

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE 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

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

Amélioration de la méthode ARAMIS par la prise en considération
des effets dominos.

« Cas : Linde Gas ALGÉRIE »

MAHGOUN Aymen Rafik & ATTIA Djaber

Sous la direction de :

M ^r . Amine BENMOKHTAR	Maître de conférences B à l'ENP
M ^r . M'hamed BOUSBAL	Maître de conférences B à l'ENP
M ^r . Farid KHELLAF	Ingénieur HSE à LGA

Présenté et soutenu publiquement le 09 / 09 / 2021 devant le jury composé de :

Président	M ^r . Mohamed BOUBAKER	Maître assistant A	ENP
Examineurs	M ^{me} . S. BENTAALLA	Maître de conférences B	ENP
	M ^r . Malik SENOUCI BEREKSI	Maître de conférences B	ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Maitrise des Risques Industriels et Environnementaux

Filière QHSE-GRI

Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

QHSE-GRI

Amélioration de la méthode ARAMIS par la prise en considération
des effets dominos.

« Cas : Linde Gas ALGERIE »

MAHGOUN Aymen Rafik & ATTIA Djaber

Sous la direction de :

M^r. Amine BENMOKHTAR

Maître de conférences B à l'ENP

M^r. M'hamed BOUSBAL

Maître de conférences B à l'ENP

M^r. Farid KHELLAF

Ingénieur HSE à LGA

Présenté et soutenu publiquement le 09 / 09 / 2021 devant le jury composé de :

Président	M ^r . Mohamed BOUBAKER	Maître assistant A	ENP
Examineurs	M ^{me} . S. BENTAALLA	Maître de conférences B	ENP
	M ^r . Malik SENOUCI BEREKSI	Maître de conférences B	ENP

Dédicace

Je dédie ce travail À :

Mes très chers parents,

Mes frères Amine, Anis et Akrem,

*Mes amis, Mohamed, Nazim, Raid, Ayoub, Taher et tous les autres qui
m'ont aidé et soutenu,*

Tous ceux qui ont cru en moi.

Aymen Rafik

Je dédie ce travail à :

Mes parents,

Mes frères Bilel et Yahia

Mes sœurs Nadia, Salwa et Zeineb

Mes amis

Toute personne qui m'est chère.

Djaber ATTIA

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout Puissant d'avoir nous donner le courage, la force et la volonté pour atteindre nos objectifs et arriver où nous en sommes.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury, Monsieur M. BOUBAKER, Maitre-assistant A, qui nous fait l'honneur de présider ce jury, Madame S. BENTAALLA, Maitre de conférences B à l'ENP et Monsieur M. SENOUCI BEREKSI, Maitre de conférences B à l'ENP qui ont bien voulu accepter d'examiner et de juger ce travail.

Nous tenons également à remercier nos encadreurs qui ont suivi de très près l'évolution de ce travail :

À Monsieur A. BENMOKHTAR, Maitre de conférences B à L'ENP, pour ses conseils et sa confiance en nous, pour son aide qui a contribué à l'exceptionnel encadrement dont nous avons bénéficiés.

À Monsieur M. BOUSBAI, Maitre de conférences B à l'ENP, Pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son aide.

À Monsieur H. BENHAMOUCHE Directeur SHEQ à Linde Gas, pour nous avoir donné la chance d'effectuer notre PFE au sein de Linde Gas.

À Monsieur F. KHELLAF responsable SHEQ site de Réghaia, de nous avoir accompagné et donné de son temps.

Nous remercions aussi l'ensemble du personnel de LGA, pour leur disponibilité et leur précieuse collaboration.

Un remerciement particulier à Monsieur S. NASRI, Ingénieur QHSE-GRI pour son aide et ses nombreux services.

Notre gratitude est aussi destinée aux enseignants du Département QHSE-GRI de l'ENP Qui nous ont soutenus durant notre parcours.

ملخص:

في هذا العمل، أجرينا دراسة الحوادث ذات تأثير الدومينو على موقع LGA في الرغاية. للقيام بذلك، قمنا بتحسين طريقة ARAMIS من خلال دمج نهج دراسة تأثيرات الدومينو. من خلال النهج المقترح، تمكنا من تحديد الأسباب التي يمكن ان تولد سيناريوهات حادث تأثير دومينو، والعواقب التي يمكن ان تحدث وأخيرًا تحديد موقع ورش العمل الحاسمة، ثم تم تقييم احتمالية كل نتيجة من خلال مراعاة العواقب. السلامة الحالية الحواجز وتأثير إدارة السلامة عليها. بعد ذلك، تم أخذ جميع السيناريوهات الأكثر احتمالية لتحديد تأثيرات الدومينو الناتجة. أخيرًا، تم تقديم مقترحات لمنع انتشار هذه الآثار

الكلمات المفتاحية: محاكاة، ثقافة السلامة، حواجز الأمانة، تحليل المخاطر الاولي، انفجار سحابة بخار (VCE)

Abstract:

In this work, we carried out a study of dominos effects on the site of LGA of Réghaia. For that, we improved the ARAMIS method by integrating an approach of dominos effects study. Through the proposed approach, we were able to determine the causes that can generate accident scenarios with domino effects, the consequences that can occur and finally locate the critical workshops. Then, the probability of each consequence was evaluated by taking into account the existing safety barriers and the influence of safety management on them. Then, all the most probable scenarios were taken to delimit the induced domino effects. Finally, proposals were given to prevent the propagation of these effects.

Key-words: Simulation, APR, Safety culture, VCE, safety barriers

Résumé :

Dans ce travail, nous avons effectué une étude d'effets dominos sur le site de LGA de Réghaia. Pour cela, nous avons amélioré la méthode ARAMIS en intégrant une approche d'étude d'effets dominos. À travers la démarche proposée, nous avons pu déterminer les causes qui peuvent engendrer des scénarios d'accidents à effets dominos, les conséquences qui peuvent survenir et enfin localiser les ateliers critiques, Ensuite, la probabilité de chaque conséquence a été évaluée en prenant compte les barrières de sécurité existantes et l'influence du management de sécurité sur ces dernières. Ensuite, l'ensemble des scénarios les plus probables ont été pris pour délimiter les effets dominos induits. Enfin, des propositions ont été données afin d'empêcher la propagation de ces effets.

Mots-Clés : Simulation, APR, Culture de sécurité, VCE, barrières de sécurité.

Table des matières

Liste des tableaux	
Table des figures	
Abréviations	
Introduction générale	15
Chapitre I : Contexte général de l'étude	16
I.1 Présentation de l'entreprise LGA.....	17
I.1.1 Généralités	17
I.1.2 Historique, organigramme	18
I.2 Cadre réglementaire Algérien et retour d'expérience	21
I.2.1 Principaux textes relatifs aux risques majeurs en ALGERIE	21
I.2.2 Retour d'expérience	21
I.3 Problématique, objectifs et méthodologie de recherche	23
I.3.1 Problématique	23
I.3.2 Méthodologie de recherche.....	23
Chapitre II : Concepts et définitions.....	25
II.1 Les effets dominos.....	26
II.1.1 Définitions	26
II.1.2 Vecteurs d'escalade	27
II.2 Méthodologies d'études des effets domino	29
II.3 Méthode ARAMIS	33
II.3.1 Principaux résultats du projet ARAMIS.....	34
II.4 Approche d'étude d'effets dominos	38
II.5 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques	40
II.5.1 Analyse préliminaire des risques (APR)	40
II.5.2 Arbre de défaillance (AdD)	41
II.5.3 Analyse par Arbre d'Évènements (AdE).....	44
II.6 Méthodologie proposée	46
Chapitre III : Application de la méthode	48
III.1 Présentation des processus de production et de conditionnement	49
III.1.1 L'oxyde d'éthylène	49

III.1.2	Les gaz de l'air	50
III.1.3	Le protoxyde d'azote.....	54
III.2	Détermination des zones critiques par l'APR	55
III.2.1	Systèmes étudiés	55
III.2.2	Identification des produits dangereux	56
III.2.3	Évaluation de la criticité	56
III.2.4	Résultats de l'APR et discussion	58
III.3	Application de la méthode.....	59
III.3.1	Sélection des équipements critiques.....	59
III.3.2	Identification des scénarios d'accidents par MIMAH.....	62
III.3.3	Identification des barrières de sécurité.....	62
III.3.4	Influence du processus managériaux et de la culture sécurité sur la performance des barrières.....	64
III.3.5	Évaluation de la fréquence d'occurrence des conséquences liées aux ERC	73
III.4	Étude d'effets dominos	78
III.4.1	Identification des évènements primaires	79
III.4.2	Identification des cibles et calcul de probabilité d'escalade.....	87
III.4.3	Détermination des scénarios secondaires	90
III.4.4	Détermination des événements tertiaires	94
III.4.5	Évaluation des scénarios dominos	94
III.4.6	Risque individuel	102
Chapitre IV	: Prévention des effets dominos	104
IV.1	Prévention des escalades par une approche de sécurité intrinsèque	105
IV.1.1	Calcul de la distance de sécurité	106
IV.2	Étude technico-économique de la mise en place d'un mur pare-souffle	108
IV.2.1	Dimensionnement du mur.....	108
IV.2.2	Modélisation du mur	109
IV.2.3	Estimation des coûts de construction	112
IV.3	Impact financier de la séquence dominos	112
Conclusion générale		115
Bibliographie		117
Annexe A : Tableaux APR		119
Annexe B : Typologie des substances dangereuse		124
Annexe C : Nœuds papillon.....		126

Annexe D : Questionnaire sur la culture de sécurité	132
Annexe E : Check list d'audit des processus managériaux	136
Annexe F : Résultats du questionnaire de culture de sécurité	140
Annexe G : Résultats des calcul de l'indice sécuritaire	145
Annexe H : Les coefficients d'influences $B_{i,k}$	147
Annexe J : Valeurs de μ^{ref} et σ_i^{ref}	148
Annexe I : Base de données des accidents à effets dominos	149

Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Généralités sur LGA	17
Tableau I- 2: Gamme de production par site	18
Tableau II- 1 : Définitions données pour un "effet domino" ou un "accident domino"	26
Tableau II- 2 : Vecteurs d'escalade directe générés par différentes catégories de scénarios primaires.....	28
Tableau II- 3 : Catégorisation des événements Domino (Reniers, 2010).....	28
Tableau II- 4 : Méthodes d'étude d'effets dominos et leurs limites.....	30
Tableau II- 5 : Exemple de tableau de type APR.[9]	40
Tableau II- 6 : Symboles graphiques [9]	43
Tableau III- 1: Découpage de l'installation pour l'APR.....	55
Tableau III- 2 : caractéristiques des produits dangereux [10].....	56
Tableau III- 3: Grille de probabilité	57
Tableau III- 4: Grille de gravité	57
Tableau III- 5: Matrice de criticité	58
Tableau III- 6 : Résultats APR	58
Tableau III- 7 : Masse de référence Ma selon la nature de produit [11]	60
Tableau III- 8 : Données nécessaires pour le calcul	61
Tableau III- 9 : Niveau de confiance et réduction du risque associé	63
Tableau III- 10 : Barrières de sécurité et NC associés	64
Tableau III- 11 : Classification des barrières pour l'audit.....	66
Tableau III- 12: Niveau de maîtrise Si par processus managérial.....	68
Tableau III-13 : Barrières de sécurité et NC _{op} associés.....	71
Tableau III- 14 : Fréquence des évènements initiateurs	73
Tableau III- 15 : Barrières de sécurité et PFD associés.....	74
Tableau III- 16 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC ₂	75
Tableau III- 17 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC ₃	75
Tableau III- 18 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC ₄	75
Tableau III- 19 : Classe approximative des conséquences des Phd "pleinement développés".[11]	76
Tableau III- 20 : Estimation des classes de gravité par Phd [11].....	76
Tableau III- 21 : Unités critiques, substance, Événements potentiellement primaire et vecteurs d'escalade correspondant.[20].....	79
Tableau III- 22 : Seuils des effets de radiation thermique sur l'Homme[20]	79
Tableau III- 23 : Seuils des effets de radiation thermique sur les structures[20].....	80
Tableau III- 24 : Seuils de référence des effets de surpression sur l'Homme[20]	80
Tableau III- 25 : Seuils de référence des effets de surpression sur les structures[20]	80
Tableau III- 26 : Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique	81
Tableau III- 27 : Caractéristique des produits utilisés.....	81
Tableau III- 28 : Températures moyennes mensuelles à Réghaia [21]	81
Tableau III- 29 : Détermination des classes de stabilité atmosphérique de Pasquill. [23]	82

Tableau III- 30 : Conditions météorologiques pour les modélisations d'accidents majeurs	83
Tableau III- 31 : Distances atteintes par l'onde de choc	87
Tableau III- 32 : Modèles de vulnérabilité [12]	88
Tableau III- 33 : Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau. ...	89
Tableau III- 34: Scénarios secondaires les plus susceptibles de se produire suite à l'événement primaire « VCE dans le Park bouteilles »	90
Tableau III- 35: Données introduites dans le logiciel PHAST	91
Tableau III- 36 : Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau. 93	
Tableau III- 37 : 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 » [7].....	97
Tableau IV - 1: poids correspond à chaque type de ferraille	112
Tableau IV - 2 : coût de ferrailage	112
Tableau IV - 3 : coût de béton.....	112
Tableau IV - 4 : Coûts des dégâts	113
Tableau IV - 5 : Coûts de perte de produits	113
Tableau IV - 6 : Coûts d'arrêt de production.....	113

Table des figures

Figure I- 1: Méthodologie suivie pour améliorer la méthode ARAMIS	24
Figure II- 1 : Les composantes du risque et les éléments à analyser [10]	34
Figure II- 2 : Matérialisation des scénarios d'accident par le modèle « nœud papillon »	35
Figure II- 3 : étapes de la méthode ARAMIS	36
Figure II- 4 : Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos	39
Figure II- 5 : Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances. [9]	43
Figure II- 6 : Architecture de l'arbre des événements	45
Figure II- 7: Schéma explicatif de la méthodologie proposée	46
Figure III- 1 – Process Flow Diagram (PFD) d'une chaîne de séparation des gaz de l'air	53
Figure III- 2 : Schéma type de conditionnement des gaz de l'air[10].....	54
Figure III- 3 : Répartition des risques dans le site LGA.....	59
Figure III- 4 : Variation thermique du « feu de jet bouteille C ₂ H ₂ ' en fonction de la distance.	83
Figure III- 5 :Propagation de l'effet de surpression suite à l'évènement primaire « VCE dans le park bouteille	84
Figure III- 6 : Variation thermique du « feu de jet bouteille H ₂ ' en fonction de la distance.	85
Figure III- 7 : Propagation des effets de surpression pour l'évènement « VCE bouteille H ₂ ...	86
Figure III- 8 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'évènement primaire « VCE bouteille H ₂ »	86
Figure III- 9 : Propagation de l'effet de surpression suite à l'évènement secondaire « Explosion du cadre de bouteilles H ₂	91
Figure III- 10 : Propagation de l'effet de surpression suite à l'évènement secondaire « Explosion du cadre de bouteilles C ₂ H ₂ »	92
Figure III- 11 : Un schéma probable de propagation de l'effet domino. Les nombres entre parenthèses indiquent l'ordre d'apparition des événements. (étape 4 de la méthodologie).[7]	95
Figure III- 12:BN modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L1 et L2, respectivement.	97
Figure III- 13 : Réseau bayésien complet pour l'estimation du modèle de propagation et de la probabilité d'occurrence de l'effet domino[23].....	98
Figure III- 14 : BN de l'évènement primaire « VCE d'une bouteille H ₂ ».....	99
Figure III- 15 : BN de l'évènement primaire « VCE d'une bouteille C ₂ H ₂ ».....	101
Figure III- 16: Contour du risque individuel correspondant à la propagation du 1er évènement primaire VCE dans le Park bouteilles.....	102
Figure IV- 1 : Propagation de l'effet de surpression de l'évènement primaire dans le nouveau Park bouteilles	107
Figure IV- 2 : Dimensionnement du mur sur plan.	109

Figure IV- 3 : Présentation 3D du mur	109
Figure IV- 4 : Cartographie des sollicitations sur mur.	110
Figure IV- 5 : Nombre de barres de ferrailages par le logiciel Robot Experts	111
Figure IV- 6: Coupe Chemin de ferrailage.	111

Abréviations

LOX	Oxygène liquide
LIN	Azote liquide
LAR	Argon liquide
LIC	CO ₂ liquide
C₂H₂	Acétylène
H₂	Hydrogène
GOX	Oxygène gazeux
GAN	Azote gazeux
GAR	Argon gazeux
GCO₂	CO ₂ gaz
GNO₂	Protoxyde d'Azote gaz
LI NO₂	Protoxyde d'Azote liquide
MIX	Mélange de gaz exemple : hydrogène/azote
SIL	Safety integrity Level
ETO	Ethylene oxide
ARAMIS	Accidental Risk Assessment Methodology for Industries
APR	Analyse préliminaire des risques
NC	Niveau de Confiance
LGA	Linde Gas Algérie
ASU	Air Separation Unit
VCE	Vapor Cloud Explosion
ERC	Événement redouté central
EI	Événement initiateur
REX	Retour d'expérience
DL	Domino Level
AdD	Arbre de Défaillances
ADE	Arbre D'évènements
LOC	Loss of containment
FDS	Fire dynamics simulation
CPT	Conditional probability tables
NCR	Niveau de Criticité

Introduction générale

Introduction générale

Les gaz industriels sont devenus indispensables dans les domaines de l'agriculture, de l'industrie et de la recherche et ont une grande importance dans le domaine médical. Ces gaz peuvent être l'azote, l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'oxyde d'éthylène, l'hydrogène, l'hélium ou l'acétylène, les grandes entreprises présentes dans ce secteur d'activité sont notamment Air liquide, Air Products, Linde et Praxair. Ce secteur est distinct de la pétrochimie.

En Algérie, *Linde Gas* est le leader dans le marché, elle assure la production, le conditionnement et le stockage de ces gaz, ce genre d'activité est considéré comme une activité industrielle à hauts risques car chacun de ces gaz possède des caractéristiques intrinsèques et classés dans des catégories de danger (explosible, gaz inflammable, gaz comburant, sous pression), non seulement ça mais aussi l'interaction entre eux rend la situation plus dangereuse et difficile à maîtriser ce qui favorise le départ ou la propagation d'un incendie ou d'une explosion.

Dans le domaine des risques potentiels, « l'effet domino » est reconnu depuis 1947, il a été défini comme "une cascade d'événements dans laquelle les conséquences d'un accident antérieur sont accrues par le ou les accidents suivants, aussi bien dans l'espace que dans le temps, conduisant à un accident majeur" (Delvosalle, 1996). Le développement de produit dans les installations industrielles, la distance entre ces ateliers, leurs stockages des substances dangereuses, l'erreur humaine, les actes de malveillance sont des raisons d'augmentation de la probabilité d'occurrence d'effet domino. Malgré ça, les chaînes en cascades restent relativement peu étudiés, peu d'études qui fédèrent les différentes approches et méthodes disponibles dans la littérature.[1]

Une étude portant sur 261 accidents à effet domino a montré que les zones de stockage et les installations de traitement sont de loin les endroits les plus courants où des accidents domino se sont produits. Ainsi, L'analyse montre que les causes les plus fréquentes sont les événements extérieurs et les défaillances mécaniques, En ce qui concerne le nombre de décès, 57 % des accidents pour lesquels des données sont disponibles ont fait des victimes, le groupe le plus courant étant celui des accidents ayant fait entre 1 et 10 morts. Au total, 1410 personnes sont décédées, d'où l'importance d'intégrer les chaînes en cascades dans une démarche d'analyse des risques.[2]

Dans ce contexte, notre travail vise à faire une réévaluation des risques en prenant en compte les effets dominos dans notre démarche d'analyse. Le mémoire est structuré en quatre (4) chapitres comme suit :

Le **premier chapitre** est consacré à la mise en contexte de l'étude, dans un premier temps, nous présenterons l'environnement de travail dans lequel évolue l'entreprise LGA ainsi que les principaux textes législatifs relatifs aux risques majeurs en ALGERIE suivie par une présentation de quelques accidents à effets dominos. Ce qui nous permettra de mieux cerner la problématique et de poser la méthodologie à suivre pour la résoudre.

Le **second chapitre** a pour objectif de construire une base de connaissance sur les différentes méthodes d'étude d'effets dominos en ressortant les limites de chacune et de pouvoir par la suite choisir la méthode la plus complète et qui répond à notre besoin. Ensuite, la méthode choisie sera définie et l'approche d'amélioration sera intégrée pour obtenir à la fin la nouvelle méthode améliorée d'étude d'effets dominos.

Le **troisième chapitre** est consacré à l'application de la méthode, nous commençons par la présentation des processus de production et de conditionnement, puis, son application sur les ateliers critiques.

Le **quatrième chapitre** présente les moyens que nous avons proposés pour limiter la propagation de l'événement primaire, suivie par étude technico-économique. Enfin nous donnons l'impact financier du scénario le plus probable.

Chapitre I : Contexte général de l'étude

L'objectif de ce chapitre est de contextualiser notre étude, dans un premier temps nous présentons l'entreprise Linde Gas Algérie (LGA) ou nous avons élaboré notre projet de fin d'étude.

En second lieu, et après avoir donné des exemples d'accidents ayant impliqués des effets dominos, ainsi que les principaux textes relatifs aux risques majeurs en Algérie, nous exposons la problématique et les objectifs de notre étude, ainsi que la méthodologie adaptée pour les atteindre.

I.1 Présentation de l'entreprise LGA

Linde Gas Algérie est le leader sur le marché Algérien des gaz industriels et médicaux, c'est une unité du groupe Allemand « The Linde Group » installée en 2007 en Algérie. sa mission essentielle est la production, le conditionnement et la distribution des gaz médicaux et industriels. [3]

I.1.1 Généralités

Nous allons commencer par la présentation 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.[3]

Tableau I- 1 : Généralités sur LGA

Nom de l'entreprise	Linde Gas Algérie
Logo de l'entreprise	
Adresse	Le siège est situé au : 23, Avenue de l'ALN, Hussein Dey, Alger.
Site Web	www.linde.com
Nature du capital/Forme juridique	Société Par Actions- SPA Linde Gas Algérie.
Activité	Production, conditionnement, commercialisation et distribution des Gaz industriels, alimentaires et Médicaux
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.
Taille de l'organisation	<p>Effectifs : À la fin du mois de février de 2015 le nombre d'employés s'élève à 600 employés.</p> <p>Capital social : 1.500.000.000 de DA.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La superficie du site de Réghaia : 35 000 m² - La superficie du siège : 16840m² dont 6375 bâtie

Répartition géographique du marché

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. Abbés, Arzew, Skikda. Répartis en trois régions : Centre/Sud, Ouest, Est.

Présence mondiale

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.

Gamme de production des gaz par site

Tableau I- 2: Gamme de production par site

Régions	Sites	Production							Conditionnement						
		LOX	LIN	LAR	LIC	LIN20	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								*	*				*	

Comme indiqué dans le tableau (I-2), LGA possède une large gamme de produits répondant aux besoins de ses clients tout en fournissant les différents gaz fabriqués, médicaux ou industriels à travers les neuf (9) sites dispersés aux quatre coins de l'Algérie (Est, Ouest, Centre-Sud), LGA fournit une couverture nationale ce qui lui permet d'atteindre et de répondre à un plus grand segment client et couvre toute la demande nationale. Cette stratégie est également adoptée pour décentraliser les activités de LGA. [3]

I.1.2 Historique, organigramme

Le passage de l'Entreprise Nationale de Gaz Industriels (ENGI) vers LGA

- ENGI

- L'activité de production des Gaz Industriels fut introduite en Algérie depuis la période coloniale à travers Air Liquide, Avec 3 unités de production.
- En 1972, l'État Algérien procède à la nationalisation de la société et l'intègre à la Société Nationale de Sidérurgie.

- En 1983, la restructuration de la SNS (Société nationale de sidérurgie), donna naissance à L'ENGI (Entreprise National de Gaz Industriels) qui est placée sous la tutelle du Ministère de l'énergie jusqu'à 1989.
- En 1989, transformation de l'ENGI en société par action au capital de 30 MDZD.
- En 1996, toutes les actions ont été transférées au Holding Chimie Pharmacie et Services.
- **LGA**
 - Signature officielle le 18 Juin 2007 avec prise en charge des le 1er Juillet de la même année.
 - Position de leader en Algérie, le deuxième plus grand marché dans la région après l'Egypte.
 - Production et distribution de Gaz industrielle et gaz médicaux.
 - + 700 employés
 - L'intégration des entreprises communes existantes (GIL, Hassi Messaoud: 40% Linde/60% ENGI, Messer, Skikda: 60% Messer/40% ENGI, Helison Production, Skikda: 51% Linde/49% Sonatrach).

Organigramme

Linde Gas Algérie est organisé comme suit :

- **La direction Plant Manager** : Chaque site a un Plant Manager (Directeur de site) soit:
 - Plant manager Constantine, Annaba, Skikda, Bouira, Reghaia, Ouergla, Sidi Bel Abbes, Arzew et Oran.
- **La direction réalisation** : Est composée de :
 - La direction opérations (Bulk et PGP)
 - La direction commerciale et marketing
- **La direction support** : est composé de :
 - La direction des affaires juridiques
 - La direction informatique et systèmes d'information
 - La direction des ressources humaines
 - La direction des achats
 - La direction de finance et comptabilité
 - La direction SHEQ (*Safety, Health, Environment and Quality*)

De la direction SHEQ découle des fonctions centrales des différentes composantes soit :

- Responsable Qualité et Audit SMI
- Responsable national de la sécurité
- Responsable environnement
- Responsable national d'hygiène et santé
- Responsable Process Safety
- Responsable de Sécurité Alimentaire

Aussi au niveau de chaque region, 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.

Les valeurs de LGA

Les valeurs de Linde Gas Algérie sont celles de « Linde Group », elles sont identifiées collectivement et font partie d'une charte d'éthique partagée et diffusée :

Le groupe Linde fonctionne selon les valeurs suivantes :

- Passion pour l'excellence.
- Innovation pour les clients.
- Responsabilisation du personnel.
- Prospérité basée sur la diversité.

Ces valeurs sont basées sur quatre principes fondamentaux :

- Sécurité.
- Intégrité.
- Vision à long terme (pérennité).
- Respect.

Politique SHEQ

La politique SHEQ (Safety, Health, Environment and Quality - Sécurité, Hygiène, Environnement & Qualité) fait partie intégrante du groupe Linde.

Notre politique SHEQ influence notre comportement et chacune de nos décisions. Elle assure également que chaque personne travaillant au sein du Groupe Linde est responsable de ses actes.

Nous nous sommes engagés à garantir le plus haut niveau possible de sécurité et de protection à nos employés, nos clients, au public et à l'environnement. Nous avons publié dans notre Politique SHEQ nos objectifs et principes dans ce domaine.

LGA s'engage à améliorer l'hygiène, la sécurité et les conditions de travail de tous ses collaborateurs et à préserver les personnes, l'environnement et les biens.

Le personnel LGA est conscient de l'impact de ses activités en matière d'hygiène, de sécurité et d'environnement. Il est directement impliqué et se considère comme personnellement responsable de l'atteinte des objectifs fixés par l'entreprise dans ce domaine.

Les centres de production et installations de Linde France sont conçus pour supprimer ou limiter tout impact négatif sur notre environnement.

I.2 Cadre réglementaire Algérien et retour d'expérience

I.2.1 Principaux textes relatifs aux risques majeurs en ALGERIE

Les législateurs algériens ont ratifié toutes les conventions internationales : de la protection de l'environnement à la protection de la faune et la flore pour aboutir à la publication des différents textes réglementaires suivant :

- Le décret exécutif n° 09-335 du 20 octobre 2009 fixant les modalités d'élaboration et de mise en œuvre des plans internes d'intervention par les exploitants des installations industrielles.[4]
- Le décret exécutif n° 07-144 du 19 mai 2007 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.
- Le décret exécutif n° 06-198 du 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement.
- La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
- La loi n°03-10 correspondant au 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- La loi n° 83-03 du 5 février 1983 relative à la protection de l'environnement.

En Algérie, la promulgation de textes de lois notamment le décret de la gestion des catastrophes et des risques dans le cadre de développement durable est dû aux catastrophes naturelles (Chlef, Boumerdès, inondation Bab El Oued, etc.) et technologiques (Skikda en 2004 et 2006) ; Depuis information et formation aux risques sont devenus incontournables.

Nous remarquons sur l'ensemble des textes réglementaires qu'il n'existe aucune disposition législative par rapport à l'aspect d'effet domino alors qu'ils sont les accidents majeurs les plus catastrophiques, la prochaine section a pour but d'exposer quelques accidents impliquant des effets dominos.

I.2.2 Retour d'expérience

Cette section prend sa source principalement dans la base ARIA qui répertorie les incidents, accidents ou presque accidents qui ont porté, ou auraient pu porter atteinte à la santé ou la sécurité publiques ou à l'environnement.[5]

Plusieurs accidents ayant entraîné plusieurs dégâts matériels et humains dans ce type d'installation et ça n'arrêtent pas là, ces accidents (événement primaire) se propagent et entraînent des préjudices pour une ou plusieurs cibles secondaires (effet domino).

Dans ce qui suit, trois accidents ayant impliqué des effets dominos sont décrits.

- L'accident de Bassens – France (15/07/2008) incendie de bouteilles d'acétylène :

Un employé d'une société prestataire chargé du contrôle périodique des bouteilles sous pression (ESP) d'une usine de gaz chimiques arrête le chariot élévateur qu'il conduit pour vérifier un panier de 12 bouteilles d'acétylène de 50 kg – 7 m³ quand une fuite enflammée se déclenche sur une des bouteilles. Il est gravement brûlé à l'avant-bras et au visage mais réussit

à éloigner le chariot du casier en feu. La chaleur de la flamme orientée vers les autres bouteilles provoque une fuite sur les robinets de ces dernières, l'incendie se propageant ensuite à toutes les bouteilles. Un agent donne l'alerte, le plan d'organisation interne (POI) est déclenché et les installations de fabrication et de conditionnement d'acétylène sont mises en sécurité. Un périmètre de sécurité de 200 m est mis en place en raison des risques d'éclatement des bouteilles car une tentative d'extinction avec un extincteur à poudre s'est révélée inefficace. Les 16 employés travaillant dans les unités les plus proches (300 m) sont évacués. Les services de secours évacuent l'employé brûlé, puis mettent en place des lances à eau pour éviter la propagation de l'incendie à la végétation environnante et refroidir les bouteilles afin de réduire le risque d'explosion lié à la décomposition de l'acétylène sous l'effet de la chaleur.

- L'accident de Saint Louis – États-Unis (24/06/2005) incendie et explosions de bouteilles de gaz :

Un important incendie dans un site de stockage et de mise en bouteilles de gaz. Près de 30 000 bouteilles contenant des gaz sont stockées sur le site, Vers 15h20, un employé constate la présence d'une flamme de 3 m de haut au niveau d'une bouteille de propylène et déclenche l'alarme incendie. L'incendie se propage aux bouteilles adjacentes, en 4 minutes le feu est généralisé à toute la zone des bouteilles de gaz inflammables. De nombreuses explosions (BLEVE) se font entendre ; des projections de fragments et de bouteilles à l'intérieur et jusqu'à 250 m à l'extérieur du site provoquent des incendies (effet domino). De multiples foyers, des hautes flammes et une épaisse fumée noire compliquent l'intervention des pompiers arrivés à 15h35.

Les dommages matériels dans le voisinage sont lourds : 1 bâtiment commercial vide et véhicules en stationnement incendiés, bris de vitres, trou dans le mur d'une habitation... De l'amiante provenant des bouteilles d'acétylène s'est propagée via les fumées, une décontamination de la zone sera effectuée.

- Explosion dans une usine pétrochimique - 16/05/1997 - Chine - 00 – Fushin (ARIA N° 11603)

À 9h05, une explosion se produit dans la colonne de distillation de l'unité de séparation d'air d'un complexe éthylénique. L'explosion cause la mort de 4 employés, blesse gravement 4 autres et 27 plus légèrement. Avec des dommages matériels très importants.

La capacité de l'unité était de 2000t/j d'oxygène pur à 99,80% ; elle avait été mise en service en 1991. La section inférieure de la colonne basse pression est constituée d'un garnissage en aluminium monté dans une enveloppe interne.

L'accident résulte d'un pic de pollution exceptionnel (au niveau de la prise d'air de la colonne) du au dégazage d'éthylène au cours de la mise à l'arrêt d'unité de fabrication d'oxyde d'éthylène 6 h plus tôt, conjointement avec un niveau de liquide temporairement bas dans le vaporisateur principal de l'unité de séparation d'air fonctionnant alors en charge réduite. Le polluant hydrocarboné a agi comme « allumeur », entraînant la combustion d'aluminium dans l'oxygène. Une explosion similaire se produit la même année en Malaisie (ARIA 23132). [6]

L'industrie de production des gaz industriels d'une façon générale, représente des risques sur la sécurité de l'homme. Les accidents et les catastrophes ont poussé les industriels à tirer la sonnette d'alarme et un constat et une maîtrise de la situation sont alors imposés. Plusieurs accords et traités nationaux et internationaux ont en découlé et une nouvelle approche est apparue : la gestion des risques industriels.

I.3 Problématique, objectifs et méthodologie de recherche

I.3.1 Problématique

L'industrie de production des gaz industriels est l'une des industries les plus touchées par les accidents majeurs, tels que les explosions et les incendies...etc. Ces accidents ont des conséquences catastrophiques sur les cibles humaines, matérielles, environnementales et même sur l'économie du pays. En Algérie ce secteur est dominé par Linde Gas, Elle couvre 80% des besoins nationaux par conséquent un accident majeur coûtera très cher non seulement à l'entreprise mais aussi ça va créer un manque des gaz médicaux aux niveaux des hôpitaux.

En Algérie, la réglementation exige une étude de danger (EDD) afin d'avoir l'autorisation d'exploitation. Dans ces études l'aspect d'effets dominos est souvent négligé car il n'existe aucune disposition législative à ce propos. De plus, et à l'heure actuelle les méthodes d'analyse des risques qui prennent en considération ces effets sont peu nombreuses et aucune de ces méthodes n'a été unanimement retenue par les spécialistes du domaine, à cet effet les deux questions importantes qui s'imposent sont :

- Par quelle approche nous allons étudier les effets dominos ? et comment intégrer cette dernière dans une méthode intégrée d'analyse des risques ?
- Quels sont les chaînes dominos qui pourraient toucher LGA ?

Pour répondre à cette question, nous avons fixées les objectifs suivants :

- Exploration de la méthode intégrée dite ARAMIS (*Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS*).
- Intégration d'une nouvelle approche d'étude d'effets dominos.
- Application de la nouvelle méthode (améliorée).

I.3.2 Méthodologie de recherche

Pour atteindre les objectifs fixés précédemment et résoudre la problématique, la méthodologie du travail est schématisée dans la figure I-1 :

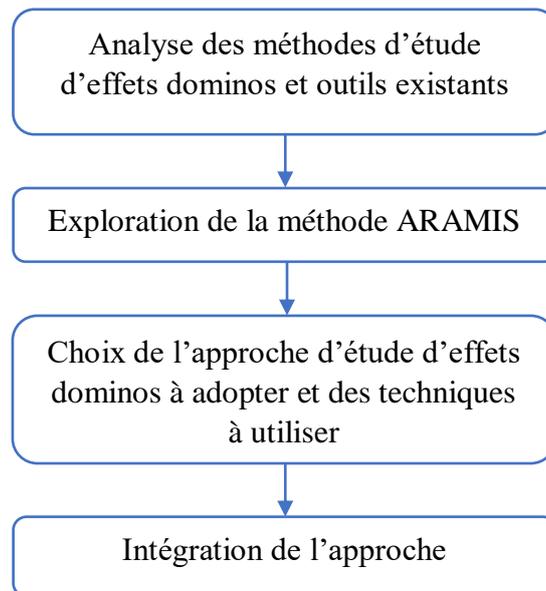


Figure I- 1: Méthodologie suivie pour améliorer la méthode ARAMIS

Dans le présent chapitre, Nous avons commencé par une présentation de l'entreprise afin de mieux connaître l'environnement de travail sur lequel nous allons opérer, ensuite la problématique et les objectifs de l'étude ont été posés suivie par la méthodologie développée pour le traitement de cette dernière.

En effet, après avoir cadré le contexte de l'étude, nous allons aborder dans le cadre du 2ème chapitre des définitions sur les différentes méthodes qui seront utilisées dans ce travail.

Chapitre II : Concepts et définitions

Dans ce chapitre, en premier lieu nous allons donner des généralités sur les effets dominos suivies par une présentation des principales méthodes existantes pour l'étude de ces derniers.

En second lieu, la méthode ARAMIS et l'approche d'intégration choisie pour l'étude seront décrites.

II.1 Les effets dominos

Dans le domaine de l'analyse des risques, l'effet domino est documenté dans la littérature technique depuis 1947. Les accidents provoqués par les effets dominos sont ceux qui induisent les conséquences les plus catastrophiques. Les conséquences de ces derniers se situent à différents niveaux et peuvent affecter non seulement les sites industriels (activités, importance...), mais aussi les personnes, l'environnement et l'économie. La probabilité de l'effet domino est de plus en plus élevée en raison du développement dans les établissements industriels, de la proximité de tels établissements et de leur inventaire de substances dangereuses. Le risque potentiel de l'effet domino est largement reconnu dans la législation européenne depuis la première directive "Seveso I" (82/501/CEE), qui exigeait l'évaluation des effets domino dans l'analyse de sécurité des sites industriels dont les activités sont soumises à cette directive. En outre, la directive "Seveso II" a étendu ces exigences à l'évaluation des effets domino non seulement à l'intérieur du site considéré, mais aussi aux usines voisines.

II.1.1 Définitions

Il n'existe pas de définition généralement acceptée de ce que sont les effets domino dans le contexte des accidents dans l'industrie, bien que divers auteurs aient fourni des suggestions. Voici un aperçu de certaines définitions identifiées lors d'un examen des documents pertinents.[7]

Tableau II- 1 : Définitions données pour un "effet domino" ou un "accident domino"

Auteur(S)	Définition de l'effet/accident domino
Lees (1996)	Un événement dans une unité qui provoque un autre événement dans une autre unité.
Khan and Abbasi (1998b)	Une chaîne d'accidents ou de situations où un incendie/une explosion/un missile/une charge toxique généré par un accident dans une unité d'une industrie provoque des accidents secondaires et d'ordre supérieur dans d'autres unités.
Delvosalle (1998)	Une cascade d'accidents (événements en domino) dans laquelle les conséquences d'un accident précédent sont accrues par le ou les suivants, tant dans l'espace que dans le temps, conduisant à un accident majeur.
Vallee et al. (2002)	Un phénomène accidentel affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui peut provoquer un phénomène accidentel dans un établissement adjacent, entraînant une augmentation générale des conséquences.

Council Directive 2003/105/EC (2003)	Une perte de confinement dans une installation Seveso qui est le résultat (direct et indirect) d'une perte de confinement dans une installation Seveso voisine. Les deux événements doivent se produire simultanément ou dans un ordre consécutif très rapide, et les risques de domino doivent être plus importants que ceux de l'événement initial.
Post et al. (2003)	Un accident majeur dans une entreprise dite "exposée" à la suite d'un accident majeur dans une entreprise dite "causale". Un effet domino est un événement ultérieur survenant à la suite d'un accident domino.
Lees (2005)	Facteur permettant de prendre en compte le danger qui peut se produire si la fuite d'une matière dangereuse peut conduire à l'escalade de l'incident, par exemple une petite fuite qui prend feu et endommage par l'impact de la flamme une conduite ou un récipient plus grand avec le déversement ultérieur d'un grand stock de matières dangereuses.
Bozzolan and Messias de Oliveira Neto (2007)	Un accident dans lequel un événement primaire se produisant dans un équipement primaire se propage à un équipement voisin, déclenchant un ou plusieurs événements secondaires avec des conséquences graves pour les installations industrielles.
Antonioni et al. (2009)	La propagation d'un événement accidentel primaire aux unités voisines, causant leurs dommages et d'autres événements accidentels "secondaires", aboutissant à un scénario global plus grave que l'événement primaire qui a déclenché l'escalade.

II.1.2 Vecteurs d'escalade

En partant du travail de Khan et Abbasi (1998b), les caractéristiques de la propagation et de l'escalade des accidents primaires pour provoquer un effet domino ont été systématiquement abordées. Deux modèles principaux ont été identifiés pour la propagation et l'escalade :

- L'escalade directe
- L'escalade indirecte

L'escalade directe est causée par les dommages directs des unités cibles dus à l'effet des radiations, des ondes de souffle et de la projection de fragments. Le tableau II-2 montre les vecteurs d'escalade générés par les différentes catégories de scénarios primaires.

Tableau II- 2 : Vecteurs d'escalade directe générés par différentes catégories de scénarios primaires

Scénario primaire	Vecteur d'escalade
Pool fire	Rayonnement thermique, impact direct des flammes.
Jet fire	Rayonnement thermique, impact direct des flammes.
Fire ball	Rayonnement thermique, impact direct des flammes.
Flash fire	Impact direct des flammes.
Mechanical explosion	Projection de fragments, surpression.
Confined explosion	Projection de fragments, surpression.
BLEVE	Projection de fragments, surpression.
VCE	Surpression, impact direct des flammes.

Comme le montre le tableau II-2, trois vecteurs d'escalade - souvent contemporains - doivent être pris en compte : le rayonnement thermique et/ou l'impact direct des flammes, la surpression et la projection de fragments.

Les scénarios d'escalade indirecte peuvent être déclenchés par la perte de contrôle d'unités ou de sections de l'usine en raison de l'effet du scénario primaire. Ces accidents sont plus susceptibles de se produire si l'événement primaire a un impact sur une usine voisine, exploitée par une autre entreprise, où différents types de scénarios d'accident sont attendus (par exemple, l'impact d'un nuage toxique sur une usine où seules des substances inflammables sont présentes ou l'impact d'une onde de choc sur une usine où seul un risque toxique est présent).

Afin de simplifier les événements domino, ils ont été divisés en 4 catégories et en 8 sous-catégories (Interne, externe, direct, indirect, temporel, spatiale, en série, en parallèle), comme le montre le tableau II-3 ci-dessous.

Tableau II- 3 : Catégorisation des événements Domino (Reniers, 2010)

Catégorisation des événements Domino		
Catégorie	Sous-catégorie	Définition du type
1	Interne	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'événement domino sont situés à l'intérieur des limites de la même usine.
	Externe	Le début et la fin du vecteur d'escalade caractérisant l'événement domino ne sont pas situés à l'intérieur des limites de la même usine chimique.
2	Direct	L'événement en domino est la conséquence directe de l'événement domino précédent.
	Indirect	L'événement domino n'est pas une conséquence directe de l'événement qui le précède.

3	Temporel	L'événement domino se produit dans le même équipement (ou installation) que l'événement précédent, mais avec un retard.
	Spatiale	L'événement domino se produit à l'extérieur de l'équipement où l'événement précédent a eu lieu.
4	En série	L'événement domino se produit comme une seule chaîne d'accidents.
	En parallèle	L'événement domino se produit sous la forme de plusieurs chaînes d'accidents.

II.2 Méthodologies d'études des effets domino

Pour répondre au problème posé par l'évaluation et/ou l'analyse des effets dominos dans les sites industriels, plusieurs méthodes ont été développées, généralement chaque méthode traite un cas spécifique d'effet domino. Dans cette section, nous présentons les principales méthodes existantes pour l'analyse et la modélisation des effets domino[1]

Tableau II- 4 : Méthodes d'étude d'effets dominos et leurs limites

Méthode (Auteur)	Principe	Limites
<p>Méthodologie ARAMIS (Oliviers et Bruno, 2006 ; Christian et al, 2006)</p>	<p>ARAMIS permet l'identification des risques d'accidents majeurs. Elle est fondée principalement sur l'utilisation de diagramme « nœud papillon » composé d'un AdD et d'un AdE. L'apport majeur d'ARAMIS est de définir en précisant la structure de nœud papillon : la liste des équipements, les événements redoutés centraux et leurs conséquences. La modélisation des dommages causés par les explosions et les incendies aux équipements industriels en raison des différents vecteurs d'intensification (radiation thermique, surpression et la projection des fragments) et les modèles spécifiques de vulnérabilité issus de plusieurs catégories d'équipements de procédés ont été utilisés dans la méthodologie ARAMIS.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ne traite pas l'aspect d'effet domino. - ne prend pas en considération les risques d'origine naturels.
<p>DEA- DOMINO EFFECT ANALYSIS (Khan et Abbassi, 2001)[8]</p>	<p>Cette méthode commence par l'élaboration de tous les scénarios d'accident plausibles dans l'unité, et permet d'évaluer les scénarios d'accident les plus crédibles, et elle permet d'évaluer les rayons de dommages pour chaque scénario accidentel. Une fois que les rayons de dommages et les probabilités sont connus pour chaque événement dommageable, certains facteurs seront estimés à l'aide d'informations spécifiques au site, telles que la densité de population et la densité des actifs de l'installation industrielle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - reste assujéti à la pertinence du découpage du système en unités, - besoin de valeurs seuils plus génériques, - ne prend pas en considération le facteur humain
<p>Maximum-Credible Accident Scenarios, MCAS, (Khan, 2001)</p>	<p>La méthodologie MCAS, permet d'évaluer tous les scénarios d'accidents crédibles dans une unité industrielle. Elle repose sur le développement de tous les scénarios d'accident possibles et sur le calcul des rayons de dommage pour chaque scénario. Dans l'étape suivante, la probabilité de chaque scénario est estimée en utilisant les données industrielles spécifiques (taux de défaillance des différents composants (équipements) utilisés dans l'unité concernée ou les données disponibles dans la littérature (fréquence d'occurrence de même événement dans les des conditions similaires). Si l'accident est jugé crédible, une</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ne prend pas en considération la propagation d'effet domino inter-unités, - se limite à la classification des scénarios primaires sans étudier les scénarios de degré plus élevés, - ne prend pas en considération le facteur humain comme un paramètre qui peut influencer le processus,

	estimation plus précise de sa probabilité d'occurrence doit être faite dans les étapes qui suivent.	- n'explique pas le processus de génération des scénarios.
Méthodologie SCAP (Safety, Credible Accidents, and PFTA (Probabilistic Fault Tree Analysis) (Khan et al. 2001 ; Khan et al. 2002)	La méthodologie « SCAP » est le fruit d'une combinaison de deux approches dans le but de développer une nouvelle méthodologie pour une approche plus réaliste et plus fiable pour l'évaluation efficace des mesures de sécurité et de contrôle des risques.	- reste dépendant d'autres approches (MCAS, PFTA, ...).
Méthodologie ORA (Abassi et Khan, 2001)	Pour l'analyse des risques dans les industries pétrochimiques, les auteurs (S. A. Abbasi, Faisal I. Khan) ont proposé une méthode d'analyse optimale de risques ORA « Optimal Risk Analysis », elle comporte 4 étapes principales : - identification et sélection des dangers, - évaluation des risques (qualitative et probabiliste), - quantification des risques / l'analyse des conséquences, - estimation des risques.	- spécifique à l'analyse des risques, - ne traite pas à proprement parler des effets dominos.
Méthodologie SIGALEA (Outil d'analyse cartographique des risques), (INERIS, 2007)	SIGALEA permet : - de réaliser la cartographie des zones d'effets des phénomènes dangereux, que doit comporter réglementairement l'Étude De Dangers (EDD) ; - d'évaluer l'impact d'une installation ou d'un établissement sur la cartographie des aléas d'un site PPRT.	- ne prend en considération les effets en cascades que partiellement, - l'aspect humain et organisationnel n'est pas pris en compte.
Méthodologie HAZWIM (Reniers et al, 2005)	La combinaison de l'analyse Hazop, What-If et Risque Matrix dans le cadre Hazwim permet de constituer un outil de méta-technique pour optimiser l'organisation des performances d'analyse des dangers dans les sites industriels. Ce dernier vise à concevoir un système de prévention des accidents dominos externe (External Domino Accident Prevention, EDAP)	- spécifique au traitement des accidents dominos externes au site industriel, - dépendant d'autres approches (Hazop, what-if, ...)

<p>Algorithme FREEDOM - Frequency Estimation of Domino accidents- (Bahman et al, 2006)</p>	<p>Une méthode récente d'évaluation des effets domino basée sur la simulation de Monte Carlo pour simuler le comportement réel d'un système multi-unités. Le système est défini comme la combinaison d'équipements présents dans une unité industrielle qui peuvent influencer la défaillance des uns et des autres. Cet outil, examine la défaillance de chaque équipement de l'unité industrielle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - traite les effets domino qu'en interne par rapport au site, - ne prend en considération les autres systèmes environnants, - ne prend comme critère que la défaillance des composants.
--	--	---

Malgré de nombreuses études dans la littérature scientifique, les méthodes existantes sont généralement basées sur des techniques analytiques, qui ont des capacités limitées pour faire face à la complexité du phénomène de l'effet domino. Généralement ces modèles sont très simplifiés et très spécifiques pour certains types de vecteurs d'intensification. En effet, à ce jour, il n'existe pas de modèle générique qui prend en compte les effets des accidents dominos en raison de leurs complexités associées à leur caractère émergent.

Les méthodes proposées peuvent être regroupées en deux grandes catégories :

Méthodes de hiérarchisation des équipements par rapport au danger d'effets dominos.

Les méthodes visant à calculer le risque d'effets dominos (fréquence et gravité des conséquences).

Cette étape a permis d'établir un cahier des charges traduisant les besoins à satisfaire et les contraintes à considérer :

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

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

Par ailleurs, le temps de calcul doit être raisonnable afin de pouvoir considérer l'ensemble des équipements d'un site industriel.

Dans ce contexte, nous avons choisi de porter des améliorations à la méthode ARAMIS en intégrant une approche d'étude d'effets dominos. Le choix de cette approche méthodologique se justifie par le fait que ce modèle répond à nos besoins et contraintes sauf qu'elle ne traite pas l'aspect d'effets dominos d'où la nécessité d'intégrer une approche pour l'étude de ce dernier.

II.3 Méthode ARAMIS

Le projet ARAMIS (*Accidental Risk Assessment Methodology for IndustrieS*) vise à améliorer les démarches d'analyse et de maîtrise (gestion) des risques d'installations industrielles susceptibles d'être le siège d'accidents majeurs comme le cas de LGA. En combinant les forces des deux approches les plus utilisées en Europe :

- L'approche probabiliste qui fait intervenir le calcul de probabilités relatives à l'occurrence d'événements faisant partie du processus de matérialisation d'un scénario d'accident donné.
- L'approche déterministe consiste à recenser les événements pouvant conduire à un scénario d'accident en recherchant le pire cas possible, et en affectant une gravité extrême à ses conséquences potentielles.

Il se fonde sur un principe de gestion selon lequel « vous ne pouvez pas gérer si vous ne pouvez pas mesurer ».

L'objectif de ce projet est de développer une nouvelle méthode qui permettra d'évaluer le niveau de risque d'une installation industrielle en tenant compte des mesures de sécurité destinées à prévenir les risques d'accidents majeurs.

II.3.1 Principaux résultats du projet ARAMIS

II.3.1.1 Concept de base

Pour le développement de cette méthodologie, la première étape consiste à s'entendre sur les composantes des risques et sur les éléments à identifier et mesurer pour les estimer. La figure (II-1) illustre la définition retenue. Le risque y est défini comme une combinaison de la probabilité de survenance d'un phénomène dangereux, et d'en estimer la fréquence. Elle implique aussi d'identifier et de qualifier les barrières de sécurité qui s'opposent au déroulement du scénario accidentel depuis un événement initiateur jusqu'à un phénomène dangereux.

La performance de ces barrières dépend non seulement de leurs caractéristiques intrinsèques mais aussi de la qualité de l'organisation mise en place pour en assurer la conception, l'installation, l'utilisation, la maintenance, et l'amélioration. La qualité de cette organisation est elle-même directement influencée par la culture de sécurité de l'entreprise.

L'évaluation de l'intensité des phénomènes dangereux dépend certes des modèles employés mais aussi beaucoup, voire principalement, des hypothèses retenues pour caractériser le terme source de ces phénomènes. Ainsi, est-il essentiel de préciser le mode de sélection de scénarios (c'est-à-dire l'ensemble des hypothèses de calcul) à modéliser pour estimer l'intensité de l'accident majeur redouté. Un nombre important de scénarios peuvent être sélectionnés par ce processus. Il faut donc aussi se doter d'un moyen de représenter le risque résultant de l'agrégation de ces scénarios d'accident. Un indice de sévérité, associant intensité et fréquence a été proposée à cet effet

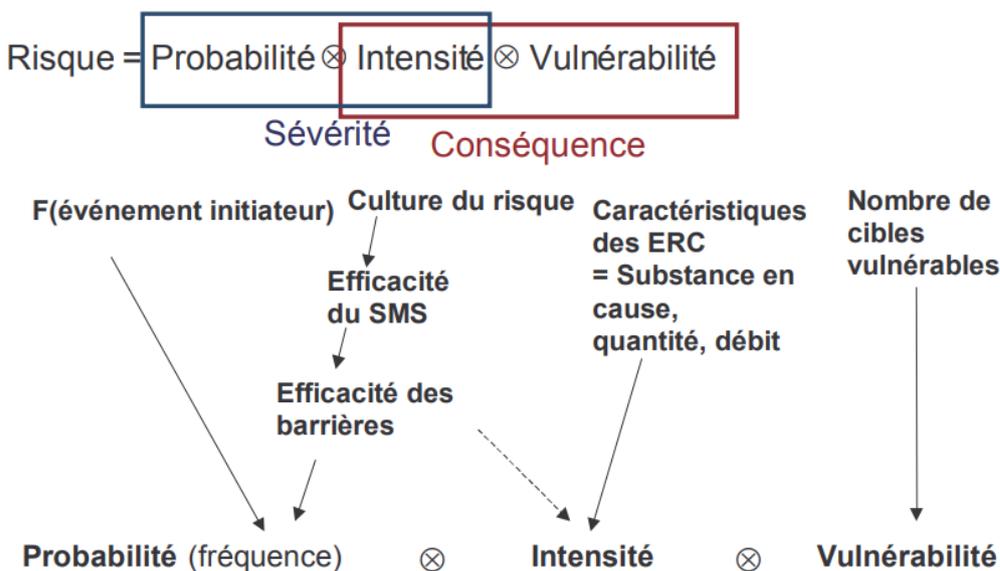


Figure II- 1 : Les composantes du risque et les éléments à analyser [10]

Enfin, la vulnérabilité du territoire est un sujet complexe qui peut être abordé suivant de nombreuses dimensions. En première approche, la vulnérabilité peut être considérée comme le facteur permettant d'estimer l'impact global d'un accident majeur.

II.3.1.2 Outils et méthodes pour l'évaluation des risques

À partir de ces définitions, le consortium d'ARAMIS a développé des méthodes et des outils pour :

- l'identification et la sélection des équipements dangereux en fonction des quantités de substances dangereuses qu'ils contiennent.
- L'identification des ERC et la construction des scénarios accidentels. ARAMIS utilise pour cela les nœuds papillon (figure II-2), association d'un ADD et ADE. Pour faciliter cette analyse, des nœuds papillons génériques ont aussi été construits. Ils constituent un support de départ pour l'analyse d'une installation spécifique.

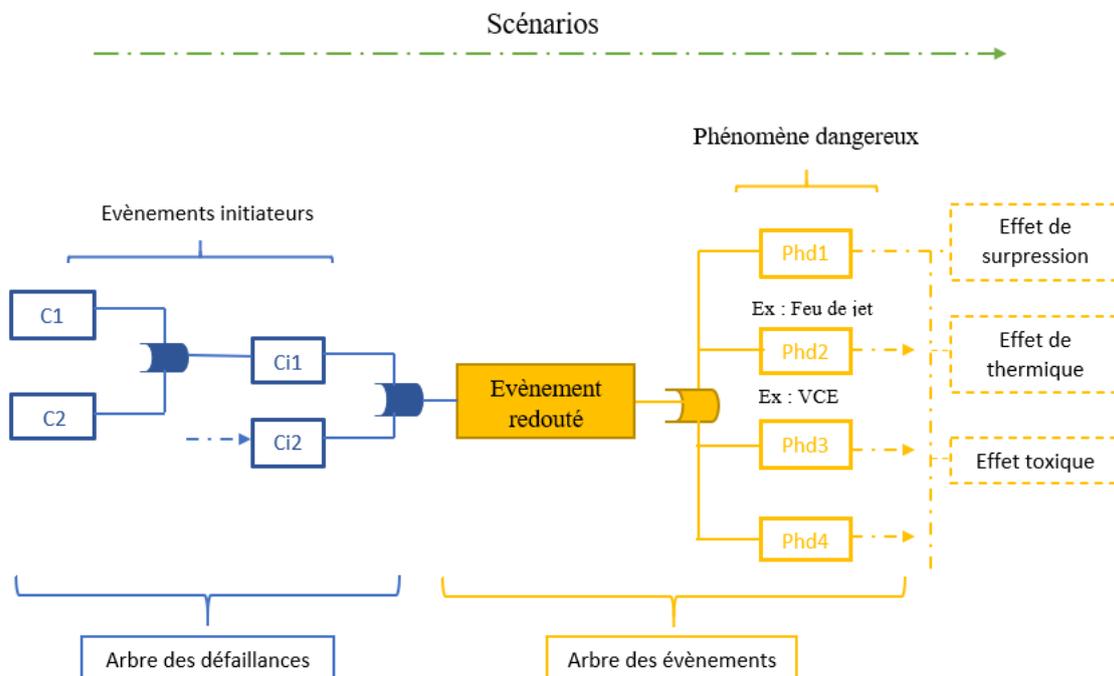


Figure II- 2 : Matérialisation des scénarios d'accident par le modèle « nœud papillon »

- L'identification des barrières de sécurité.
- L'évaluation des performances des barrières de sécurité. Les outils proposés à cet effet par ARAMIS sont volontairement inspirés des normes CEI 61508 et CEI 61511.
- L'estimation de la probabilité du scénario à partir de la prise en compte des fréquences d'événements initiateurs et des niveaux de confiance des barrières, qualifiée d'approche barrière.
- La qualification du système de management de la sécurité (SMS) et son influence sur le niveau de confiance des barrières.
- La qualification de la culture de sécurité.

- La sélection des scénarios de référence : ceux qui doivent être modélisés pour établir l'indice de sévérité.
- Le calcul et la cartographie de l'indice de sévérité.
- Le calcul et la cartographie de la vulnérabilité.

II.3.1.3 Déroulement de la méthode

La méthode ARAMIS est structurée en six étapes :

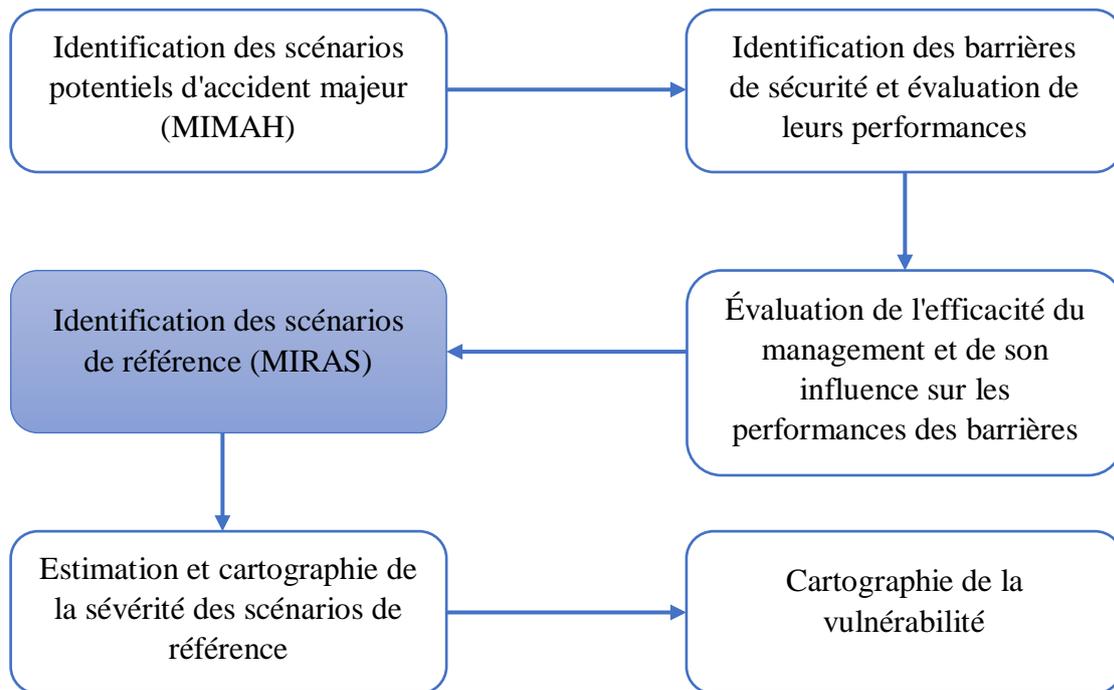


Figure II- 3 : étapes de la méthode ARAMIS

- **Première étape** : Identification des scénarios potentiels d'accident majeur (MIMAH)

L'identification des scénarios d'accident est basée sur l'utilisation d'une série d'arbres de défaillance et d'arbres d'événement génériques correspondant aux différents types d'équipements utilisés régulièrement dans l'installation.

L'identification des scénarios est précédée par une étape permettant de sélectionner les équipements de l'installation étudiée par la méthode VADE-MECUM, qui doivent faire l'objet d'une analyse. Cette sélection est réalisée en tenant compte de la nature et de la quantité des substances ainsi que des conditions dans lesquelles elles sont mises en œuvre.

Pour chaque couple formé d'un équipement et de la substance qu'il contient, la méthode permet de définir la liste des événements redoutés centraux (ERC), perte de confinement ou perte d'intégrité physique, qu'il est susceptible de générer. Chaque événement critique associe un arbre de défaillance et un arbre d'événement pour former un nœud papillon représentatif de plusieurs scénarios d'accident.

- **Deuxième étape** : Identification des barrières de sécurité et évaluation de leurs performances

Une fois les scénarios d'accident potentiels identifiés, la méthode ARAMIS prévoit d'identifier les barrières de sécurité permettant de réduire la probabilité de l'accident ou d'en réduire la gravité potentielle. Des listes de barrières sont proposées pour aider l'utilisateur dans sa démarche.

En parallèle, un graphe de risque inspiré de la norme CEI 61508 permet de définir les exigences de sécurité associées à un scénario donné et de définir ainsi le niveau de confiance global que doivent avoir les barrières de sécurité pour que le scénario soit acceptable.

- **Troisième étape** : Évaluation de l'efficacité du management et de son influence sur les performances des barrières de sécurité

Deux questionnaires d'audit permettent de prendre en compte les performances du management de l'usine et de la culture de sécurité sur le site. Les niveaux de confiance des barrières de sécurité sont affectés par le management et la culture de sécurité et sont donc recalculés à l'issue de cette évaluation.

- **Quatrième étape** : Identification des scénarios de référence (MIRAS)

Une matrice de criticité est utilisée ensuite pour déterminer les scénarios de référence qui vont faire l'objet d'une modélisation des effets.

Approche d'amélioration proposée

Ces dernières années, plusieurs méthodologies ont été proposées pour l'identification et l'évaluation des scénarios domino ainsi que l'étude de dangers, des dommages et des risques pouvant découler de cette catégorie d'accidents.

L'approche proposée dans cette partie se veut simple et applicable dans un contexte industriel réel. Elle permet à partir des résultats trouvés dans la première étape, d'identifier les sinistres pouvant être initiés par les scénarios d'accidents envisagés. Une fois que les effets dominos ont été identifiés pour des équipements pris deux par deux (un agresseur et une cible), On suggère d'identifier les cascades d'accidents (scénarios secondaires).

Les résultats de cette approche vont être utilisés pour définir les scénarios de référence en les intégrant dans la matrice de criticité proposée dans le cadre du projet ARAMIS.

- **Cinquième étape** : Estimation et cartographie de la sévérité des scénarios de référence

La sévérité des scénarios est alors évaluée. Plusieurs indices de sévérité ont été définis. Un premier indice permet de représenter les effets potentiels d'un scénario d'accident. Il repose sur une normalisation des effets dans une échelle unique. L'indice 100 correspondant au début des effets létaux et l'indice 0 à des effets nuls.

L'évaluation des effets du scénario considéré conduit à calculer cinq distances d'effets correspondant à cinq seuils auxquels sont affectés les indices 100, 75, 50, 25 et 0.

Entre ces distances seuils, l'indice de sévérité décroît de façon linéaire. Un indice de sévérité global a aussi été défini. Il permet de représenter le cumul des sévérités de l'ensemble des scénarios d'accident sur le site pondéré par les probabilités associées à chaque scénario.

À l'issue de ce calcul, il est donc possible de tracer une carte de sévérité autour du site.

- **Sixième étape** : Cartographie de la vulnérabilité

La vulnérabilité est estimée en faisant inventaire des éléments vulnérables potentiels (ou enjeux) autour du site industriel. Chaque type d'enjeu (humain, matériel, environnemental) est décomposé en différentes catégories dont la vulnérabilité relative à différents types d'effets a été évaluée sur la base d'un jugement d'expert. La vulnérabilité globale d'une zone est donc obtenue en effectuant une somme des différents types d'enjeux pondérés par leur vulnérabilité relative au type d'effet considéré.

La méthode ARAMIS a donc pour objectif de produire, in fine des résultats utiles à la décision en matière de maîtrise de l'urbanisation puisqu'elle permet de représenter de façon synthétique le risque sous forme d'une carte de sévérité couplée à une carte de vulnérabilité. Elle vise aussi à apporter des informations utiles relatives à la maîtrise du risque à la source, en identifiant les scénarios potentiels et les barrières qui permettent de les maîtriser. Enfin, elle constitue une approche innovante de la quantification de l'influence du management sur la sécurité du site.

II.4 Approche d'étude d'effets dominos

Si un risque d'escalade pertinent est identifié, une évaluation plus détaillée que celle basée sur les valeurs seuils de dommages peut être nécessaire. L'évaluation quantitative des risques (QRA) est aujourd'hui utilisée comme un outil standard pour analyser et comparer le risque dû aux installations industrielles.

En effet, elle permet l'évaluation quantitative des accidents à effets dominos, par le calcul des indices de risque, et cela en s'appuyant sur des outils et logiciels FDS (Fire Dynamics Simulator) ainsi que l'analyse Bayésienne, pour évaluer la fréquence des scénarios dominos.

L'approche se décline en plusieurs étapes, schématisée dans la figure (II-5) [7]

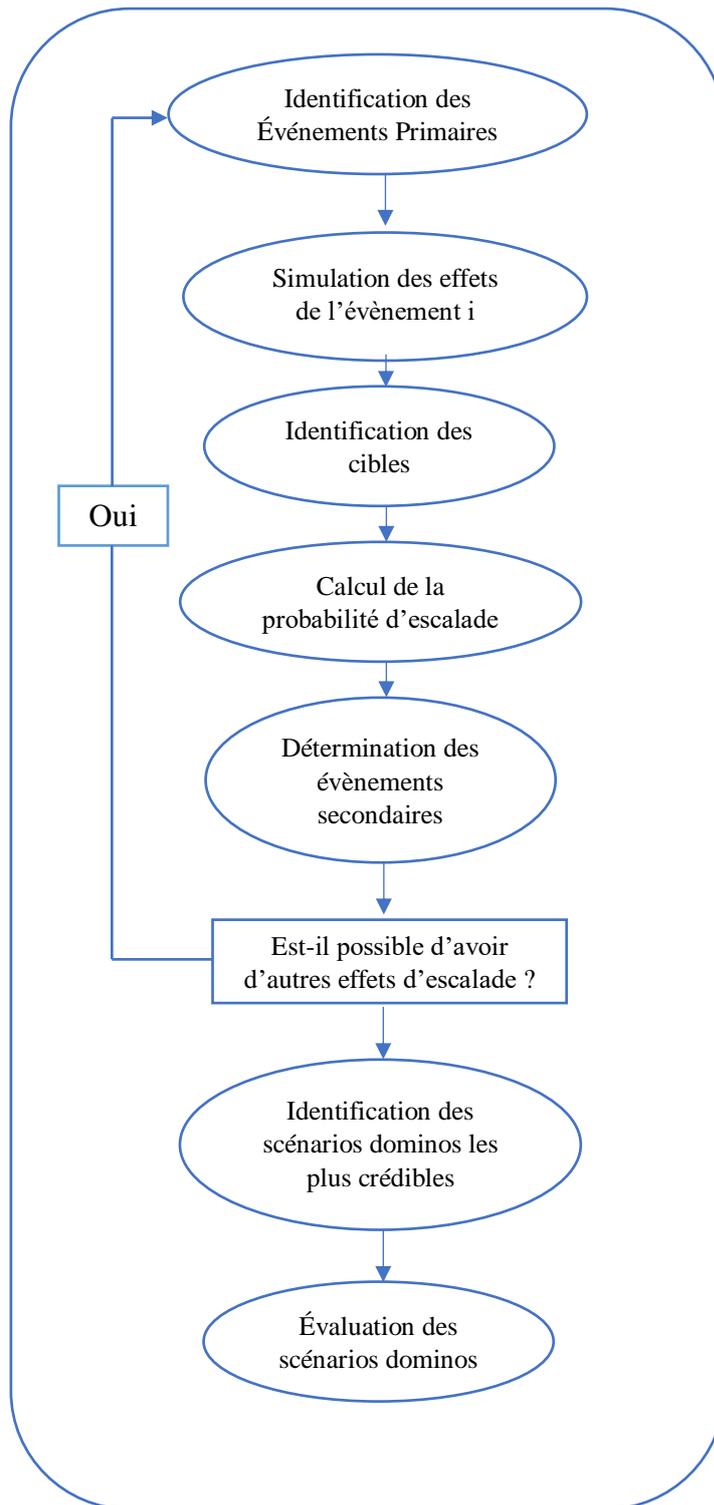


Figure II- 4 : Schéma explicatif de la méthode QRA pour les effets dominos

II.5 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Nous allons présenter dans cette section un échantillonnage de l'ensemble des méthodes d'analyse de risque intégrée dans la méthode ARAMIS, Chacune d'entre elle sera présentée brièvement.

II.5.1 Analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée.[9]

En ce sens, elle est particulièrement utile dans les situations suivantes :

- Au stade de la conception d'une installation.
- Dans le cas d'une installation complexe existante, au niveau d'une démarche d'analyse des risques.
- Dans le cas d'une installation dont le niveau de complexité ne nécessite pas d'analyses plus poussées au regard des objectifs fixés au départ de l'analyse des risques

II.5.1.1 Principe de la méthode

L'APR repose sur trois phases essentielles :

- Identification des situations dangereuses : substances, équipements, opérations dangereuses
- Détermination des causes et des conséquences de chacune des situations de danger identifiées
- Identifier les barrières de protection et de prévention existantes et, si nécessaire, proposer des mesures correctives.

II.5.1.2 Déroulement de la méthode

L'analyse préliminaire des risques est généralement synthétisée sur un tableau récapitulatif. Une décomposition fonctionnelle du système ou de l'installation en question est souvent utile car elle permet de passer en revue tous les produits ou équipements pour chaque fonction identifiée dans la phase de description de l'installation.

Le tableau (II-5) ci-dessous est donc donné à titre d'exemple.

Tableau II- 5 : Exemple de tableau de type APR.[9]

N°	Produit ou équipement	Situation de danger	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration

II.5.1.3 Avantages et limites

L'avantage de l'APR est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations, elle apparaît comme relativement économique en termes de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié détaillé.

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'ADD. Toutefois, son utilisation seule peut être jugée suffisante dans le cas d'installations simple ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approches.

II.5.2 Arbre de défaillance (AdD)

II.5.2.1 Historique et domaine d'application

L'analyse par Arbre de Défaillances a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine « Bell Téléphone ». Elle fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles. Elle est employée pour identifier les causes relatives aux événements redoutés. En partant d'un événement unique, il s'agit de rechercher les combinaisons d'événements conduisant à la réalisation de ce dernier. L'analyse par Arbre de Défaillances peut également être poursuivie dans le cadre d'une reconstitution des causes d'un accident.

La méthode consiste en une représentation graphique des multiples causes d'un événement redouté. Elle permet de visualiser les relations entre les défaillances d'équipement, les erreurs humaines et les facteurs environnementaux qui peuvent conduire à des accidents. On peut donc éventuellement y inclure des facteurs reliés aux aspects organisationnels.

Elle est également utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'événement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident.[9]

II.5.2.2 Principe

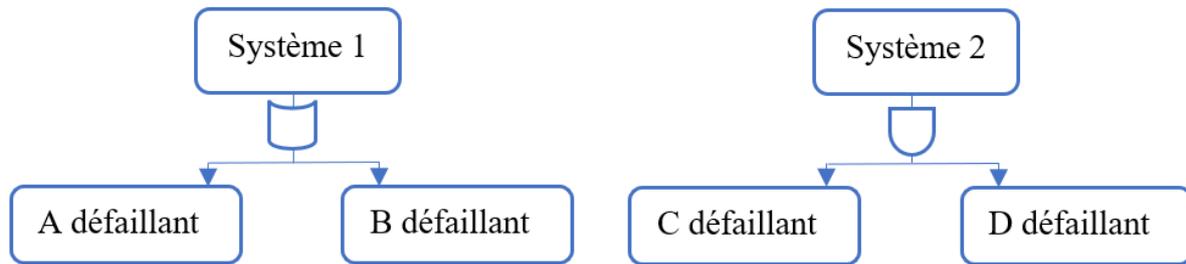
Un AdD représente de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'événements qui, dans certaines conditions, produisent un événement donné, point de départ de l'étude. Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question « comment un tel événement peut-il arriver ? », ou encore « quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet événement ? ».

L'analyse par AdD est une méthode de type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'événements ou les combinaisons d'événements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en causes jusqu'aux événements de base susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté.

Ainsi, l'analyse par l'AdD permet d'identifier les successions et les combinaisons d'événements qui conduisent des événements de base jusqu'à l'événement indésirable retenu.

Les liens entre ces différents événements identifiés sont réalisés grâce à des portes logiques (de type « ET » et « OU » par exemple). Cette méthode utilise une symbolique graphique particulière qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente.

Ce schéma représente les portes logiques



- La porte logique OU modélise un système S1 qui est en panne lorsqu'au moins un des deux composants A ou B est tombé en panne.
- La porte logique ET modélise un système S2 qui est en panne lorsque les composants A et B sont tombés en panne.

À l'aide des règles mathématiques et statistiques, il est alors théoriquement possible d'évaluer la probabilité d'occurrence de l'événement final à partir des probabilités des événements de base identifiés.

L'analyse par AdD d'un événement redouté peut se décomposer en trois étapes successives :

- Définition de l'événement redouté étudié
- Construction de l'arbre
- Exploitation de l'arbre

II.5.2.3 Élaboration de l'arbre

La construction de l'arbre des défaillances vise à déterminer les enchaînements d'évènements pouvant conduire à l'événement final retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles correspondent à des événements élémentaires.

La figure (II-5) représente la démarche pour élaborer l'AdD

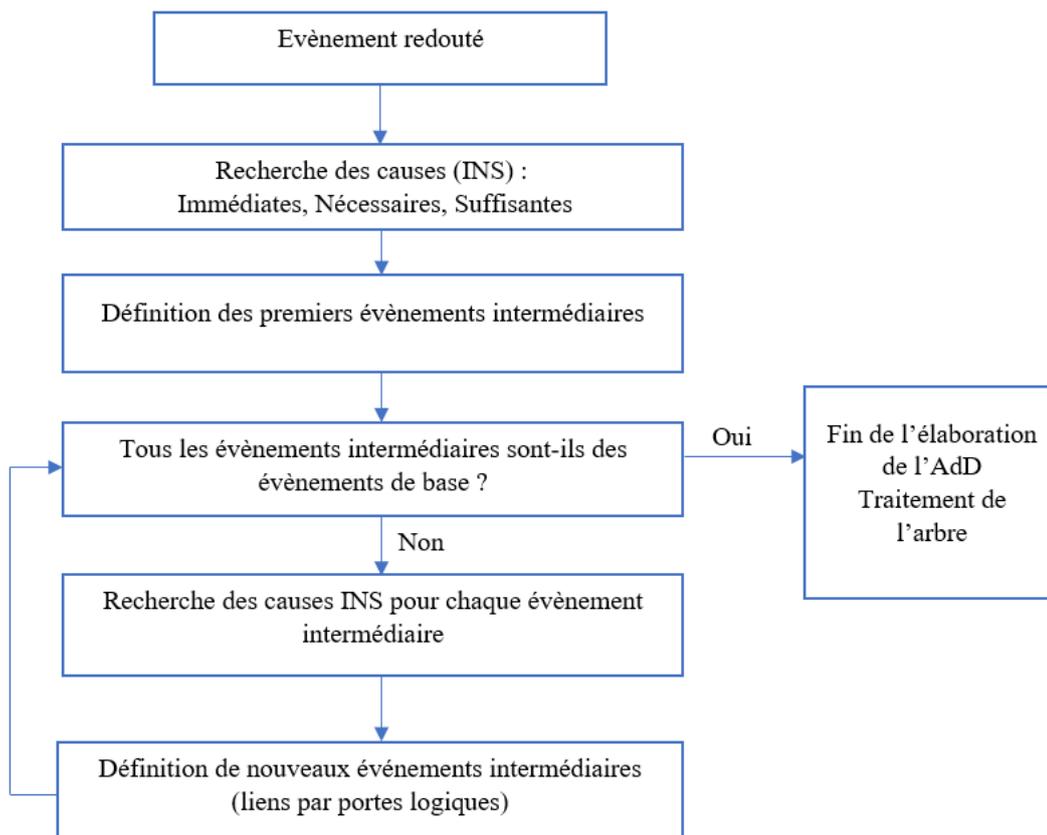


Figure II- 5 : Démarche pour l'élaboration d'un arbre des défaillances. [9]

La construction de l'arbre revient à relier les différents événements trouvés pouvant conduire à l'ER selon les scénarios arrêtés. Pour les événements primaires, il existe des symboles graphiques propres à aider l'analyste dans son travail de construction, ces symboles sont représentés dans le tableau II-6 :

Tableau II- 6 : Symboles graphiques [9]

Symbole	Nom	Description
	Évènement de base	Évènement du plus bas niveau pour lequel la probabilité d'apparition ou d'information de fiabilité est disponible
	Évènement élémentaire	Évènement qui pourrait être détaillé mais dont le niveau de détail est considéré comme suffisant pour l'arbre considéré
	Évènement à développer	Le développement de cet événement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information. L'utilisation de ce symbole permet à l'analyste de repérer facilement le travail restant à faire.

II.5.2.4 Exploitation de l'arbre des défaillances

L'analyse par arbre des défaillances permet d'estimer la probabilité d'occurrence d'un événement et de s'assurer que toutes les mesures possibles ont effectivement été envisagées en vue de prévenir le risque associé à cet événement. Elle est conçue afin de pouvoir considérer

des combinaisons de défaillances et de vérifier que toutes les causes potentielles ont bien été prises en compte.

Cette exploitation de l'arbre des défaillances peut être réalisée de manière qualitative et quantitative. Elle nécessite au préalable de traiter les résultats fournis au cours de la construction de l'arbre.

- L'exploitation qualitative de l'arbre vise à examiner comment une défaillance correspondant à un événement de base peut se propager dans l'enchaînement des causes jusqu'à l'événement final.
- L'exploitation quantitative d'un AdD se fait principalement afin de calculer la probabilité d'occurrence de son événement redouté (ER). On fait cette exploitation à partir des données numériques relatives aux probabilités d'occurrence de tous les événements de base de l'AdD.

II.5.3 Analyse par Arbre d'Évènements (AdE)

L'analyse par AdE a été développée au début des années 1970 pour l'estimation du risque lié aux centrales nucléaires.

Cette méthode s'applique sur des sous-systèmes bien déterminés, elle apporte une aide précieuse pour traiter des systèmes comportant de nombreux dispositifs de sécurité et de leurs interactions, elle permet d'estimer les probabilités d'occurrence de séquences accidentelles à condition de disposer de la probabilité d'occurrence de l'évènement initial et de la probabilité de défaillance des barrières de sécurité.

Cette méthode est aussi utilisée dans le domaine de l'analyse après l'accidents en vue d'expliquer les conséquences observées résultant d'une défaillance du système.[9]

II.5.3.1 Principe

L'analyse par AdE suppose la défaillance d'un composant ou d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les évènements qui en découlent.

À partir d'un évènement initiateur ou d'une défaillance d'origine, l'analyse par arbre d'évènements permet donc d'estimer la dérive du système en envisageant de manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de détection, d'alarme, de prévention, de protection ou d'intervention.

II.5.3.2 Déroulement

L'analyse par Arbre d'Évènements se déroule en plusieurs étapes préliminaires :

- Considération d'un évènement initiateur ;
- Identification des fonctions de sécurité prévues pour contrôler son évolution ;
- Construction de l'arbre ;
- Description et exploitation des séquences d'évènements identifiées ;
- Il serait plus pertinent d'élaborer un Arbre d'Évènements à l'issue d'une première analyse identifiant les accidents potentiels à l'image de l'APR.

Les fonctions de sécurité doivent être assurées par des barrières ayant pour objectif d'empêcher le processus de matérialisation d'un accident provoqué par un événement initiateur.

La construction de l'arbre consiste à envisager soit le bon fonctionnement soit le dysfonctionnement de la première fonction de sécurité en partant de l'événement initiateur.

La suite de la méthode consiste à examiner le développement de chaque branche en considérant systématiquement le fonctionnement ou la défaillance de la fonction de sécurité jusqu'à l'atteinte d'un accident potentiel. La propagation des probabilités d'occurrence des événements initiateurs permet de calculer la probabilité de l'évènement redouté.

II.5.3.3 Construction de l'arbre

La construction de l'arbre consiste alors, à partir de l'évènement indésirable, à envisager soit le bon fonctionnement soit la défaillance de la première fonction de sécurité. L'évènement initiateur est représenté schématiquement par un trait horizontal. Le moment où doit survenir la première fonction de sécurité est représenté par nœud. La branche supérieure correspond généralement au succès de la fonction de sécurité, la branche inférieure à la défaillance de cette fonction. Voici un exemple de l'architecture de l'arbre des événements.

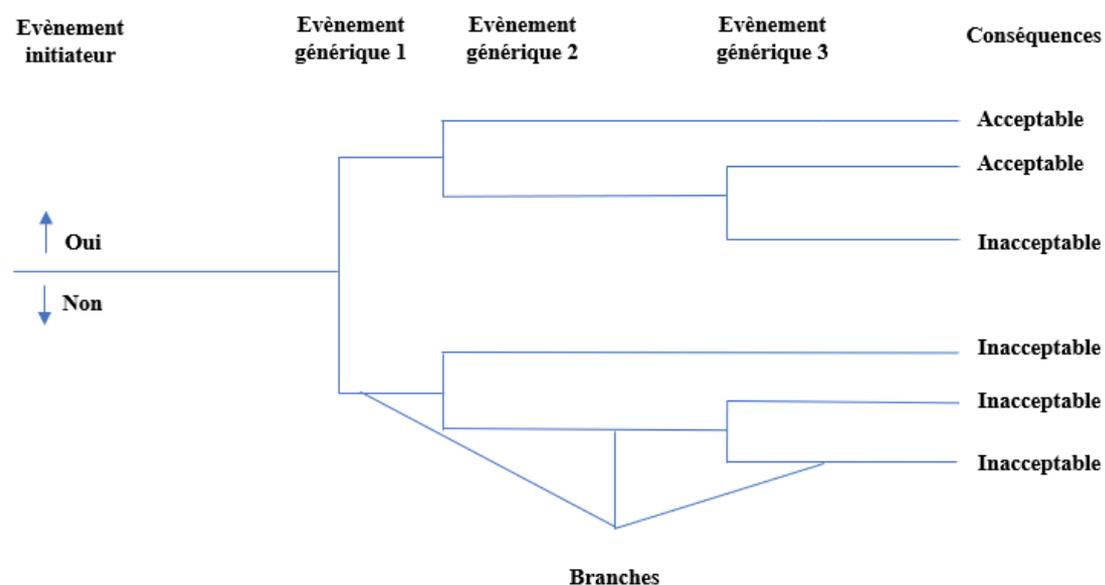


Figure II- 6 : Architecture de l'arbre des événements

L'analyse par l'AdE est une méthode qui permet d'examiner, à partir d'un évènement initiateur, l'enchaînement des évènements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle trouve ainsi une utilité toute particulière pour l'étude de l'architecture des moyens de sécurité (prévention, protection, intervention) existants ou pouvant être envisagés sur un site. À ce titre, elle peut être utilisée pour l'analyse d'accidents a posteriori.

Cette méthode peut s'avérer lourde à mettre en œuvre. En conséquence, il faut définir discernement l'évènement initiateur qui fera l'objet de cette analyse.

II.6 Méthodologie proposée

Après avoir choisi l'approche d'étude d'effets dominos et la méthode d'analyse des risques qui répond à nos besoins et nos contraintes, la méthodologie proposée est schématisée dans la figure (II-7)

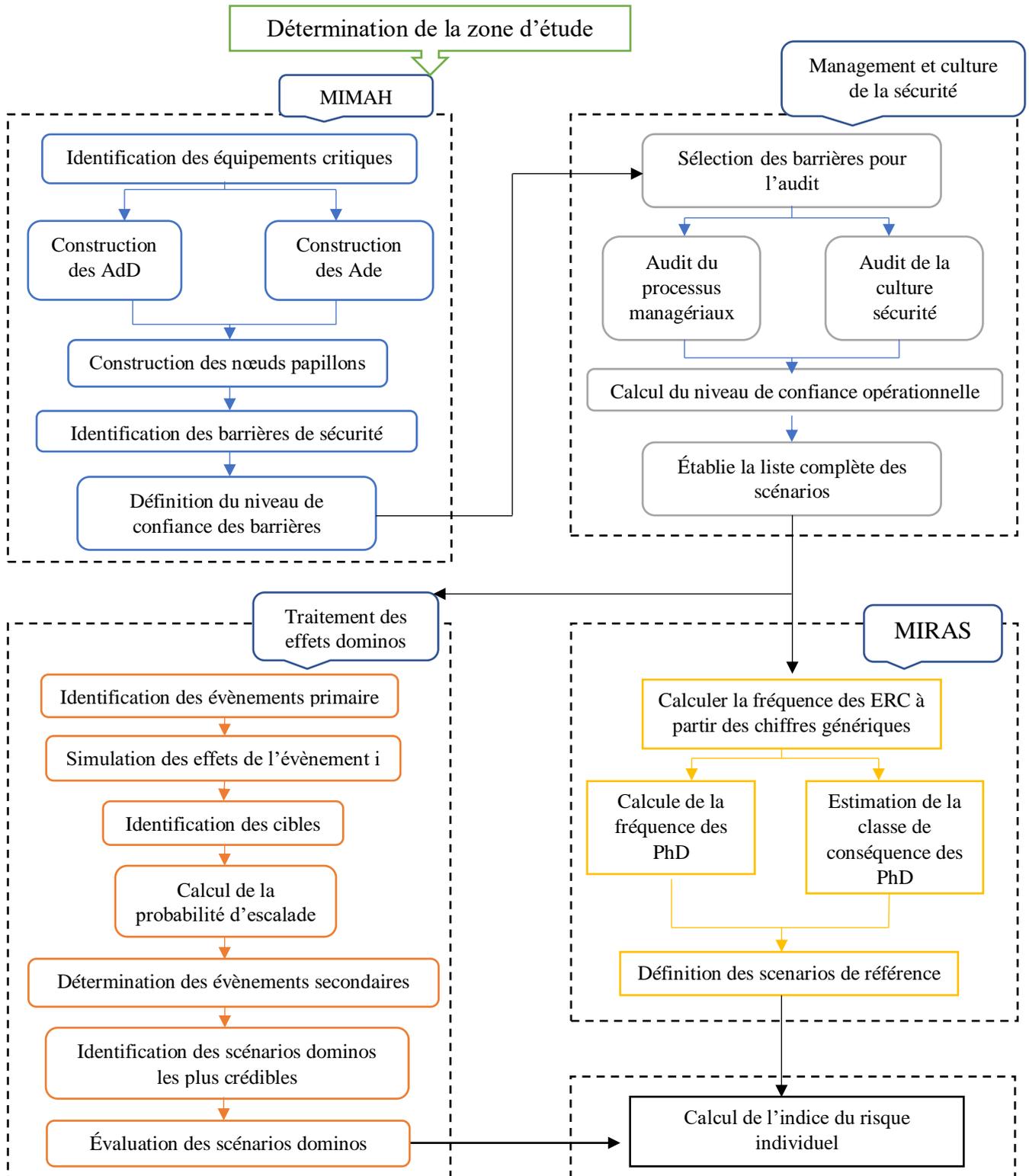


Figure II- 7: Schéma explicatif de la méthodologie proposée

Ce chapitre a permis de clarifier les notions liées aux effets dominos, nous avons aussi détaillé la méthode ARAMIS et expliqué les différentes méthodes classiques intégrées au sein de cette dernière. Ensuite, L'approche d'étude d'effets dominos a été identifiée et intégrée dans la quatrième étape de la méthode ARAMIS, Le chapitre suivant est consacré à l'application de cette nouvelle méthode.

Chapitre III : Application de la méthode

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la méthode proposée dans le précédent chapitre aux ateliers critiques de l'organisation, le choix des ateliers critiques est réalisé par l'application de l'APR.

III.1 Présentation des processus de production et de conditionnement

Dans cette section, nous allons explorer les processus et les produits utilisés dans les différents ateliers.

Le site de Réghaia comprenant environ 130 employés pour la réalisation des activités suivantes :

- La production des gaz de l'air : L'unité de séparation des gaz de l'air (ASU) fonctionnant 24 heures /24 et 365 Jours /ans, elle produit de l'azote, l'oxygène et l'argon liquide.
- Le conditionnement des gaz industriels en bouteilles : L'oxyde d'éthylène, protoxyde d'azote, oxygène.
- Travail administratif, commercial/logistique.
- Maintenance des équipements et traitement des bouteilles.

Pour ce faire, Les installations du site comportent :

- Une unité de séparation des gaz de l'air (*Air Separation Unit*).
- Un atelier de conditionnement des gaz de l'air.
- Un atelier de conditionnement d'oxyde d'éthylène.
- Un atelier de conditionnement de protoxyde d'azote.
- Un parc de stockage de bouteilles.
- Bloc administratif.

Ces derniers feront l'objet d'une analyse par APR.

III.1.1 L'oxyde d'éthylène

III.1.1.1 Présentation

L'oxyde d'éthylène, ou 1,2-époxyéthane, oxyde de di méthylène, oxacyclopropane, ou encore oxirane est un composé organique, le plus simple de la classe des époxydes, il est important pour l'industrie chimique, entre autres dans la production d'éthylène glycol. Ainsi que dans les industries pharmaceutique et agroalimentaire.

L'oxyde d'éthylène fut synthétisé pour la première fois par Charles Wurtz en 1859. En faisant réagir du 2-chloroéthanol avec une base. Il prit vraiment une importance aux yeux des industriels durant la première guerre mondiale, où il servit à fabriquer l'éthylène glycol (en tant que réfrigérant) et le gaz moutarde.

En 1931, Théodore Lefort découvrit une autre méthode de synthèse, directement à partir d'éthylène et de dioxygène réagissant grâce à un catalyseur à base d'argent, Depuis les années 1940, c'est cette méthode qui sert à produire quasiment tout l'oxyde d'éthylène industriel.[10]

III.1.1.2 Processus de conditionnement

Le conditionnement de l'oxyde d'éthylène se fera en fonction de la demande, la capacité de conditionnement est de 40 tonnes par an.[10]

Le processus de conditionnement peut être résumé comme suit :

La production d'oxyde éthylène dilué se fait à partir des produits suivants :

- Matière première : Oxyde éthylène pur (Importation).
- Utilités : AZOTE Gazeux pour l'inertage.
CO₂ Vrac (Production entreprise).
H₂O (Refroidissement).

Les bouteilles homologuées par les services des mines seront remplies d'un mélange d'oxyde d'éthylène (10 %) et de CO₂ (90 %), en procédant comme suit :

L'oxyde d'éthylène pur est poussé à l'intérieur du tonneau vers les bouteilles à remplir par une pression d'azote de 6 bars. À la fin du dosage de 10% d'oxyde d'éthylène dans la bouteille, la pompe du CO₂ est actionnée automatiquement pour compléter le remplissage de bouteille en CO₂ (90 %) pour atteindre le poids total de 34 à 37 KG.

Toutes les purges d'oxyde d'éthylène et CO₂, sont systématiquement envoyés vers le scrubber (tampon à récupérer) dont le rôle est d'absorber les résidus dans un mélange (H₂O + Acide) en conduite de circulation en circuit fermé pour les neutraliser.

Les petites quantités d'oxyde d'éthylène récupérées dans le scrubber seront synthétisées avec l'eau, selon l'équation :



Cette réaction peut être catalysée en milieu acide. Dans ce dernier et avec un excès d'eau, le rendement de la réaction peut atteindre 90 %.

L'éthylène glycol est surtout employé en tant qu'antigel et réfrigérant.

III.1.2 Les gaz de l'air

L'air atmosphérique est constitué principalement d'azote (78%), d'oxygène (21%) des gaz rares (Argon, Néon, xénon, Krypton, Hélium (0,94 %) des traces d'Anhydride carbonique (300 ppm environ), vapeur d'eau et Hydrocarbures.

III.1.2.1 L'oxygène (O₂)

L'oxygène est un élément gazeux, de symbole O, incolore, inodore et légèrement magnétique.

Il est livré en tant que gaz industriel conditionné pur dans des bouteilles sous pression, à trois usages :

- Industriel : pour provoquer des réactions chimiques, ou activer une flamme de chalumeau oxyhydrique ;
- Loisirs : plongée sous-marine.
- Médical : Oxygénothérapie normobare (à pression atmosphérique),

Oxygénothérapie hyperbare (à haute pression)

Il est également utilisé sous forme liquide pour les applications médicales et industrielles.

III.1.2.2 Équipements de l'ASU

Le principe de fabrication d'oxygène, Azote et Argon est basé sur la séparation à très basses températures des constituants de l'air.[10]

Sachant que la température d'ébullition à la pression atmosphérique (760 mm Hg) est

Oxygène :	-183 °C
Azote :	-196 °C
Argon :	-185,8 °C

L'ASU se compose de :

- Un filtre d'air (S1146) pour éliminer la poussière et d'autres particules contenues dans l'air avant sa pénétration dans le compresseur d'air C1161 qui comprime l'air à 4,6 bars.
- Deux refroidisseurs E1121 et E2418 et une unité de réfrigération K2476 qui assure l'eau de refroidissement.
- L'élimination des CO₂ et des hydrocarbures potentiellement dangereux se réalise par des adsorbants à tamis moléculaires A2626A/B.
- Chauffage électrique E2618 qui chauffe l'azote impur utilisé pour la régénération des adsorbants et un accumulateur de chaleur E2621 qui est chargé durant les étapes de refroidissement, de pressurisation, de changement et de dépressurisation.
- Un refroidisseur de sortie E1421 qui refroidit l'air après le dernier étage du compresseur de recyclage, puis comprimé encore à 49,6 bars par l'unité de compresseur/surpresseur à turbine de détente C3461.
- Une boîte froide où la quantité totale d'air comprimé est refroidie par les flux de produits froids à une température de -70°C.
- Une turbine de détente, ce flux est divisé. Une partie est dirigée vers la colonne de pression T3211 et l'autre partie est recyclée vers le compresseur de recyclage C1461.
- Une colonne de pression T3211 où l'air de processus est pré-séparé en liquide enrichi en oxygène en bas (au fond) et en azote pur en haut.
- Un condenseur E3216 qui assure la condensation de l'azote gazeux contre l'oxygène bouillant pour générer le reflux nécessaire pour la rectification.
- Une partie de l'azote liquide sert de reflux pour la colonne de pression, et le reste est sous-refroidi dans le sous-refroidisseur E3316 et alimentée dans la colonne basse pression T3212 dans laquelle elle sert de reflux pour la colonne basse pression.
- Réservoir de stockage d'azote liquide LIN D7310.
- Un sous-refroidisseur E3316 où le liquide enrichi en oxygène est sous-refroidi. Il sert de réfrigérant pour le condenseur d'argon brut E4116 et pour le condenseur d'argon pur E4116. 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 de T3212 est pompé par une pompe cryogénique P3366 et divisé en deux flux.
- L'un des flux est directement dirigé via le sous-refroidisseur E3316 vers le réservoir de stockage de LOX D7110.
- L'autre flux est alimenté dans le condenseur E3216 et vaporisé contre l'azote en condensation. L'oxygène gazeux extrait du condenseur est divisé en oxygène gazeux résiduaire (GOX) et en oxygène fourni à la colonne basse pression.
- Le gaz d'azote pur en haut de la colonne basse pression est réchauffé dans le sous-refroidisseur E3316 et l'échangeur de chaleur principal E3116, 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 N 3954.
- Le gaz résiduaire d'azote de la colonne basse pression est réchauffé dans le sous-refroidisseur E3316 et l'échangeur de chaleur principal E3116 pour la régénération de l'adsorbeur à tamis moléculaire. Le gaz résiduaire est ensuite rejeté dans l'atmosphère.

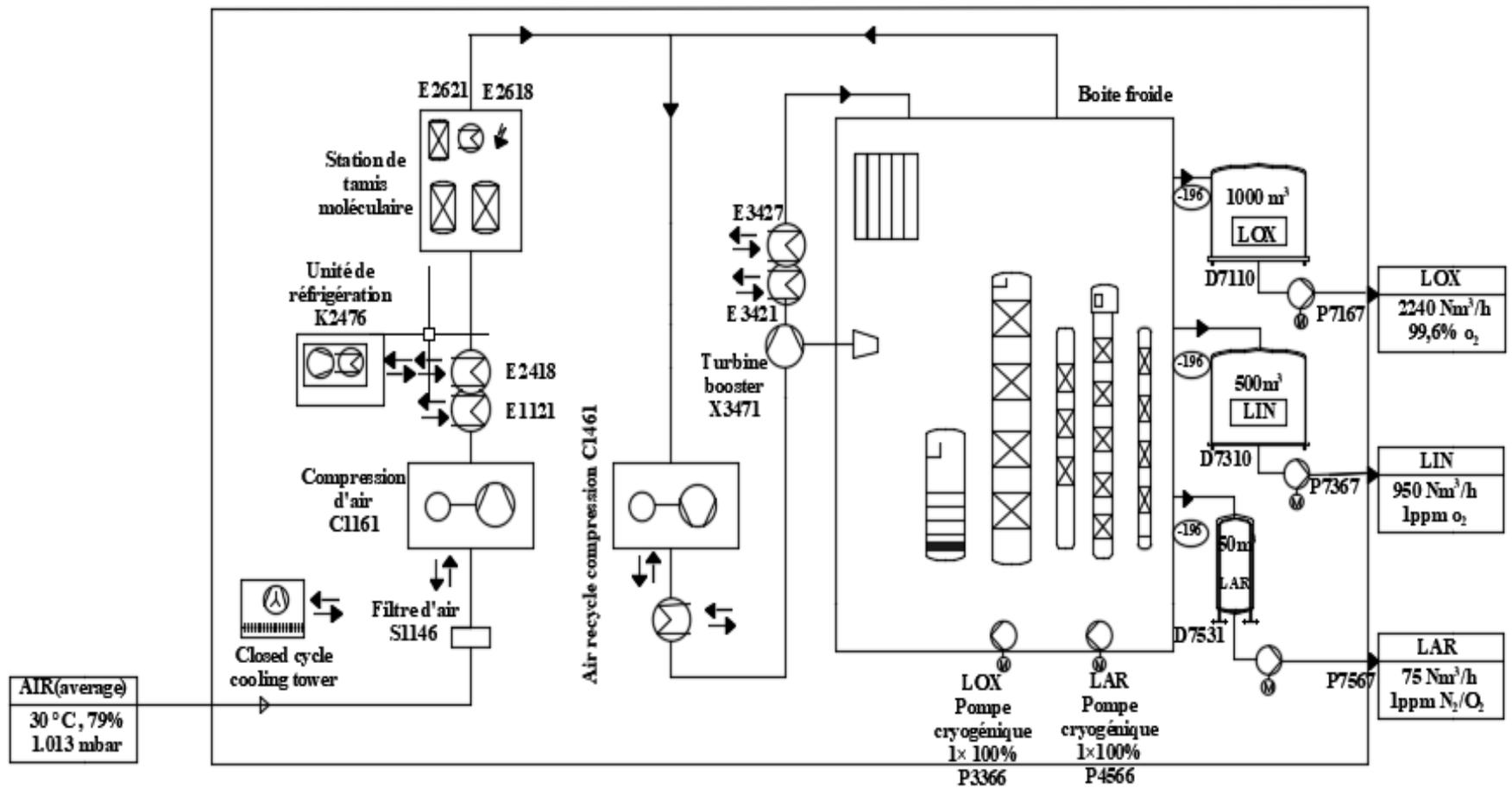


Figure III- 1 – Process Flow Diagram (PFD) d’une chaîne de séparation des gaz de l’air

III.1.2.3 Conditionnement des gaz de l'air

Le processus de mise en bouteilles industrielles de ces gaz consiste en un pompage de gaz liquéfiés des réservoirs de stockage vers les rampes de chargement des récipients, à travers les réchauffeurs atmosphériques.[10]

Les principaux équipements pour le conditionnement d'O₂, N₂, Ar à partir d'un réservoir cryogénique sont :

- Pompe HP
- Réchauffeur atmosphérique
- Rampe remplissage bouteilles
- Rampe cadre de bouteilles

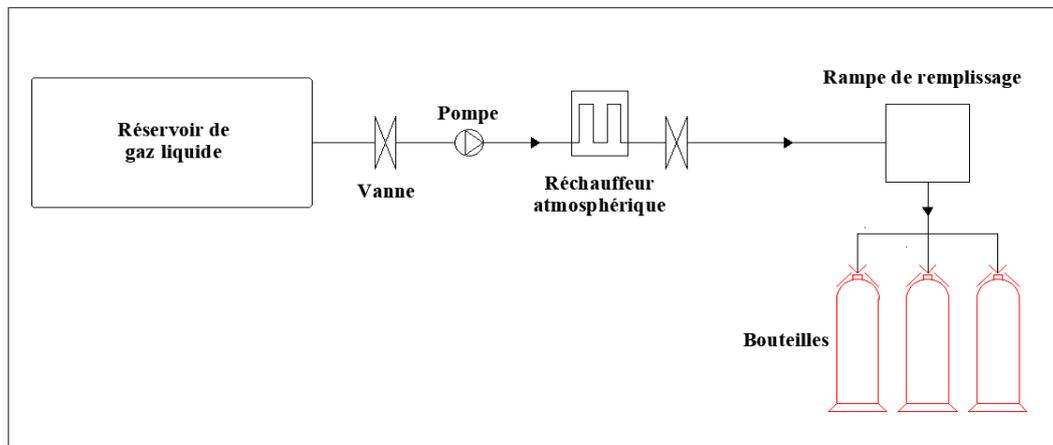


Figure III- 2 : Schéma type de conditionnement des gaz de l'air[10]

III.1.3 Le protoxyde d'azote

Le protoxyde d'azote (*Nitrous Oxide*), dont la formule est N₂O, est un gaz liquéfié comburant, clair et incolore, à l'odeur douce. Ce gaz est stable et inerte à la température ambiante.[10]

Le N₂O entretient la combustion et peut détoner à des températures supérieures à 650 ° C (1202 ° F).

On le retrouve dans un certain nombre d'applications. Le protoxyde d'azote a des usages bénéfiques. On le livre en tant que gaz industriel conditionné pur dans des bouteilles sous pression, à trois usages

- Médecine / Dentisterie Anesthésie
- Traitement des aliments Gaz propulseur
- Autres :
- Fabrication des semi-conducteurs,
- Chimie analytique : comburant utilisé avec l'acétylène pour la spectrométrie d'absorption atomique.

III.2 Détermination des zones critiques par l'APR

Afin de pouvoir appliquer la méthode proposée dans le chapitre précédent, nous devons tout d'abord déterminer la zone critique, pour ce faire nous allons appliquer la méthode APR sur les différents ateliers existants au niveau de LGA Réghaia.

Notre objectif est de déterminer les ateliers à haut risque (criticité élevé), par conséquent nous allons faire une évaluation qualitative en prenant en compte les barrières de sécurité existantes, nous allons commencer par un découpage de toute l'installation par atelier, ensuite nous aurons à identifier les caractéristiques des différents produits utilisés dans le conditionnement et la production des gaz industriels et médicaux.

III.2.1 Systèmes étudiés

Pour la réalisation de l'APR, les installations du site ont été découpées selon les systèmes indiqués dans le tableau (III-1)

Tableau III- 1: Découpage de l'installation pour l'APR

Sous-systèmes i	I - Atelier de production et de conditionnement des gaz de l'air
Sous-système 1	Réservoir de stockage d'oxygène liquide (LOX) D7110
Sous-système 2	Colonne de pression T3211
Sous-système 3	Compresseur d'air C1161
Sous-système 4	La ligne reliant le réservoir LOX à la rampe de remplissage
Sous-système 5	Bouteilles LOX
Sous-système 6	Camion-citerne
Sous-système 7	Rampe de remplissage

Sous-systèmes i	II - Atelier de conditionnement de protoxyde d'azote
Sous-système 1	Bouteilles GNO ₂
Sous-système 2	Rampe de remplissage
Sous-système 3	Réservoir GNO ₂

Sous-systèmes i	III - Atelier de conditionnement d'oxyde d'éthylène
Sous-système 1	Bouteilles ETO
Sous-système 2	Panel de remplissage
Sous-système 3	Laveur (scrabber)
Sous-système 4	Fut ETO

Sous-systèmes i	IV – Atelier de stockage de bouteilles
Sous-système 1	Cadres de bouteilles Hydrogène (H ₂)
Sous-système 2	Cadres de bouteilles Acétylène (C ₂ H ₂)
Sous-système 3	Cadres de bouteilles Oxygène (O ₂)
Sous-système 4	Cadres de bouteilles Protoxyde d'azote (GNO ₂)

III.2.2 Identification des produits dangereux

Les risques que présentent la manipulation et/ou le stockage des produits sont résumés dans le tableau (III-2) :

Tableau III- 2 : caractéristiques des produits dangereux [10]

Produits	Potentiels de danger
Acétylène	<ul style="list-style-type: none"> - Extrêmement inflammable - Le Mélange air-gaz est explosif - Réagit violemment avec les oxydants provoquant des risques d'explosion et d'incendie - Produit asphyxiant
Hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz extrêmement inflammable - Peut former potentiellement une atmosphère explosive dans l'air. - Peut réagir violemment avec les oxydants.
Oxyde d'éthylène	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz extrêmement inflammable - Toxique par inhalation - Provoque une sévère irritation des yeux - Peut irriter les voies respiratoires - Provoque une irritation cutanée
Oxygène liquide	<ul style="list-style-type: none"> - Favorise fortement la combustion d'autres substances - Risque d'incendie ou d'explosion au contact des matières - Combustibles avec lesquelles il réagit violemment - Risque d'explosion des contenants sous l'effet de la chaleur
Dioxyde de carbone / CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz incombustible inodore et toxique Gaz à effet de serre - Densité : 1,92 Kg / m³, plus lourd que l'air. - Concentration maximale admise : 0,5 % sur lieux de travail - Concentration dangereuse : <ul style="list-style-type: none"> - 4 % : évanouissement - 8 % : asphyxie
Protoxyde d'azote	<ul style="list-style-type: none"> - Asphyxiant à forte concentration. (Les risques d'asphyxie sont souvent sous-estimés et doivent être soulignés pendant la formation des opérateurs) - Favorise l'inflammation des matières combustibles. Peut causer des gelures
Argon	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'inhalation : Ce liquide s'évapore très rapidement entraînant la sursaturation d'air avec un risque sérieux de suffocation dans les secteurs confinés. - Effets d'exposition : <ul style="list-style-type: none"> o Inhalation : Vertige. Mal de tête. Suffocation. o Peau : Sur le contact avec le liquide : gelure. o Yeux : Sur le contact avec le liquide : gelure. - Inhalation : Ce gaz est inerte et est classifié comme agent asphyxiant simple. Inhalation avec les concentrations excessives peut entraîner le vertige, nausée, vomissement, perte de conscience et mort. - La perte de conscience et la mort peuvent se produire en quelques secondes sans avertissement.

III.2.3 Évaluation de la criticité

Pour bien mener notre APR, nous aurons à élaborer les différentes grilles (Probabilité, gravité) afin de localiser les risques à criticité élevé.

Tableau III- 3: Grille de probabilité

Situations	Niveau	Qualitative
L'événement ne s'est pas produit dans notre secteur	1	Improbable
Un événement similaire s'est produit dans le secteur gazier	2	Faible
Un événement similaire s'est produit chez Linde	3	Possible
Événement susceptible de se produire plusieurs fois pendant la durée de vie d'une installation	4	Occasionnel
Événement courant	5	Fréquent

Tableau III- 4: Grille de gravité

Blessure de collaborateurs	Domage environnemental	Impact financier	Niveau	Commentaire
Premiers secours ou absence de blessure	Domage environnemental non significatif nécessitant une intervention minimale et n'entraînant aucun effet à long terme	< 20000 DA	1	Faible
Incidents avec traitement médical	Domage limité sans effets à long terme (dépassement temporaire des valeurs limites légales ou déversement de produits sur le site)	20000 – 200 000 DA	2	Modéré
Accident du travail avec arrêt de travail, rétablissement complet	Domage significatif, mais qu'il est possible de réparer (un incident localisé entraînant un dommage écologique sérieux, mais qui peut être traité et réparé rapidement)	200 000 - 100 000 000 DA	3	Sérieux
Un seul décès ou incapacité permanente	Domages à long terme sérieux sur le site et les zones environnantes	100 000 000 - 200 000 000 DA	4	Majeur
Plusieurs décès ou incapacités permanentes	Désastre écologique	Plus de 200 000 000 DA	5	Catastrophique

La matrice de criticité est donnée dans le tableau (III-5) :

Tableau III- 5: Matrice de criticité

		Gravité				
		Faible 1	Modéré 2	Sérieux 3	Majeur 4	Catastrophique 5
Fréquence	Fréquent 5	1	2	3	3	3
	Occasionnel 4	1	2	2	3	3
	Possible 3	1	1	2	3	3
	Faible 2	1	1	1	2	3
	Improbable 1	1	1	1	1	2

Cette grille délimite trois niveaux de criticité (NCR) :

- Une zone de risque élevé NCR=3, figurée par une couleur rouge.
- Une zone de risque ALARP NCR=2 (*As Low As Reasonably Possible*), figurée par la couleur orange : un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation.
- Une zone de risque faible NCR=1 figurée par la couleur verte : Risque résiduel, compte tenu des mesures de maîtrise du risque, est modéré et n'implique pas d'obligation de réduction complémentaire du risque d'accident,

III.2.4 Résultats de l'APR et discussion

L'APR par la prise en considération des mesures de sécurités existantes (Annexe A) a donné les résultats suivants (Figure III-3) :

Tableau III- 6 : Résultats APR

Atelier	Nb d'équipements	NCR		
		1	2	3
I	7	5	2	1
II	3	3	1	0
III	4	1	2	1
IV	4	0	1	3

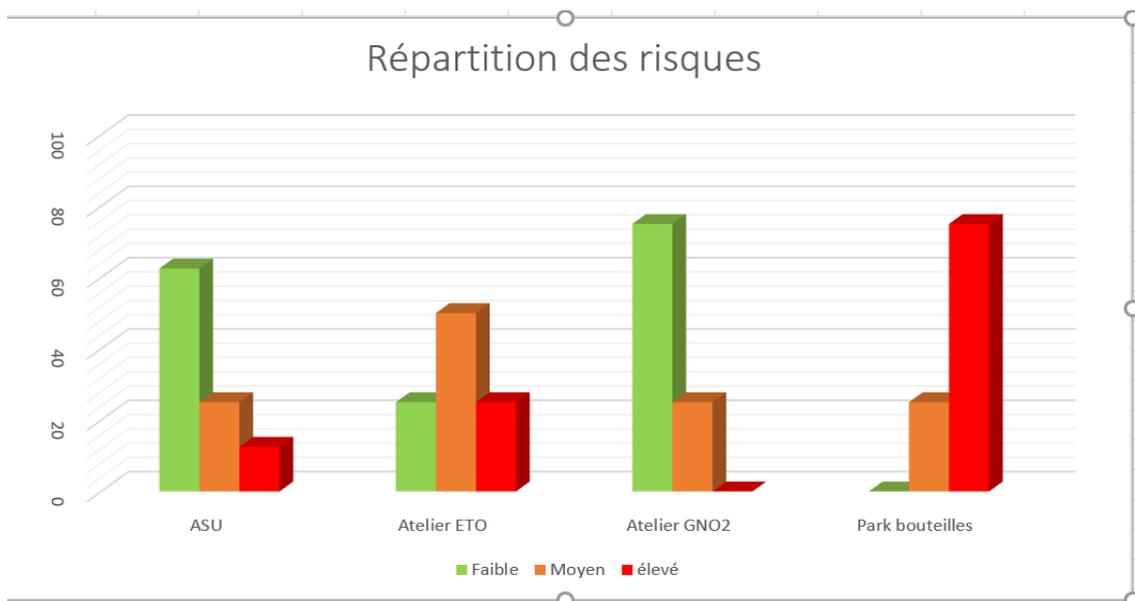


Figure III- 3 : Répartition des risques dans le site LGA

La majorité des risques sont liés à la nature des produits, on constate que les ateliers qui présentent un niveau de criticité élevé sont l'atelier ETO et le Park Bouteilles, les équipements potentiellement critiques que nous avons pu tirer de l'APR sont :

- Bouteille H₂ Atelier de stockage de bouteilles.
- Bouteille ETO Atelier ETO.
- Bouteille C₂H₂ Atelier de stockage de bouteilles.
- Fut ETO Atelier ETO.
- Réservoir LOX D7710 Atelier ASU.

III.3 Application de la méthode

Comme expliqué dans le deuxième chapitre, la méthodologie développée consiste en 4 étapes essentielles (voir figure II-7). Dans ce qui suit, nous allons réaliser les 4 étapes de la méthode sur les équipements potentiellement critique déterminé par l'APR, Cependant puisque toutes les étapes ont été précédemment décrites dans nous reprenons uniquement les étapes clé.

L'APR nous a permis de déterminer les ateliers à haut risques, qui sont :

- L'atelier de conditionnement d'oxyde d'éthylène.
- Le Park bouteilles.

III.3.1 Sélection des équipements critiques

Cette étape consiste à identifier les équipements pouvant conduire à des scénarios significatifs, Les équipements présélectionnés sont ceux contenant des substances dangereuses ; ils sont classés selon 16 catégories (voir annexe B).

Ensuite nous avons utilisé la méthode VADE-MECUM pour sélectionner parmi les équipements listés, ceux qui contiennent une quantité de produits dangereux supérieure à une valeur seuil dont la valeur dépend de la nature et de la phase du produit.

Pour définir la valeur du seuil qui sert de comparaison avec la quantité de produits dangereux, une première quantité Ma est définie en fonction des caractéristiques des produits. Celle-ci est corrigée pour les liquides dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques.

Tableau III- 7 : Masse de référence Ma selon la nature de produit [11]

Propriétés de la substance	Masse de référence (kg)		
	Solide	Liquide	Gaz
1 Très toxique	10.000	1000	100
2 Toxique	100.000	10.000	1000
3 Oxydant	10.000	10.000	10000
4 Explosive	10000	10.000	---
5 Inflammable	---	10.000	---
6 Très Inflammable	---	10.000	---
7 Extrêmement inflammable	---	10.000	1000
8 Dangereux pour l'environnement	100.000	10.000	1000
9 autres classifications que celles ci-dessus impliquant des phrases de risques R14, R14/15, R29	10.000	10.000	---

Définition de la quantité seuil Mb : pour les liquides dont l'évaporation conduit à une aggravation des risques, la masse Ma précédemment définie doit être divisée par un facteur S : $Mb = \frac{Ma}{S}$, définissant ainsi une nouvelle référence Mb .

S est la somme de deux coefficients S_1 et S_2 . S remplit les conditions suivantes :

$$\left| \begin{array}{l} 1.0 \leq S \leq 10 \\ \text{Si } S < 1.0 \text{ alors } S = 1.0 \\ \text{Si } S > 10 \text{ alors } S = 10 \end{array} \right.$$

Les coefficients S_1 et S_2 se calculent ainsi :

Le coefficient S_1 est lié à la différence entre la température de service T_p (°C) et la température d'ébullition à pression atmosphérique T_{eb} (°C) : $S_1 = 10^{(T_p - T_{eb}) / 100}$

Le coefficient S_2 ne s'applique que lorsque la température de service est inférieure à 0° : $S_2 = \frac{T_{eb}}{(-50)}$. En cas de température de service positive : $S_2 = 0$.

Les équipements dont la masse de produit dangereux est supérieure à la masse seuil Mb sont sélectionnés.

✓ Application numérique

Les données nécessaires pour le calcul des masses des produits dangereux sont résumées dans le tableau (III-8) :

Tableau III- 8 : Données nécessaires pour le calcul

Équipements	Capacité (kg)	Température d'ébullition : $T_{eb}(^{\circ}C)$	Température de service : $T_p(^{\circ}C)$	Phase de la substance	Phrase de risque
Bouteille H_2	6.66	-252,9	24	Gaz	R12
Bouteille ETO	9,5	10,7	24	Gaz	R12
Bouteille C_2H_2	5.5	-84	24	Gaz	R12
Fut ETO	700	10,7	24	Gaz	R12
Réservoir LOX D7710	1141200	-183	24	Liquide	R8

- Fut ETO

L'atelier contient (15) fut ETO

$$M_a = 700 \times 15 = 10500 \text{ (kg)}$$

La masse des fûts est supérieure à la masse seuil ($M_a=1000$ kg) donc le fut ETO est un équipement critique.

- Bouteille H_2

La capacité maximale de stockage de bouteilles H_2 est de 16 cadres

$$16(\text{cadres}) \times 12(\text{bouteilles}) = 192 \text{ bouteilles}$$

$$M_a = 192 \times 6,66 = 1278,72 \text{ (kg)}$$

La masse totale des bouteilles est supérieure à la masse seuil ($M_a=1000$ kg) donc la bouteille H_2 est un équipement critique.

- Bouteille GNO_2

$$20(\text{cadres}) \times 12(\text{bouteilles}) = 240 \text{ bouteilles}$$

$$M_a = 240 \times 6,77 = 1624,8 \text{ (kg)}$$

La masse totale des bouteilles est inférieure à la masse seuil ($M_a=10000$ kg) donc la bouteille GNO_2 n'est pas un équipement critique.

- Bouteille C_2H_2

La capacité maximale de stockage de bouteille C_2H_2 dans le parc bouteille est de 16 cadres :

$$16(\text{cadres}) \times 12(\text{bouteilles}) = 192 \text{ bouteilles}$$

$$M_a = 192 \times 5.5 = 1056 \text{ (kg)}$$

La masse totale des bouteilles est supérieure à la masse seuil ($M_a=1000$ kg) donc la bouteille C_2H_2 est un équipement critique.

- Réservoir (LOX) D7110

La capacité maximale du réservoir est de 1000 m^3 d' O_2 liquide l'équivalent de 1141200 kg, le réservoir est généralement rempli à 95% alors :

$$M_a = 1084140 \text{ (kg)}$$

La masse de LOX est supérieure à la masse seuil ($M_a = 10000$ kg), le réservoir LOX D7110 est un équipement critique.

III.3.2 Identification des scénarios d'accidents par MIMAH

MIMAH est fondée sur l'élaboration de diagrammes en nœud papillon. Pour chaque équipement critique choisi lors de la précédente étape est associé un ensemble des (ERC). Pour chaque ERC, un arbre des défaillances est élaboré, puis un arbre des événements, et pour toute la chaîne du nœud, il faut mettre en place les barrières de sécurité existantes et leurs niveaux de confiances.

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

L'examen des accidents passés montre qu'un accident primaire survenu sur un équipement donné, se propage suite à l'endommagement d'un autre équipement. L'endommagement direct de l'équipement cible causant une perte de confinement (LOC) est la cause la plus fréquente de la propagation des accidents.[12]

Les ERC sont déjà identifiés dans l'APR, qui est :

- ERC₁ : Perte de confinement bouteille ETO lors du remplissage.
- ERC₂ : Perte de confinement fut ETO dans l'atelier ETO.
- ERC₃ : Perte de confinement bouteille d'H₂ dans le Park bouteilles.
- ERC₄ : Perte de confinement bouteille d'C₂H₂ dans le Park bouteilles.
- ERC₅ : Perte de confinement réservoir LOX D7110.

À partir de ces 5 ERC identifiés par l'APR, nous allons développer (5) nœuds papillons associés aux ERC (Voir annexe C).

III.3.3 Identification des barrières de sécurité

Cette section a pour but d'identifier l'ensemble des barrières de sécurité susceptibles de réduire la fréquence d'occurrence des ERC et les phénomènes dangereux, et de déterminer le NC technique de chaque barrière.

La méthode d'identification des barrières proposée par ARAMIS est fondée sur la définition de fonctions de sécurité génériques. Ces fonctions de sécurité sont traduites par un verbe d'action suivi d'une intention à accomplir.

Cinq verbes d'action permettent ainsi de couvrir l'ensemble des fonctions qu'il convient d'assurer pour maîtriser les risques :

- Éviter : Il s'agit de rendre un événement impossible. Cette fonction désigne généralement des modifications profondes des installations et est à rapprocher du concept des procédés intrinsèquement plus sûrs.

- Prévenir : Il s'agit cette fois de limiter la probabilité d'occurrence d'un événement, sans toutefois pouvoir le rendre impossible.
- Détecter : Il s'agit de détecter un événement. Cette fonction seule ne suffit généralement pas à assurer la maîtrise de l'accident et doit être associée à d'autres fonctions comme contrôler ou limiter notamment.
- Contrôler : Il s'agit de maîtriser le déroulement d'une dérive afin de ramener le système dans un état opérationnel en sécurité.
- Limiter : La fonction « limiter » ou « réduire » consiste à agir sur les conséquences d'un événement afin d'en réduire la gravité. Le système n'est en revanche pas ramené dans un état totalement sûr. Équivalente au terme anglais « *to mitigate* », cette fonction s'applique le plus souvent au terme source de l'accident (par exemple, limiter un temps de fuite ou un débit).

Puisque les barrières de sécurité ont été déjà identifiées dans l'APR, nous allons juste les classer selon le modèle de classement d'ARAMIS, pour qu'on puisse par la suite les mettre dans l'emplacement exact dans le nœud papillon. Les résultats sont représentés dans le tableau (III-10).

✓ Évaluation du niveau de confiance des barrières

Le niveau de confiance est l'architecture et la classe de probabilité pour qu'une barrière technique de sécurité, dans son environnement d'utilisation, assure la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie. Cette classe de probabilité est déterminée pour une efficacité et un temps de réponse donné.

Le niveau de confiance de chaque barrière technique identifiée pourra être déterminé (pour les installations nouvelles) selon les normes NF EN 61508 et CEI 61511.

De manière conservatrice, on retient souvent que le NC est associé à une réduction de risques de 10^{NC} . Le tableau (III-9) issu de la norme NF EN 61511-1 pour le mode de fonctionnement à la sollicitation, dans lequel SIL a été remplacé par NC.

Tableau III- 9 : Niveau de confiance et réduction du risque associé

Niveau de confiance (NC)	Probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation (PFD_{avg})	Réduction du risque
4	$10^{-5} \leq PFD_{avg} < 10^{-4}$	$10000 < RP \leq 100000$
3	$10^{-4} \leq PFD_{avg} < 10^{-3}$	$1000 < RP \leq 10000$
2	$10^{-3} \leq PFD_{avg} < 10^{-2}$	$100 < RP \leq 1000$
1	$10^{-2} \leq PFD_{avg} < 10^{-1}$	$10 < RP \leq 100$
0	$10^{-1} \leq PFD_{avg} < 1$	$1 < RP \leq 10$

Dans le cas des installations existantes comme LGA, on pourra s'aider des valeurs données dans les bases de données telles que celles du projet ARAMIS pour estimer les niveaux de confiance des barrières techniques mises en place, en ce qui concerne les

barrières dont la valeur du niveau de confiance n'existe pas dans la base de données d'ARAMIS, nous allons utiliser d'autres base telles que OREDA[13], LEES [14] , etc.

Les barrières de sécurité et les NC associés sont représentées dans le tableau (III-10)

Tableau III- 10 : Barrières de sécurité et NC associés

ERC concerné	Barrières	Technique/humaine	Fonction	NC
1	Procédure de tri des bouteilles à remplir (vérification des robinets notamment).	Humaine	Éviter	2
	Détecteur : alarme sonore et visuelle.	Technique	Détecter	2
	Flexibles changés tous les 3 ans (Maintenance préventive)	Technique	Prévenir	2
	Instruction opérationnelle, procédure	Humaine	Éviter	2
	Indicateur de pression	Technique	Contrôler	3
	Réseaux anti incendie	Technique	Limiter	1
	Matérielles antidéflagrants	Technique	Éviter	2
	Arrêt d'urgence	Technique	Limiter	1
2	Réseau anti incendie	Technique	Limiter	1
	Manodétendeur	Technique	Prévenir	2
	Indicateur de pression	Technique	Contrôler	3
	Alarme sonore	Technique	Détecter	2
	Extracteurs	Technique	Prévenir	1
	Inspection visuelle	Humaine	Éviter	2
	Matérielles antidéflagrants	Technique	Éviter	2
3,4	Vérification périodique des accessoires	Technique	Contrôler	1
	Remplacement systématique des robinets des bouteilles lors de leur ré épreuve	Technique	Contrôler	1
	Instruction opérationnelle	Humaine	Éviter	2
	Protection des bouteilles par les structures en acier des paniers ou des cadres	Technique	Prévenir	1
5	Soupape de sécurité (5 bars)	Technique	Prévenir	2
	Disque de rupture	Technique	Prévenir	2
	Indicateur de pression	Technique	Contrôler	2
	Indicateur de niveau du liquide	Technique	Contrôler	2
	Réseau anti incendie	Technique	Limiter	1
	Délimitation de la zone de stockage	Humaine	Éviter	2
	Régulateur de pression	Technique	Contrôler	3

L'ensemble des barrières identifiées sont répertoriés dans les nœud-papillons (voir annexe C).

III.3.4 Influence du processus managériaux et de la culture sécurité sur la performance des barrières

Les barrières de sécurité identifiées (voir tableau III-10) sont soit des barrières techniques de sécurité (matériel), soit des barrières humaines ou bien une combinaison de ces deux types de barrières. Sommairement, les barrières sont regroupées en trois

catégories pouvant se décliner en sous-catégorie suivant les combinaisons possibles. Les trois catégories de barrières sont les suivantes :

- Barrières passives : barrières en fonctionnement permanent ne demandant pas d'actions humaines, de sources d'énergie et de diagnostic préalablement à leur action.
- Barrières actives : ce type de barrières demande un diagnostic préalable de la situation pour une action proportionnée. Ce type de barrière demande une source d'énergie pour en assurer le fonctionnement et son fonctionnement met en œuvre du matériel (fonctionnement mécanique, électrique ou électronique).
- Barrières humaines : l'efficacité de ce type de barrière est liée aux mécanismes de l'agir humain (détection, observation, décision, réalisation d'une tâche, ...).

Ces barrières feront l'objet d'un audit des processus managériaux dans le but de vérifier si les processus managériaux nécessaires au bon fonctionnement des barrières sont efficaces et permettent de conserver le niveau de confiance déterminé.[15]

Les processus managériaux liés au cycle de vie des barrières sont les suivants :

Pour les barrières humaines :

- Disponibilité du personnel : Il s'agit de s'assurer qu'il y a le personnel nécessaire pour effectuer les diverses activités suivant les conditions de fonctionnement qui peuvent être rencontrées (congé, pics d'activité...)
- Compétence du personnel : Le but ici est de s'assurer que les employés existants ont le niveau de compétence requis, ce qui inclut notamment la sélection et la formation des employés.
- Implication du personnel et résolution des conflits : Il s'agit de s'assurer que les participants se comportent bien face à leurs tâches. Cela prend en compte la voie de l'arbitrage afin de réduire la charge pesant sur ces derniers,
- Communication et coordination : Le but de ces activités est d'assurer une bonne communication entre les acteurs (par exemple dans les situations d'urgences) et de la bonne coordination des activités (par exemple en phase de travaux),
- Procédure, modes opératoires et objectifs : Enfin, il s'agit de s'assurer du respect des règles, ce qui prend en compte la vérification de l'adéquation des règles aux activités à réaliser, l'apprentissage de ces règles, et l'évaluation de ces dernières.

Pour les barrières techniques :

- Détermination des spécifications de conception (incluant l'interface homme/machine), achat, construction, installation, et gestion des pièces : Cela correspond aux activités permettant d'assurer que les objectifs de sécurité seront correctement remplis,
- Gestion des inspections, des contrôles et de la maintenance : Il s'agit enfin de suivre dans le temps la performance des barrières, y compris leur (ré) étalonnage

Pour chaque processus identifié ci-avant, un sous-protocole d'audit est développé. Ce sous protocole correspond au référentiel des activités de gestion à réaliser pour assurer un bon système de management des barrières.

Par ailleurs, les sous-protocoles à employer sont déterminés suivant le type de barrière auditée. Par exemple, pour les barrières de type 2 (ex : disque de rupture), le sous-protocole 6 (Détermination des spécifications de conception, achat, construction, installation, et gestion des pièces) sera à employer en priorité.

L'évaluation se fait selon cinq notes :

- 5 : Très bien : processus fonctionne bien et est en amélioration.
- 4 : Bien : processus mis en place, fonctionne bien et mis à jour.
- 3 : Moyennement faible : processus existe mais n'est pas bien suivi selon les règles.
- 2 : Très faible : processus ne sont pas suivis ou sont ignorés.
- 1 : Inexistant : processus inexistant.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer les 3 étapes que nous avons suivies pour l'évaluation de l'influence des processus managériaux sur la performance des barrières.

✓ **Étape 1 : Classification des barrières**

Les actions de gestion de la sécurité nécessaires pour mettre en œuvre et maintenir une barrière dépendent des propriétés de la barrière et des éléments qui la constituent (matériel, logiciel ou comportement humain). Par conséquent, l'évaluation de la gestion de la sécurité doit tenir compte de ces propriétés de la barrière ; c'est pourquoi ARAMIS a établi un système de classification des barrières de sécurité pour regrouper les barrières.

L'ensemble des barrières est classé dans le tableau (III-11)

Tableau III- 11 : Classification des barrières pour l'audit

N ^o	Type de barrières	Barrières retenues
1	Passive – Contrôle Permanente	- Protection des bouteilles par les structures en acier des paniers.
2	Passive – Barrière Permanente	-Disque de rupture
3	Passive – Temporaire Mises en place (ou retirées) par une personne	-Barrières de protection d'une zone de travaux.
4	Active – Permanente	-Système de refroidissement.
5	Active – matériel fonctionnant à la demande et réutilisable	-Soupape de sécurité. -Manodétendeur. -régulateur de pression. -Extracteurs.
6	Active – automatique	/
7	Active – manuelle	-Indicateur de pression.

	L'action humaine est déclenchée par un système de détection	-Indicateur du niveau de liquide. -Arrêt d'urgence.
8	Active – avertissement passif L'action humaine est conditionnée par un avertissement passif	-Instruction opérationnelle.
9	Active – assistée Un logiciel présente un diagnostic à un opérateur	-Détecteur de gaz. -Alarme sonore/visuelle
10	Active – procédure Observation des conditions locales par un opérateur	-Maintenance préventive -Procédure de tri de bouteilles (vérification des robinets notamment) -Inspection visuelle.
11	Active – situations d'urgence Réponse humaine improvisée suite à l'observation des conditions locales	-Déclenchement d'alarme manuelle.

Cette classification va nous permettre de faire le lien entre la barrière et les parties pertinentes de la structure de management de la sécurité - et donc les éléments correspondants de l'audit.

✓ **Étape 2 : Déroulement de l'audit**

Le calendrier que nous avons suivi est le suivant :

- Jour 1 :
 - Introduction de l'audit.
 - Entretiens avec les responsables des ateliers.
- Jour 2-4 :
 - Entretiens avec les utilisateurs de la barrière, c'est-à-dire les opérateurs, les superviseurs.
 - Examen de la documentation
- Jour 5 :
 - Vérifications finales/entretiens de dernière minute.

Liste des documents consultés :

- Politique de sécurité.
- Fiche de poste.
- Objectifs/cibles en matière de sécurité (année en cours).
- Calendrier des réunions de sécurité.
- Plan de maintenance.
- Rapport de sécurité de l'année précédente '2020'.
- Analyse des risques de l'année précédente '2020'.
- Informations sur les grands travaux, les grands projets de maintenance, les projets de changement, etc.
- Certificat ISO 9001 et statut de mise en œuvre.
- Certificat ISO 14001 et état de la mise en œuvre.

✓ **Étape 3 : Élaboration d'une *check-list* et quantification des résultats**

Dans un premier temps, nous avons défini les sous-protocoles de chaque processus managérial en se basant sur le manuel d'audit du projet ARAMIS [15]. Suite à la définition des sous-protocoles nous avons élaboré une check-list afin de faciliter la collecte d'information vis-à-vis les processus audités (Voir annexe E).

Après avoir terminé l'audit terrain et recueilli tous les résultats qualitatifs, nous avons quantifié les résultats de la check-list en attribuant un score final pour chaque processus comme étant la moyenne en pourcentage qui présente S_i (niveau de maîtrise de l'entreprise) du processus i .

Les résultats sont représentés dans le tableau (III-12) ci-dessous

Tableau III- 12: Niveau de maîtrise S_i par processus managérial.

N^o Processus	Processus	Note
S1	Disponibilité du personnel	96%
S2	Compétence et aptitude	94%
S3	Implication du personnel et résolution des conflits	100%
S4	Communication & coordination	100%
S5	Procédures, règles et objectifs	89%
S6	Détermination des spécifications de conception (incluant l'interface homme/machine), achat, construction, installation, et gestion des pièces.	96%
S7	Gestion de d'inspection, tests et maintenance	92%

Discussion :

Les résultats de l'audit ont démontré que le niveau de maîtrise de LGA des processus managériaux est excellent, avec quelques écarts au niveau des processus S1, S2, S5, S6, S7. Ce dernier est dû à l'absence de l'amélioration continue des quelque sous-protocole à savoir, Les plans de formations, l'évaluation de l'efficacité des procédures et des règles de sécurité.

III.3.4.1 Questionnaire de la culture sécurité

Les éléments culturels sont évalués en réalisant une enquête par questionnaire auprès du personnel du site à examiner. Le personnel comprend tous les employés qui sont impliqués dans l'installation ou les installations dangereuses d'une manière ou d'une autre sur le plan professionnel. En mettant l'accent sur la main-d'œuvre de l'atelier (opérateurs, personnel de maintenance, travailleurs de la production, etc.)

Le questionnaire que nous avons élaboré contient 10 groupes de questions fermées auxquelles les répondants doivent répondre sur une échelle à cinq points, plus une question demandant aux répondants d'écrire leurs propres suggestions sur la sécurité (Voir annexe D).

1. Déclaration d'accidents.

2. Si et quand des incidents et des accidents (de tous types) ne sont pas signalés, c'est parce que ...
3. Consignes et attitudes de sécurité.
4. Priorité à la sécurité au travail.
5. Selon vous, qui devrait assumer la responsabilité de la sécurité ?
6. Participation des employés aux décisions concernant la sécurité.
7. Engagement de la direction et des responsables en matière de sécurité.
8. Confiance et équité.
9. Travail et relations sociales.
10. Vos suggestions personnelles.

Les employés inclus dans l'enquête sont ceux qui ont une relation directe avec l'atelier d'oxyde d'éthylène et le Park bouteilles (Les chefs d'atelier, les chefs d'équipes, les opérateurs de terrain et de salle de contrôle, le personnel d'entretien et de nettoyage, etc.)

Ensuite, nous avons fixé des conditions pour remplir et renvoyer le questionnaire. Ces conditions comprennent :

- Toutes les réponses sont anonymes.
- Aucune information au niveau individuel ne sera communiquée.
- Un retour d'information sera donné aux employés sur les résultats de l'enquête sur la culture de la sécurité.

Puis, nous avons distribué le questionnaire aux personnels concernés composés de 22 personnes en expliquant l'objectif de cette investigation.

Après la collecte des questionnaires remplis nous avons fait une analyse statistique des résultats en utilisant le logiciel Excel, les résultats sont représentés en histogramme en Annexe F.

Les résultats montrent que le personnel concerné est bien formé et sensibilisé sur les principes fondamentaux de la sécurité. Malgré cela, nous remarquons qu'il existe une lacune en matière de confiance entre la haute direction et les employés. De plus, et d'après les entretiens directs avec les employés et les réponses au questionnaire, nous avons constaté que l'entreprise a besoin de mettre en place un système pour motiver le personnel et encourager les bonnes habitudes de sécurité existantes.

III.3.4.2 Calcul du niveau de confiance opérationnel

Le but ultime de l'évaluation de la structure de gestion et de la culture de sécurité est de pouvoir faire des déclarations sur la manière dont le système de gestion de l'entreprise affecte l'efficacité des barrières qu'elle a mises en place pour contrôler le risque (en particulier la perte de confinement).

Le résultat de l'audit du management de sécurité et l'enquête sur la culture sécuritaire fournissent un facteur réducteur du NC (SIL). Ce facteur est la multiplication de deux grandeurs, la première est le niveau de maîtrise **Si** de l'entreprise pour chaque

processus audité i plus S_0 liés au résultat du questionnaire sur la culture, la deuxième est le coefficient d'influence $B_{i,k}$ pour chaque type k . Donc le niveau de confiance opérationnel NC_{op} d'une barrière de type k s'obtient par la formule suivante [16] :

$$NC_{op} = (1 - \sum (1 - S_i) \cdot B_{i,k}) * SIL \quad (III-1)$$

Avec :

$B_{i,k}$: représente un ensemble de facteurs de pondération liant l'importance du système de distribution i au type de barrière k en question ($B_{i,k} > 0$ pour tous les k et i).

S_i : Le niveau de maîtrise de l'entreprise pour chaque processus i .

Les étapes suivantes contiennent les instructions pour calculer l'indice de culture de sécurité $S_{0,k}$ pour un nouvel échantillon k donné. Dans l'Annexe est fourni un tableau des moyennes et des écarts types obtenus à partir de l'échantillon de référence européen de cinq sites.[16]

Les abréviations suivantes sont utilisées :

μ_i^{ref} = la moyenne du i -ème élément de l'échantillon de référence (les cinq cas de test).

σ_i^{REF} = l'écart-type du i -ème élément de l'échantillon de référence.

μ_i^{NEW} = la moyenne du i -ème élément d'un nouvel échantillon cible.

1. Les réponses à chaque élément (question) des sections 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9 du questionnaire sont codées sur une échelle de 1, 2, ..., 5 de la manière suivante [les sections 2, 5 ne comptent pas pour l'indice de culture de sécurité ; Pour tous les éléments, attribuer 1 à la valeur de réponse la plus à gauche « pas du tout d'accord » ou « à un très faible degré », 2 à la deuxième, et enfin 5 à la valeur la plus à droite. Pour les items 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 5.6, 5.7, 6.2, 9.1, 9.3, 9.8, 9.9, 9.10 et 10.7, l'affectation doit être inversée de sorte que « tout à fait d'accord » et « à un très haut degré » soient affectés à 1, et ainsi de suite.

L'inversion permet de s'assurer que la direction des valeurs de réponse positives et négatives en termes d'attitudes et de perceptions.

2. Pour chaque élément i , on calcule la moyenne de l'échantillon μ_i^{NEW} pour chaque question.
3. Sur la base des données de l'échantillon de référence (Voir annexe B) contenant, pour chaque élément, la moyenne μ_i^{REF} et l'écart type σ_i^{REF} , le score y de l'échantillon cible est calculé comme suit :

D'abord, le score y pour chaque élément i est calculé :

$$y_i^{NEW} = (\mu_i^{NEW} - \mu_i^{REF}) / \sigma_i^{REF} \quad (III-2)$$

À partir duquel on peut produire le score moyen Y^{NEW} pour tous les éléments :

$$Y^{new} = \frac{1}{54} \cdot (\sum_1^{54} y_i^{new}) \quad (III-3)$$

4. Enfin, la transformation du score y de l'échantillon cible k en l'indice de culture de sécurité S_0^k , se fait comme suit :

$$\left| \begin{array}{l} S_0^k = 1; \text{ si: } Y^{new} \geq 1 \\ S_0^k = 0,25; \text{ si: } -3 < Y^{new} < 1 \\ S_0^k = 0; \text{ si } Y^{new} \leq -3 \end{array} \right.$$

✓ Exemple de calcul :

$$\begin{aligned} - \mu_{01.1}^{NEW} &= \frac{54,55 \times 1}{100} + \frac{36,36 \times 2}{100} + \frac{4,55 \times 3}{100} + \frac{4,55 \times 4}{100} + \frac{0 \times 5}{100} = 1.5912 \\ - y_i^{NEW} &= (\mu_i^{NEW} - \mu_i^{REF}) / \sigma_i^{REF} = (1.5912 - 2.159) / 0.985 = -0.576 \end{aligned}$$

Le reste des résultats sont en Annexe G.

On calcul maintenant la moyenne Y_{new} des y -score de toutes les questions :

$$\begin{aligned} Y^{new} &= \frac{1}{54} \cdot (\sum_1^{54} y_i^{new}) = 0.123 \\ \Rightarrow S_0 &= 0,25; \text{ si } Y^{new} + 0,75 = 0.78 = 78\% \end{aligned}$$

Les deux coefficients nécessaires au calcul du NC_{op} sont les S_i qui sont déjà calculés, et les $B_{i,k}$ (coefficients d'influences du processus i pour chaque type k) sont des valeurs génériques proposés par la méthode ARAMIS (Voir Annexe H) dans le fichier Excel Rating.sheet.exl fournie par Mr NIJIS.

Exemple de calcul : Disque de rupture (barrière de type 2)

$$NC_{op} = (1 - ((1 - 0,96) \cdot 0,5) + (1 - 0,92) \cdot 0,5)) \cdot 2 = 1.88$$

Les résultats de calcul du NC_{op} sont représentés dans le tableau (III-13)

Tableau III-13 : Barrières de sécurité et NC_{op} associés

N ⁰	Type de barrières	Barrières retenues	NC	NC _{op}
1	Passive – Contrôle Permanente	- Protection des bouteilles par les structures en acier des paniers.	1	0.98
2	Passive – Barrière Permanente	-Disque de rupture.	2	1.88
		-Matériels antidéflagrants.	2	1.88
3	Passive – Temporaire Mises en place (ou retirées) par une personne	-Barrières de protection d'une zone de travaux.	2	1.8
4	Permanente – active	-Système de refroidissement	1	0.91
5		-Soupape de sécurité.	2	1.92

	Active – matériel fonctionnant à la demande et réutilisable	-Manodétendeur.	2	1.92
		-régulateur de pression.	3	2.88
		-Extracteurs.	1	0.96
6	Active – automatique	/		/
7	Active – manuelle L'action humaine est déclenchée par un système de détection	-Indicateur de pression.	3	2.586
		-Indicateur du niveau de liquide.	2	1.724
		-Arrêt d'urgence.	1	0.862
8	Active – avertissement passif L'action humaine est conditionnée par un avertissement passif	-Instruction opérationnelle/procédures.	2	0.923
9	Active – assistée Un logiciel présente un diagnostic à un opérateur	-Détecteur de gaz.	2	1.83
		-Alarme sonore et visuelle.	2	1.83
10	Active – procédure Observation des conditions locales par un opérateur	-Maintenance préventive	2	1.65
		-Vérification périodique des bouteilles	1	0.82
		-Procédure de tri de bouteilles (Vérification des robinets notamment)	2	1.65
		-Inspection visuelle.	2	1.65
		-Remplacement systématique des robinets des bouteilles lors de leur ré épreuve	1	0.82
11	Active – situations d'urgence Réponse humaine improvisée suite à l'observation des conditions locales	-Déclenchement d'alarme manuelle.	1	0.72

Dans cette partie, nous avons démontré que les déficiences du processus de gestion de la sécurité, sont directement liées aux fiabilités des barrières de sécurité. Aussi, la véritable relation cause à effet est dû aux déficiences du résultat de la gestion de la sécurité entraînant ainsi une augmentation de la probabilité de défaillances de ces barrières.

D'autre part, c'est le processus de gestion de la sécurité qui fournit l'indication si les barrières de sécurité sont susceptibles de conserver leurs niveaux de confiance actuel dans le futur.

Découlant de ces résultats, nous constatons que les NCop de toutes les barrières sont inférieurs au NC technique (SIL) d'où la nécessité de revoir le système de management en matière de gestion de ces barrières, et aussi prévoir un nouvel investissement dans la gestion des ressources humaines et pour l'amélioration aussi la culture sécurité.

III.3.5 Évaluation de la fréquence d'occurrence des conséquences liées aux ERC

Dans cette section, nous allons procéder dans les nœuds-papillons pour obtenir, en sortie, la fréquence de chaque conséquence liée à un événement redouté, cette dernière est basée sur les fréquences des pertes de confinement des ERC et sur la probabilité d'ignition.

III.3.5.1 Fréquence d'occurrence des événements initiateurs

Lorsqu'on base ses calculs sur la probabilité de l'ERC, on perd de l'information sur les éléments conduisant à l'ERC et sur l'effet de l'ensemble des barrières de prévention. On ne sait pas quelles barrières ont été prises en compte implicitement dans le chiffre fourni ; on ne sait pas si les effets dominos sont intégrés ou non.

Pour cela nous allons passer par les différentes banques de données qui existent dans la littérature scientifique afin d'élaborer les probabilités adaptées à chaque EI, pour certain EI nous allons se référer au REX de l'organisation. Les résultats de cette étape sont représentés dans le tableau (III-14).

Tableau III- 14 : Fréquence des événements initiateurs

N°	Évènement initiateur	Fréquence retenue (/an)	Source	ERC concerné
1	Erreur opératoire	10^{-2}	DRA 41 de l'INERIS	1,2,3,4
2	Défaillance flexible	10^{-2}	DRA 41 de l'INERIS	1
3	Défaillance robinet	10^{-4}	LEES [14]	1,2,3
4	Défaut pompe	$2,02.10^{-2}$	OREDA 2002 (p.173)[13]	1,4
5	Impact dû à un choc	10^{-4}	DRA 41 de l'INERIS	2,3
6	Suppression par expansion thermique	10^{-5}	DRA 71 de l'INERIS[17]	5
7	Défaillance du manomètre PCV	$1,54.10^{-2}$	OREDA 2002 (p.811)	5
8	Vanne ouverte	$4,77.10^{-2}$	OREDA 2002 (p.581)	5
9	Défaut métallurgique	10^{-4}	DRA 71 de l'INERIS	2,3

III.3.5.2 Probabilité d'ignition

Les probabilités des événements (inflammation directe : accélération du front de la flamme / retardée.), constituant les différents scénarios, dépendent de plusieurs paramètres : elle dépend du débit de la fuite, si celle-ci est continue, ou de la quantité de la matière rejetée si fuite instantanée.

Elle dépend de la présence de source d'inflammation (point chaud, étincelle...), dans l'environnement où se trouve le nuage ; la position du nuage dépend, des conditions météorologiques, de la quantité rejetée et du débit.

La probabilité d'ignition a été déterminée sur la base de l'annexe 2 du rapport DRA 71 de l' INERIS [17], Purple book[18] et sur le BEVI [19]

Il est retenu une probabilité d'ignition immédiate de 2.10^{-1} s'appliquant à un rejet continu < 10 kg/s ou rejet instantané < 1000 kg/s pour l'oxyde d'éthylène et l'acétylène, et une probabilité d'ignition retardée de 0.1 pour une zone classée ATEX avec présence de personnel occasionnelle (le cas de l'atelier ETO).

Pour l'hydrogène, la probabilité d'ignition immédiate est de 0,5 ainsi que la probabilité d'ignition retardée, et une probabilité d'explosion de 0,04.

En ce qui concerne le Phénomène BLEVE, la probabilité d'ignition immédiate est de 1 car l'ERC est induit par une source d'énergie (Effet domino).

III.3.5.3 Résultats et interprétations

En ce qui suit, nous allons détailler les calculs des différentes probabilités d'apparition des PhD du 1^{er} ERC

- Nœud papillon 1 'ERC₁ : Perte de confinement d'une bouteille ETO lors du remplissage'

Notons :

- P_{phd1} : Probabilité d'apparition du PhD ' feu de jet '
- P_{phd2} : Probabilité d'apparition du PhD ' VCE '
- P_{phd3} : Probabilité d'apparition du PhD ' feu de jet '
- P_{IM} : Probabilité d'ignition immédiate d'oxyde d'éthylène.
- P_{IR} : Probabilité d'ignition retardée d'oxyde d'éthylène.
- P_{B01} : Probabilité de défaillance à la demande de la barrière B₀₁.

Les probabilités de défaillance à la sollicitation des barrières de sécurité sont représentées dans le tableau (III-15)

Tableau III- 15 : Barrières de sécurité et PFD associés

Barrière		$PFD_{op}=10^{-N_{Cop}}$
B ₀₁	Instruction opérationnelle, procédure	$1,119.10^{-1}$
B ₀₂	Maintenance préventive : Flexibles changés tous les 3 ans	$2,238.10^{-2}$
B ₀₃	Arrêt d'urgence	$1,374.10^{-1}$
B ₀₄	Procédure de tri des bouteilles à remplir	$2,238.10^{-2}$
B ₀₅	Détecteur/alarme sonore et visuelle	$1,47.10^{-2}$

La fréquence d'occurrence d'un feu de jet dans l'atelier ETO est de :

$$- P_{phd1} = [(P_{EI1} \times P(B01)) + (P_{EI2} \times P(B02)) + [P_{EI4} \times [P(B03)]] + (P_{EI3} \times P(B04))] * P(B05) * P_{IM} = 4,12.10^{-3} * 1,47.10^{-2} * 0.2$$

$$\rightarrow P_{phd1} = 1,21.10^{-5}$$

La fréquence d'occurrence d'un VCE dans l'atelier ETO est de :

$$- P_{\text{phd2}} = 4,12.10^{-3} * P(B_{05}) * (1-P_{\text{IM}}) * P_{\text{IR}} = 4,12.10^{-3} * 1,47.10^{-2} * 0,8 * 0,1 * 0,4$$

$$\rightarrow P_{\text{phd2}} = 1,94.10^{-6}$$

La fréquence d'occurrence d'un feu de flash dans l'atelier ETO est de :

$$- P_{\text{phd3}} = 4,12.10^{-3} * P(B_{05}) * (1-P_{\text{IM}}) * (P_{\text{IR}}) * (1-P)$$

$$\rightarrow P_{\text{phd3}} = 2,9.10^{-6}$$

$$- P_{\text{disp}} = [(P_{\text{EI1}} \times P(B_{01})) + (P_{\text{EI2}} \times P(B_{02})) + [P_{\text{EI4}} \times [P(B_{03}) + P(B_{04})] + (P_{\text{EI3}} \times P(B_{05}))] * P(B_{05}) * (1-P_{\text{IM}}) * (1-P_{\text{IR}})$$

$$\rightarrow P_{\text{disp}} = 4,36.10^{-5}$$

- Nœud papillon 2 'Perte de confinement d'une bouteille C₂H₂'

Les fréquences d'occurrence de chaque conséquence liée à l'ERC₂ sont représentées dans le tableau (III-16) ci-dessous :

Tableau III- 16 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC₂

N	Phénomène dangereux	Fréquence d'occurrence (/an)
SC4	Feu de jet	2,67.10 ⁻⁴
SC5	Flash Fire	0,4256.10 ⁻⁴
SC6	VCE	0,6384.10 ⁻⁴
SC7	Dispersion	2,67.10 ⁻⁴

- Nœud papillon 3 'Perte de confinement d'une bouteille H₂'

Tableau III- 17 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC₃

N	Phénomène dangereux	Fréquence d'occurrence (/an)
SC8	Feu de jet	6,65.10 ⁻⁴
SC9	Flash Fire	0,134.10 ⁻⁴
SC10	VCE	3,192.10 ⁻⁴
SC11	Dispersion	3,325.10 ⁻⁴

- Nœud papillon 4 'Perte de confinement Fut ETO'

Tableau III- 18 : Fréquence d'occurrence des conséquences liée à ERC₄

N	Phénomène dangereux	Taille de la fuite	La fréquence d'occurrence
SC12	Dispersion	/	1,42.10 ⁻⁶
SC13	Feu de jet	Fuite	1,77.10 ⁻⁶
SC14	Feu de nappe	Rupture	2,48.10 ⁻⁶
SC15	Feu de flash	Fuite	0,248.10 ⁻⁶

		Rupture	0,446.10 ⁻⁶
SC16	VCE	Fuite	0,1062.10 ⁻⁶
		Rupture	0,298.10 ⁻⁶

Le résultat de cette étape est une liste des PhD associés à chaque ERC identifié par MIMAH. La fréquence de chaque PhD est calculée, et les limitations du terme source ou des effets dus aux barrières de sécurité limitantes sont prises en compte. Ce qui représente un avantage

L'étape suivante est donc l'estimation de la classe des conséquences des PhD, pour cela MIRAS propose une grille en quatre classes de gravité (C1 à C4) en fonction de la nature des effets (sur l'homme, l'environnement ou comme source d'effet domino).

Tableau III- 19 : Classe approximative des conséquences des PhD "pleinement développés".[11]

EFFET DOMINO	CONSEQUENCES ET EFFETS		CLASSE
	Cibles humaines	Environnement	
Voir note *	Pas de blessures ou blessures légères ne nécessitant pas d'arrêt de travail	Pas d'action nécessaire, simple observation	C1
	Blessures nécessitant une hospitalisation de durée supérieure à 24 heures	Sérieux effets sur l'environnement, nécessitant des moyens locaux d'intervention	C2
	Blessures irréversibles ou morts sur site Blessures réversibles à l'extérieur	Sérieux effets sur l'environnement à l'extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d'intervention	C3
	Blessures irréversibles ou morts à l'extérieur du site	Effets irréversibles sur l'environnement à l'extérieur du site, nécessitant des moyens nationaux d'intervention	C4

* si un PhD peut entraîner par effet domino un deuxième phénomène dangereux et que la classe de gravité de ce deuxième phénomène dangereux est plus élevée que celle du premier phénomène dangereux, la classe de gravité de ce dernier doit être augmentée à la classe de gravité du deuxième phénomène dangereux.

Au-delà de cette grille, ARAMIS propose également en fonction de la nature des PhD et des produits impliqués une classification a priori des phénomènes (tableau III-20). En cas de doute, des calculs complémentaires peuvent être menés pour valider la classe de gravité correspondante.

Tableau III- 20 : Estimation des classes de gravité par Phd [11]

Phénomène dangereux	Classe de conséquences
Feu de nappe	C2
Feu de cuve	C1
Jet enflammé	C2
VCE	C3 ou C4 (en fonction de la quantité émise)
Flashfire	C3
Nuage toxique	C3 ou C4 (en fonction des phrases de risques – C4 pour des substances très toxiques)
Feu	C2
Projection de missiles	C3
Création onde de surpression	C3
Boule de feu	C4
Dégâts à l'environnement	À juger sur site
Explosion de poussières	C2 ou C3 (en fonction de la substance et de la quantité)
Boilover et feu de nappe associé	C3

Dans le cas de notre étude, nous avons pu identifier 6 PhD :

- Feu de jet = C2
- Feu de Flash = C3
- VCE au niveau du Park bouteilles = C3
- VCE Atelier ETO = C4
- Feu de nappe = C2
- Nuage toxique = C3

III.3.5.4 Choix primaire des scénarios de référence par la matrice de risques

L'ensemble des PhD a été identifié et caractérisé par :

- L'évaluation de la fréquence d'occurrence (incluant la probabilité de défaillance des barrières mises en place),
- L'estimation a priori de leur classe de gravité.

Les scénarios peuvent donc à ce stade être placés sur une matrice de risques, qui définit des critères d'acceptabilité et de sélection des scénarios en fonction de cette caractérisation en gravité / fréquence.

La matrice de risques comporte en abscisse la classe de gravité des phénomènes dangereux et en ordonnée la fréquence d'occurrence des phénomènes dangereux.

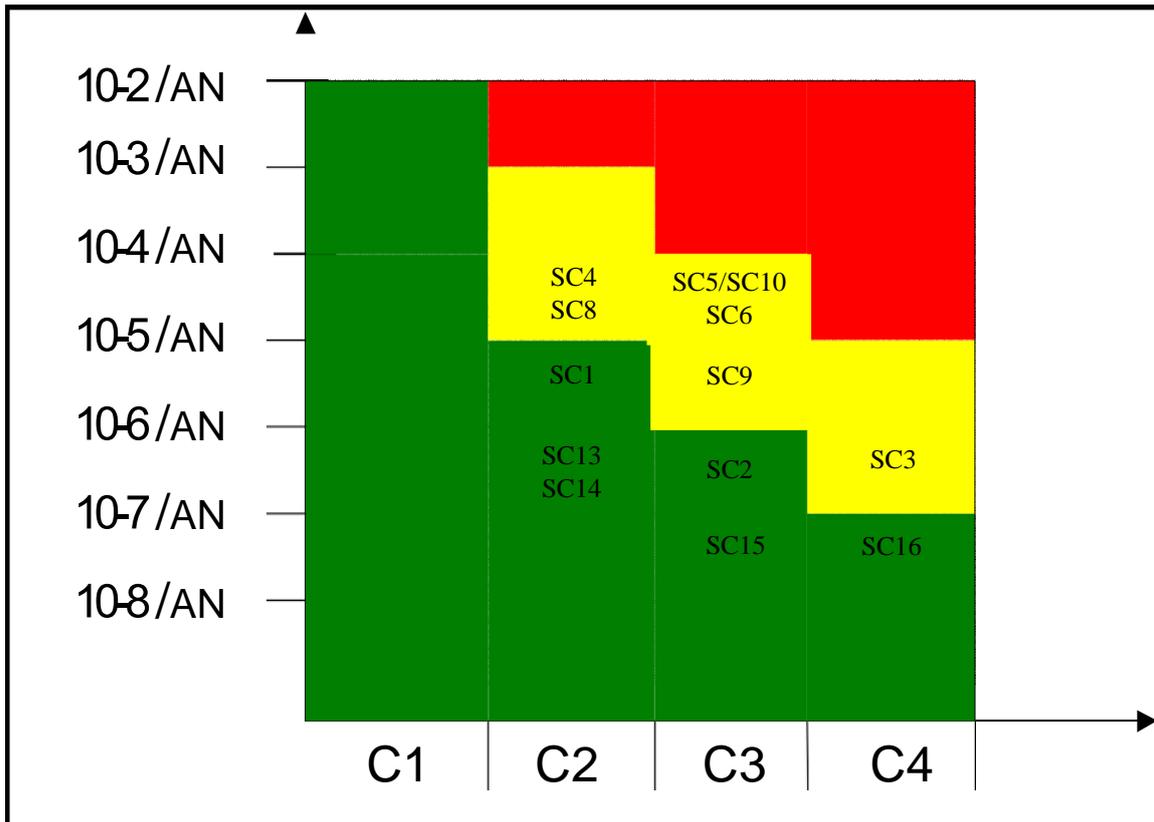
La zone verte (effets négligeables) : correspond aux PhD avec une fréquence d'occurrence et/ou des conséquences suffisamment faibles pour ne pas être considéré comme représentatif du risque d'un établissement.

La zone jaune (effets moyens) : correspond aux PhD dont la probabilité est tolérable et qui représente le niveau de risque moyen d'un établissement.

Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et constituent les scénarios de référence.

La zone rouge (effets importants) : correspond à des PhD dont la probabilité d'occurrence n'est pas satisfaisante en l'état : des barrières complémentaires de sécurité doivent être rajoutées.

Les phénomènes dans cette zone sont retenus pour la modélisation et font également partie des scénarios de référence.



La classification primaire des scénarios d'accident nous a permis de déterminer les scénarios qui vont faire l'objet d'étude d'effets dominos, Les sept scénarios SC3, SC4, SC5, SC6, SC8, SC9, SC10 représente les événements potentiellement primaires qui sont retenus pour la modélisation.

III.4 Étude d'effets dominos

Dans cette partie, nous allons identifier les effets physiques de chaque événement potentiellement primaire identifié lors de l'étape précédente et évaluer la propagation de ce dernier.

L'évaluation des effets engendrés par chaque phénomène dangereux sera faite par le logiciel PHAST, ce dernier nous permettrons d'élaborer des cartes des effets physiques et de comparer les valeurs obtenues avec les seuils d'escalades afin d'identifier les cibles.

III.4.1 Identification des événements primaires

Les unités critiques, les événements potentiellement primaires, les vecteurs d'escalade ainsi que le type de substance sont représentés dans le tableau :

Tableau III- 21 : Unités critiques, substance, Événements potentiellement primaire et vecteurs d'escalade correspondant.[20]

Unités critiques	Substance	Évènements potentiellement primaire	Vecteurs d'escalade
Park bouteilles	Hydrogène	Feu de jet	Radiation thermique
		Feu de flash	Radiation thermique
		VCE	Surpression Radiation thermique
	Acétylène	Feu de jet	Radiation thermique
		Feu de flash	Radiation thermique
		VCE	Surpression Radiation thermique

Pour quantifier la propagation des effets, il faut prendre en compte :

- L'intensité de radiation thermique ($KW.m^{-2}$) et la surpression (mbar)

Les seuils des effets thermiques sur l'homme et sur les structures sont représentés dans le tableau (III-22)

Tableau III- 22 : Seuils des effets de radiation thermique sur l'Homme[20]

Types d'effets constatés		Flux radiatifs ($KW.m^{-2}$)
Durée du phénomène > 2min	Létaux	5
	Irréversibles	3
Durée du phénomène < 2 min	Létaux	(100 %) 6000-7000
	Brûlures du 3ème degré superficielles	2600
	Létaux (50 %)	2200
	Brûlures du 2nd degré sévères	1200
	Létaux (1 %)	1000
	Irréversibles	600
	Brûlures superficielles du 2nd degré	700
	Brûlures du 1er degré	200
Brûlures du 1er degré	85	

Les seuils des effets de radiation thermique sur les structures, référencées dans la littérature, sont représentés dans le tableau (III-23)

Tableau III- 23 : Seuils des effets de radiation thermique sur les structures[20]

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
Rupture ou destruction des éléments en acier	100
Ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200

Les seuils des effets de surpression sur, référencés dans la littérature, sont représentés dans le tableau (III-24)

Tableau III- 24 : Seuils de référence des effets de surpression sur l'Homme[20]

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

Les seuils des effets de surpression sur les structures, référencées dans la littérature, sont représentés dans le tableau (III-25)

Tableau III- 25 : Seuils de référence des effets de surpression sur les structures[20]

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
Dommages 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
Destruction totale des structures	830

Les seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique, sont donnés dans le tableau (III-26)

Tableau III- 26 : Seuils d'escalade, causés par la surpression et la radiation thermique

Vecteur d'escalade	Équipement 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

III.4.1.1 Évaluation des effets

L'évaluation des effets des différents PhD identifiés précédemment est fait par le logiciel PHAST, nous intéressons à trois seuils de surpression 140 (mbar), 200 (mbar), 300 (mbar) et à trois seuils de radiation thermique (10 KW/m²), (36 KW/m²) et (100 KW/m²) parce que ces derniers approchent des seuils d'escalade.

III.4.1.1.1 Données nécessaires pour la modélisation

- Caractéristique des produits utilisés

Tableau III- 27 : Caractéristique des produits utilisés

Substances	Pression (bar)	Capacité (kg)
Bouteille Hydrogène	200	6.8
Bouteille Acétylène	15	5.5

- Contexte climatique

La ville de Réghaia se situe dans une région qui présente un climat méditerranéen assez humide, caractérisé par des températures moyennes.

• Température

À Réghaïa, les étés sont très chauds, lourds, secs et dégagé dans l'ensemble et les hivers sont longs, venteux et partiellement nuageux. Le tableau suivant présente les données de températures moyennes mensuelles à Réghaia.

Tableau III- 28 : Températures moyennes mensuelles à Réghaia [21]

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T _{min} (°c)	7,6	9,2	12,4	13,7	16,0	17,9	21,0	22,6	19,3	14,8	12,9	10,1
T _{max} (°c)	18,3	20,6	19,7	21,8	25,7	27,5	29,6	31,1	28,8	26,1	21,5	18,5

La saison très chaude dure 3,0 mois, du 22 juin au 22 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 28 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 12 août, avec une température moyenne maximale de 31 °C et minimale de 20 °C.[21]

La saison fraîche dure 4,0 mois, du 24 novembre au 23 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 19 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 19 janvier, avec une température moyenne minimale de 6 °C et maximale de 16 °C.[21]

- **Vitesse et direction du vent**

L'été montre la prédominance des vents de direction Nord (N, NE), pour l'hiver, elle est en faveur des vents du sud et du sud-ouest.[10]

La vitesse du vent est généralement égale à 3 (m/s) en été, et à 4 (m/s) en hiver[10].

- **Classe de stabilité atmosphérique**

Le modèle de dispersion souvent employé est le modèle gaussien développé selon la méthode de Pasquill. Ce modèle s'applique dans différents cas de figure possibles définis en fonction de la vitesse du vent et de différents états atmosphériques désignés comme « classes » par Pasquill.

Le tableau (III-29) ci-dessous fournit les conditions dans lesquelles sont définies les classes de Pasquill :

Tableau III- 29 : Détermination des classes de stabilité atmosphérique de Pasquill. [23]

Vitesse du vent de surface (m/s)	Couverture nuageuse relative				
	Jour			Nuit	
	0/8 – 2/8	3/8 – 5/8	6/8 – 8/8	< 3/8	> 4/8
< 2	A	A-B	B	F	F
2 – 3	A-B	B	C	E	F
3 – 4	B	B – C	D	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Les conditions de stabilité varient avec le temps d'observation, par conséquent nous choisirons des classes de stabilité caractéristiques de la saison (été ou hiver).

Deux conditions météorologiques ont été définies selon le climat général de Réghaia qui est données dans le tableau (III-30)

Tableau III- 30 : Conditions météorologiques pour les modélisations d'accidents majeurs

Conditions	Vitesse du vent (m/s)	Stabilité de l'air	Température (°C)	Humidité (%)
Été	3	D	25	70
Hiver	4	B	16	60

III.4.1.1.2 Modélisation et interprétation des effets

Après avoir collecté les données nécessaires à la simulation par le logiciel PHAST, nous allons modéliser les phénomènes susceptibles d'endommager les équipements et les structures (Feu de jet, VCE), le feu de flash ne sera pas modélisé puisqu'il n'a aucun effet sur les structures.

- **Scénario 1 'SC4'** : Feu de jet suite à la perte de confinement d'une bouteille C₂H₂

La perte de confinement d'une bouteille C₂H₂ donne lieu à un feu de jet, nous nous intéressons dans ce cas aux effets des radiations thermiques émises, les résultats de la variation du flux thermique en fonction de la distance pour les deux conditions climatiques sont représentés dans la figure (III-4) suivante :

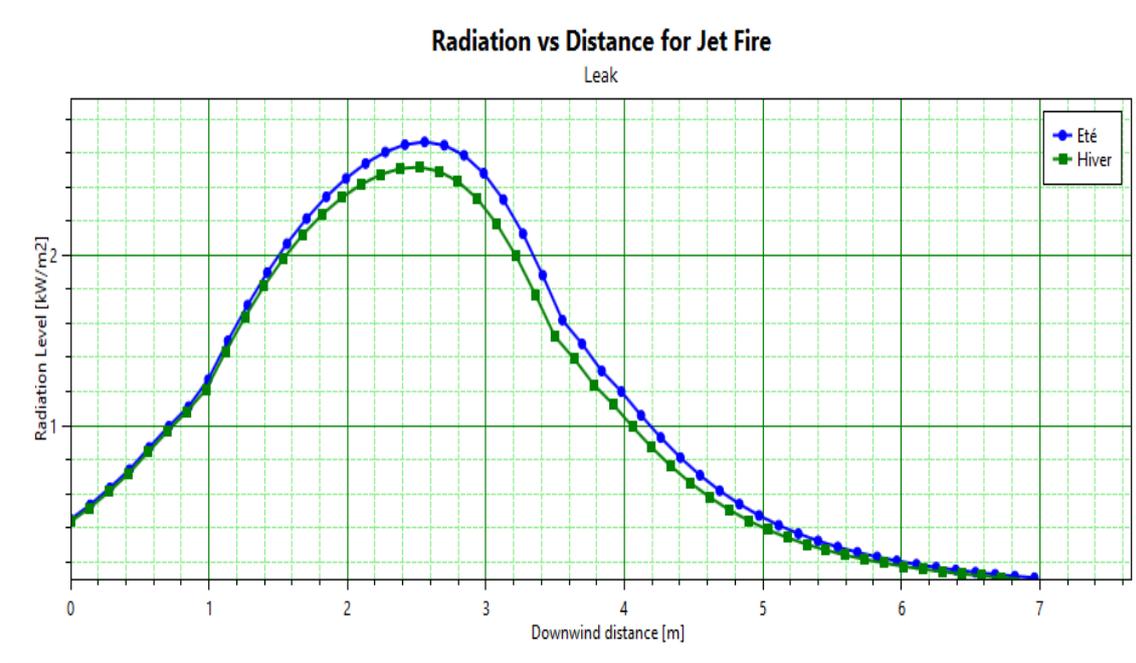


Figure III- 4 : Variation thermique du « feu de jet bouteille C₂H₂ » en fonction de la distance.

Le graphique montre que les effets de radiation thermique engendrés par le feu de jet au niveau du Park bouteilles sont maximaux à 2,6 m de la bouteille d'C₂H₂ avec une valeur de 2,63 (KW/m²) qui est inférieure au seuil minimal des effets. Par conséquent, cet événement n'est pas susceptible d'être un événement primaire à effet domino.

- **Scénario 2 'SC6'** : VCE dans Park bouteilles suite à la perte de confinement d'une bouteille C₂H₂

La perte de confinement d'une bouteille C_2H_2 donne lieu à un VCE dans le Park bouteille, nous nous intéressons à l'effet de l'onde de choc sur les structures.

Les résultats de la modélisation sont représentés sur la carte satellitaire dans la figure (III-5)

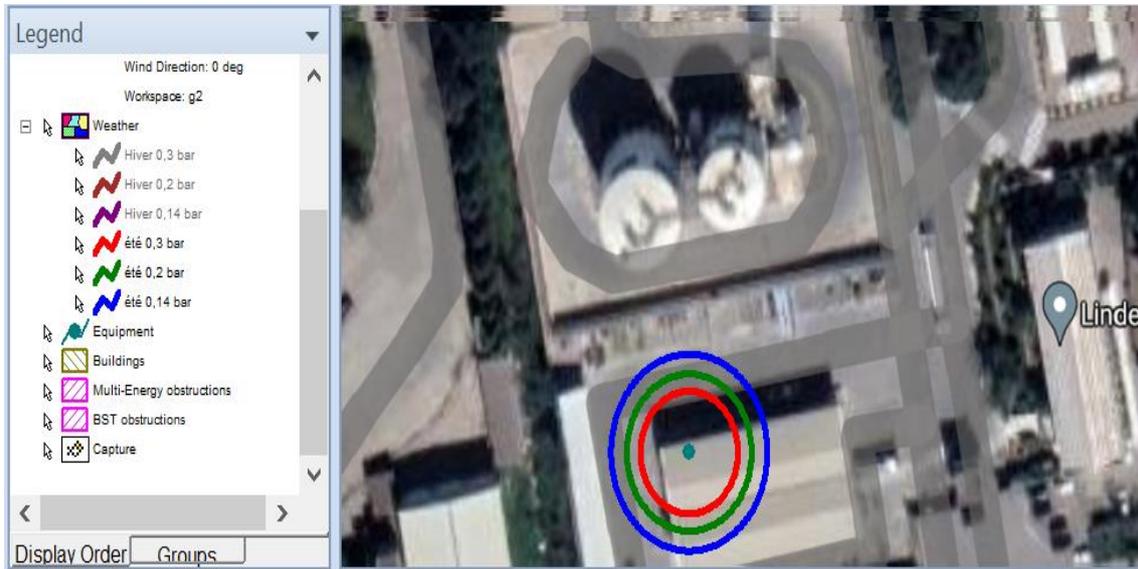


Figure III- 5 :Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement primaire « VCE dans le park bouteille

D'après le rapport fourni par le logiciel PHAST, le seuil d'effet domino est atteint à une distance de **13,27 m** et la valeur maximale $\Delta P=1\text{bar}$ est atteinte à une distance de 5m autour de la bouteille.

- **Scénario 3 ' SC8' :** Feu de jet dans le Park bouteille suite à la perte de confinement d'une bouteille H_2

L'ignition immédiate après la perte de confinement d'une bouteille H_2 donne lieu à un feu de jet, nous nous intéressons dans ce cas à l'effet des radiations thermiques.

Les résultats de la variation du flux thermique en fonction de la distance pour les deux conditions climatiques sont représentés dans la figure III-6

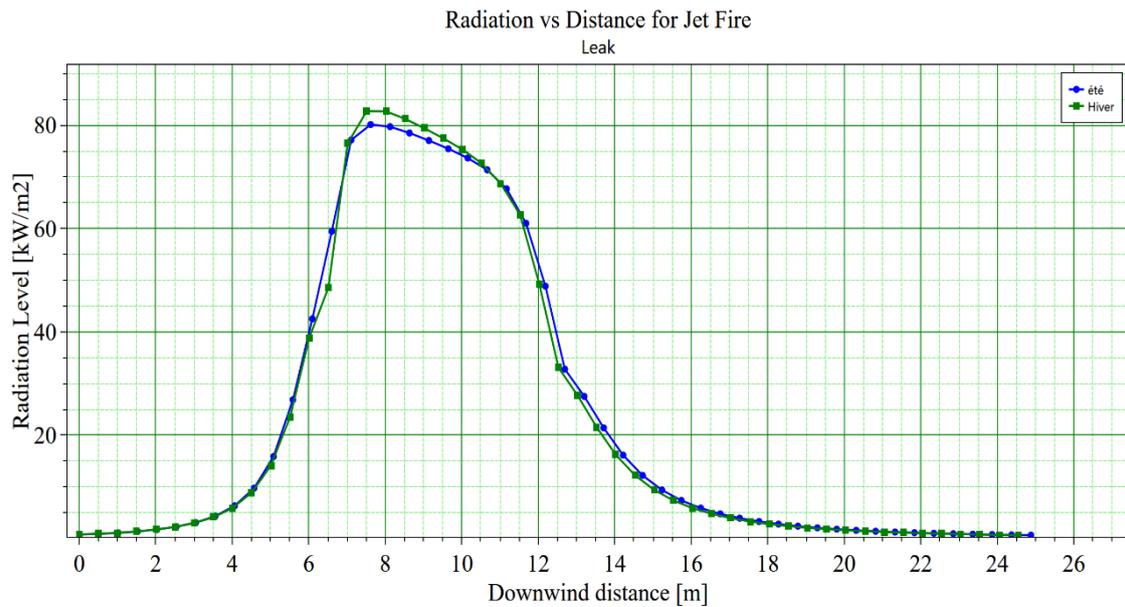


Figure III- 6 : Variation thermique du « feu de jet bouteille H₂ » en fonction de la distance.

Le graphique montre que les effets de radiation thermique engendrés par le feu de jet sont maximaux à **7,92 m** du lieu de déclenchement du feu de jet, ou ils attendront la valeur de **83,07 (KW/m²)** qui est > à la valeur seuil d'escalade (50 KW/m² pendant 10 min) mais la durée du feu est de **33,34 (s)** qui signifie que la propagation n'est pas possible et que cet évènement n'est pas pris comme évènement primaire à effet domino.

- **Scénario 4 ' SC10' :** VCE dans le Park bouteille suite à la perte de confinement d'une bouteille H₂

L'ignition retardée après la perte de confinement d'une bouteille H₂ donne lieu à un VCE, nous nous intéressons dans ce cas aux effets de l'onde de choc.

Les résultats de la modélisation sont représentés sur la carte satellitaire dans la figure (III-7)



Figure III- 7 : Propagation des effets de surpression pour l'événement « VCE bouteille H₂ »

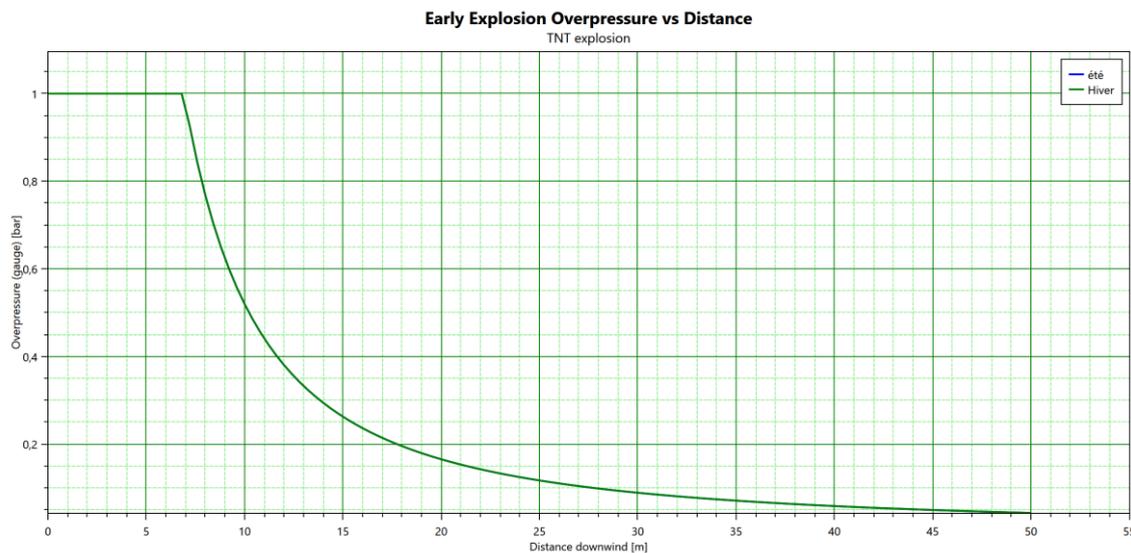


Figure III- 8 : Effet de surpression en fonction de la distance pour l'événement primaire « VCE bouteille H₂ »

Le graphique montre que le seuil d'effet dominos (200 mbar) est atteint à une distance de **17,75 m** autour de la bouteille, ainsi nous aurons un $\Delta P = 1$ (bar) qui est l'effet maximal à **6,8 m**, cette dernière représente la valeur seuil qui engendrent la destruction totale de la structure.

Le tableau (III-31) reprend les distances atteintes par l'onde de choc à effet domino :

Tableau III- 31 : Distances atteintes par l'onde de choc

Surpression (mbar)	Distance (m)
0,2	17,75
0,3	13,84

On constate finalement que l'effet de l'onde de choc touchera en premier lieu le cadre de bouteille d'H₂.

III.4.2 Identification des cibles et calcul de probabilité d'escalade

Dans la section précédente, nous avons pu identifier deux événements primaires :

- VCE bouteille hydrogène.
- VCE bouteille Acétylène.

L'identification des cibles potentielles est effectuée en comparant les distances réelles aux distances d'effets, calculées pour les valeurs seuils prédéfinies.

La probabilité d'escalade est déterminée en utilisant des modèles de vulnérabilité spécifiques appelés « fonction Probit » [7]. Nous avons choisi d'utiliser l'approche probit, car elle est très utilisée dans la littérature d'étude des effets domino.

Pour l'estimation de la probabilité d'escalade, l'équation (III-2) est utilisée

$$P_{ij} = \frac{1,005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{ij} - 5,004}{0,6120}\right)}} \quad \text{(III-4)}$$

Avec :

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

Y_{ij} : Fonction probit.

Les auteurs ont défini une fonction de probabilité appelée "fonction probit" (Y) pour relier les dommages aux équipements à la surpression statique de pointe ΔP :

$$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln(\Delta P) \quad \text{(III-5)}$$

Où :

- Y est le probit pour les dommages à l'équipement.
- ΔP est exprimé en Pa.
- k_1 et k_2 sont les coefficients du probit.

Les modèles proposés par Zhang et Jiang reconnus comme étant les plus fiables, 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.

Les modèles retenus sont présentés dans le tableau (III-32)

Tableau III- 32 : Modèles de vulnérabilité [12]

Effets physiques	Équipements cibles	Modèles de vulnérabilité
Radiation thermique	Atmosphérique	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{tff})$ $\ln(\text{tff}) = - 1.13 \ln(I_{i,j}) - 2.67 \times 10^{-5} V + 9.9$
	Pressurisé	$Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \times \ln(\text{tff})$ $\ln(\text{tff}) = - 0.95 \ln(I_{i,j}) + 8.845 V 0.032$
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.

tff : temps-avant-défaillance (s).

V : volume de l'équipement (m^3).

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

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

Concernant les effets de projection de fragments, il n'existe pas de modèles de vulnérabilité simples pour l'étude de la probabilité d'endommagement. Cela est dû non seulement au nombre relativement faible d'accidents à effets dominos causés par ce type d'effets. Mais également au nombre important de paramètres qui influencent l'impact des fragments et la probabilité d'endommagement.

Selon les représentations graphiques et les données ressorties par la modélisation, On constate finalement que l'effet de l'onde de choc du premier événement primaire 'VCE bouteille hydrogène' touchera en premier lieu les cadres de bouteilles d' H_2 et pour le deuxième événement primaire « VCE d'une bouteille C_2H_2 » la cible est le cadre de bouteilles C_2H_2 .

Dans le tableau (III-33), nous identifions les cibles, ce sont les équipements qui peuvent être endommagés par l'accident primaire. Une fois endommagés, ils engendrent des effets physiques très intenses ce qui aggrave ainsi les conséquences de l'accident primaire, ensuite nous calculons les probabilités d'escalade.

Tableau III- 33 : Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de premier niveau.

Équipements	Vecteurs d'escalade	Cibles		Pique de pression statique ΔP (kPa)	Valeurs seuils d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_{ed1} (ans ⁻¹)
		Équipements	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
Bouteille d'hydrogène	Surpression	Cadre bouteilles d'H ₂	Pressurisé	100 kPa	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82.x. \ln(\Delta P_{i,j})$	-6.0585	$1,418 \times 10^{-8}$	3.664×10^{-12}
Bouteille d'acétylène	Surpression	Cadre bouteilles d'C ₂ H ₂	Pressurisé	100 kPa	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82.x. \ln(\Delta P_{i,j})$	-6.0585	$1,418 \times 10^{-8}$	$7,328 \times 10^{-13}$

III.4.3 Détermination des scénarios secondaires

Afin de déterminer les scénarios secondaires qui peuvent être engendrés suite à la propagation de l'accident primaire, nous devons savoir en premier lieu si les bouteilles vont exploser en même temps ou non, alors nous allons baser sur une investigation faite après une explosion de bouteilles d'hydrogène survenue en chine [22] et aussi sur la base de données recueillie par Abdolhamidzadeh et al. 2011 (Annexe I) qui regroupe l'historique de tous les accidents à effets dominos produits dans le monde durant la période 1917–2009.

L'investigation a montré qu'après l'explosion de la première bouteille, le reste de bouteilles ont explosé en même temps.

Cependant, puisque les cadres de bouteilles sont fortement inclus dans la zone du seuil des effets dominos, les évènements secondaires retenus, pour les deux évènements primaires sont :

- VCE bouteille d' H_2 → Explosion des bouteilles en cadre d' H_2 .
- VCE bouteille d' C_2H_2 → Explosion des bouteilles en cadre d' C_2H_2 .

Il est noté que la fréquence d'occurrence de l'évènement secondaire (F_2) est égale à la fréquence d'occurrence de l'effet domino de niveau 1 (F_{ed1}).

Les fréquences de chacun de ces deux évènements sont données dans le tableau (III-34) pour pouvoir par la suite déterminer la fréquence de l'effet domino du deuxième niveau.

Tableau III- 34: Scénarios secondaires les plus susceptibles de se produire suite à l'évènement primaire « VCE dans le Park bouteilles »

Évènement primaire	Scénarios secondaires	Fréquence F_2 (ans ⁻¹)
VCE bouteille d' H_2	Explosion des bouteilles en cadre d' H_2	3.664×10^{-12}
VCE bouteille d' C_2H_2	Explosion des bouteilles en cadre d' C_2H_2	$7,328 \times 10^{-13}$

III.4.3.1 Évaluation des effets des évènements secondaires

Pour la modélisation PHAST, nous allons utiliser le modèle 'Standalone' car nous voulons simuler un seul phénomène « VCE », contrairement à la simulation des évènements primaires ou nous avons utilisé « Pressure Vessel » qui donnent tous les phénomènes possibles en cas de fuite.

Pour l'évènement secondaire « Explosion des bouteilles en cadre d' H_2 », Les données nécessaires pour la modélisation sont résumées dans le tableau

Tableau III- 35: Données introduites dans le logiciel PHAST

Combustible	H ₂
Quantité	81,6
Pression	200 bars
Distance minimale	0 m
Distance maximale	60 m
Pas	0,2 m

Les résultats de la modélisation sont représentés sur la carte satellitaire dans la figure (III-9)



Figure III- 9 : Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire « Explosion du cadre de bouteilles H₂ »

D'après le rapport fournis par le logiciel PHAST, le seuil d'effet dominos (200 mbar) est atteint à une distance de **40,164 m** autour du cadre d'hydrogène, nous constatons que le réservoir LOX se trouve dans ce périmètre critique à une distance de **29,28 m** ainsi que le réservoir LIN à une distance de **34,94 m**.

En prenant en compte l'effet de synergie entre l'événement primaire « VCE bouteille d'H₂ » et l'événement secondaire « Explosion des bouteilles en cadre d'H₂ », les vecteurs d'escalades doivent être sommés. Ce qui nous permet d'obtenir la pression statique au niveau de chaque cible :

- Au niveau du réservoir LOX : $\Delta P = 100 + 32,13 = 132,13$ kPa.
- Au niveau du réservoir LIN : $\Delta P = 100 + 24,91 = 124,91$ kPa.

Pour l'évènement secondaire 'Explosion des bouteilles en cadre d'C₂H₂', les résultats de la modélisation sont représentés dans la figure (III-10)

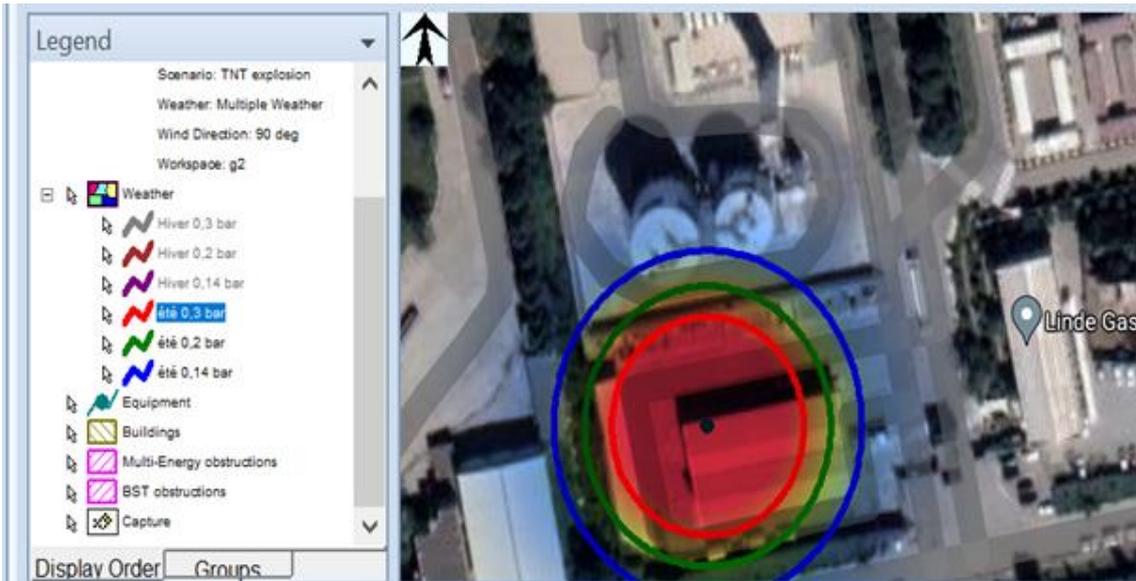


Figure III- 10 : Propagation de l'effet de surpression suite à l'événement secondaire « Explosion du cadre de bouteilles C₂H₂ »

D'après le rapport fournis par le logiciel PHAST, le seuil d'effet dominos (200 mbar) est atteint à une distance de **28** m autour du cadre d'acétylène, cela signifie que les réservoirs LOX et LIN ne seront pas affectés, la cible potentielle qui se trouve dans ce périmètre critique est le cadre de bouteilles d'H₂ avec une pression statique au niveau de ces derniers de $\Delta P = 1$ bar.

En prenant en compte l'effet de synergie entre l'événement primaire « VCE bouteille d'C₂H₂ » et l'événement secondaire « explosion après la rupture totale des bouteilles du cadre d'acétylène », les vecteurs d'escalades doivent être sommés. Ce qui nous permet d'obtenir le résultat suivant :

- Au niveau du cadre d'C₂H₂, $\Delta P = 100 + 100 = 200$ kPa.

Dans le tableau (III-36), nous identifions les cibles et nous calculons la probabilité d'escalade :

Tableau III- 36 : Probabilité d'escalade et fréquence de l'effet domino de deuxième niveau.

Source	Vecteurs d'escalade	Cibles		Pique de pression statique ΔP (kPa)	Valeurs seuils d'escalade	Fonction probit		$P_{i,j}$	F_2 (ans ⁻¹)
		Équipements	Type			Expression	$Y_{i,j}$		
Synergie entre le VCE bouteille d'H ₂ et l'explosion du cadre de bouteilles d'H ₂	Surpression	Réservoir d'O ₂ liquide	Pressurisé	132,13	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82 \times \ln(\Delta P_{i,j})$	-5,55	$3,25 \times 10^{-8}$	$1,19 \times 10^{-19}$
		Réservoir d'N ₂ liquide		124,91			-5,65	$2,75 \times 10^{-8}$	$1,0076 \times 10^{-19}$
Synergie entre le VCE bouteille d'C ₂ H ₂ et l'explosion du cadre de bouteilles d'C ₂ H ₂	Surpression	Les cadres de bouteille H ₂		200	17 kPa	$Y_{i,j} = - 14.44 + 1.82 \times \ln(\Delta P_{i,j})$	-4,797	$1,114 \times 10^{-7}$	$8,166 \times 10^{-20}$

III.4.4 Détermination des événements tertiaires

Les scénarios tertiaires retenus pour l'événement secondaire « explosion du cadre de bouteilles H₂ » sont la rupture catastrophique des réservoirs LOX et LIN.

Concernant l'évènement secondaire « Explosion du cadre de bouteilles C₂H₂ » l'évènement tertiaire retenu est « l'explosion du cadre de bouteilles H₂ », cet événement ne sera pas étudié vu qu'il nous ramène au premier scénario domino.

Concernant la rupture des deux réservoirs LOX et LIN, seul une estimation qualitative des dégâts peut être faite, puisque nous ne disposons d'aucun outil informatique pour simuler ce scénario.

L'évènement tertiaire « Rupture du réservoir LOX » peut donner lieu à une escalade, nous justifions cela par la quantité importante d'O₂ au niveau du réservoir qui est de $\approx 1000 \text{ m}^3$ et par la proximité du réservoir d'argon (3,63m) et de la tour ASU.

Ensuite, l'effet de synergie entre l'évènement secondaire « explosion du cadre de bouteilles H₂ » et l'évènement tertiaire « Rupture du réservoir LOX » donne lieu au scénario quaternaire : Rupture du réservoir d'argon + incendie de la tour ASU.

III.4.5 Évaluation des scénarios dominos

Une nouvelle méthodologie basée sur le réseau bayésien est introduite pour modéliser le modèle de propagation de l'effet domino et pour estimer la probabilité de l'effet domino à différents niveaux. La structure flexible et les techniques de modélisation uniques offertes par le réseau bayésien permettent d'analyser les effets domino dans un cadre probabiliste, en tenant compte des effets synergiques, des probabilités bruitées et des défaillances de cause commune[7].

En outre, les incertitudes et les interactions complexes entre les composantes de l'effet domino sont saisies à l'aide d'un réseau bayésien. Les probabilités des événements sont mises à jour à la lumière de nouvelles informations, et le chemin le plus probable de l'effet domino est déterminé sur la base des nouvelles données recueillies.

III.4.5.1 Définition d'un réseau bayésien (BN)

Le BN est un graphe acyclique dirigé pour le raisonnement en incertitude dans lequel les nœuds représentent des variables et sont reliés par des arcs dirigés. Les arcs dénotent des dépendances ou des relations causales entre les nœuds reliés, tandis que les tables de probabilité conditionnelle (CPT) attribuées aux nœuds déterminent le type et la force de ces dépendances[7].

Dans BN, Les nœuds à partir desquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds parents, tandis que les nœuds vers lesquels les arcs sont dirigés sont appelés nœuds enfants. En fait, 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 également appelés nœuds racines et nœuds feuilles, respectivement.

III.4.5.2 La modélisation domino

Pour modéliser le chemin de propagation probable de l'effet domino, les étapes suivantes sont suivies [7]:

Étape 1 : Selon la disposition de l'usine de traitement concernée, un nœud est attribué à chaque unité de traitement. Ces unités sont soit susceptibles de subir l'accident, soit capables de l'aggraver, notamment les colonnes de distillation et les réservoirs de stockage atmosphériques et pressurisés. Par exemple, supposons une usine de traitement comportant six unités (X_i , avec i allant de 1 à 6. Voir figure III-11).

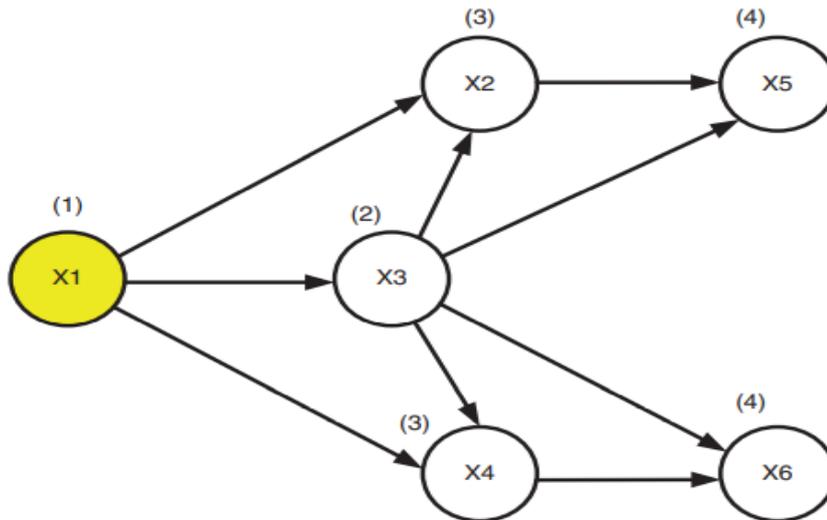


Figure III- 11 : Un schéma probable de propagation de l'effet domino. Les nombres entre parenthèses indiquent l'ordre d'apparition des événements. (étape 4 de la méthodologie).[7]

Étape 2 : En utilisant les rapports de sécurité généralement disponibles pour usines de traitement ou par des méthodes d'évaluation des risques, l'unité primaire dans laquelle l'accident domino est susceptible de commencer est déterminée (par exemple, X1 sur la figure III-11). Il convient de noter que des considérations telles qu'une probabilité d'occurrence raisonnablement élevée et un inventaire suffisant de matières dangereuses pour produire des vecteurs d'escalade crédibles doivent être prises en compte lors du choix de l'unité primaire. [7]

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 III.4.1), les probabilités d'escalade des unités secondaires vont être calculées compte tenu de l'événement primaire, c'est-à-dire $P(X2/X1)$, $P(X3/X1)$ et $P(X4/X1)$. Tel que, les unités ayant la probabilité d'escalade la plus élevée sont choisies comme unités secondaires (par exemple, X3 dans la figure III-11). [7]

Puisque les événements secondaires sont causés par l'événement primaire, un arc causal doit être dirigé de X1 à X3, indiquant que l'occurrence de X3 est conditionnelle à l'occurrence de X1.

Étape 4 : En remplaçant l'unité primaire par les unités secondaires, l'étape 3 est répétée pour déterminer les unités tertiaires potentielles (p. ex. X2 et X4), les unités quaternaires potentielles (p. ex. X5 et X6) et ainsi de suite. Dans cet exemple, X2 et X4 (X5 et X6) ont les mêmes probabilités d'escalade et sont tous deux sélectionnés comme unités tertiaires (quaternaires). [7]

Il convient de noter que lors de la répétition de la même procédure pour les unités secondaires ou les unités d'ordre supérieur, les effets synergiques doivent être pris en compte.

Par effet synergique, On entend que les vecteurs d'escalade des unités nouvellement engagées (d'ordre i) coopèrent avec ceux des unités déjà engagées (d'ordre i-1) pour affecter 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 (III-11), X2 et X3 coopèrent entre eux (c'est-à-dire que leurs vecteurs d'escalade sont superposés) pour déclencher un accident dans X5.

Ainsi, les arcs causaux doivent être dirigés de X2 et X3 vers X5, 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 X5 due à l'effet synergique, $P(X5/X2, X3)$ est également calculée à l'aide des fonctions probit mais en sommant les vecteurs d'escalade.

Une fois que le schéma de propagation probable de l'effet domino a été développé en tant que BN, et que la probabilité de l'événement primaire et les probabilités conditionnelles des autres événements ont été calculées, la distribution de probabilité conjointe des événements contribuant à l'effet domino est calculée comme suit :

$$P(U) = P(X1) P(X3/X1) P(X2/X1, X3) P(X4/X1, X3) P(X5/X2, X3) P(X6/X3, X4) \quad \text{(III-6)}$$

En supposant que X1 est l'unité primaire et selon la figure (III-11), la chronologie ou l'ordre séquentiel probable des événements serait $X1 \Rightarrow X3 \Rightarrow X2(\text{ou } X4) \Rightarrow X5(\text{ou } X6)$.

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 (III-11), en considérant X3 comme unité secondaire, la probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être calculée comme suit :

$$P_{\text{Niveau1}} = P(X1) \cdot P(X3/X1) \quad \text{(III-7)}$$

De même, l'effet domino ne pourrait se poursuivre jusqu'au deuxième niveau que si au moins l'une des unités tertiaires X2 ou X4 est touchée par l'accident de premier niveau. Par conséquent, la probabilité de l'effet domino de deuxième niveau est calculée comme suit :

$$P_{\text{Niveau2}} = P(X1) P(X3/X1) \cdot P(X2 \text{ ou } X4/X1, X3) \quad \text{(III-8)}$$

Pour tenir compte de l'union de X2 et X4, la figure (III-11) peut être modifiée en ajoutant le nœud auxiliaire L1 de telle sorte que $L1 = X2 \cup X4$ (voir figure III-12).

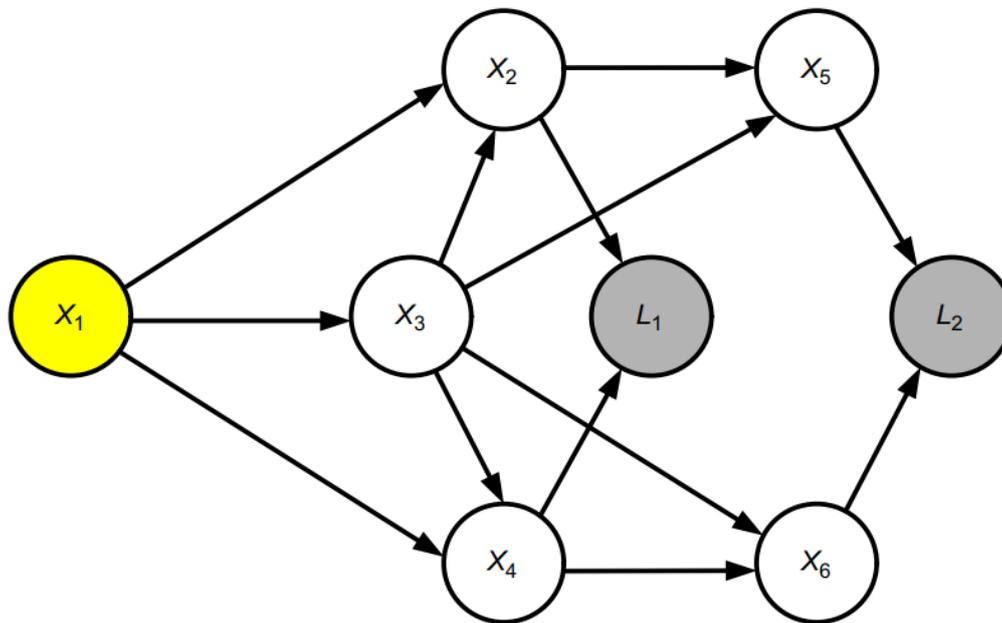


Figure III- 12:BN modifié pour incorporer l'union des événements tertiaires et quaternaires en utilisant les nœuds auxiliaires L1 et L2, respectivement.

Ainsi, X2 et X4 sont connectés à L1 à l'aide d'arcs causaux de porte logique « OU », ce qui donne la table de probabilité conditionnelle présentée dans le tableau (III-37) pour le nœud L1.

Tableau III- 37 : 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 » [7]

Unités		P (L1/X2, X4)	
X2	X4	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

Il convient de noter que la probabilité de L1 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 X2 et X4 soit impliquée dans l'accident. De même, pour que l'effet domino se poursuive au troisième niveau, il est nécessaire que l'accident survenu dans les unités tertiaires se propage dans au moins une des unités quaternaires.

La probabilité de l'effet domino de premier niveau peut être estimée comme le produit de $P(X1)$ et $P(X3/X1)$. Ainsi, si DL1 (*Domino Level 1*) est connecté à X1 et X3 par des arcs causaux de porte logique « ET », $P(DL1)$ 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 X1 mais aussi l'événement secondaire X3 sont nécessaires.

De même, si DL2 est connecté aux nœuds DL1 et L1 par des arcs causaux de porte logique « ET », P(DL2) 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. DL1) et au moins un des événements tertiaires, c.-à-d. L1 se produisent. Même chose pour le niveau 3. (Voir figure III.13).

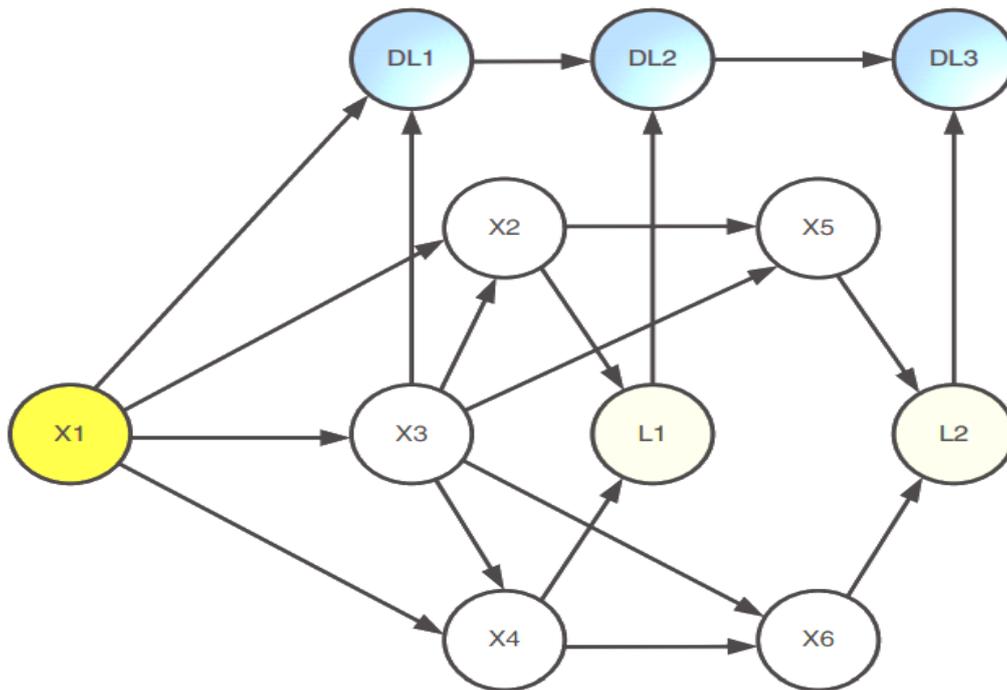


Figure III- 13 : Réseau bayésien complet pour l'estimation du modèle de propagation et de la probabilité d'occurrence de l'effet domino[23].

III.4.5.3 Réalisation des BN

Afin de réaliser les réseaux bayésiens qui permettent de modéliser le schéma de propagation probable de l'effet domino, nous allons utiliser le logiciel AGENARISK.

Scénario 1 : VCE bouteille H₂ => Explosion du cadre de bouteilles H₂ => Explosion du cadre de bouteilles C₂H₂ => Rupture du réservoir LOX => Rupture du réservoir LIN => Rupture du réservoir Argon => Incendie tour ASU.

Le BN relatif au 1^{er} scénario est schématisé dans la figure (III-14)

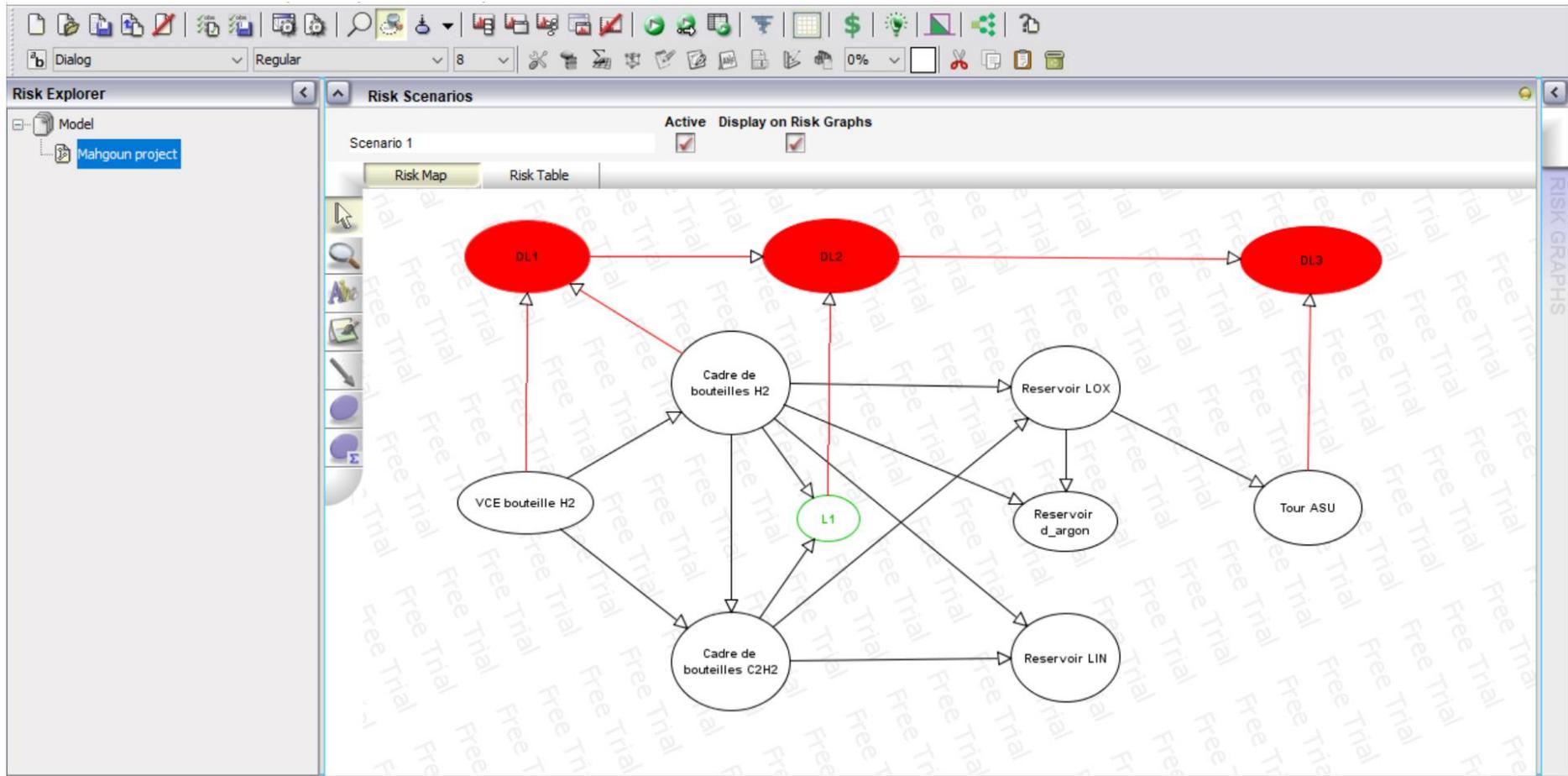


Figure III- 14 : BN de l'évènement primaire « VCE d'une bouteille H₂ »

Scénario 2 : VCE bouteille C_2H_2 => Explosion du cadre de bouteilles C_2H_2 => Explosion du cadre de bouteilles H_2 => Rupture du réservoir LOX => Rupture du réservoir LIN => Rupture du réservoir Argon => Incendie tour ASU.

Le BN relatif au 2^{ème} scénario est schématisée dans la figure (III-15)

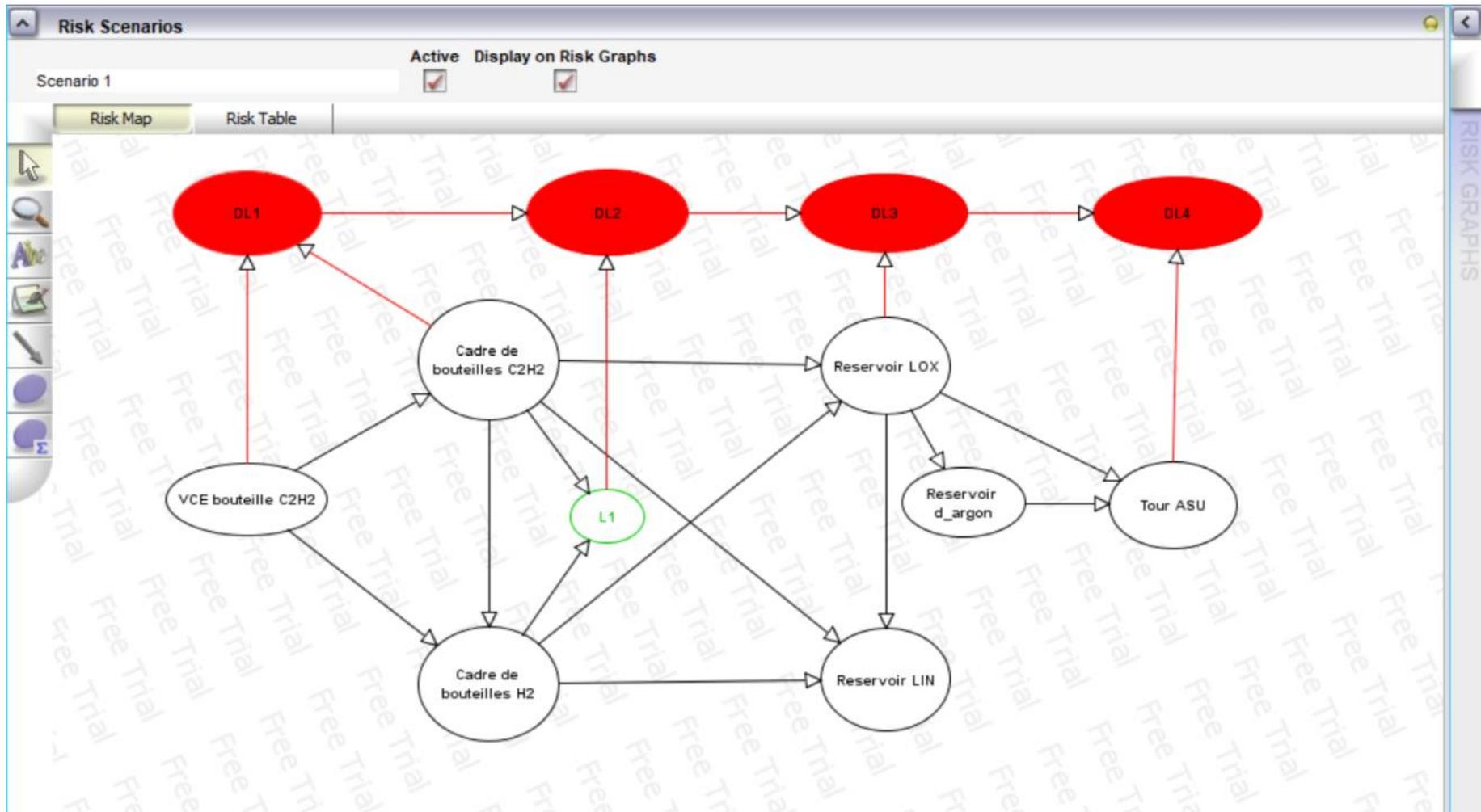


Figure III- 15 : BN de l'évènement primaire « VCE d'une bouteille C₂H₂ »

III.4.6 Risque individuel

Le risque individuel est exprimé par une ou plusieurs valeurs. Ce dernier peut être représenté sous forme de synthèse graphique montrant le contour du risque individuel ou sa répartition géographique.

Il est obtenu en calculant la fréquence prévue d'un événement pouvant causer des dommages à chaque emplacement à l'intérieur ou à proximité de l'installation en supposant que quelqu'un qui n'est pas protégé sera présent et exposé sans tenir compte de la fraction du temps pendant lequel la personne est exposée au risque.

La figure (III-16) représente le contour du risque individuel relatif à l'événement primaire « VCE bouteille H₂ »

En comparant les valeurs de surpression obtenues avec le premier seuil des effets de surpression sur l'homme (voir tableau III-24), nous avons pu déterminer les contours des zones où une personne au minimum serait touchée.



Figure III- 16: Contour du risque individuel correspondant à la propagation du 1er évènement primaire VCE dans le Park bouteilles.

Le petit cercle en rouge correspond à la zone où la fréquence qu'une personne au minimum soit touchée par les effets dominos de niveau 1. Cette fréquence est de 3.664×10^{-12} .

Le grand cercle représente le contour de la zone correspondante à la fréquence qu'une personne au minimum soit touchée par un effet domino du niveau 2. Cette fréquence est de $1,19 \times 10^{-19}$. Donc, à travers ces contours de risque individuel, la fréquence de risques auxquels une personne est exposée est mieux représentée.

Finalement ce chapitre nous a permis, dans un premier temps de déterminer les ateliers à criticité élevée et cela en utilisant une analyse préliminaire des risques. Dans un deuxième temps, l'utilisation des nœuds papillons nous a permis d'identifier les combinaisons de défaillances et des causes amenant à la réalisation des ERC ainsi que de les quantifier en calculant la probabilité de leur occurrence par approche AdD, et de déterminer les différents PhD auxquels peuvent conduire les ERC identifiés. Identiquement à l'AdD nous avons quantifié la probabilité d'occurrence de chaque phénomène. Durant la démarche de quantification l'influence du management et de la culture de sécurité a été prise en considération.

Aussi, les scénarios les plus probables ont été pris pour l'étude des effets dominos, ou nous avons pu déterminer deux événements primaires qui pourraient donner lieu à des accidents dominos :

- « VCE d'une bouteille H₂ dans le Park bouteille »
- « VCE d'une bouteille C₂H₂ dans le Park bouteille »

Selon la matrice des risques donnée dans le tableau (III-19), la classe des conséquences de ces deux événements doit être élevée à C4, ce qui les rend des scénarios à effets importants (zones rouges) et nécessite des barrières de sécurité supplémentaires.

Ces résultats ne seront pas atteints sans l'intégration de l'approche proposée, cette amélioration a permis de déterminer 4 niveaux des effets dominos pour SC6 et SC10, et que ces derniers pourront déclencher des accidents majeurs aux niveaux de plusieurs autres équipements qui ont été pris pour des équipements non critiques selon la méthode ARAMIS.

Chapitre IV : Prévention des effets dominos

Les accidents dans lesquels un effet domino se produit font partie des événements les plus graves qui peuvent affecter les processus industriels et les sites de stockage. Par conséquent, la gestion de la sécurité doit déployer des efforts considérables pour prévenir les scénarios accidentels à effet domino, ce qui est actuellement réalisé principalement par des stratégies de sécurité active et passive.

Une approche inhérente à la prévention des accidents dominos peut être facilement appliquée dès la conception de l'usine. Dans ce cas, les événements d'escalade peuvent être évités simplement en introduisant des distances de sécurité appropriées entre les unités de traitement les plus dangereuses (celles qui ont des stocks importants de substances inflammables ou toxiques) et les autres installations de traitement. Cependant, les distances entre les unités de traitement sont généralement définies sur la base de la pratique industrielle et de simples directives ou règles de pouce, sans référence spécifique à la prévention des événements domino.

Dans ce chapitre, nous allons proposer des mesures qui permettent, dans un premier temps d'empêcher la propagation des événements indésirables potentiellement destructeurs, en second lieu de diminuer la gravité et la probabilité de ces derniers.

IV.1 Prévention des escalades par une approche de sécurité intrinsèque

La théorie de la sécurité intrinsèque peut-être esquissée par cinq mots-clés bien connus :

Intensification (minimisation), substitution, modération (atténuation), simplification et limitation des effets.

Ces mots-guides peuvent être appliqués pour identifier et définir les actions de sécurité inhérentes visant à prévenir l'escalade. Il convient toutefois de noter que le cadre conceptuel de base représenté par ces mots-guides est parfois difficile à mettre en pratique, et que tous ces concepts ne peuvent pas être appliqués au stade de la conception du processus dans lequel l'évaluation de la possibilité d'escalade doit être envisagée.

Le mot-guide "intensification" fait principalement référence à la réduction du stock d'équipements individuels ou du nombre d'équipements.

Les actions liées à la "modération" permettraient également de réduire considérablement les possibilités d'escalade. L'utilisation de conditions moins dangereuses, comme le passage à des technologies de stockage plus sûres (comme, en général, l'utilisation de stockages cryogéniques au lieu de stockages pressurisés), est efficace pour réduire d'une part le danger de l'événement primaire, d'autre part la vulnérabilité des équipements à l'escalade ainsi que la gravité des scénarios secondaires possibles.

De même, la substitution de substances par d'autres ayant des propriétés moins dangereuses et la simplification des processus, bien qu'efficaces pour réduire les possibilités d'escalade, exigeraient des modifications pertinentes de la conception des

processus, qui ne sont guère applicables au stade de la définition de l'agencement pendant la conception de l'usine ou dans les usines existantes.

En effet, les actions identifiées par ces mots-clés requièrent, en général, d'importantes modifications du processus ou des changements dans la conception de l'usine, qui ne sont généralement pas abordables au stade de la définition de l'aménagement lors de la conception de l'usine ou dans les usines existantes. Ainsi, les actions liées à la modération, l'intensification, substitution et simplification sont généralement peu applicables à la prévention de l'escalade, et devraient être considérées dans d'autres étapes du développement du processus.

Enfin, la limitation des effets est parfois considérée comme un mot d'ordre "mineur", car elle accepte qu'un effet négatif se produise d'une manière ou d'une autre. Cependant, dans la perspective de l'escalade, ce mot-guide devrait garantir qu'aucun événement secondaire ne sera causé par des effets domino, poursuivant ainsi la prévention des accidents domino par une approche effectivement inhérente.

On peut conclure que l'application d'une approche de sécurité intrinsèque à la prévention des événements d'escalade conduira principalement à identifier les actions qui tombent sous le mot guide de **limitation des effets**, spécifiques à la prévention des dommages et de l'escalade.

Dans ce qui suit, nous allons étudier la possibilité d'éloigner la Park bouteilles pour qu'il n'y ait pas d'escalade.

IV.1.1 Calcul de la distance de sécurité

Dans la section (4.1.1.2), nous avons trouvé que le seuil d'effet domino est atteint à une distance de 40 (m) autour de la source d'explosion pour l'événement primaire d'où la nécessité d'éloigner la Park bouteille de la première cible qui est le réservoir LOX plus de 40 m.

La figure ci-dessous montre le nouvel emplacement du Park proposé ainsi que les contours de propagation des effets de surpression pour les trois seuils (0.3 bars, 0.2 bars ,0.14 bars)

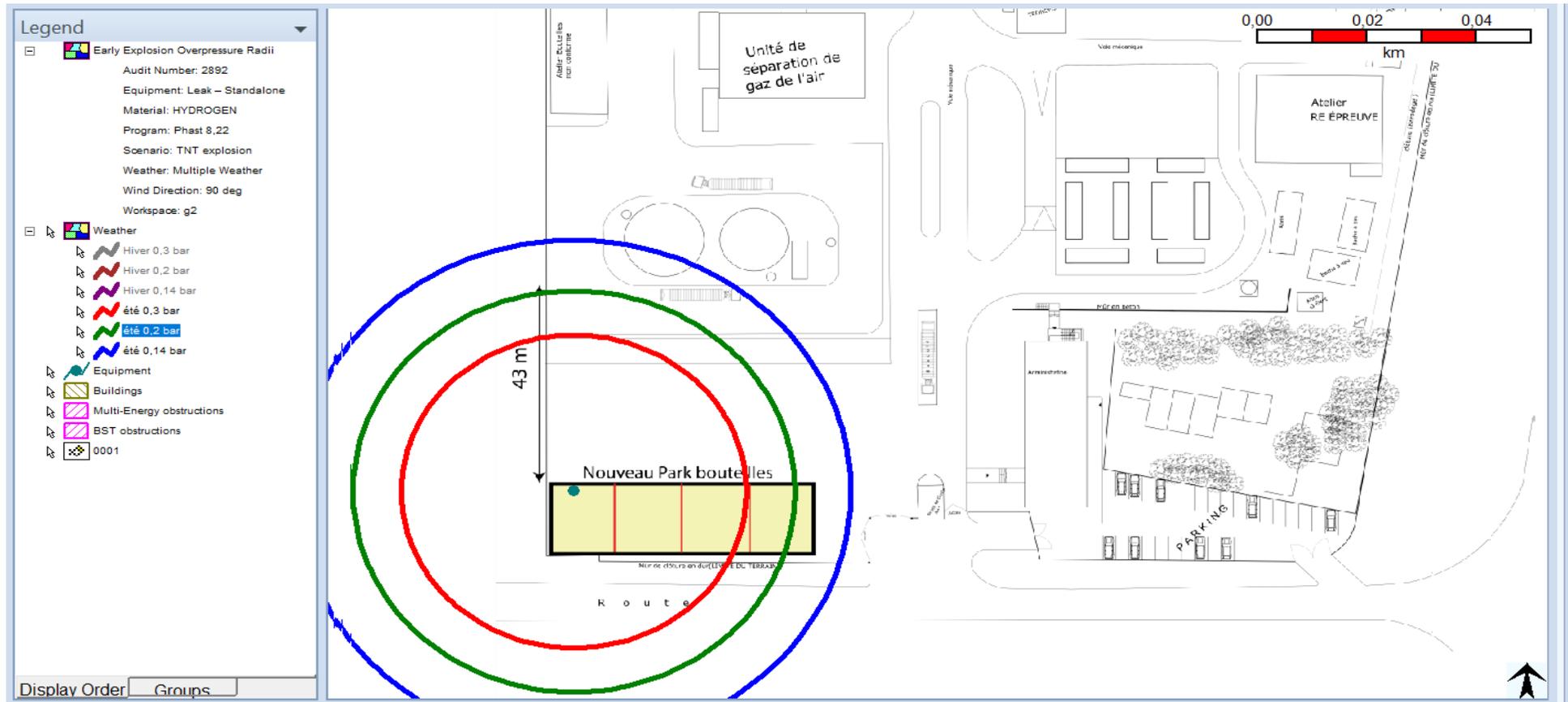


Figure IV- 1 : Propagation de l'effet de surpression de l'événement primaire dans le nouveau Park bouteilles

Nous remarquons que, Après le changement de l'emplacement du Park bouteilles, le seuil d'effets dominos (200mbar) n'atteint plus les réservoirs LOX et LIN mais ils sont affectés par l'onde de choc de (0,14 mbar) qui est selon le modèle de vulnérabilité utilisé dans notre étude (voir tableau III-25) capable de causer l'effondrement partiel des murs.

Pour cela, et afin de garantir qu'aucune onde de choc touchera les réservoirs LIN et LOX et de les protéger aussi par la projection des fragments, nous suggérons la mise en place d'un mur pare-souffle (*blast wall*).

IV.2 Étude technico-économique de la mise en place d'un mur pare-souffle

Un mur anti-souffle est une barrière qui protège les structures et les vies contre la pression des explosions, les débris et les incendies. Les murs anti-souffle empêchent les fragments et les pierres volantes de se déplacer à grande vitesse et réduisent la pression explosive maximale des ondes de choc qui peuvent avoir un impact sur les environs.

L'explosion du cadre bouteilles, l'événement secondaire comme déjà prédéfini auparavant, génère une surpression qui peut blesser des personnes et endommager tout objet sur son périmètre, notamment le stock d'oxygène liquide LOX qui est inclus dans la zone des effets dominos à 0.2 bar. À cet égard, la construction d'un mur préventif (*blast wall*) est indispensable pour limiter ces effets.

Le mur (en béton armé) va être construit selon des conditions spécifiques, tel que la hauteur et la résistance au choc qui assurent la protection du stock qui derrière.

Dans ce qui suit, Nous allons dimensionner et modéliser ce mur et savoir comment choisir les propriétés du mur (béton, ferraille) dont nous avons besoin pour répondre aux exigences.

IV.2.1 Dimensionnement du mur

Le choix des dimensions de ce mur s'est fait d'une manière objective, la hauteur de ce mur sera la même que le stock d'oxygène LOX (+3 mètres), en considérant que l'effet de suppression sera le même dans tous les points du mur, L'épaisseur de ce dernier se varie en fonction de la charge qui sera maximal en bas

À l'aide des deux logiciels, Autocad et robot, on a pu réaliser ces deux présentations du mur. Voir figures (IV-2) (IV-3)

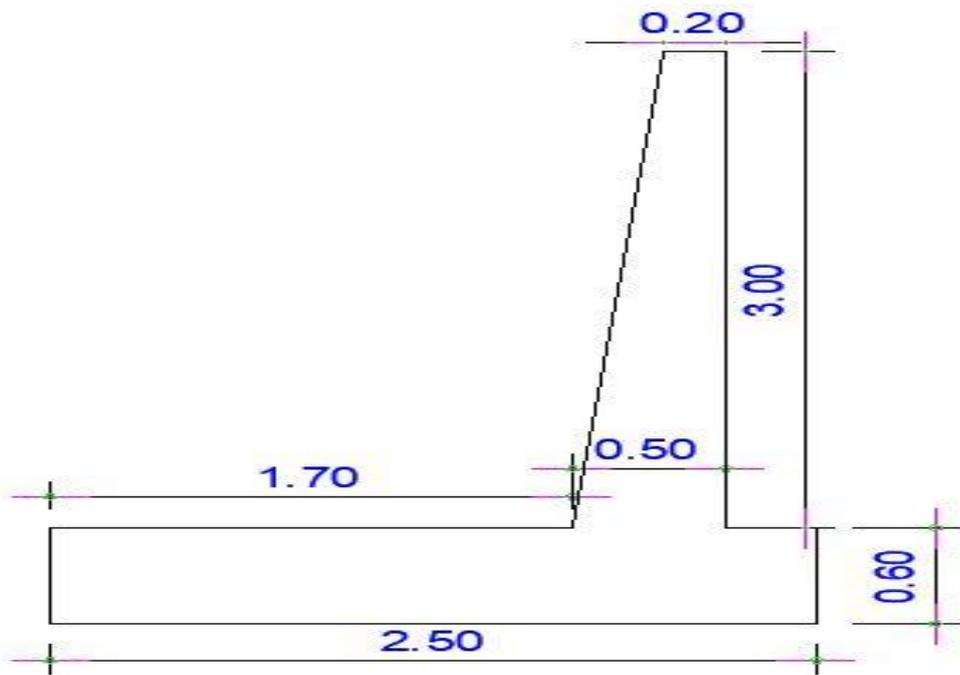


Figure IV- 2 : Dimensionnement du mur sur plan.

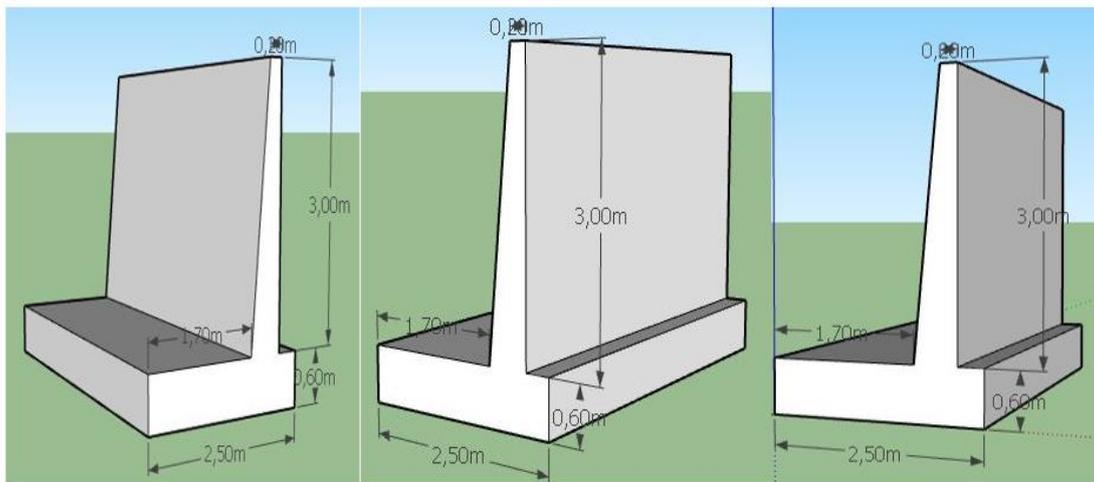


Figure IV- 3 : Présentation 3D du mur

IV.2.2 Modélisation du mur

Le seuil d'effet domino (200mbar) est la contrainte principale qu'il faut ce mur résister, en revanche, la résistance du mur se varie en fonction de leurs compositions qui sont le volume du béton et le nombre de barres de ferrailles. Pour cela, et à l'aide du logiciel Robot expert, on a pu ressorti l'effort maximal qui va nous donner après le nombre nécessaire des barres pour que le mur résiste cette charge de 200mbar.

L'onde de choc c'est une charge accidentelle comme le séisme, c'est un effort qui agit sur un corps quelconque, dans ce logiciel, on a ce qu'on appelle l'état limite des charges accidentelles (ELA = 20 kPa =200 mbar).

Après avoir ajouté les dimensions et la charge appliqué sur ce mur, on a pu obtenir la figure (IV-4) qui représente le diagramme du moment et les sollicitations sur les différents points du mur, à la fin nous avons obtenu une charge maximale de 91,42 (kN.m).

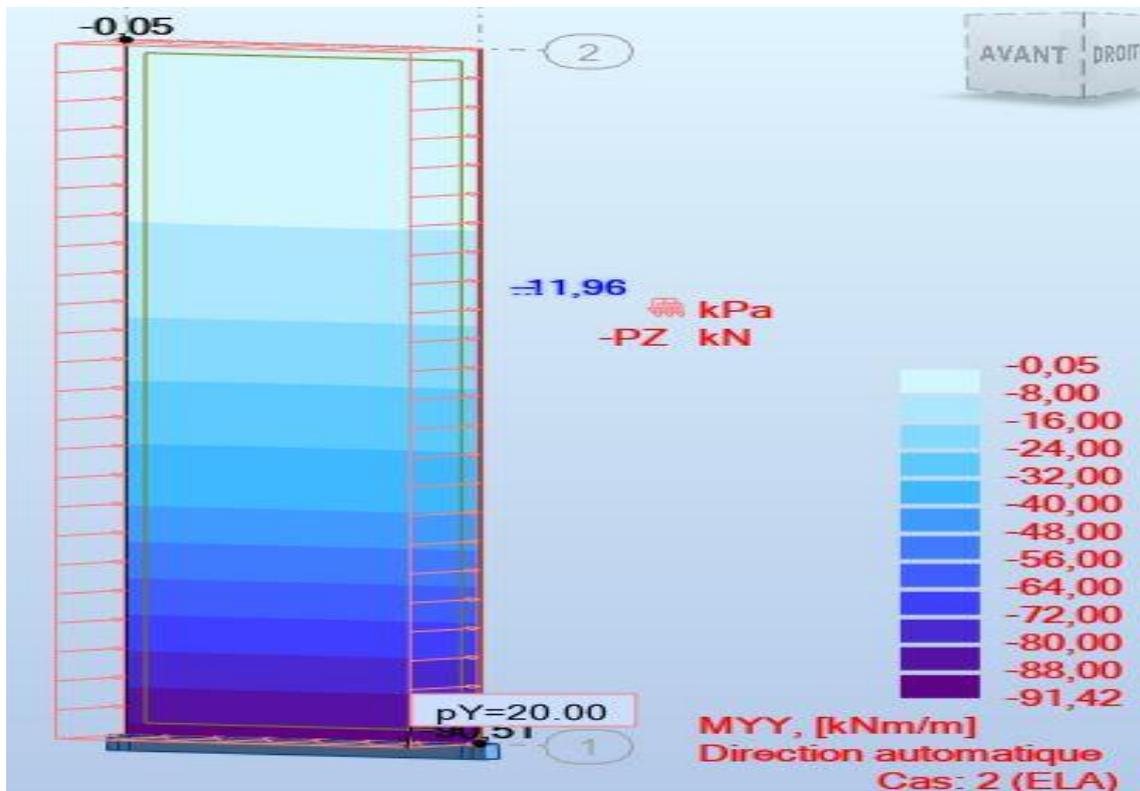


Figure IV- 4 : Cartographie des sollicitations sur mur.

IV.2.2.1 Calcul du ferrailage

Après avoir ressorti la valeur maximale des moments, on peut maintenant retirer le nombre de barres de ferraille nécessaire pour le ferrailage qu'il est de 6 barres de HA14 pour un mètre linéaire, la figure suivante démontre

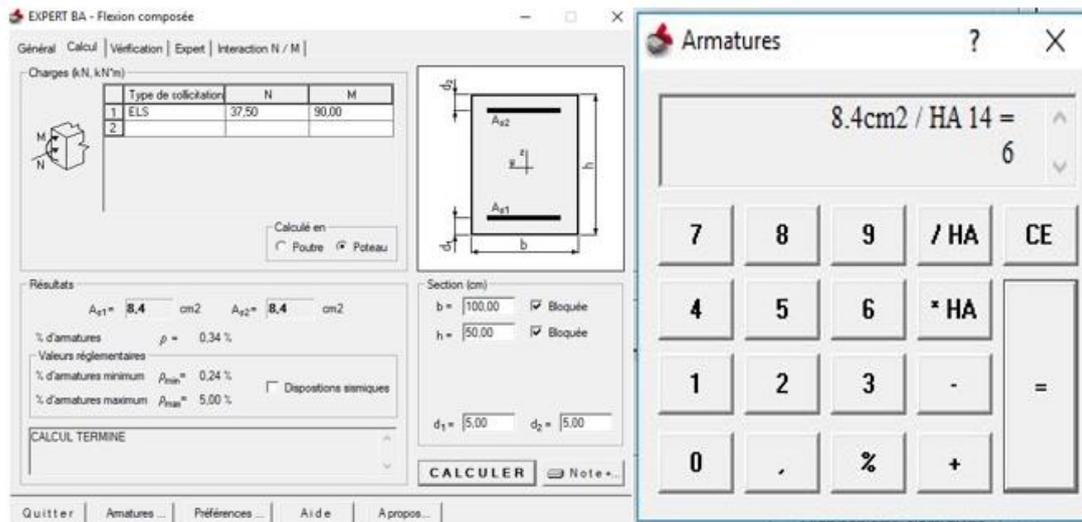


Figure IV- 5 : Nombre de barres de ferrailages par le logiciel Robot Experts

IV.2.2.2 Le choix des armatures

La figure suivante représente une coupe du chemin de ferrailage dont on a utilisé des armatures de HA12 chacune de 1 mètre et à l'aide d'une fonction de calcul sur Autocad on a obtenu les longueurs suivantes : 8,66 m de HA12 et 3,7 m de HA 14.

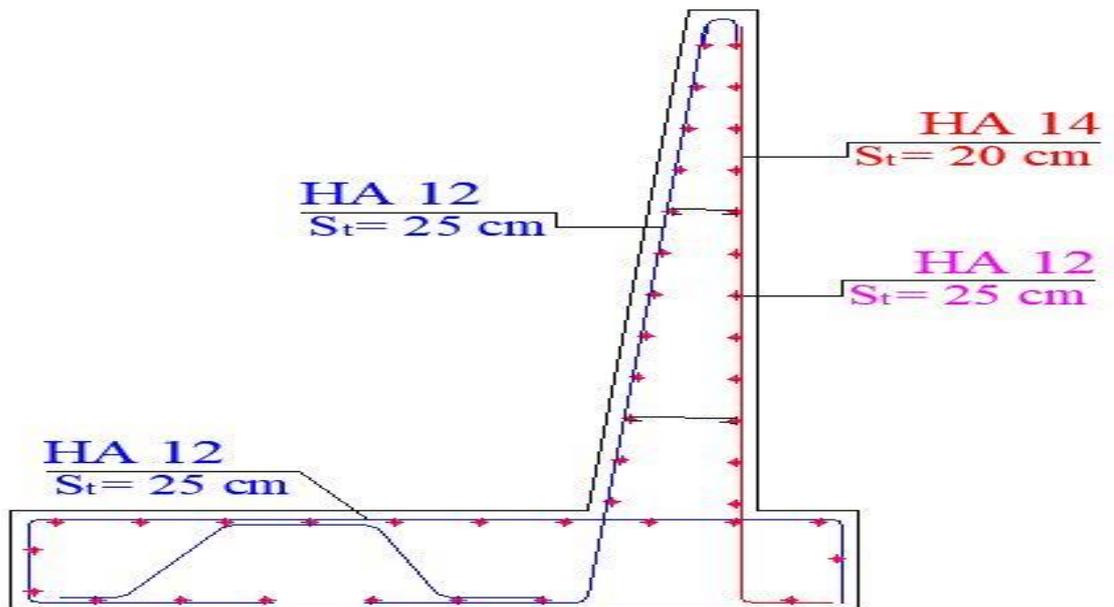


Figure IV- 6: Coupe Chemin de ferrailage.

Pour HA 12 : en bleu

$$44 \text{ armatures} + 8,66 \text{ m} \times 6 = 96 \text{ m ; HA 12}$$

Pour HA 14 : en rouge

$$3,7 \times 6 = 22,2 \text{ m ; HA14}$$

- Calcul du poids nécessaire pour un mètre linéaire :

Tableau IV - 1: poids correspond à chaque type de ferraille

Type	Diamètre (mm)	Poids au mètre linéaire (kg/m)
HA12	12	0,888
HA14	14	1,208

La quantité de ferraille nécessaire pour un mètre linéaire est de :

$$(96 \times 0,888) + (22,2 \times 1,208) = 112 \text{ kg} = 0.112 \text{ tonnes.}$$

- Calcul du béton

La quantité du béton nécessaire pour construire le mur est le volume du mur :

Pour 1 mètre linéaire :

- Trapézoïdale : $1 \times (0,2+0,5) \times 3 \div 2 = 1,05 \text{ m}^3$

- Rectangle : $1 \times 0,6 \times 2,5 = 1,5 \text{ m}^3$

Volume total pour 1 mètre linéaire : $1,5 + 1,05 = 2.55 \text{ m}^3$

IV.2.3 Estimation des coûts de construction

Pour le ferrailage : Ferrailage de l'armature (coupe, façonnage et assemblage des éléments) sur l'aire de ferrailage en chantier et pose en coffrage sur site

Tableau IV - 2 : coût de ferrailage

Quantité en (tonne)	Prix (da)
1	144 010,00
0.112	16 129,12

Pour le béton : Béton prêt à l'emploi, coulage avec des moyens manuels, pour la réalisation du mur.

Tableau IV - 3 : coût de béton

Quantité en (m ³)	Prix (da)
1	14.392,02
2.55	36 699,65

Enfin nous obtenons pour 1 mètre linéaire du mur une somme de 52 828,77DA.

Vu que la longueur du mur est de 56 m, donc le cout total de la construction sera de 2 958 411,12 DA.

IV.3 Impact financier de la séquence dominos

Dans cette section, nous allons estimer l'impact financier direct de la séquence domino la plus probable.

En termes d'installation :

Tableau IV - 4 : Coûts des dégâts

Type d'installation	Coûts des dégâts
Réservoir LOX vide	135.469.000 DA
Réservoir LIN vide	67.737.700 DA
Réservoir Argon vide	3.386.725 DA
Tour ASU	13.000.000 DA

En termes de produits :

La quantité stockée en moyenne au niveau des réservoirs est de :

Oxygène : 900000 litres.

Azote : 450000 litres.

Argon : 45000 litres.

Tableau IV - 5 : Coûts de perte de produits

Produit	Coûts
Oxygène	22.500.000 DA
Azote	7.500.000 DA
Argon	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

Tableau IV - 6 : Coûts d'arrêt de production

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

Nous remarquons que, le cout estimé de destruction des installations concernés est énorme et qui pourrait être bien élevé avec la perte causée par l'arrêt de production ainsi que son impact sur les parties intéressées tels que les hopitaux, les entreprises ...etc.

Pour cela deux propositions ont été posée, la première consiste à changer l'emplacement du Park bouteilles qui est une solution temporaire qui permet de minimiser les dégâts qui peuvent toucher les cibles, La deuxième consiste à mettre en place un mur séparant le Park bouteilles et les équipements cibles (Réservoirs de stockage), ce mur est

capable de protéger les réservoirs des ondes de choc qui peuvent être générées par l'explosion ainsi d'empêcher la projections de fragments vers les réservoirs LOX et LIN.

Enfin, voici quelques points à respecter :

- La personne manipulant les bouteilles de gaz doit avoir suivi une formation et porter des EPI adaptés (équipement de protection individuelle) : chaussures de sécurité et gants de protection.
- Il est recommandé de transporter les bouteilles d'acétylène en position verticale.
- Protéger les bouteilles de gaz d'éventuels rayons solaires dangereux.
- En intérieur : les deux types de bouteilles doivent être séparées de 6 mètres de distance minimum ou par un mur de minimum 1,50 mètre de haut.
- Une bouteille d'oxygène et une bouteille de gaz ne doivent pas être rangées au même endroit.

Conclusion générale

Le travail présenté a porté sur l'étude d'effets dominos et l'évaluation de son potentiel destructif au niveau de LGA site réghaia. Pour ce faire, une approche, basée sur la méthode ARAMIS, la modélisation et la simulation a été développée.

La première partie du travail était consacrée à la construction d'une base de connaissance sur les méthodes d'étude d'effets dominos existantes dans la littérature scientifique, afin de connaître leurs limites et savoir par la suite choisir la méthode la plus complète qui réponde à notre besoin. Après cela, le choix est tombé sur la méthode ARAMIS vu qu'elle regroupe les forces de deux approches les plus utilisées dans l'analyse des risques : l'approche probabiliste et l'approche déterministe. Mais, parmi ses limites c'est qu'elle ne prend pas en considération l'aspect d'effets dominos du coup nous avons intégré une approche d'étude d'effets dominos basée sur le modèle QRA. En fait, la méthode proposée est conçue de façon à ce qu'elle puisse être utilisée sans qu'il soit nécessaire de s'appuyer sur les résultats des études de dangers. Cependant, si ces résultats sont disponibles, certaines étapes de la méthode peuvent être atténuées.

Une fois la méthode posée, nous avons entamé son application. Nous avons déterminé la zone d'étude en utilisant la méthode APR afin d'optimiser le temps par la détermination des zones critiques de l'installation, dans un 2ème temps, nous avons identifié et évalué l'ensemble des scénarios d'accidents par une approche noeud papillons en prenant en considération les barrières de sécurité existantes ainsi que l'influence du système de management et de la culture de sécurité sur ces derniers.

Le modèle d'évaluation de la gestion de sécurité d'ARAMIS nous a permis de calculer le niveau de confiance opérationnelle de l'ensemble des barrières de sécurité, et ceci par un audit des processus managériaux ou nous avons élaboré une check-list contenant sept processus à auditer, les résultats ont démontré que l'entreprise LGA a une bonne maîtrise de ces derniers, ensuite un questionnaire sur la culture de sécurité a été réalisé et distribué aux personnels concernés ou nous avons déterminé qu'il ya un manque de confiance entre la haute direction et les employés ce qui a affecté le niveau de confiance de 63 % des barrières de sécurité, d'autre part, les employés ont besoin de la motivation et l'encouragement sur les bonnes habitudes de sécurité.

A l'issue de cette étape nous avons obtenu 4 événements potentiellement primaires susceptibles de donner lieu à des accidents à effets dominos, et qui sont :

- VCE au niveau du park bouteilles (Hydrogène).
- Feu de jet au niveau du Park bouteilles (Hydrogène).
- VCE au niveau du Park bouteilles (Acétylène).
- Feu de jet au niveau du Park bouteilles (Acétylène).

Ensuite, le logiciel PHAST nous a permis de simuler les effets des phénomènes liés à chaque évènement primaire, à savoir, VCE et jet fire. Il nous a permis de connaître

les caractéristiques des PhD et d'observer la variation de ses effets par rapport à des distances bien déterminées et à des seuils prédéfinis. Ainsi, cela nous a permis de connaître la chaîne d'événements qu'ils engendrent et de réaliser les réseaux bayésiens par le logiciel AGENARISK.

Des calculs sur les probabilités d'occurrences des événements dominos ont été faits en utilisant l'approche Probit. Qui ont conduit à la détermination de la séquence domino la plus probable et de calculer l'indice de risque individuel afin de délimiter les zones où toute personne présente est touchée par l'effet de l'explosion. Ces données permettent ainsi une évaluation très concrète du risque.

Les résultats de l'étude d'effets dominos ont démontré la possibilité de survenance de ces deux événements primaires :

- VCE au niveau du park bouteilles (Hydrogène).
- VCE au niveau du Park bouteilles (Acétylène).

Ces résultats sont obtenus grâce à l'approche d'amélioration proposée, qui a permis de déterminer que les scénarios de référence SC6 et SC10 ont capable de déclencher des accidents majeurs au niveau d'autres équipements par effets thermiques ou de surpression, la détermination de ces accidents déclanchés par SC6 et SC10 n'aurait pas pu être réalisée si on avait appliqué la méthode ARAMIS tel qu'elle est.

Enfin, nous avons proposé la mise en place d'un mur à paroi de souffle séparant l'atelier de stockage de bouteilles de la première cible (Réservoirs de stockage), le cout de sa mise en place a été estimé à 2.958.411 DA, c'est une solution économique en la comparant avec la perte totale de l'entreprise suite à la séquence domino estimé à 361.961.425 DA.

Bibliographie

- [1] F. Kadri *et al.*, “Analyse d ’ Effet Domino : Méthodes et Outils To cite this version : HAL Id : hal-01015142 Analyse d ’ Effet Domino : Méthodes et Outils,” pp. 1–15, 2014.
- [2] F. Clini, R. M. Darbra, and J. Casal, “Historical analysis of accidents involving domino effect,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 19, pp. 335–340, 2010, doi: 10.3303/CET1019055.
- [3] “Documents interne linde.” .
- [4] “Journal officiel,” p. 2012, 2012.
- [5] ARIA, “La référence du retour d’expérience sur accidents technologiques,” 2005. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>.
- [6] ARIA N° 23132, “Explosion dans une unité de distillation d’air.” <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/23132/>.
- [7] J. Casal and R. M. Darbra, *Domino Effects in the Process Industries: Modelling, Prevention and Managing*. 2013.
- [8] F. I. Khan and S. A. Abbasi, “Models for domino effect analysis in chemical process industries,” *Process Saf. Prog.*, vol. 17, no. 2, pp. 107–123, 1998, doi: 10.1002/prs.680170207.
- [9] V. T. B.DEBRAY, S.CHAUMETTE, S.DESCOURIERE, *Méthodes d’analyse des risques générés par une installation industrielle*. 2005.
- [10] E. T. D. E. D. Anger, S. U. R. L. Environnement, D. E. L. U. G. Az, and I. N. D. E. R. Eghaïa, “ETUDE DE DANGER LGA unité REGHAIA,” 2006.
- [11] V. D. E. DIANOUS, A. VALLEE, F. PRATS, N. RODRIGUES, and D. HOURTOLOU, “ARAMIS: Développement d’une méthode intégrée d’analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs,” *Ineris.Fr*, p. 106, 2004, [Online]. Available: http://www.ineris.fr/centredoc/Rapport_BCRD_2004_ARAMIS_public.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/A5287F4A-F9AE-4EE4-A997-C81519827974.
- [12] N. Alileche, “Etude des effets dominos sur une zone industrielle Nassim Alileche To cite this version : HAL Id : tel-02614383,” 2020.
- [13] OREDA, “Offshore Reliability Data Handbook,” *OREDA, Norway*. 2002, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Offshore+Reliability+Data+Handbook#0>.
- [14] M. S. Mannan, “Lees’ Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control: Third Edition,” *Lees’ Loss Prev. Process Ind. Hazard Identification, Assess. Control Third Ed.*, vol. 9780750675, pp. 1–3567, 2004, doi: 10.1016/B978-0-7506-7555-0.X5081-6.

- [15] F. G. ANDREW HALE, “The ARAMIS Audit Manual,” *Annex A*, pp. 1–101.
- [16] E. For, I. N. The, and C. Of, “ARAMIS_FINAL_USER_GUIDE,” no. December, 2004.
- [17] “DRA 71 de l’ineris,” 2015.
- [18] L. Declerck, “Quantitative risk assessment,” *Top. Model. Clust. Data*, pp. 157–172, 2002, doi: 10.26634/jfet.6.1.1292.
- [19] V. D. Version, H. R. Bevi, and P. Health, “Reference Manual Bevi Risk Assessments Introduction,” p. 198, 2009.
- [20] MINISTÈRE DE L’ÉCOLOGIE, “Guide Technique Relatif Aux Valeurs De Reference De Seuils D’Effets Des Phenomenes Accidentels Des Installations Classees,” pp. 1–29, 2004.
- [21] “Reghaïa, Climate and Average Weather Year Round in.” <https://fr.weatherspark.com/y/48905/Météo-habituelle-à-Reghaïa>.
- [22] X. Kong, C. Yang, L. Zhang, and G. Tao, “Analysis of ‘7.23’ hydrogen cylinder explosion accidents of three quartz products companys,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 680, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/680/1/012118.
- [23] N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte, and V. Cozzani, “Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks,” *Risk Anal.*, vol. 33, no. 2, pp. 292–306, 2013, doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x.

Annexe **A**
Tableaux APR

I- Atelier production et conditionnement des gaz de l'air (ASU)								
N°	Équipements	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	P	G	NCR
1	Réservoir de stockage d'oxygène liquide (LOX) D7110	-Perte de confinement – fuite -	-Défaillance matérielle (organe de commande) -Corrosion réservoir -Choc mécanique -Défaillances d'un accessoire (vannes, indicateur de pression ...)	-Dispersion de produit comburant. -Incendie en présence d'un combustible	-Indicateur de pression -Réseau anti-incendie -Délimitation de la zone de stockage -Disque de rupture -Régulateur de pression en amont 'S31' >4bar -Contrôle quotidien de la pression et des fuites	2	3	1
		-Perte de confinement – Rupture -	-Effet domino (effet thermique)	-Phénomène BLEVE	-Vanne de mise à l'air 'W41' -Indicateur de niveau du liquide -soupape de sécurité (5bar)	2	5	3
2	Colonne de pression T3211	-Perte de fonctionnement du groupe de froid	-Manque de fréon -Détendeur HS -Présence incondensable dans le circuit frigo	-Explosion dans la colonne	-Maintenance préventive -Indicateur de pression.	1	4	1
3	Compresseur d'air C1161	Perte de confinement sur compresseur	-Surpression -Défaillance mécanique	-Endommagement du compresseur -Projections	-Maintenance préventive -Débitmètre -Thermostat air/huile compresseur	1	3	1
4	La ligne reliant le réservoir LOX à la rampe de remplissage	Perte de confinement lors du remplissage	-Surpression -Défaillance des accessoires (vannes, soupapes...)	-Dispersion de produit comburant.	- Deux soupapes de sécurité -Régulation automatique de la pression -Détendeur de pression	2	3	1
5	Bouteilles GOX (oxygène gazeux)	Perte de confinement d'une bouteille	-Plus de pression dans la bouteille (Défaillance du système d'arrêt automatique de la pompe) -Défaillance robinet/flexible	-Éclatement de la bouteille -Dispersion du produit comburant	-Instruction opérationnelle. -Courbe de remplissage P/T°	2	4	2
6	Camion-citerne	Fuite du flexible de chargement	-Démarrage du camion lors de l'opération de dépotage	-Dispersion de produit comburant.	-Calles de blocage des roues -Balisage de la zone de dépotage -Affichage des consignes de sécurité	3	3	2
7	Rampe de remplissage	Fuite au niveau de la rampe	-Défaillance flexible. -augmentation excessive de la pression	-Dispersion de produit comburant.	-Indicateur de pression digital sur les rampes -Régulation automatique de la pression	2	3	1

Atelier de conditionnement de protoxyde d'azote (GNO ₂)								
N°	Produit/ équipement	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	P	G	NCR
1	Bouteilles GNO ₂	Perte de confinement d'une bouteille	-Défaillance flexible. -Défaillance au niveau de la rampe. -Défaillance soupape de la pompe.	-Relâchement du flexible -Éclatement de la bouteille -Blessure opérateur -Perte du produit	-Procédure de tri des bouteilles à remplir (vérification des robinets notamment) -Détecteur : alarme sonore et visuelle -Flexibles changés tous les 5 ans	3	3	2
2	Rampe de remplissage	Fuite au niveau de la rampe	-Erreur opératoire. -Défaillance flexible/robinet.	-Effets neurologique -Asphyxie -Perte de conscience -Effet de serre	-Ventilation naturelle -Analyseur de concentration portatif 'G200' avec seuil d'alarme '100ppm N2O' -Contrôle quotidien des fuites	2	3	1
3	Réservoir GNO ₂	Perte de confinement du réservoir	Surpression (Groupe de froid défaillant, Sur-remplissage du réservoir, Soupapes de sécurité défaillantes, Défaillance de disque de rupture)	-Éclatement de réservoir	-Deux soupapes de sécurité (24,5 bars) -Vannes manuelles de mise à l'air (dépressurisation) -Alarme lumineuse haute pression (22 bars) -Indicateur de pression. -Groupe de froid	2	3	1
			Perte de pression (-Défaillance vannes, Soupape de sécurité restée ouverte)	-Détérioration du réservoir	-Indicateur de pression. -Alarme basse pression -Contrôle quotidien de la pression et des fuites. -Indicateur du niveau du liquide	2	3	1

Atelier conditionnement d'oxyde d'éthylène (ETO)								
N°	Produit/équipement	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	P	G	NCR
1	Bouteilles ETO	Perte de confinement lors du remplissage	-Défaut de la pompe (mauvaise réponse) -Défaillance du robinet. -Défaillance d'un flexible de remplissage.	-Déversement d'oxyde d'éthylène. -Formation d'une atmosphère explosive (zone ATEX) -Fatalité.	-Procédure de tri des bouteilles à remplir (vérification des robinets notamment). -Détecteur : alarme sonore et visuelle. -Flexibles changés tous les 3 ans.	3	4	3
2	Panel de remplissage	Fuite	-Défaillance du flexible ou du robinet de la bouteille.	-Augmentation de la concentration d'oxyde d'éthylène dans l'atelier. -Formation d'une ATEX. -Lésions sur la peau/yeux.	-Alarme sonore. -Arrêt d'urgence. -EPI. -Vérification des flexibles.	2	4	2
3	Laveur (scrabber)	Perte de confinement du laveur	-Défaillance vannes -Erreur humaine	-Surchauffe et débordement du laveur	-Arrêt d'urgence. -Indicateur de niveau avec alarme sonore/lumineuse.	2	2	1
4	Fut ETO	Perte de confinement du fut	-Surpression du fut	-Explosion -Fatalité	-indicateur de pression. -Réseau anti incendie. -Fut à l'intérieur du local.	3	4	3

Park de stockage de bouteilles								
N°	Produit ou équipement	Évènements redoutés	Causes	Conséquences	Sécurités existantes	P	G	NCR
1	Cadres de bouteilles Hydrogène	Fuite d'hydrogène	-Agression externe -Erreur opératoire -Défaillance d'un robinet	-Dispersion atmosphérique d'hydrogène -VCE -Feu de jet -Effets dominos : perte de confinement d'autres bouteilles par suppression	- Vérification périodique des accessoires -Remplacement systématique des robinets des bouteilles lors de leur ré épreuve -Instruction opérationnelle -Protection des bouteilles par les structures en acier des paniers ou des cadres	2	5	3
2	Cadres de bouteilles Oxygène	Fuite d'oxygène		-Dispersion du produit comburant		3	3	2
3	Cadres de bouteilles Protoxyde d'azote	Fuite de Protoxyde d'azote		-Dispersion du produit comburant		3	4	3
4	Cadres de bouteilles Acétylène	Fuite d'acétylène		-Dispersion atmosphérique d'acétylène. -VCE -feu de jet -Effets dominos : perte de confinement d'autres bouteilles par suppression		2	5	3

Annexe B

Typologie des substances dangereuses

Catégorie	Phrases de risques	
Très toxiques	R26 R100(3)	Très toxique par inhalation Émet des vapeurs très toxiques en cas de feu
Toxique	R23 R101(3)	Toxique par inhalation Émet des vapeurs toxiques en cas de feu
Oxydant	R7 R8 R9	Peut provoquer un incendie (peroxyde organique) Favorise l'inflammation des matières combustibles Peut exploser en mélange avec des matières combustibles
Explosif	R1 R2 R3 R4 R5 R6 R16 R19 R44 R102(3)	Explosif à l'état sec Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition Forme des composés métalliques très sensibles. Danger d'explosion sous l'action de la chaleur. Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air. Peut exploser en mélange avec des substances comburantes. Peut former des peroxydes explosifs. Risque d'explosion si chauffé en ambiance combinée. Substance pyrotechnique
Inflammable	R10 R18	Inflammable Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur / air inflammable / explosif.
Très inflammable	R10 R11 R17 R30	Inflammable (dans des conditions particulières de pression et température) (1) Facilement inflammable Spontanément inflammable à l'air Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
Extrêmement inflammable	R10 R11 R12	Inflammable (T > Té _b) Facilement inflammable (T > Té _b) Extrêmement inflammable
Réagit violemment avec l'eau	R14 R15 R29 R14/15 R15/29	Réagit violemment au contact de l'eau Au contact de l'eau dégage des gaz extrêmement inflammables Au contact de l'eau dégage des gaz extrêmement inflammables. Réagit violemment avec l'eau, dégagent des gaz extrêmement inflammables Au contact de l'eau dégage des gaz toxiques, extrêmement inflammables
Réagit violemment avec d'autres substances	R103(3) R104(3) R105(3) R106(3)	Au contact d'autres substances, dégage des gaz toxiques Au contact d'autres substances, dégage des gaz très toxiques Au contact d'autres substances, dégage des gaz inflammables Au contact d'autres substances, peut exploser
Dangereux pour l'environnement (environnement aquatique)	R50 R51	Très toxique pour les organismes aquatiques : (96h CL ₅₀ (poisson) ≤ 1 mg/l ou 48h CE ₅₀ (daphné) ≤ 1 mg/l ou 72 h CL ₅₀ (algue) ≤ 1 mg/l) Toxique pour les organismes aquatiques 96h CL ₅₀ (poisson):

		$1 \text{ mg/l} < \text{CL50} \leq 10 \text{ mg/l}$ ou 48h CE50 (daphné): $1 \text{ mg/l} < \text{CE50} \leq 10 \text{ mg/l}$ ou 72 h CL50 (algues): $1 \text{ mg/l} < \text{CI50} \leq 10 \text{ mg/l}$.
Dangereux pour l'environnement (non aquatique)	R54 R55 R56 R57 R59	Toxique pour la flore. Toxique pour la faune. Toxique pour les organismes du sol. Toxique pour les abeilles. Dangereux pour la couche d'ozone.

Annexe C

Nœuds papillon

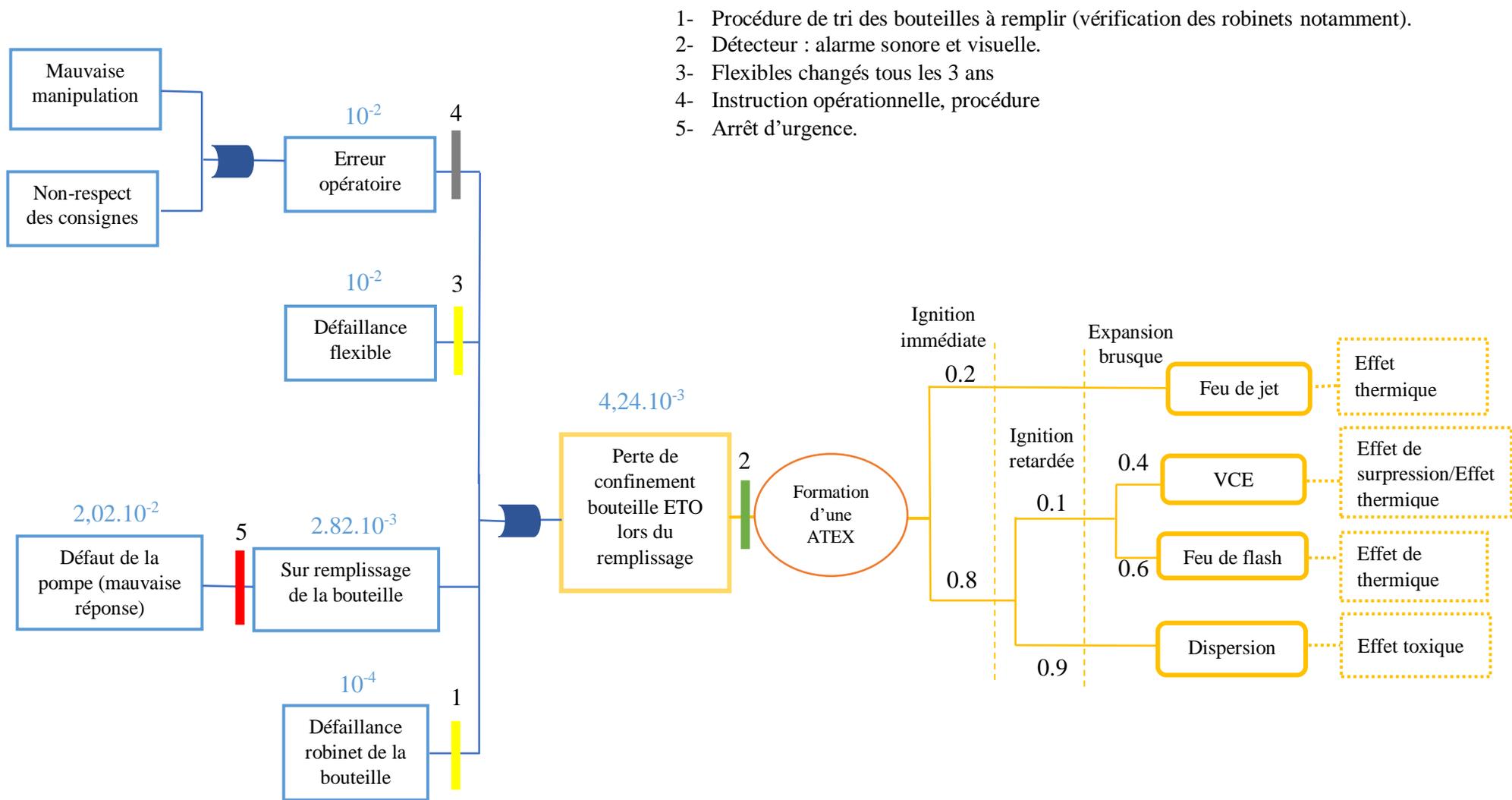


Figure C- 1: Nœud papillon LOC bouteille ETO lors du remplissage

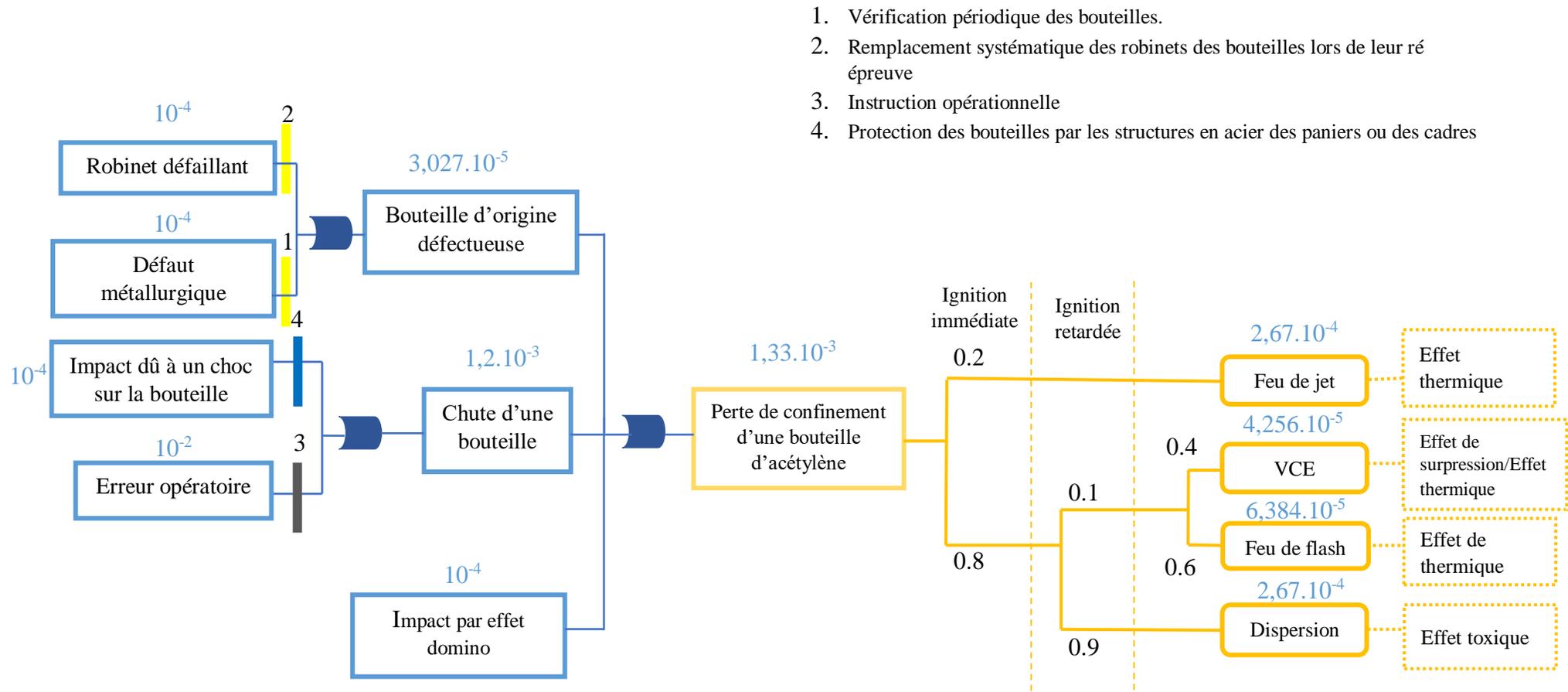


Figure C- 2 : Nœud papillon LOC bouteille C₂H₂

1. Vérification périodique des bouteilles.
2. Remplacement systématique des robinets des bouteilles lors de leur ré-épreuve
3. Instruction opérationnelle
4. Protection des bouteilles par les structures en acier des paniers ou des cadres

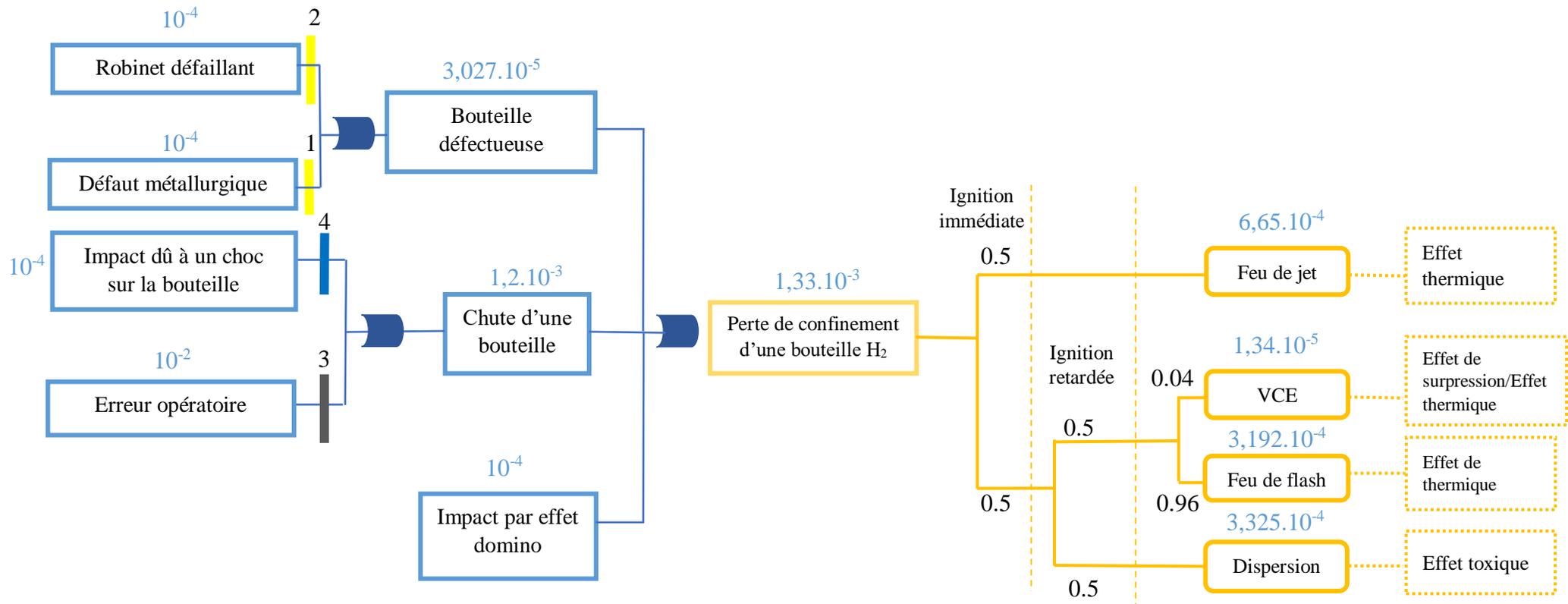


Figure C- 3 : Nœud papillon LOC bouteille H₂

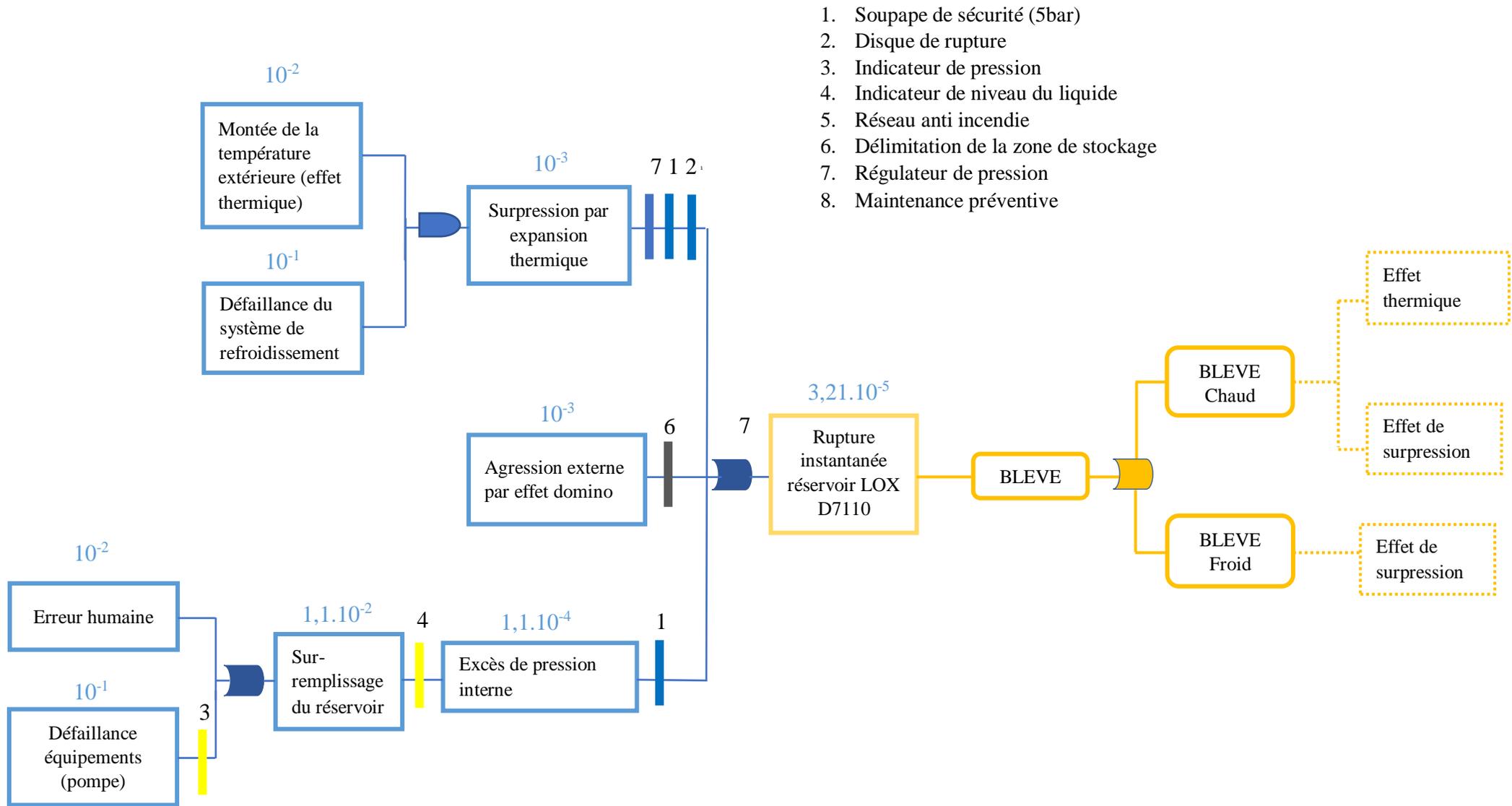


Figure C- 4 : Nœud papillon Rupture réservoir LOX D7110

1. Système de refroidissement
2. Arrêt d'urgence
3. Indicateur de pression
4. Alarme sonore/visuelle
5. Extracteurs
6. Inspection visuelle

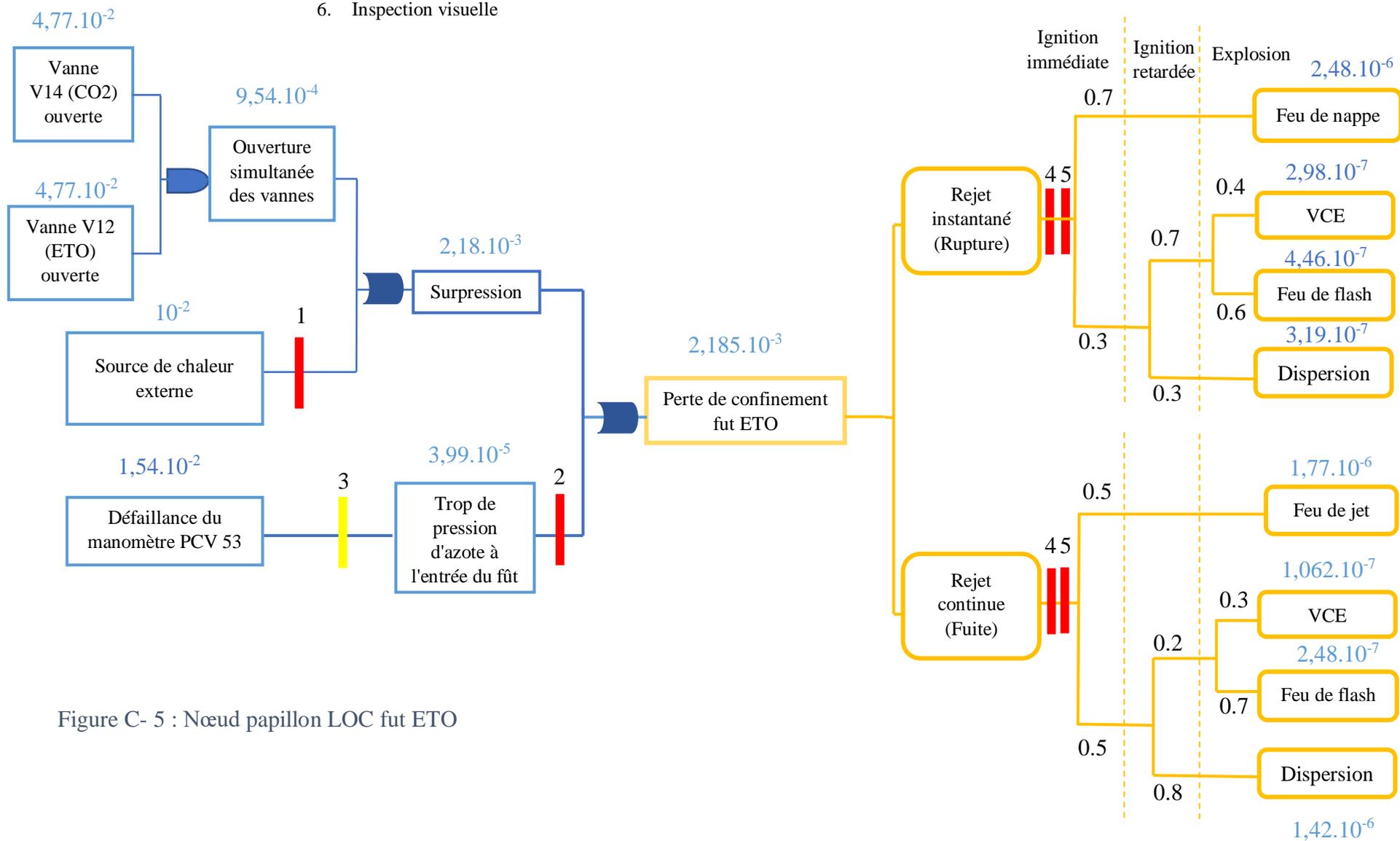


Figure C- 5 : Nœud papillon LOC fût ETO

Annexe D

Questionnaire sur la culture sécurité

Toutes les réponses seront traités dans un strict anonymat et seuls les résultats au niveau du groupe seront présentés et mis à la disposition de l'entreprise. Par conséquent, aucune information sur les réponses individuelles ne sera transmise sous quelque forme que ce soit.

Section 1 : Déclaration d'accidents

ID qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
		1	2	3	4	5
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord					
01.1	Je suis personnellement disposé à signaler tout incident de blessure mineure.					
01.2	Je suis personnellement disposé à signaler tout accident de travail.					
01.3	Je suis personnellement disposé à signaler tout incident dangereux.					
01.4	Je suis personnellement disposé à signaler tout environnement / équipement accident.					
01.5	Tout accident porté à la connaissance de nos dirigeants est examiné avec les employés.					
01.6	Je n'ai pas été témoin d'améliorations apportées en raison du signalement des incidents et des accidents.					
01.7	Nos dirigeants ont clairement indiqué que les rapports sont nécessaires pour les leçons que l'on peut tirer des accidents et des incidents.					

Section 2 : Si et quand des incidents et des accidents (de tous types) ne sont pas signalés, c'est parce que ...

	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
		1	2	3	4	5
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord					
02.1	Les rapports prennent trop de temps.					
02.2	Les gens ne veulent pas interrompre le flux de travail lorsqu'ils sont occupés.					
02.3	La paresse - les gens ne veulent tout simplement pas se déranger.					
02.4	La fierté - les gens ne veulent pas que leurs collègues sachent qu'ils ont été impliqués dans un accident					
02.5	La peur des conséquences					
02.6	Les formulaires de rapport ne sont pas facilement disponibles					

Section 3 : Consignes et attitudes de sécurité

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
		1	2	3	4	5
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord					
03.1	J'ai reçu des instructions et des informations sur la façon de travailler en toute sécurité sur mon lieu de travail actuel					
03.2	Les consignes de sécurité données aux apprentis sont particulièrement complètes et détaillées					
03.3	Les instructions de sécurité données aux nouveaux membres du personnel sont particulièrement complètes et détaillées					
03.4	Chaque employé est activement encouragé à participer à des cours de sécurité					
03.5	Je reçois des informations sur les décisions et les points discutés lors de chaque réunion de sécurité					
03.6	Il m'arrive parfois de contourner les consignes de sécurité pour que le travail soit fait de manière plus facile et plus fluide.					
03.7	Il est nécessaire d'enfreindre les consignes de sécurité afin d'effectuer le travail.					
03.8	Il m'arrive de violer les consignes de sécurité parce que je sens que mes collègues font pression sur moi pour que je le fasse					
03.9	Il m'arrive de violer les consignes de sécurité lorsque je pense que cela n'a aucun impact sur les risques réels					
03.10	Les consignes de sécurité sont parfois difficiles à comprendre					
03.11	L'accent est trop mis sur le risque et la sécurité dans cette usine.					

Section 4 : Priorité à la sécurité au travail

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord	1	2	3	4	5
04.1	J'utilise toujours des protections individuelles (casque, gants, etc.) lorsque cela est obligatoire					
04.2	J'essaie toujours de suivre les instructions de sécurité					
04.3	Je choisirai toujours - même dans des situations de forte pression - de travailler en toute sécurité plutôt que rapidement, chaque fois qu'un choix doit être fait.					
04.4	Mon supérieur immédiat s'énerve contre tout employé qui enfreint les consignes de sécurité, même pour des infractions mineures.					
04.5	Si un employé a enfreint les consignes de sécurité, il sera surveillé plus attentivement par la suite					
04.6	Lorsque nous travaillons sous pression, mon supérieur immédiat préfère que nous travaillions plus vite que de respecter les consignes de sécurité					
04.7	Tant que le travail est fait, la direction de notre usine ne se soucie pas de la manière dont il est fait.					

Section 5 : Selon vous, qui devrait assumer la responsabilité de la sécurité ?

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord	1	2	3	4	5
05.1	Les dirigeants de cette usine.					
05.2	Le responsable de l'atelier.					
05.3	L'ingénieur/superviseur HSE.					
05.4	Le chef d'équipe.					
05.5	Le groupe de travail / l'équipe elle-même.					
05.6	Moi-même.					

Section 6 : Participation des employés aux décisions concernant la sécurité

Id Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord	1	2	3	4	5
06.1	Je participe aux décisions concernant la sécurité qui ont une incidence directe sur mon travail.					
06.2	Mes conseils sur les questions de sécurité ne seront pas entendus					
06.3	Mon supérieur immédiat examinera toujours sérieusement les suggestions en matière de sécurité faites par tout employé.					
06.4	Notre groupe de sécurité réagit rapidement lorsque son attention est attirée sur un problème de sécurité.					
06.5	Les employés de ce lieu de travail s'intéressent vraiment aux questions de sécurité.					
06.6	J'ai le sentiment d'être suffisamment impliqué dans les décisions concernant la sécurité.					

Section 7 : Engagement de la direction et des responsables en matière de sécurité

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord	1	2	3	4	5
07.1	La direction de nos usines privilégie la productivité à la sécurité					

07.2	La direction de notre usine réagit résolument lorsque des problèmes de sécurité se présentent.					
07.3	Dans cette usine, la sécurité est prise au sérieux et pas seulement pour les apparences.					
07.4	Mon supérieur hiérarchique interviendra immédiatement s'il constate que les consignes de sécurité sont violées					
07.5	De temps en temps, mon supérieur immédiat vérifie si nous faisons effectivement le travail selon les consignes de sécurité					
07.6	Tant qu'aucun accident n'est survenu, mon supérieur immédiat ne se préoccupe pas vraiment de la façon dont le travail est effectué.					

Section 8 : Confiance et équité

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. Pas du tout d'accord -2. Pas d'accord -3. Neutre -4. D'accord -5. Tout à fait d'accord	1	2	3	4	5
08.1	La direction de notre usine a une grande confiance dans ses employés.					
08.2	J'ai une grande confiance dans la direction de notre usine.					
08.3	Mon supérieur immédiat a une grande confiance dans ses employés					
08.4	J'ai une grande confiance dans mon chef de service					
08.5	Sur mon lieu de travail, nous sommes traités équitablement en cas d'accident.					
08.6	Les collègues qui créent des situations dangereuses par d'imprudences seront tenus pour responsables					
08.7	Lors d'une enquête sur un accident, l'accent est mis uniquement sur le personnel directement impliqué					
08.8	L'entreprise accueille favorablement les critiques constructives					

Section 9 : Travail et relations sociales

ID Qst	Veillez indiquer pour chaque affirmation votre niveau d'accord ou de désaccord (un X par ligne)					
	1. à un très faible degré -2. A un faible degré -3. A un certain degré -4. À un haut degré -5. À un très haut degré	1	2	3	4	5
09.1	Avez-vous une grande influence sur les décisions concernant votre travail quotidien ?					
09.2	Avez-vous une influence sur les personnes avec lesquelles vous travaillez ?					
09.3	Vous considérez-vous comme motivé et impliqué dans votre travail ?					
09.4	Sur votre lieu de travail, êtes-vous informé des décisions importantes, des changements et des plans futurs bien à l'avance ?					
09.5	Recevez-vous toutes les informations dont vous avez besoin pour faire un bon travail ?					
09.6	Envisageriez-vous de rester sur votre lieu de travail actuel pour le reste de votre vie professionnelle ?					
09.7	Vous aimez parler de votre lieu de travail à d'autres personnes ?					
09.8	Avez-vous l'impression que les problèmes de votre lieu de travail sont vos problèmes également ?					
09.9	Pensez-vous que votre lieu de travail est important pour vous personnellement ?					

Section 10 : Vos suggestions personnelles

Que peut faire l'entreprise pour améliorer la sécurité ?

--

Annexe **E**

Check-list d'audit des processus managériaux

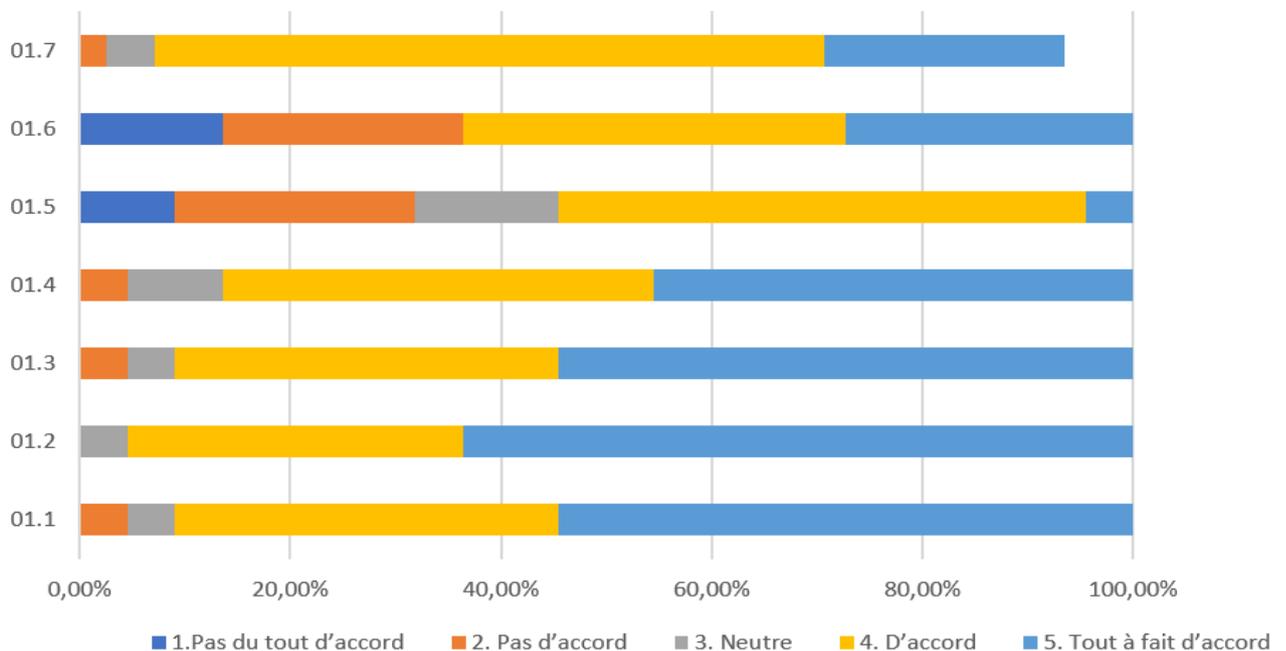
Check List					
Date : 04/07/2021					
Auditeurs : MAHGOUN Aymen Rafik/ATTIA Djaber.					
Audité : Farid KHELLAF (Responsable SHEQ site de Réghaia) / KACI Hacene (Animateur HSE du site Règhaia) / AIFI Naoufel (Responsable ressources humaines)					
Type D'audit : Audit des processus managériaux.					
Processus 1 : Disponibilité du personnel	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Le besoin en main-d'œuvre est évalué.	×	×	×		5
Plan pour faire correspondre l'offre et la demande.	×	×	×		5
Y a-t-il une couverture d'organisation d'urgence et de secours.	×	×	×		5
Plan de formation des employés.	×	×	×		4
Évaluation de l'apprentissage des manœuvres.	×	×	×		5
Processus 2 : Compétence et aptitude	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Définition des besoins de formation, critères de formation explicites, y compris les considérations de sécurité.	×	×	×		5
Des programmes appropriés de formation sur les connaissances et les compétences de base, ainsi que des programmes de formation sur les postes, sont en place.	×	×	×		5
Des critères sont en place pour garantir que les niveaux nécessaires d'expérience et de connaissances individuelles et collectives sont maintenus et que l'on s'assure de la qualité des services offerts.	×	×	×		5
Système de préparation et d'information des employés sur les travaux à effectuer et des compétences requises.	×	×	×		4
Formation révisée sur la base du retour d'information des stagiaires, de la direction, l'analyse des incidents et en tenant compte des dernières avancées technologiques en matière de comportement lié à la sécurité.	×	×	×		5
Un système de formation et d'évaluation des compétences de son propre personnel est mis en place.	×	×	×		4
Système de vérification et de modification des exigences et de la fourniture de compétences pour des tâches spécifiques est mis en place	×	×	×		5
Processus 3 : Implication du personnel et résolution des conflits	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Politique d'engagement et d'évaluation de la maturité culturelle de l'entreprise mise en place.	×	×	×		5
Des systèmes d'incitation, de supervision et de contrôle social sont mis en place.	×	×	×		5
Mise en œuvre des mesures pour garantir l'engagement et le retour d'information.	×	×	×		5
Enregistrement et analyse des cas de manque de vigilance/attention/engagement.	×	×	×		5

Processus 4 : Communication & coordination	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Identification des besoins de coordination relatifs au fonctionnement et la gestion des barrières : plans, réunions, supervision.	×	×	×		5
Planification/allocation des canaux de communication.	×	×	×		5
Disponibilité du matériel de communication : quantité et qualité suffisantes, testé et maintenu en bon état.	×	×	×		5
Systèmes de permis de travail.	×	×	×		5
Procédures d'appels d'urgence.	×	×	×		5
Enregistrement et analyse des cas de mauvaise communication & coordination : rapports d'incidents, plaintes, vérifications de la paperasserie & de la pratique de communication.	×	×	×		5
Processus 5 : Procédures, règles et objectifs	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Les règles de sécurité sont définies, élaborées, rédigées et approuvées.	×	×	×		5
L'employé est formé pour l'exécution des règles de sécurité.	×	×	×		5
L'utilisation de ces règles est contrôlée/renforcée périodiquement.	×	×	×		4
L'efficacité des règles et procédures de sécurité est évaluée.	×		×		3
Modification des règles en cas d'inefficacité.	×		×		3
Procédures d'arrêt d'urgence.	×	×	×		5
Plan d'intervention interne.	×	×	×		5
Procédures spécifiques pour la maintenance des installations, telles que les tests, le transfert, l'échantillonnage/la vidange, le diagnostic, les (dés) assemblage.	×	×	×		5
Correction des écarts par rapport aux procédures/objectifs mis en œuvre.	×	×	×		5
Processus 6 : Détermination des spécifications de conception (incluant l'interface homme/machine), achat, construction, installation, et gestion des pièces.	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Critères permettant de décider ce qui doit être fabriqué ou modifié en interne et ce qui doit être sous-traité à des fournisseurs (spécialisés).	×	×	×		5
Réception, vérification et stockage des marchandises commandées.	×	×	×		5
Inventaire des barrières et des pièces de rechange achetées, stockées et installées, y compris l'emplacement et l'historique et le couplage aux exigences d'utilisation, les essais, l'inspection, le nettoyage et la maintenance	×	×	×		4
Stockage dans des conditions appropriées pour éviter tout dommage, accident ou la détérioration	×	×	×		5
Système de délivrance comprenant des contrôles des demandes d'achat pour éviter la délivrance d'articles incorrects ou en mauvais état (émetteur et récepteur)	×	×	×		5

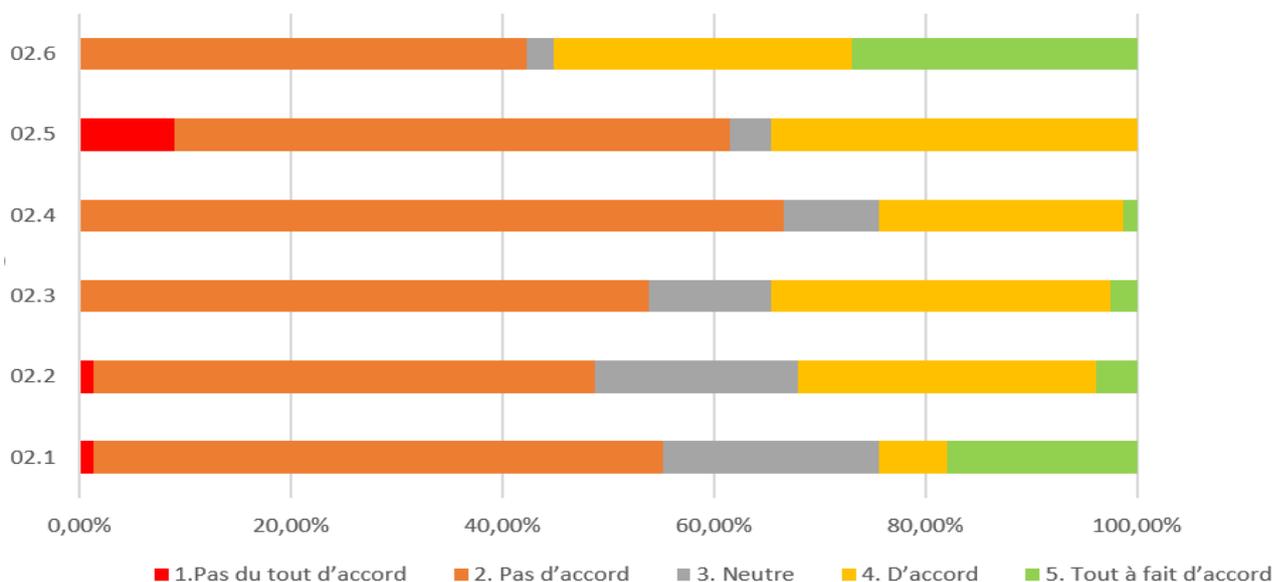
Processus 7 : Gestion de d'inspection, tests et maintenance	Présent	Documenté	Fonctionnant	N/A	NOTE
Une analyse des risques est réalisée.	×	×	×		4
Documents de l'équipement : les plans d'inspection, de tests et de la maintenance.	×	×	×		4
Planification des ressources & les méthodes de travail.	×	×	×		5
Calendrier de maintenance/réparation.	×	×	×		5
Exécution de la maintenance & la réparation (isolation – vérification– manœuvre – exécution – vérification – manœuvre - redémarrage).	×	×	×		5

Résultats du questionnaire de culture sécurité

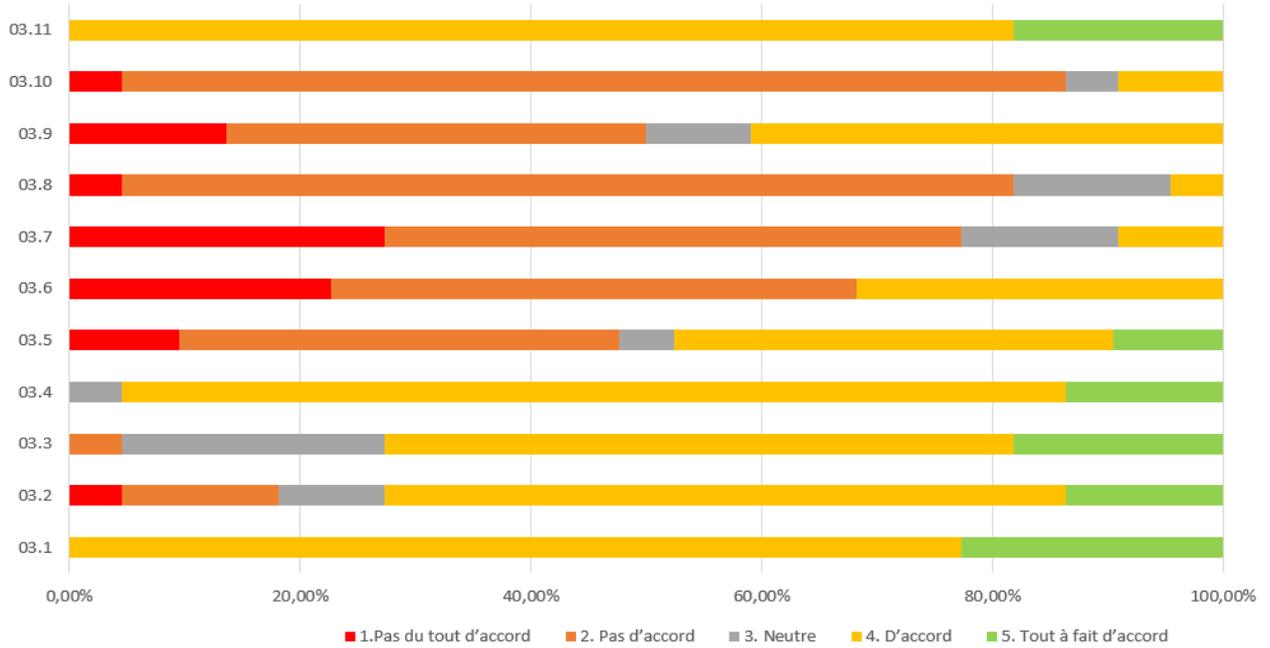
Section 1 : Déclaration d'accidents



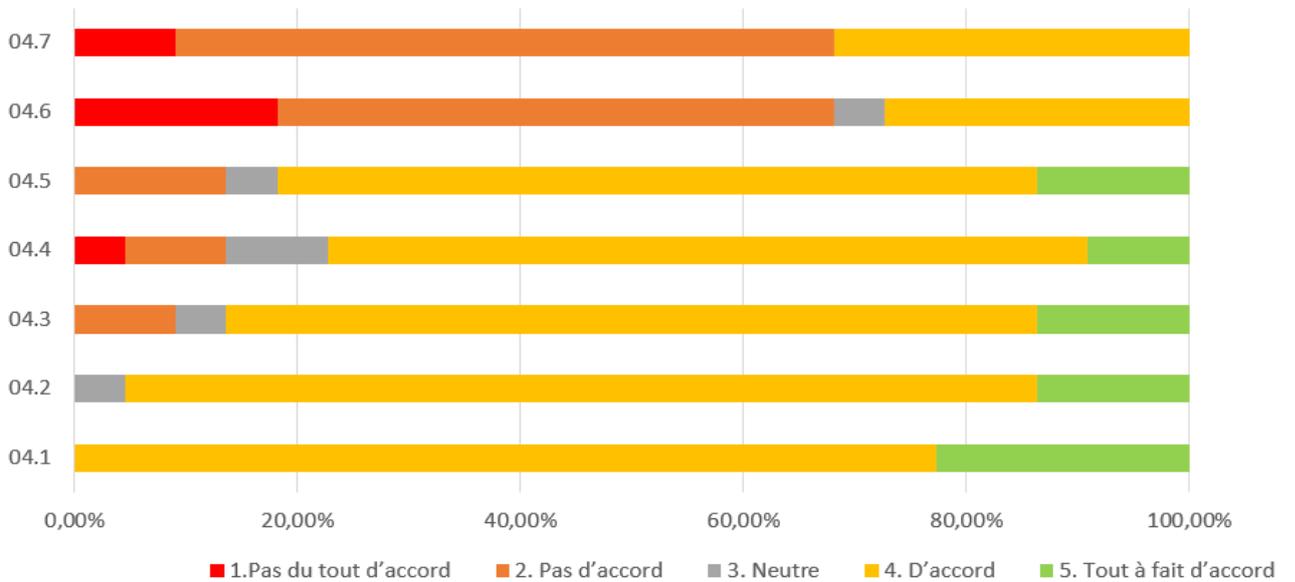
Section 2 : Si et quand des incidents et des accidents (de tous types) ne sont pas signalés, c'est parce que ...



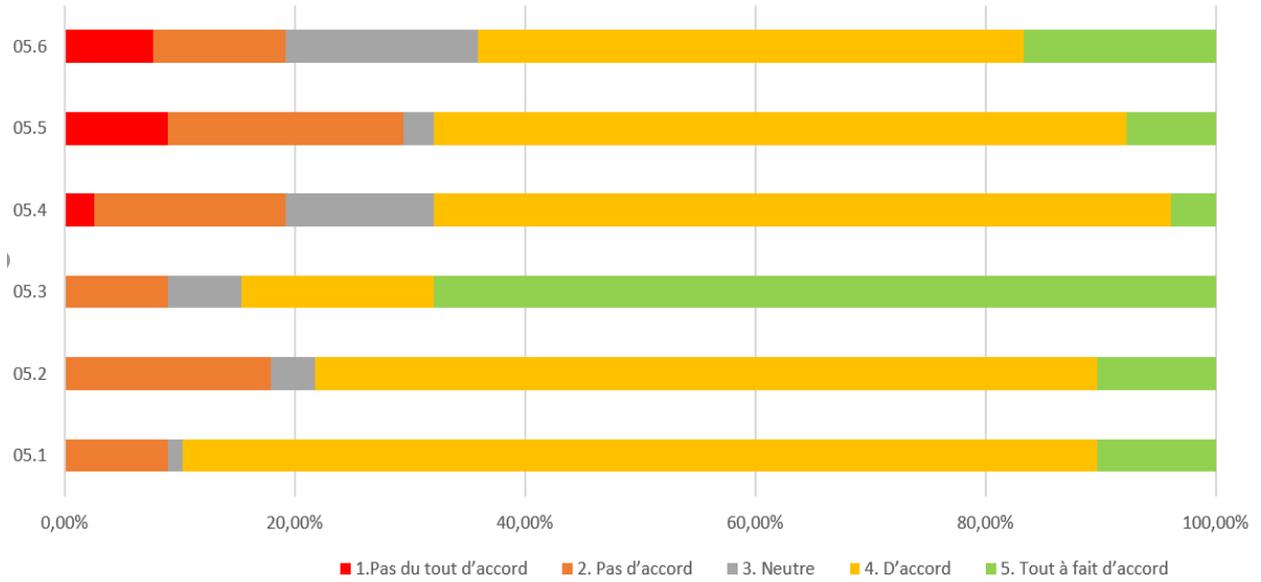
Section 3 : Consignes et attitudes de sécurité



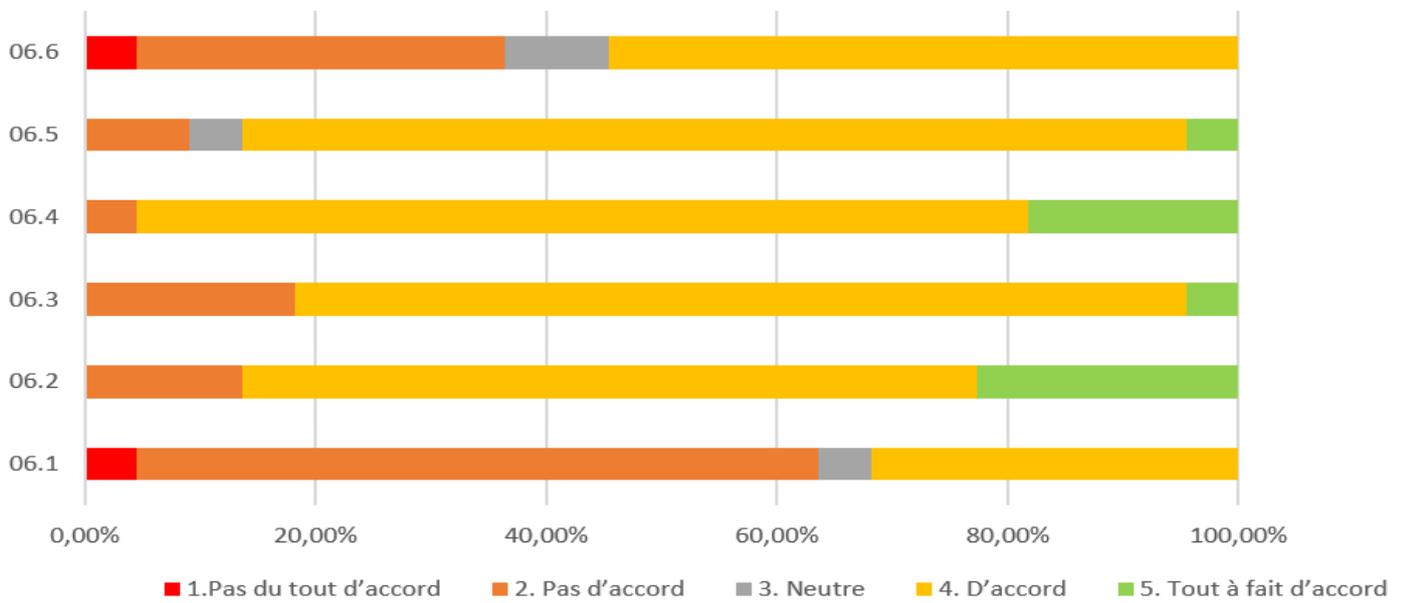
Section 4: Priorité à la sécurité au travail



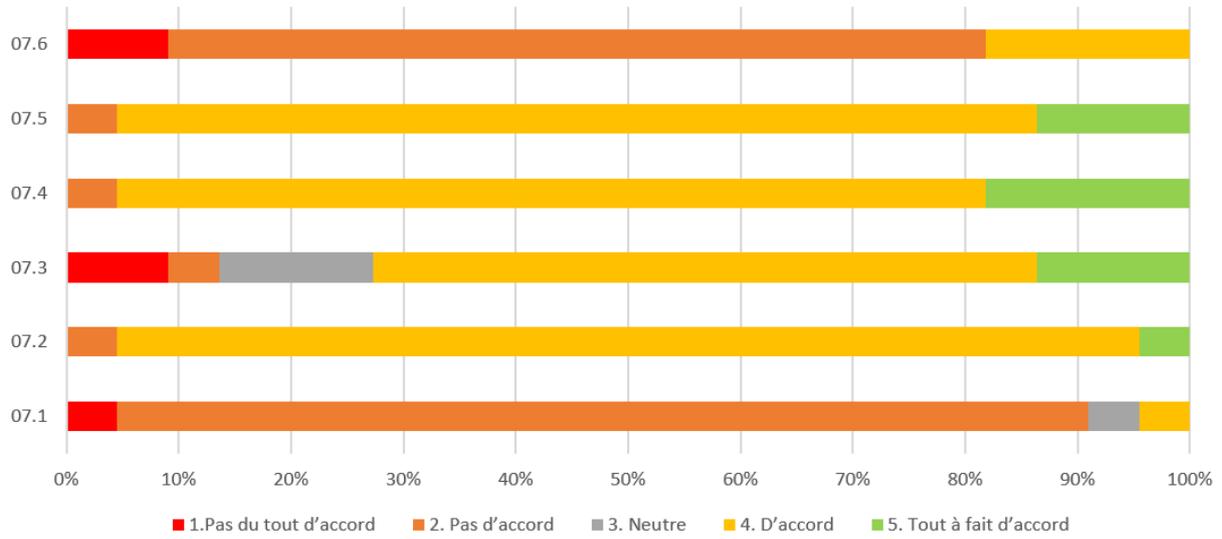
Section 5 :Selon vous, qui devrait assumer la responsabilité de la sécurité



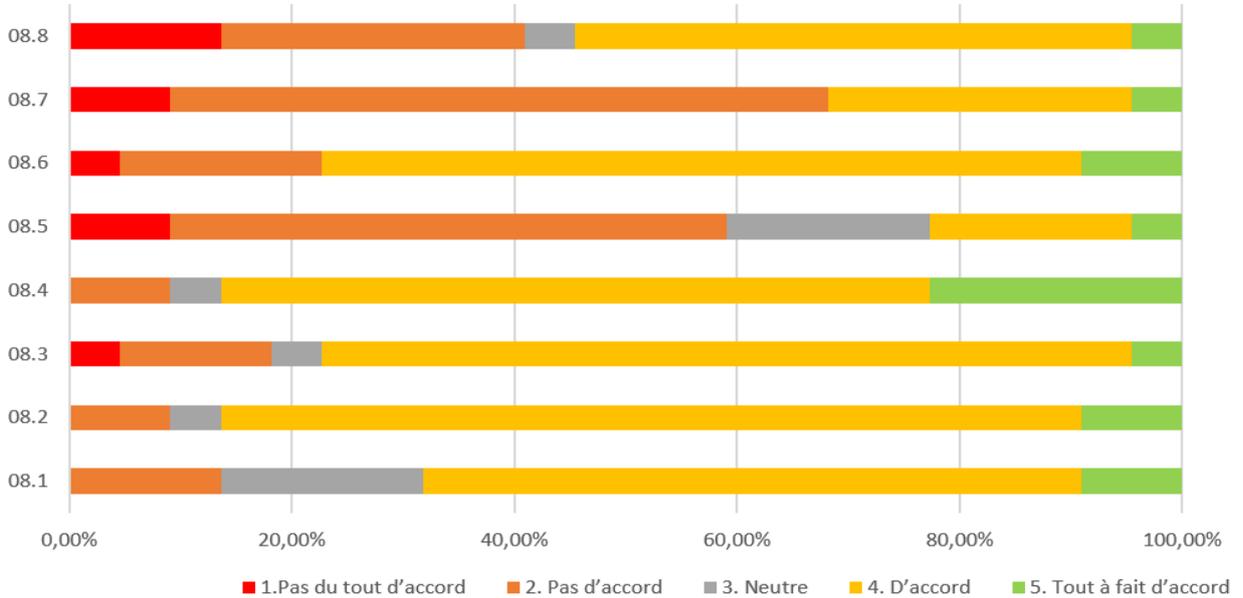
Section 6 : Participation des employés aux décisions concernant la sécurité



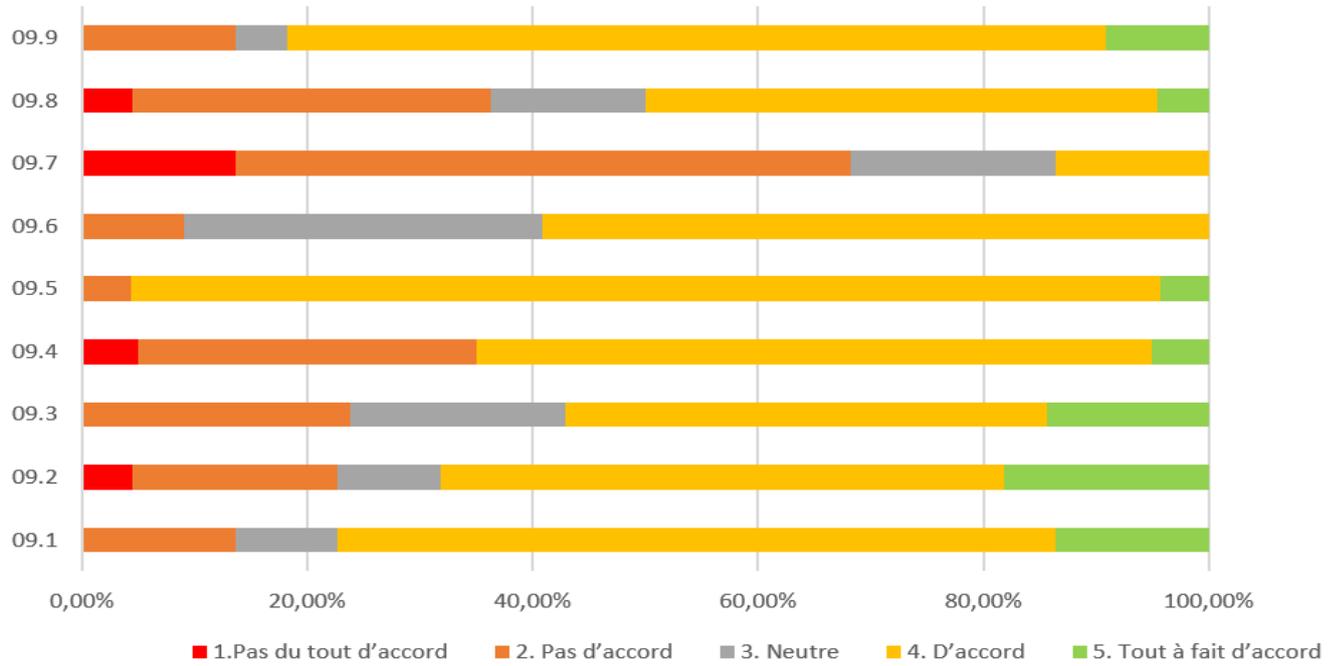
Section 7 : Engagement de la direction et des responsables en matière de sécurité



Section 8 : Confiance et équité



Section 9 : Travail et relations sociales



Résultats du calcul de l'indice sécuritaire

Section 1 : Déclarations d'accidents				
ID QST	Moyenne μ^{new}	Moyenne de référence $\mu^{\text{réf}}$	Écart-type σ_i^{ref}	Score y_i
01.1	1,5912	2,159	0,985	-0.576
01.2	1,409	1,659	0,676	-0.369
01.3	1,591	1,823	0,815	-0.284
01.4	1,727	1,74	0,689	-0.018
01.5	2,817	2,492	1,039	0.312
01.6	2,591	2,669	1,039	-0.075
01.7	1,711	2,068	0,869	-0.410
Section 3 : Consignes et attitudes de sécurité				
03.1	1,772	1,853	0,617	-0.131
03.2	2,364	2,376	0,815	-0.014
03.3	2,136	2,204	0,842	-0.080
03.4	1,909	2,321	0,886	-0.465
03.5	3	2,641	0,959	0.374
03.6	3,59	2,679	1,084	0.840
03.7	3,954	2,353	1,029	1.555
03.8	3,818	2,131	0,987	1.709
03.9	3,227	2,702	1,050	0.5
03.10	3,718	2,438	1,043	1.28
03.11	1,8182	2,151	0,934	-0.356
Section 4 : Priorité à la sécurité au travail				
04.1	1,7727	1,836	0,740	-0.085
04.2	1,9093	1,940	0,660	-0.046
04.3	2,091	2,060	0,778	0.039
04.4	2,318	2,506	0,894	-0.210
04.5	2,182	2,720	0,787	-0.683
04.6	3,59	2,390	0,966	1.242
04.7	3,574	2,308	0,988	1.281
Section 6 : Participation des employés aux décisions concernant la sécurité				
06.1	3,363	2,520	0,902	0.934
06.2	2,045	2,484	0,842	-0.521
06.3	2,318	2,344	0,777	-0.033
06.4	1,908	2,534	0,966	-0.648
06.5	2,182	2,404	0,756	-0.293
06.6	2,864	2,716	0,833	0.177

Section 7 : Engagement de la direction et des responsables en matière de sécurité

07.1	3,904	2,855	1,006	1.042
07.2	2,045	2,414	0,834	-0.442
07.3	2,363	2,258	0,886	0.118
07.4	1,904	2,27	0,914	-0.4
07.5	1,954	2,258	0,798	-0.380
07.6	3,363	2,177	1,024	1.158

Section 8 : Confiance et équité

08.1	2,379	2,6	0,921	-0.239
08.2	2,136	2,756	0,929	-0.667
08.3	2,409	2,302	0,757	0.141
08.4	2,001	2,3	0,78	-0.383
08.5	3,409	2,298	0,777	1.429
08.6	2,409	2,541	0,91	-0.145
08.7	3,378	2,808	0,919	0.620
08.8	2,954	2,48	0,841	0.563

Section 9 : Travail et relations sociales

09.1	2,227	2,622	0,998	-0.395
09.2	2,419	3,317	0,915	-0.981
09.3	2,524	2,052	0,752	0.627
09.4	2,7	2,967	0,927	-0.288
09.5	2,043	2,544	0,768	-0.652
09.6	2,504	2,492	0,942	0.012
09.7	3,682	2,722	0,99	0.969
09.8	2,863	2,801	0,989	0.062
09.9	2,226	2,269	0,845	-0.050

Annexe H

Les coefficients d'influences $B_{i,k}$

Processus Managériale	Type de barrière										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Culture de sécurité	0%	0%	8%	4%	0%	0%	15%	25%	8%	15%	25%
Disponibilité du personnel	0%	50%	25%	75%	0%	50%	10%	5%	25%	10%	0%
Compétence du personnel	0%	0%	29%	14%	0%	0%	58%	0%	29%	58%	87%
Implication du personnel et résolution des conflits	0%	0%	36%	18%	0%	0%	72%	0%	36%	72%	100%
Communication et coordination	0%	0%	10%	5%	0%	0%	20%	33%	10%	20%	33%
Procédure, modes opératoires et objectifs	0%	0%	25%	13%	0%	0%	50%	0%	25%	50%	83%
Détermination des spécifications de conception ; achat, construction, installation, et gestion des pièces	0%	0%	9%	5%	0%	0%	18%	40%	9%	18%	40%
Gestion des inspections, des contrôles et de la maintenance	50%	50%	25%	25%	50%	50%	48%	5%	25%	48%	80%

Annexe J

Valeurs de μ^{ref} et σ_i^{ref}

Item no. *	Mean	Std. Deviation	Item no. *	Mean	Std. Deviation	Item no. *	Mean	Std. Deviation
Item01.1	2,159	0,985	Item05.1	1,836	0,740	Item10.1	2,600	0,921
Item01.2	1,659	0,676	Item05.2	1,940	0,660	Item10.2	2,756	0,929
Item01.3	1,823	0,815	Item05.3	2,060	0,778	Item10.3	2,302	0,757
Item01.4	1,740	0,689	Item05.4	2,506	0,894	Item10.4	2,300	0,780
Item01.5	2,043	0,811	Item05.5	2,720	0,787	Item10.5	2,298	0,777
Item01.6	2,097	0,852	Rev05.6	2,390	0,966	Item10.6	2,541	0,910
Item01.7	2,664	0,913	Rev05.7	2,308	0,988	Rev10.07	2,808	0,919
Item01.8	2,492	1,039	Item06.1	2,520	0,902	Item10.8	2,480	0,841
Rev01.9	2,669	1,008	Rev06.2	2,484	0,842	Item11.1	2,622	0,998
Item01.10	2,332	0,872	Item06.3	2,344	0,777	Item11.2	3,317	0,915
Item01.11	2,068	0,869	Item06.4	2,534	0,966	Item11.3	3,162	0,910
Item01.12	2,574	0,850	Item06.5	2,404	0,756	Item11.4	2,980	0,994
Item03.1	1,853	0,617	Item06.6	2,716	0,833	Item11.5	2,177	0,715
Item03.2	2,376	0,815	Rev09.1	2,855	1,006	Item11.6	2,045	0,621
Item03.3	2,204	0,842	Item09.2	2,414	0,834	Item11.7	2,052	0,752
Item03.4	2,321	0,886	Item09.3	3,590	0,938	Item11.8	2,967	0,927
Item03.5	2,641	0,959	Item09.4	2,258	0,886	Item11.9	2,544	0,768
Rev03.6	2,679	1,084	Item09.5	2,265	0,784	Item11.10	2,492	0,942
Rev03.7	2,353	1,029	Item09.6	2,602	0,842	Item11.11	2,722	0,990
Rev03.8	2,131	0,987	Item09.7	2,237	0,765	Item11.12	2,801	0,989
Rev03.9	2,702	1,050	Rev09.8	2,270	0,914	Item11.13	2,269	0,845
Rev03.10	2,438	1,043	Rev09.9	2,258	0,798			
Rev03.11	2,151	0,934	Rev09.9	2,258	0,798			
Rev03.12	2,810	1,050	Rev09.10	2,177	1,024			
Rev03.13	2,737	0,981	Item09.11	2,500	0,800			
			Item09.12	2,691	0,873			

Annexe I

Base de données des accidents à effets dominos

Table 1

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 500 Totally blinded; massive property damage	Billings & Copland, 1992
2.	1917	Novo Scotia, Canada	Ammunition ship	Collision with another ship → F → MaE	1800	8000		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	Severe damage to the plant and property More than 3300 dwellings and 130 business building damaged, 600 automobile and 360 box car damaged, several storage tanks destroyed	Marshall, 1987; Nash, 1976
6.	1944	Cleveland, USA	Liquefaction plant/LNG	Tank rupture & leak → F → series of MaE	128	200–400		Marshall, 1987; Nash, 1976
7.	1947	Texas, USA	Ship/ammonium nitrate	F → MaE → MaE	552	>3000		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	–	73 Bullet tanks were destroyed, missiles demolished a filling station and ruptured underground water main 6.5 Million property damage	MHIDAS, 2009
10.	1951	Port Newark, USA	LPG storage/propane	F → MiE → several BLEVEs	0	14		Lewis, 1993.
11.	1951	Baton Rouge, USA	Refinery/naphtha	VCE → multiple explosions	2			Lenoir & Davenport, 1993
12.	1952	Bound Brook, USA	Phenolic resin plant/phenolic resin powder	Powder smouldering due to overheating → MaE → MaE → MaE VCE → three explosions	5	21		Lewis, 1993
13.	1953	Campana, Argentina	Refinery/recovery unit/gasoline		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	–	3 Storage tanks damaged	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			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

Table 1 (continued)

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 of Fs and Es		1		Kier & Muller, 1983; Slater, 1978

(continued on next page)

Table 1 (continued)

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.
52.	1970	Ludwigshafen, Germany	Transportation/propylene	VCE → F and MaE	5	3	2 Barge caught fire and sunk	MHIDAS, 2009
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
65.	1975	Eagle Pass, USA	Transportation/LPG	VCE → fire and another VCE	17			Lenoir & Davenport, 1993
66.	1975	Philadelphia, USA	Storage area/fuel oil	Overfilling → VCE → major F	—	—		MHIDAS, 2009

Table 1 (continued)

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 MHIDAS, 2009
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	Bienville, France	Chemical storage depot/resins, acetates, solvents	MiE → F	—	—		MHIDAS, 2009

(continued on next page)

Table 1 (continued)

No.	Year	Location	Plant/unit/chemical	Sequence of accidents	Deaths	Injuries	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/ deethanizer column/ ethylene	Relief system operated → ethylene discharge → F → MaE → tank collapse and more MaEs	—	—		Mahoney, 1990