, 1976
6.	1944	Cleveland, USA	Liquefaction plant/LNG	Tank rupture & leak → F → series of MaE	128	200–400	Severe damage to the plant and property	Marshall, 1987; Nash, 1976
7.	1947	Texas, USA	Ship/ammonium nitrate	F → MaE → MaE	552	>3000	More than 3300 dwellings and 130 business building damaged, 600 automobile and 360 box car damaged, several storage tanks destroyed	Marshall, 1987; Nash, 1976; National Board of Fire Underwriters, 1948; Wheaton, 1948
8.	1948	Ludwigshafen, Germany	Tank car/dimethyl ether	Tank rupture & dispersion of contents → VC	207	3818		Lewis, 1993; Marshall, 1987
9.	1949	Perth Amboy, USA	Asphalt tank	MaE → F	4	–		MHIDAS, 2009
10.	1951	Port Newark, USA	LPG storage/propane	F → MiE → several BLEVEs	0	14	73 Bullet tanks were destroyed, missiles demolished a filling station and ruptured underground water main	Lewis, 1993.
11.	1951	Baton Rouge, USA	Refinery/naphtha	VCE → multiple explosions	2		6.5 Million property damage	Lenoir & Davenport, 1993
12.	1952	Bound Brook, USA	Phenolic resin plant/ phenolic resin powder	Powder smouldering due to overheating → MaE → MaE → MaE	5	21		Lewis, 1993
13.	1953	Campana, Argentina	Refinery/recovery unit/gasoline	VCE → three explosions	2			Lenoir & Davenport, 1993
14.	1953	Miami, USA	Storage unit/LPG	F → F	–	–		MHIDAS, 2009
15.	1954	Lake Port, USA	Storage area/LPG	MiE → MaE	4	–		MHIDAS, 2009
16.	1955	Whiting, USA	Refinery/ hydroformer unit/naphtha	MaE → F	2	40		Lenoir & Davenport, 1993; Lewis, 1993; Mahoney, 1990; Woodworth, 1955
17.	1957	Montreal, Canada	Storage tanks/butane	VC → F → 3 BLEVEs	1		3 Storage tanks damaged	Kier & Muller, 1983
18.	1957	Meraux, USA	Storage tank/diesel oil	Tank collapse → severe fire	1	–		MHIDAS, 2009
19.	1958	Boron, USA	Tank truck/LPG	F → MaEs	1	–		MHIDAS, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
20.	1958	Signal Hill, USA	Refinery/visbreaker plant/oil	Tank eruption → F	2	18		Lewis, 1993; Woodworth, 1955
21.	1959	Deer Lake, USA	Road tanker/LPG	LPG leak and ignition → F → BLEVE	11	10		Kier & Muller, 1983
22.	1959	Mac Kittrick, USA	Storage area/LPG	MiE → BLEVE	–	2		MHIDAS, 2009
23.	1960	Bakersfield, USA	Storage tank/caustic	MiE → F	–	–		MHIDAS, 2009
24.	1961	Perry, USA	Tank truck/LPG	F → MaEs	–	–		MHIDAS, 2009
25.	1962	Pampa, USA	Refinery/isopentane	MiE → F	–	1		MHIDAS, 2009
26.	1962	Doe Run, USA	Ethanolamine plant/ethylene oxide	Internal explosion due to runaway → VC	1	21		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
27.	1962	Marietta, USA	Phenol production plant/benzene	Discharge of benzene through relief valve → VC damage pipework → F	1	3		Mahoney, 1990
28.	1962	Ibbenburen, Germany	Pipeline/hydrogen	MiE → F and toxic release	–	1		MHIDAS, 2009
29.	1963	Evanston, USA	Warehouse/methanol	F → Toxic release	–	1		MHIDAS, 2009
30.	1964	Attleboro, USA	Vinyl chloride polymerization plant/vinyl chloride	Leak → E → MaE	7	40		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
31.	1964	Niigata, Japan	Refinery/oil	Oil spillage F → E → F	2		97 Storage tanks destroyed	Mahoney, 1990
32.	1964	Liberal, USA	Compressor station/propane	VCE → multiple explosions	–		0.5 Million property damage	Lenoir, 1993
33.	1965	Louisville, USA	Neoprene plant/mono vinyl acetylene	Decomposition of mono vinyl acetylene due to overheating → MaEs	12	8		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
34.	1965	Carthage, USA	Process plant/oil	F → MaE and F	–	–		MHIDAS, 2009
35.	1966	Feyzin, France	Refinery storage tanks/propane	Propane leak → F → MaE	18	81	Five spheres destructed	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
36.	1967	Lake Charles, USA	Refinery/iso butane	MaE → major F	7	13		Health and Safety Executive, 1978; Marshall, 1977
37.	1968	Romford, UK	Naphtha	(jet)F → F	–	–		MHIDAS, 2009
38.	1968	Milford Haven, UK	Refinery/hydrocarbons	MiE → F	–	–		MHIDAS, 2009
39.	1968	Port Arthur, USA	Storage tank/petrol	MiE → F	3	5		MHIDAS, 2009
40.	1968	Pernis, Netherlands	Refinery/hydrocarbon vapour	Overflow lead to VC → MaE → F	2	85		Fontein, 1968; Lewis, 1993; MSAPH report, 1968
41.	1968	Leverkusen, Germany	Formamidinesulphinic acid plant/urea	F → MaE	1	14		MHIDAS, 2009
42.	1969	Dormagen, Germany	Ethylene oxide plant/ethylene oxide	MaE → MaE	1	40		MHIDAS, 2009
43.	1969	Glendora, USA	Rail tank car/vinyl chloride	Tank derailment and leak → series		1		Kier & Muller, 1983; Slater, 1978

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
44.	1969	Laurel, USA	LPG tank cars/LPG	Tank derailment lead to serial tank explosions and fireballs	2	>33	Structural damage within 400 ft. Almost all glasses were shattered within half a mile	Eisenberg, Lynch, & Breeding, 1975; Lenoir & Davenport, 1993
45.	1969	Répcelak, Hungary	Carbonic acid/storage/ purified CO ₂	MaE → MaEs	9	15		Chiles, 2001
46.	1969	Round Brook, USA	Reactor/nitrophenol	MiE → MaE	1	1		MHIDAS, 2009
47.	1969	Geary, USA	Rail tank car/butane	F → BLEVE	–	–		MHIDAS, 2009
48.	1969	Long Beach, USA	Tank/petrol	F → MaE	1	83		MHIDAS, 2009
49.	1969	Texas City, USA	Petrochemical/ butadiene	Detonation → VCE	3		30 Million property damage	Lenoir & Davenport, 1993
50.	1970	Beaumont, USA	Oil slope tank/oil	Tank failure and oil spillage → F → F in other 16 tanks nearby				Mahoney, 1990
51.	1970	Crescent, USA	Rail tank car/ propane	Propane leak → F → serial MaEs		66		Lewis, 1993; Strehlow, 1973; Watrous, 1970. MHIDAS, 2009
52.	1970	Ludwigshafen, Germany	Transportation/ propylene	VCE → F and MaE	5	3	2 Barge caught fire and sunk	
53.	1970	Big springs, USA	Refinery/alkylation/ hydrocarbon vapors	VCE → MaE	–		Property damage worth \$9.7 million	Lenoir & Davenport, 1993
54.	1970	Linden, USA	Refinery/ hydrocracking/oil	Physical explosion → VCE and fire	–		Property damage worth \$ 87.6 million	Lenoir & Davenport, 1993
55.	1971	Baton Rouge, USA	Road tanker/ethylene	Physical E → F	–	21		MHIDAS, 2009
56.	1971	Houston, USA	Rail tank car/vinyl chloride monomer	Tank derailment and punctured → serial tank explosions and fires	1	5		Eisenberg et al., 1975; Lewis, 1980
57.	1971	Longview, USA	Polyethylene plant/ethylene	Gas pipe broke → VC → rupture of other ethylene pipelines → VCs	4	60		Eisenberg et al., 1975; Lewis, 1980
58.	1972	Yokkaichi, Japan	Rubber plant/waste water treatment unit/ waste water	MiE → F and reactor rupture	–	–		MHIDAS, 2009
59.	1972	Rio de Janeiro, Brazil	Refinery/storage area/LPG	MiE → BLEVE	37	53		Mahoney, 1990
60.	1972	Duque de Caxias, Brazil	Storage tank/LPG	VCE → BLEVE → series of explosions	39	51		MHIDAS, 2009
61.	1973	Kingman, USA	Rail tank car/propane	(Jet) F → BLEVE and fireball	13	More than 90		Marshall, 1987
62.	1974	Climax, USA	Rail tank car/vinyl chloride monomer	Tank derailment and VCM leak → VC → F → BLEVE				Eisenberg et al., 1975
63.	1974	Beaumont, USA	Hydrocarbons	VCE → F and MaE	2	10		MHIDAS, 2009
64.	1974	Petal, USA	Terminal/salt dome storage/butane	MiE → MaE	–		Glass breakage up to 11 km	Lenoir & Davenport, 1993

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
67.	1975	Beek, Netherlands	Ethylene plant/propylene	VC → F (numerous fires)	14	104 (Inside the factory); 3 (outside)	Damage in a radius of 4.5 km, 6 tanks burned, control room demolished	Lewis, 1980, MSARE, 1976; Van Eijnatten, 1977
68.	1975	Avon, USA	Coking unit/drum/crude oil	F → F	—	—		MHIDAS, 2009
69.	1976	Geismar, USA	Petrochemical plant/polyglycol ether reactor/ethylene oxide and propylene oxide	MaE → major F	—	—		Mahoney, 1990
70.	1976	Baton Rouge, USA	Chemical plant/natural gas	MaE → toxic release	—	—		MHIDAS, 2009
71.	1976	Addyston, USA	Storage area/methanol	MaE → F	—	—		MHIDAS, 2009
72.	1976	Guayaquil, Ecuador	Tanker/LNG	VCE → series of explosions	—	>50		MHIDAS, 2009
73.	1977	Puebla, Mexico	Storage bullets/vinyl chloride monomer	VCM leakage → VCF → 4 BLEVES	1	3		Lewis, 1993.
74.	1977	Westwego, USA	Grain silo/grain dust	MaE → MaE → MaE	36	10		Lewis, 1993.
75.	1977	Galveston, USA	Grain silo/grain dust	MaE → MaE → MaE	15	—		Kier & Muller, 1983; Marshall, 1987 MHIDAS, 2009
76.	1977	Romeoville, USA	Refinery/storage area/diesel fuel	F → F	—	—		MHIDAS, 2009
77.	1978	Abqaiq, Saudi Arabia	Gas processing unit/methane	Gas leak due to internal corrosion → VC → (a pipe section struck a LPG spherical tank → release & VCE)	—	—		Mahoney, 1990
78.	1978	Texas, USA	LPG storage tanks/LPG	Crack due to internal overpressure led to LPG leak → F → BLEVE	7	10		Mahoney, 1990
79.	1979	Pittsfield Township, USA	Road tanker/propane	Leakage → series of explosion	—	—		MHIDAS, 2009
80.	1979	Mississauga, Canada	Rail tank car/propane, etc	Tanks derailment and F → BLEVES and toxic release	—	—		Amyot, 1980; Lewis, 1993; Mississauga, 1979
81.	1979	Tacoma, USA	Hydrogen compression system/hydrogen	MaE → toxic release	—	3		MHIDAS, 2009
82.	1979	Ras Tanura, Saudi Arabia	Refinery/storage tank/petrol	MaE → F	2	6		MHIDAS, 2009
83.	1979	Priolo, Italy	Plastic plant/cumene	F → F	1	—		MHIDAS, 2009
84.	1979	Milligan, USA	Train of tank cars containing ammonia, acetone, chlorine, etc	Derailment → MaEs → F/Tox	0	14	4500 People evacuated; damage worth \$ 1.26 million	MHIDAS, 2009
85.	1980	Deer Park, USA	Ship/vacuum distillate	MaE → F	3	12		MHIDAS, 2009
86.	1980	Bianville, France	Chemical storage depot	MaE → F	—	—		MHIDAS, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injures	Other reported impacts	Reference
87.	1980	Borger, Texas, USA	Refinery/alkylation unit/light HCs	Vessel rupture and HC release → VC		41	Blast destroyed the alkylation unit, whole refinery shutdown	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
88.	1980	Salina Cruz, Mexico	Storage tank/oil	Lightening → F → F	–	–		MHIDAS, 2009
89.	1980	Deer Park, USA	Phenol plant/cumene	F → F	–	–		MHIDAS, 2009
90.	1981	South Hutchinson, USA	Railcar/ammonia	F → MaE	–	–	500 People evacuated	MHIDAS, 2009
91.	1981	Montana, Mexico, USA	Rail tank car/chlorine	Tanks derailment → MaEs	17	1000		Marshall, 1987
92.	1981	West Glamorgan, UK	Refinery/propane	MiE → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
93.	1982	Livingston, USA	Freight train/ petrochemical products	Tank derailment → several explosions	–	–		NTSB annual report, 1983
94.	1982	Philadelphia, USA	Storage tank/cumene	MaE → F	–	–		MHIDAS, 2009
95.	1982	Houston, USA	Tank truck/propane	F → F	–	3		MHIDAS, 2009
96.	1982	Caracas, Venezuela	Electricity company/ storage/oil	E → F → boilover	150	>500		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
97.	1983	Milford Haven, UK	Refinery/storage tank/ crude oil	F → 2 boilovers	–	20		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
98.	1983	Houston, USA	Chemical plant/ methyl bromide	Physical E → toxic release	2	Several	2 Blocks were evacuated	MHIDAS, 2009
99.	1983	Port Neches, USA	Ship/diesel fuel	F → MaEs	–	–		MHIDAS, 2009
100.	1983	Dursley, UK	Diesel engine production plant	F → toxic release	–	5	Hundreds of people evacuated	MHIDAS, 2009
101.	1983	Baton Rouge, USA	Plastic plant/vinyl chloride monomer	MaE → F	–	2	1500 People evacuated	MHIDAS, 2009
102.	1983	Swindon, UK	Process plant/resin	F → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
103.	1983	Dalhousie, Canada	Electrolysis plant	MiE → toxic release	–	–		MHIDAS, 2009
104.	1983	Newark, USA	Storage area/ unleaded gasoline	Tank overfilling → MiEs → MaE	–	–		PresstV, 2009
105.	1984	Las Piedras, Venezuela	Refinery/hydrogen plant/oil	Oil line fractured → F → F (jet fire of a gas pipe)	–	–		Mahoney, 1990
106.	1984	Mexico city, Mexico	Storage tanks/LPG	Line rupture and LPG leak → VC → F → BLEVEs	650	6400	Severe damage to nearby houses, \$ 31 million damage	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
107.	1984	Romeoville, USA	Refinery/absorption column/propane, butane	Column crack → VC → MaE	17	31	Damage to electrical power supply system and fire extinguishing systems	Lewis, 1993; Mahoney, 1990
108.	1985	Bombay, India	Port warehouse/ chemicals	Chain of explosions → major F	–	–	Entire storage complex devastated, a barge caught fire due to flying missiles	MHIDAS, 2009
109.	1985	San Antonio, USA	Storage tank/ammonia	MaE → toxic release	4	23	20 People evacuated	MHIDAS, 2009
110.	1985	Priolo, Italy	Ethylene plant/ Relief system	Relief system	–	–		Mahoney, 1990

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
111.	1985	Naples, Italy	Transportation/oil	MaE → F	4	170		MHIDAS, 2009
112.	1985	Algeciras, Spain	Ship/naphtha	MaE → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
113.	1985	Naples, Italy	Petroleum terminal/oil	Tank overfilling → VC → major F	4	170		MHIDAS, 2009
114.	1986	Petal, USA	Pipeline/LPG	MiE → MaE and fireball	–	12	Residents in 2 mile radius evacuated	MHIDAS, 2009
115.	1986	Thessaloniki, Greece	Oil terminal/oils	Oil spillage and F → several Fs				Browning & Searson, 1989
116.	1987	Antwerp, Belgium	Ethylene oxide plant/distillation column/ethylene oxide	EO decomposition and internal explosion → F		14		Lenoir & Davenport, 1993
117.	1987	Port Herriot, France	Storage tanks/oil	Oil spray and flash → F → MaEs	2	8		Mansot, 1989
118.	1987	Genoa, Italy	Storage facility/ methanol and hexane	F → MaEs	4	1	60 Families and local school evacuated	MHIDAS, 2009
119.	1987	Ciudad Madero, Mexico	Refinery/gasoline	MiE → F	–	–	3000 Residents evacuated	MHIDAS, 2009
120.	1987	Pampa, USA	Petrochemical/ acetic acid plant/ butane	Detonation → VCE	3		Property damage worth \$ 210 million	Lenoir & Davenport, 1993
121.	1988	Perth Amboy, USA	Road tanker/ hexane	F → F	1	–		MHIDAS, 2009
122.	1988	Bombay, India	Storage tank/ benzene	MiE → F	35	16		MHIDAS, 2009
123.	1988	Kings Ripton, UK	Storage/LPG	F → BLEVE	–	–		MHIDAS, 2009
124.	1988	Brisbane, Australia	Chemical factory/ detergent	MiE → toxic release	–	30		MHIDAS, 2009
125.	1989	Antwerp, Belgium	Ethylene oxide plant/ distillation column/ ethylene oxide	Internal explosion → pipework fractured and flame flashed back to another column → internal explosion		5		Kletz, 1990; Mahoney, 1990
126.	1989	Pasadena, USA	Polyethylene plant/HCs	Hydrocarbon vapour release → VC → MaEs (a storage tank and a reactor)	24	>130		Lewis, 1993; Mahoney, 1990
127.	1989	Jonova, Lithuania	Ammonia storage/ ammonia	Ammonia tank rupture → Fs and toxic dispersion	7	57	32,000 Person evacuated	Andersson, 1991; Kletz, 1990
128.	1989	Al Hillah, Iraq	Transportation/ explosives	MaE → F	19	–		MHIDAS, 2009
129.	1989	Baton Rouge, USA	Refinery/ethane and propane	MiE → F	–	–		Mahoney, 1990
130.	1990	Stanlow, UK	Batch reactor/ chemical mixture	(Jet) F → MaE and fireball	1	5		Lewis, 1993
131.	1990	Sydney, Australia	LPG terminal/LPG	Gas Leak → F → BLEVES				MHIDAS, 2009
132.	1990	St. Peters, Australia	Gas depot/LPG	MaE → fireball → MiEs	–	–		MHIDAS, 2009
133.	1991	Coatzacoalcos, Mexico	Petrochemical complex/vinyl chloride plant	MiE → MaE	–	–		Mahoney, 1990

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
134.	1992	La Mede, France	Refinery/hydrocracker unit/hydrocarbon and hydrogen	MaE → F and MiEs			US\$ 180,000,000	The 100 Largest Losses, 2003
135.	1992	Bradford, UK	Chemical warehouse/ azodiisobutyronitrile	AZDN containers ruptured → MiE → Fs		33	Significant air and water pollution Extensive property damage	Health and Safety Executive, 1993 Health and Safety Executive, 1994
136.	1992	Castleford, UK	Chemicals	Jet F → Fs	–	–		
137.	1993	Ringaskiddy, Ireland	Pharmaceutical facility	MaE → large F	–	32	Multinational Monitor, 2009 Guoshun, 2000	
138.	1993	Shenzhen, China	Warehouse/ ammonium nitrate	MaE → MaE	15	141		
139.	1993	Jacksonville, USA	Petroleum terminal/ unleaded gasoline	F → tank overflow → several pool fires	1		Emars, 2009	
140.	1994	Bel Pre, USA	Petroleum plant/ thermoplastic rubber product	MiE → F → MaE				
141.	1994	Milford Haven, USA	Texaco refinery/HCs	Pipe failure → hydrocarbon release → MaE → Fs → flare relief damage → F		26	Two buildings and a tank farm caught fire £ 48 Million damage	Health and Safety Executive, 1993 HSE, 2009
142.	1994	Sioux City, USA	Ammonium nitrate plant/nitric acid	MaE → toxic release	5	18	2500 People evacuated	MHIDAS, 2009
143.	1994	New Delhi, India	Transportation/ nitrocellulose	MaE → major F	8	2		MHIDAS, 2009
144.	1994	Ueda, Japan	Storage tank/ gasoline	MaE → MaE	1	3	70 Residents evacuated	MHIDAS, 2009
145.	1995	Kucove, Albania	Storage tank/ crude oil	F → MaE	1	4		MHIDAS, 2009
146.	1995	Volgograd, Russia	Rail tanker/ propane	F → MaE	–	–		MHIDAS, 2009
147.	1995	Savannah, USA	Chemical storage & transfer facility	F → toxic release			Nearby town evacuated, environmental impact (fish kill)	EPA, 1998
148.	1996	Paese, Italy	LPG loading terminal/LPG	Flash fire → explosion and pool fire → BLEVEs → fireballs	–	–		Zenier, Antonello, Dattilo, & Rosa, 2001
149.	1996	Martinez, USA	Hydrogen plant/hydrogen	MiE → F	–	2		MHIDAS, 2009
150.	1997	Burnside, USA	Grain dryer/LPG	F → BLEVE	2	2		Abbasi and Abbasi, 2007a
151.	1997	Visakhapatnam, India	HPCL refinery/LPG	Tank F → MaE → MaE and Fs	60		\$20 Million damage	Khan & Abbasi, 1999a, 1999b MHIDAS, 2009
152.	1997	Magdalla, India	Transportation/ ethylene chloride and sulphur	F → major F	–	–		
153.	1997	Zamboanga, Philippines	Transportation/ hydrocarbons	F → MiE → Fs	1	6		MHIDAS, 2009
154.	1998	Albert City, USA	Turkey farm/propane	Vehicle struck pipeline → F → BLEVE	2	7		Wolf, 2006
155.	1998	Longford Victoria, Australia	Gas processing plant/ heat exchanger/ hydrocarbon	VCE → major F	2	8		The 100 Largest Losses, 2003
156.	1999	Laem Chabang, Thailand	Refinery/tank farm/gasoline	Tank overfilling → VCE → F	7	18	4000 Residents had to be	PressTV, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
157.	2000	Mexico City, Mexico	Gas plant/natural gas	F → series of explosions	22			Independent, 2009
158.	2000	Gloucester, UK	Waste transfer station	F → MaEs		9		Environment-Agency, 2009
159.	2000	Douglas, USA	Oil field service company/propane	Propane leak → series of explosions (a tank BLEWES)				Fireworld, 2009
160.	2000	Texas, USA	Tanker truck/propane	MiE → MaE	2	1	Evacuated 200 residents	Acusafe, 2009
161.	2000	Ontario, USA	Water treatment plant/corrosive gases	F → series of explosions			Several nearby companies were evacuated	Acusafe, 2009
162.	2001	Ohio, USA	Chemical plant	Chemicals overheated → series of explosions	–	17		Acusafe, 2009
163.	2001	Pennsylvania, USA	Dynamite plant/dynamite and fireworks	MaE → MaEs	1	3	200 Residents evacuated	Acusafe, 2009
164.	2001	Louisiana, USA	Refinery/turbine fuel	Leak → explosion → F	–	2		Acusafe, 2009
165.	2001	Roncador, Brazil	Offshore platform/drain tank/mixture of water and hydrocarbons	E → E and p platform flooding	10	–	USD 515,000,000 damage	The 100 Largest Losses, 2003
166.	2001	Nevada, USA	Chemical plant	F → a series of explosions	–	5		Acusafe, 2009
167.	2001	Michigan, USA	Pressed board manufacturing plant/wood chips	F → MaE	–	9		Acusafe, 2009
168.	2001	Gastonia, USA	Electroplating complex	F → series of explosions	–	–	\$ 1 Million damages	Acusafe, 2009
169.	2001	Delaware, USA	Refinery/sulfuric acid	F → acid spill → releasing a cloud of toxic gas	1	8		Acusafe, 2009
170.	2001	Pennsylvania, USA	Dynamite and fireworks plant	MaE → series of explosions	1	3	200 People evacuated	NYtimes, 2009
171.	2001	Dayton, USA	Chemical & polymer company	Refrigeration system failed → overheating of chemicals → series of explosions				Acusafe, 2009
172.	2001	Toulouse, France	Petrochemical plant/ammonium nitrate warehouse	MaE → MaE	30	More than 5000	€ 2.3 Billion	UNEP, 2009
173.	2001	Conocophillips, Humber Refinery, UK	Refinery/deethanizer overhead pipe/mixture of ethane, propane, butane	Pipe rupture and hydrocarbon release → VC → other pipe ruptures → fireball	0			HSE, 2009
174.	2001	Rio de Janeiro offshore, Brazil	Oil platform/HCs	Tank rupture due to overpressure → damage to various equipment → gas dispersion → F → MaE	12		The platform sank into the water	Petrobras, 2001; EPA, 2001
175.	2001	Mexico City, Mexico	Dye factory/alcohol and methanol	F → MAEs	–	17	More than 5000 people evacuated	Acusafe, 2009
176.	2002	Mississippi, USA	Rubber plant/dryer/	F → MaE	4	8		Acusafe, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
177.	2002	Kuwait	Oil producing plant/ crude oil	Leak → MaE → F	4	–		Acusafe, 2009
178.	2002	Austin, USA	Food processing plant	MiEs → MaE		5		Fireworld, 2009
179.	2003	Perm Region, Russia	Rail tank car/ propane–butane blend	MaE → series of explosions	1			Pravda, 2009
180.	2004	Skikda, Algeria	LNG plant/boiler	VC → MiE → MaE	27	74	7 People missing, nearby electricity generation plant & oil refinery shutdown	Bape, 2009
181.	2004	Chongqing, China	Chemical plant/ chlorine	Chlorine gas leak → MaEs → chlorine dispersion	9	3	150000 people evacuated	Chinadaily, 2009
182.	2004	Vadodra, India	Oil refinery/ slurry reactor	MaE → F	2	16		Thehindu- businessline, 2009
183.	2004	Zahedan, Iran	Truck/gasoline	Truck lost control hit a bus → F → other lorry fire	90	114		UNEP, 2009
184.	2004	Neyshabur, Iran	Rail tank car/variety of chemicals: sulphur, gasoline, fertilizers, cotton wool	Tank derailment → F → MaE	328	460		BBC, 2009; UNEP, 2009
185.	2005	Texas City, USA	BP refinery/ isomerization unit/hydrocarbons	VC → MaE → Fs	15	180	More than 1 billion dollar damage	Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2007
186.	2005	Buncefield, UK	Oil storage terminal/ motor fuel	Tank overfilling → VC → MaE → F	0	60		HSE, 2009
187.	2005	St. Louis, USA	Gas repacking & distribution facility/ propylene	F → MaE s and Fs	1			Chemsafety, 2009
188.	2005	Fort Worth, USA	Solvent & other chemicals	F → MiE → other fires	0	4		Infowars, 2009
189.	2007	Valero McKee Refinery, USA	Refinery/propane deasphalting unit/propane	Propane leak → F → pipe rack collapse → other pipe rupture and chlorine release				CSB, 2009
190.	2008	Shazand, Iran	Chemical plant/2-ethyle hexanol	MaE → MaEs → F	30	38	90% Plant destroyed, up to 300 m glasses were shattered	BBC, 2009
191.	2008	Maricopa, USA	Grain silo/grain	MaE → MaE	–	3		Maricopa360, 2009
192.	2008	Nagothane, India	Polymer plant/LLDPE unit/ cyclone filter	MiE → MaE	4	46		Hindustantimes, 2009
193.	2008	Yizhou City, China	Polyvinyl acetate & other chemicals	F → Es → Fs	16	57	11,500 people evacuated	Topnews, 2009
194.	2008	Lalbagh, Bangladesh	Polymer	F → Fs	6	6	Fifty houses gutted	Ittefaq, 2009
195.	2008	San Antonio, USA	Atlas pallet	F → MaE → F	–	–	–	Ksat, 2009
196.	2008	Torkham,	Oil tankers	MaE → MaE →	–	60	Forty oil tankers	Kbri, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
197.	2008	Toronto, Canada	Sunrise propane industrial gases	MaE → MaE → F	2	54	Evacuation of an area of 1.6 km radius; clean up costs \$ 1.5 million	MHIDAS, 2009
198.	2009	Sao Paulo, Brazil	Chemical depot	F → MaEs → F	—	10	'Dozens evacuated'; major property loss	Dailymail, 2009
199.	2009	Yerevan, Armenia	Synthetic rubber factory	F → MaE → MaE → F	3	24	One person unaccounted; massive property damage	Asbarez, 2009
200.	2009	Ambegaon, India	Chemical plant	F → MaEs	—	1		Saunalahti, 2009
201.	2009	Badami Bagh, Pakistan	Chemical depot/sulphur, sulfuric acid, potassium permanganate, and industrial and textile chemicals	F → several Fs and MaEs	>12		Severe damage to neighboring houses and facilities	Saunalahti, 2009
202.	2009	Delhi, India	Paint factory	E → F	1	12	Fire spread to the nearby buildings causing heavy damage	Thaindian, 2009
203.	2009	Delhi, India	Chemical factory	E → F	2			Thaindian, 2009
204.	2009	Faridabad, India	Footwear industry/ material involved was a highly flammable mixture of chemicals used for making shoes and rubber	E → F	10		5 More people missing	Thaindian, 2009
205.	2009	Himachal Pradesh, India	Air-conditioning manufacturing company	F → E check	8	19		Thaindian, 2009
206.	2009	Punjab, India	Fertilizer factory	F → MiE		2	Losses incurred due to the accident is estimated to be between Rs 80 and 100 million	Thaindian, 2009
207.	2009	Madhya Pradesh, India	Ideal Explosives Limited and Rajasthan Explosives Pvt. Ltd.	MaE → caused MaE in nearby plant	10	>100	The explosions caused damage to at least 15 nearby plants	Thaindian, 2009
208.	2009	West Carrollton, USA	Veolia Environmental Sciences	Leak → E → F	—	2	20 Residences damaged	Chemsafety, 2009
209.	2009	Viareggio, Italy	Freight train/LPG	MaE → 2MaEs → F	15	>50	1000 Residents evacuated, over 100 rendered homeless	Reuters, 2009
210.	2009	Dunkirk, France	Refinery	E → F	1	5	14 People shocked by the incident needed psychiatric support.	Safetynews, 2009
211.	2009	Hyderabad, India	Chemical solvent extraction factory	E → F → leak	2	2		Hindu, 2009
212.	2009	Molo, Kenya	Gasoline tanker	Tanker overturned → Leak → fireball	111	>200		Firegeezzer, 2009

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	Other reported impacts	Reference
213.	2009	Hyderabad India	Drug intermediates manufacturing company:	MaE → F	–	2	Shockwaves due to the explosion were felt even 10 km away.	Deccanchronicle, 2009
214.	2009	Saravli, India	Chemical dyeing plant	E → F	2	4		Saunalahti, 2009
215.	2009	Karachi, Pakistan	Chipboard making factory	E → F	3	5		Dailytimes, 2009
216.	2009	Pawane, India	Darshan Chemicals	F → Fs → Es	2	9		Saunalahti, 2009
217.	2009	Columbus, US	Columbus chemical industries	F → Es	–	3		Wkowitz, 2009
218.	2009	La Mesa, US	Saltwater disposal factory	Lightning bolt → F → Fs → E	–	1		Whdh, 2009
219.	2009	Okhla, India	Foam manufacturing factory	F → Fs → E	1	8	The entire factory was destroyed	Tribuneindia, 2009
220.	2009	Gazipur Bangladesh	Blade making factory/LPG	E → Fs	3	15		TheDailyStar, 2009
221.	2009	Agra, India	Firecracker Godown in a commercial complex	F → MiEs → F	–	–	The fire spread to nearby shops, gutting some of them	Taragana, 2009
222.	2009	Yanshi City, China	Luoran Co. Ltd/ chemical dye production	F → E → Fs	5	>108	Residents within a 1 km radius were evacuated	Xinhuanet, 2009
223.	2009	Ulyanovsk, Russia	Army depot/ ammunition	E → MaEs and Fs	2	More than 10	3000 People were evacuated	BBC, 2009
224.	2009	Jaipur, India	Petroleum products	F → VCE → several pool fires with explosions	13	>200	500,000 Evacuated; property loss worth \$40 million	PressTV, 2009