

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université 20 Août 1955- Skikda

Faculté de technologie

Département de Pétrochimie et Génie des Procédés

Réf : D012121014D

جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم البتروكيمياة وهندسة الطرائق

المرجع:

Thèse

Présentée en vue de l'obtention Du diplôme de

Doctorat LMD

En

Filière : Hygiène et sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement, Maitrise des Risques

Intitulée :

Matrice des risques : cas de la zone pétrochimique de Skikda

Présentée par : Abderraouf BOUAFIA

Soutenue publiquement le 04/11/2021

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|------|------------|----------------------------------|
| ZIGHED Lilia | Prof | Présidente | Université 20 aout 1955 Skikda |
| MEDJRAM Mohamed Salah | Prof | Rapporteur | Université 20 aout 1955 Skikda |
| ZENNIR Youcef | Prof | Examineur | Université 20 aout 1955 Skikda |
| CHAIB Rachid | Prof | Examineur | Université des Frères Mentouri 1 |
| ROUAINIA Mounira | Prof | Invité | Université 20 aout 1955 Skikda |

Année universitaire : 2020-2021



Dédicaces



À mes chers parents et à toute la famille . . .

À tous ceux qui m'ont beaucoup donné . . .

À tous ceux qui me sont chers . . .

À mes enseignant(e)s . . .

À la mémoire de tous ceux qui m'ont quitté . . .

_____ Abderraouf

Remerciements

Tout d'abord, ma plus profonde gratitude va à ALLAH le tout-puissant, le bienfaiteur, le miséricordieux de m'avoir accordé de matérialiser cette recherche dans la forme actuelle.

Je voudrais exprimer ma gratitude et mon respect à mon directeur de thèse, le Pr MEDJRAM Mohamed Salah, pour avoir accepté l'encadrement de cette thèse, et pour sa présence, toujours prêt à répondre à mes interrogations et à soutenir mon travail au sein de notre laboratoire LGCES, Skikda. J'ai beaucoup appris de sa vaste expérience et de ses connaissances. J'apprécie vraiment son soutien.

Je n'oublie pas de remercier également la directrice de notre formation doctorale, professeur ROUAINIA Mounira pour ses encouragements et aide infinie.

Je remercie également les membres du jury, Mme Lilia ZIGHED, Mr Youcef ZENNIR (professeurs à l'université 20 aout 1955 de Skikda), Mr Rachid CHAIB (professeur à l'Université des Frères Mentouri Constantine 1), pour leurs commentaires critiques et leurs suggestions constructives. Je souhaiterais remercier sincèrement professeur INNAL Fares pour le soutien qu'ils m'ont apporté pendant mon stage en Norvège. Je tiens à remercier le Professeur MEBARKI Ahmed, qui m'a invité dans son laboratoire MSME de l'université Gustave Eiffel paris (France) et m'a soutenu lorsque j'y étais.

Je tiens à remercier tous les professeurs et les collègues du département de pétrochimie et génie des procédés.

Mes plus sincères remerciements vont aux membres de ma famille ; mon père, ma mère, mes sœurs et frère pour leur amour et leur soutien pendant toutes ces années.

Merci à tous mes amis en particulier Mohammed B, Bilel K, abdelhamid A et Lazhar H pour leur aide et leur soutien non seulement dans mes recherches mais aussi dans ma vie.

Matrice des risques : cas de la zone pétrochimique de Skikda

Résumé

Aujourd'hui, l'industrie pétrochimique se préoccupe non seulement de la production, mais aussi de la sécurité des installations. L'objectif de l'analyse des risques est de s'assurer que les risques majeurs dans les domaines industriels pétrolier soient suffisamment faibles ou que des moyens de prévention-protection soient déjà mis en œuvre pour lutter contre ces risques. Les accidents industriels majeurs pourraient être évités si les scénarios d'accident étaient préalablement identifiés, grâce à des méthodes d'identification des risques. Dans telles situations, les analystes de risques se réfèrent souvent à l'analyse quantitative des risques ((QRA)), qui est une approche cruciale pour l'évaluation et la gestion appropriées des risques industriels. Elle consiste essentiellement à identifier les événements accidentels potentiels, à estimer leur fréquence et à analyser leurs conséquences, en utilisant des méthodes appropriées (hazard operability HAZOP) ou (hazard identification HAZID), arbre de défaillances, arbre d'événements, modèles physiques et empiriques des effets des conséquences, modèles de vulnérabilité, etc. L'objectif est d'estimer les risques individuels et sociétaux et par conséquent, appliquer des mesures appropriées qui répondent efficacement à cette évaluation. Divers modèles de vulnérabilité ont été mis au point pour modéliser différents types d'accidents majeurs et pour prévoir leurs conséquences. Dans ce contexte, le modèle d'explosion des zones obstruée, (obstructed region explosion model OREM) est utilisé pour approfondir la compréhension du phénomène physique des incendies et les explosions utilisant des modèles analytiques tels que le modèle multi-énergie, le modèle de risque vulnérabilité (VULN) et le modèle d'impact (MPACT), pour modéliser les phénomènes accidentels et calculer leur impact sur la population et les structures environnantes. En outre, il est nécessaire d'utiliser l'outil (SAFETI software for the assessment of flammable, explosive and toxic Impact) qui appartient à det norske veritas (DNV) pour la modélisation, qui s'avère être un outil supplémentaire puissant pour la recherche expérimentale et théorique du (QRA). Ensuite, le développement d'une matrice de risques représentant la gravité des risques étudiés pour quantifier les effets indésirables des conséquences modélisé. La réalisation de ce travail permettra aux responsables d'entreprises ou d'organisations de l'utiliser comme un outil d'aide à la décision dans l'élaboration de leur plan d'action.

Mots-clés : (QRA), industrie pétrochimique, OREM, modèle multi-énergie, incendie et explosion. Matrice des risques.

Risk matrix: the case of the Skikda petrochemical zone

Abstract

The petrochemical industry today is concerned not only with the production but also with safety. Risk analysis aims to ensure that major risks in industrial areas are sufficiently low or that preventive and protective measures are already in place to combat these risks. Major industrial accidents could be avoided if such scenarios were previously identified, thanks to risk identification methods. In such situations, risk analysts often refer to quantitative risk analysis (QRA), which is a solid and crucial approach for the proper assessment and management of industrial risks. It essentially consists of identifying potential accidental events, estimating their frequency and analyzing their consequences, using appropriate methods (HAZOP or HAZID, fault tree, event tree, physical and empirical models of the effects of consequences, vulnerability models, etc.). The objective is to estimate individual and societal risks and therefore apply appropriate measures that respond effectively to this assessment. Various vulnerability models have been developed to model different types of major accidents and to predict their consequences. In this context, the obstructed area explosion model (OREM) is used to deepen the understanding of the physical phenomenon of fire and explosion using analytical models such as the multi-energy model, the risk model (VULN), and the model (MPACT), to model accidental phenomena and calculate their impact on the population and surrounding structures. Also, it is necessary to use DNV's SAFETI tool for modeling, which proves to be a powerful additional tool for experimental and theoretical research for (QRA). Secondly, the development of a risk matrix representing the severity of the risks was studied to quantify the undesirable effects of the modeled consequences. The completion of this work will enable company or organization managers to use it as a decision support tool in the development of their action plan.

Keywords: (QRA), petrochemical industry, OREM, Multi Energy model, fire and explosion. Risk matrix

مصفوفة المخاطر: حالة منطقة سكيكدة للبتروكيماويات

ملخص

لا تهتم صناعة البتروكيماويات اليوم بجودة عمليات الإنتاج فحسب، بل بالسلامة أيضًا. الهدف من تحليل المخاطر هو التأكد من أن المخاطر الرئيسية في المناطق الصناعية منخفضة بما فيه الكفاية أو أن التدابير الوقائية والحمائية موجودة بالفعل لمكافحة هذه المخاطر. يمكن تجنب الحوادث الصناعية الكبرى إذا تم تحديد مثل هذه السيناريوهات مسبقًا، وذلك بفضل طرق تحديد المخاطر. في مثل هذه الحالات، غالبًا ما يشير محللو المخاطر إلى التحليل الكمي للمخاطر (QRA)، وهو نهج قوي وحاسم للتقييم السليم وإدارة المخاطر الصناعية. وهي تتكون أساسًا من تحديد الأحداث العرضية المحتملة، وتقدير تواترها وتحليل عواقبها، باستخدام الأساليب المناسبة (HAZOP أو HAZID)، شجرة الأخطاء، شجرة الأحداث، النماذج المادية والتجريبية لتأثيرات العواقب، ونماذج الضعف، وما إلى ذلك). الهدف هو تقدير المخاطر الفردية والمجمعة وبالتالي دراسة وتطبيق التدابير المناسبة التي تستجيب بشكل فعال لهذا التقييم. تم تطوير خوارزميات ونماذج الهشاشة المختلفة لنمذجة أنواع مختلفة من الحوادث الكبرى والتنبؤ بعواقبها. في هذا السياق، يتم استخدام نموذج انفجار المناطق المعاقة OREM لتعميق فهم الظاهرة الفيزيائية التي تؤدي إلى نشوب الحرائق والانفجارات باستخدام نماذج تحليلية مثل نموذج الطاقة المتعددة، ونموذج مخاطر (VULN)، ونموذج MPACT، لنموذج عرضي الظواهر وحساب تأثيرها على السكان والهياكل المحيطة. بالإضافة إلى ذلك، من الضروري استخدام أداة DNV SAFETI للنمذجة، والتي تثبت أنها أداة إضافية للبحث التجريبي والنظري لـ (QRA). أخيرًا وليس آخرًا، يتم تطوير مصفوفة المخاطر التي تمثل خطورة المخاطر المدروسة لتحديد الآثار غير المرغوب فيها للعواقب المجسدة على الكتلة الصناعية أو السكان المحيطين حول GLIK سكيكدة. سيتمكن إكمال هذا العمل مديري الشركة أو من استخدامه كأداة لدعم القرار في تطوير خطة العمل الخاصة بالوقاية أو التدخل لمواجهة الاخطار.

الكلمات الدالة: (QRA)، صناعة البتروكيماويات، OREM، نموذج متعدد الطاقة، الحرائق والانفجارات. مصفوفة المخاطر

Tableau des matières

| | |
|---|------|
| <i>Dédicaces</i> | i |
| <i>Remerciements</i> | ii |
| <i>Résumé</i> | iii |
| <i>Tableau des matières</i> | vi |
| <i>Liste des figures</i> | xi |
| <i>Liste des Tableaux</i> | xiii |
| Introduction Générale | 1 |
| 1. <i>Introduction</i> | 2 |
| 2. <i>Objectifs de l'étude</i> | 5 |
| 3. <i>Structure de la thèse</i> | 5 |
| Chapitre 1 : Aperçu des concepts de sécurité et de risque | 7 |
| 1. <i>Introduction</i> | 8 |
| 2. <i>Aperçu des concepts de sécurité et de risque</i> | 8 |
| 2.1 <i>Définition des concepts de base</i> | 8 |
| 2.1.1 <i>Risques et dangers</i> | 8 |
| 2.1.2 <i>Autres concepts associés au risque</i> | 10 |
| 2.2 <i>Risques industriels majeurs des processus</i> | 12 |
| 2.2.1 <i>Stockage</i> | 13 |
| 2.2.2 <i>Le facteur énergétique</i> | 13 |
| 2.2.3 <i>Le facteur temps</i> | 14 |
| 2.2.4 <i>La relation intensité-distance</i> | 14 |
| 2.2.5 <i>Le facteur d'exposition</i> | 15 |
| 2.2.6 <i>Les relations intensité-dommages et intensité-blessures</i> | 16 |
| 3. <i>Analyse, évaluation et gestion des risques</i> | 16 |
| 3.1 <i>Analyse des risques</i> | 16 |
| 3.2 <i>Évaluation des risques</i> | 16 |
| 3.3 <i>Gestion des risques</i> | 16 |
| 4. <i>Développement de la sécurité des procédés</i> | 17 |
| 4.1 <i>Les accidents les plus catastrophiques des trois dernières décennies</i> | 19 |
| 4.1.1 <i>La tragédie de l'Ocean Ranger</i> | 20 |
| 4.1.2 <i>La catastrophe de Bhopal</i> | 21 |
| 4.1.3 <i>L'accident de la centrale électrique de Sayano-Chushenskaya</i> | 22 |
| 4.1.4 <i>La catastrophe nucléaire de Fukushima Daiichi</i> | 22 |
| 4.1.5 <i>Deep-water Horizon (l'éruption de Macondo)</i> | 23 |
| 5. <i>Modèle de processus d'accident</i> | 24 |
| 5.1 <i>Techniques d'analyse de la sécurité et des risques</i> | 26 |
| 5.1.1 <i>Approches qualitatives</i> | 26 |
| 5.1.2 <i>Approches quantitatives</i> | 28 |
| 6. <i>Conclusion</i> | 30 |
| Chapitre 2 : Analyse Quantitative des risques (QRA) | 31 |
| 1. <i>Introduction</i> | 32 |
| 2. <i>Objectifs de l'analyse quantitative des risques</i> | 32 |
| 3. <i>Méthodologie d'analyse quantitative des risques</i> | 33 |
| 3.1 <i>Collecte des informations pertinentes</i> | 34 |

| | | |
|--|--|----|
| 3.2 | Identification des scénarios d'accidents | 34 |
| 3.3 | Estimation des fréquences des événements initiateurs | 35 |
| 3.4 | Développement des arbres d'événements (ADE) | 36 |
| 3.5 | Analyse des conséquences..... | 38 |
| 3.6 | Analyse de vulnérabilité | 40 |
| 3.6.1 | Réaction d'une population suite à un accident | 40 |
| 3.6.2 | Analyse de probit | 41 |
| 3.7 | Estimation du risque individuel et sociétal..... | 43 |
| 3.7.1 | Risque individuel..... | 43 |
| 3.7.2 | Risque sociétal | 47 |
| 4. | Application de la (QRA) dans l'industrie des procédés | 48 |
| 5. | Avantages de l'approche (QRA)..... | 49 |
| 6. | Limites de l'approche (QRA)..... | 49 |
| 7. | Conclusion..... | 50 |
| <i>Chapitre 3 : Modèle d'explosion des régions obstruées OREM.....</i> | | 51 |
| 1. | Introduction..... | 52 |
| 2. | Modèle standard d'explosion | 52 |
| 2.1. | Modèle d'explosion de régions obstruées (OREM)..... | 52 |
| 2.2 | Contexte | 53 |
| 2.3 | Modèles d'explosion de régions obstruées vs modèles CFD | 55 |
| 3. | Aperçu du modèle Multi-énergie..... | 56 |
| 3.1 | Courbes de souffle pour les effets d'explosion..... | 56 |
| 3.2. | Définition des régions encombrées | 60 |
| 3.3 | Orientations du yellow book sur la définition des régions encombrées | 60 |
| 3.3.1. | Évaluer la zone d'intérêt et la décomposer en formes géométriques | 60 |
| 3.3.2. | Supposons un lieu d'allumage..... | 61 |
| 3.3.3 | Déterminer l'orientation des obstacles | 61 |
| 3.3.4 | Construction d'une région obstruée | 61 |
| 3.3.5 | Définition d'une boîte contenant la région obstruée | 62 |
| 3.3.6. | Subdivision en plusieurs cases | 62 |
| 3.3.7. | Définir des régions obstruées supplémentaires, le cas échéant | 62 |
| 3.4 | Caractérisation des régions obstruées pour ME | 62 |
| 4. | Dérivation des sources d'explosion | 63 |
| 4.1 | Parties non obstruées et obstruées d'un nuage de vapeur..... | 63 |
| 4.2 | Méthodes pour appliquer la distance de séparation critique..... | 66 |
| 4.3 | Méthodes de définition des sources d'explosion | 68 |
| 4.3.1 | Volume et centre des explosions confinées | 69 |
| 4.3.2 | Énergie d'explosion par intégration de la concentration et de la distribution | 72 |
| 4.3.3 | Estimation de l'énergie d'explosion à l'aide de la concentration stœchiométrique | 73 |
| 4.3.4 | Source d'explosion du modèle d'explosion standard..... | 73 |
| 4.3.4.1 | Le nuage stœchiométrique équivalente..... | 73 |
| 4.3.4.2 | Masse de carburant obstruée..... | 74 |
| 4.3.4.3 | Centre de l'explosion | 74 |
| 4.3.4.4 | Courbe de souffle des explosions | 74 |
| 5. | Effets de l'explosion | 75 |
| 5.1 | Courbes de souffle des sources d'explosion formées de région obstruée | 75 |
| 5.2. | Degré d'expansion | 75 |

| | |
|---|------------|
| 5.3 Dimension typique, D..... | 76 |
| 5.4 Résultats de l'explosion à un moment donné..... | 76 |
| 5.4.1 Surpression réfléchie (P_{ref}) | 77 |
| 5.4.2 Sources d'explosion Multiples..... | 79 |
| 5.5 Calculer la distance pour une surpression donnée..... | 79 |
| 5.6 Risques de construction | 80 |
| 5.6.1 Effets des explosions | 80 |
| 5.6.2 Effets de Feu de nuage..... | 82 |
| 6. Conclusion..... | 82 |
| <i>Chapitre 4 : Modèle du risque, VULN & MPACT</i> | <i>84</i> |
| Introduction..... | 85 |
| 1.1 Modèle (VULN)..... | 85 |
| 1.2 vulnérabilité aux radiations | 86 |
| 1.2.1 Méthode de l'intensité de rayonnement | 86 |
| 1.3. vulnérabilité aux explosions | 86 |
| 1.3.1 Méthode du surpression discrète (purple book)..... | 86 |
| 1.3.2 Méthode de la CIA (surpression interpolée par logarithme) | 87 |
| 1.3.3 Méthode d'Interpolation Linéaire (Linear-interpolated Surpression)..... | 89 |
| 1.3.4 Méthode de pression et d'impulsion | 89 |
| 1.3.5 Méthode Probit..... | 90 |
| 1.3.6 Méthode des impulsions discrètes | 90 |
| 1.3.7 Limites..... | 90 |
| 1.4 Discussion..... | 91 |
| 2.1 Modèle MPACT..... | 92 |
| 2.2 Aperçus des modèles | 92 |
| 2.2.1 Entrée du modèle | 92 |
| 2.2.2 Calculs des risques individuels..... | 94 |
| 2.2.2.1 Définition du risque individuel..... | 95 |
| 2.2.2.2 Zone de calcul | 96 |
| 2.2.2.3 Distribution et direction du vent | 97 |
| 2.2.2.4 Arbres d'événements (résultats toxiques ou inflammables)..... | 98 |
| 2.2.2.5 Sources d'inflammation et distribution | 99 |
| 2.2.2.6 Matériaux inflammables et toxiques | 100 |
| 2.2.2.7 Résultats des calculs de risques individuels | 101 |
| 2.2.3 Calculs des risques sociétaux | 102 |
| 2.2.3.1 Définition du risque sociétal | 102 |
| 2.2.3.2 Résultats des calculs de risques sociétaux..... | 104 |
| 3. Conclusion..... | 106 |
| <i>Chapitre 5 : Application : étude de cas.....</i> | <i>107</i> |
| 1. Introduction..... | 108 |
| 2. Étude de cas et définition du problème | 108 |
| 3. Analyse quantitative des risques..... | 109 |
| 3.1 Identification des dangers | 110 |
| 3.2 Évaluation probabiliste des dangers potentiels | 111 |
| 3.2.1 Scénarios de l'arbre des événements | 112 |
| 3.3 Performance de l'analyse des conséquences | 115 |
| 3.4 Modèles et logiciels..... | 115 |

| | |
|---|------------|
| 3.5 Résultats des Conséquences | 116 |
| 3.5.1 Résultats de Dispersion et Feu de nuage | 120 |
| 3.5.2 Résultats de Feu de torche..... | 121 |
| 3.5.3 Résultats de Feu de nappe | 122 |
| 3.5.4 Résultats de Boule de feu | 123 |
| 3.5.5 Résultats d'Explosion | 124 |
| 3.6 Effectuer des calculs de risque..... | 126 |
| 3.6.1 Caractérisation de la population..... | 128 |
| 3.7 Résultats en matière de risque | 129 |
| 3.7.1 Risque individuels | 129 |
| 3.7.2 Risque sociétal | 134 |
| 3.7.3 Détermination de la gravité..... | 135 |
| 3.7.4 Placement des Phénomènes dangereux dans la matrice de criticité | 135 |
| 4. Les résultats globaux de l'analyse des risques dans le GL1K de Skikda | 135 |
| 4.1 Analyse détaillée des risques de l'unité 5P / 6P..... | 136 |
| 4.1.1. Section Liquéfaction - Circuit MCR | 136 |
| 4.1.2. Section Liquéfaction - Stockage et appoint MCR | 138 |
| 4.1.3. Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL..... | 140 |
| 4.1.4. Section Fractionnement Déméthanisation | 142 |
| 4.2 Analyse détaillée des risques de l'unité 10 | 147 |
| 4.2.1. Section Circuit GNT / GNL..... | 147 |
| 4.2.2. Section Circuit MCR | 149 |
| 4.2.3. Section Compression MCR | 151 |
| 4.2.4. Section Fractionnement Dééthanisation | 153 |
| 4.3 Analyse détaillée des risques du Stockage du GNL, l'unité GPL et les unités annexes..... | 157 |
| 4.3.1. Bacs du Stockage du GNL..... | 157 |
| 4.3.2. L'unité GPL..... | 162 |
| 4.3.2.1 Section Séparation propane/butane..... | 162 |
| 2.2 Section Stockage et réfrigération du cycle propane | 163 |
| 2.3 Section Stockage et réfrigération du cycle butane | 165 |
| 4.3.3. Les unités annexes & utilités | 169 |
| 3.1 Section Stockage de gazoline | 169 |
| 4.4 Analyse détaillée des risques de l'unité MEGA Train | 173 |
| 4.4.1. Section Liquéfaction | 174 |
| 4.4.2. Section Fractionnement..... | 175 |
| 4.4.3. Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène | 177 |
| 4.4.4. Section Système frigorigène propane externe..... | 179 |
| 5. Les résultats globaux de la matrice des risques de la zone industrielle GL1K Skikda..... | 183 |
| 5.1. Matrice des risques globale | 183 |
| 5.2. Cartographies..... | 183 |
| 5.3. Bilan du complexe GL1K | 183 |
| 6. Discussion des résultats finaux | 187 |
| Recommandations..... | 187 |
| Risques sur site..... | 187 |
| Risques hors site..... | 189 |
| Potentiel d'escalade | 189 |
| 5. Conclusions | 189 |

| | |
|---|-----|
| <i>Conclusion Générale</i> | 190 |
| <i>Perspectives</i> | 194 |
| <i>Références bibliographiques</i> | 195 |
| <i>Annexe A : Identification des risques au niveau de GL1K Skikda</i> | 203 |
| 1. Unité méga train..... | 204 |
| 2. Unité 5P / 6P et 10 | 209 |
| 3. Unité stockage GNL..... | 213 |
| 4. Unité GPL..... | 214 |
| 5. Scénarios de déversement de procédé | 215 |
| <i>Quantification des risques</i> | 216 |
| 1. Quantification de la fréquence..... | 216 |
| 2. Principes d'évaluation de la gravité : | 216 |
| 3. Hiérarchisation des risques – Positionnement de risque dans la matrice | 217 |
| <i>Annexe B : Travaux de recherche publiés</i> | 220 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Analyse, évaluation et gestion des risques | 17 |
| Figure 2 : Analyse des tendances des accidents de 1988 à 2012 | 18 |
| Figure 3 : Développements en science et en ingénierie pertinents pour la sécurité des procédés | 19 |
| Figure 4 : Modèle de Houston du processus d'accident | 25 |
| Figure 5 : Modèle d'accident d'arbre de défaillance | 25 |
| Figure 6 : Modèle MADS | 26 |
| Figure 7 : Modèle d'accident qui intègre les échecs humains, organisationnels et externes | 26 |
| Figure 8 : Arbre d'événements pour les rejets de GPL | 30 |
| Figure 9 : Méthodologie de l'analyse quantitative des risques adaptée | 33 |
| Figure 10 : Paramètres nécessaires à la modélisation d'un scénario d'accidents | 34 |
| Figure 11 : Arbre typique des incidents potentiels générés par un rejet de produit dangereux | 35 |
| Figure 12 : Schéma d'un arbre des événements | 36 |
| Figure 13 : Classification des événements indésirables | 38 |
| Figure 14 : Processus global d'analyse des conséquences | 39 |
| Figure 15 : Relation entre la variable probit et le pourcentage d'atteinte | 42 |
| Figure 16 : Exemple de contours d'iso-risque individuel | 44 |
| Figure 17 : Étapes de calcul des contours du risque individuel | 45 |
| Figure 18 : Exemple d'une courbe F-N | 46 |
| Figure 19 : Explosion idéale d'un nuage de vapeur comme base des courbes Multi-énergie | 56 |
| Figure 20 : Décroissance de la surpression latérale de pointe en fonction de la distance | 57 |
| Figure 21 : Décroissance de la pression dynamique de pointe en fonction de la distance | 58 |
| Figure 23 : Durée de l'impulsion Vs à l'échelle de la distance du centre de l'explosion et de la forme de l'impulsion | 59 |
| Figure 24 : Exemple de limites du nuage à un moment précis | 64 |
| Figure 25 : Exemple d'un nuage de vapeur commençant dans une région obstruée | 65 |
| Figure 26 : Distance critique de séparation recommandée par le RIGOS | 67 |
| Figure 27 : Illustration d'un nuage UDM se déplaçant à travers une région obstruée | 69 |
| Figure 28 : Coupe horizontale d'une vue de nuage coupée par des régions obstruées | 70 |
| Figure 29 : Coupe verticale d'une vue de nuage et des régions obstruées | 70 |
| Figure 30 : Surface d'une ellipse tronquée | 71 |

| | |
|---|-----|
| Figure 31 : Validation de la surpression réfléchie prédite par l'équation (33) pour les ondes de pression | 79 |
| Figure 32 : Interaction entre l'onde de choc et le installation..... | 80 |
| Figure 33 : Calcul de la probabilité de décès PE, FE,in et FE, due à l'exposition à une explosion/explosion | 85 |
| Figure 34 : vulnérabilité pour les 4 différents types de installations | 86 |
| Figure 35 : Exemple de pression d'impulsion montrant une vulnérabilité de 1 %, 50 % et 100 | 88 |
| Figure 36 : Comparaison des méthodes de la CIA, du Probit et du Purple Book | 90 |
| Figure 37 : Données globales d'entrée et de sortie pour le modèle MPACT | 93 |
| Figure 38 : La grille de calcul des risques MPACT..... | 95 |
| Figure 39 : Probabilités de direction du vent illustrées comme une dose de vent | 96 |
| Figure 40 : Arbre d'événements généralisé illustrant la logique appliquée dans MPACT | 97 |
| Figure 41 : Un exemple de la fonction de probabilité d'allumage..... | 98 |
| Figure 42 : Exemple de l'affichage du contour du risque | 100 |
| Figure 43 : Exemple de résultats des points de classement des risques individuels | 101 |
| Figure 44 : Exemple d'une courbe FN..... | 104 |
| Figure 45 : Exemple de résultats en matière de risques sociétaux | 104 |
| Figure 46 : méthodologie de l'étude | 108 |
| Figure 47 : schémas de processus de l'unité 5P | 109 |
| Figure 48 : noeud papillon de scenario rupture de Circuit LNG..... | 113 |
| Figure 49 : Représentation des zones d'effet possible de feu de nuageet feu de torche | 117 |
| Figure 50 : Représentation des zones d'effet possible de l'explosion, Boule de feu, feu de nappe..... | 118 |
| Figure 51 : FN courbe modèle | 126 |
| Figure 52 : Répartition de la population dans le site industrielle..... | 128 |
| Figure 53 : courbes de dépassement Surpression de scenario de rupture circuit GNL | 131 |
| Figure 54 : Les Courbes de dépassement Thermique de scenario de rupture circuit GNL..... | 132 |
| Figure 55 : FN curves de la population sur site. | 133 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : résumé des définitions de risque et danger | 9 |
| Tableau 2 : revue des certains accidents les plus catastrophiques survenus entre 1980 et 2011 | 20 |
| Tableau 3 : Fréquences d’occurrence pour des événements initiateurs | 37 |
| Tableau 4 : Probabilité de défaillance pour différents types de barrières | 37 |
| Tableau 5 : Seuil d’effet de surpression défini par la réglementation française | 40 |
| Tableau 6 : Seuils d’effets thermiques définis par la réglementation française..... | 40 |
| Tableau 7 : Corrélations probit pour différents types d’exposition | 42 |
| Tableau 8 : données permettant de définir un nuage | 64 |
| Tableau 9 : Charges exercées sur le installation par une onde de choc incidente..... | 80 |
| Tableau 10 : Population à l’intérieur | 86 |
| Tableau 11 : Population à l’extérieur..... | 86 |
| Tableau 12 : Type de installation 1..... | 87 |
| Tableau 13 : Type de installation 2..... | 87 |
| Tableau 14 : Type de installation 3..... | 87 |
| Tableau 15 : Type de installation 4..... | 87 |
| Tableau 16 : sections de l’Unit 5P/6P..... | 110 |
| Tableau 17 : Probabilité d’inflammation immédiate | 112 |
| Tableau 18 : les données d’entrée utilisées dans l’étude. | 115 |
| Tableau 19 : conditions météorologiques | 116 |
| Tableau 20 : résultat de dispersion et feu de nuage | 119 |
| Tableau 21 : résultat de feu de torche..... | 120 |
| Tableau 22 : résultat de feu de nappe | 121 |
| Tableau 23 : résultat de Boule de feu | 122 |
| Tableau 24 : résultat d’Explosion | 124 |
| Tableau 25 : scenarios effets sur les structures /population..... | 125 |
| Tableau 26 : Population sur site..... | 127 |
| Tableau 27 : résultat du risque individuel..... | 130 |
| Tableau 28 : répartition du installation en fonction de l’énergie reçue. | 131 |
| Tableau 29 : Niveau de gravité des conséquences indésirable | 134 |
| Tableau 30 : matrice de criticité | 134 |

Introduction

Générale

1. Introduction

L'industrie des procédés aujourd'hui s'occupe non seulement de la production, mais également de la sécurité des installations. Le but de l'analyse des risques est de s'assurer que les risques industriels soient suffisamment faibles en implantant des moyens de prévention-protection pour que ces risques soient situés dans une zone de risque acceptable ou au moins dans une zone tolérable par le principe (as low as reasonably practicable ALARP) [1].

La prévention des accidents industriels majeurs ayant des conséquences graves sur la population, les équipements et l'environnement reste un souci important pour les décideurs et les experts industriels. En effet, même si des mesures de sécurité classiques (normes d'ingénierie, barrières techniques et organisationnelles, inspections, listes de contrôle, etc.) sont systématiquement adoptées, ces accidents majeurs continuent de se produire [2].

Dans l'industrie pétrolière durant la production, le transport et le stockage des substances inflammables, des gaz, des vapeurs inflammables s'échappent. Ces matières peuvent former des atmosphères explosibles avec l'oxygène de l'air. Nous verrons plus loin les conditions de formation et d'inflammation de ces atmosphères. Lorsque celles-ci s'enflamment, elles donnent lieu à des explosions qui peuvent causer d'importants dommages aux personnes, aux biens et à l'environnement.

Il y a eu tant d'exemples d'accidents spectaculaires d'explosion de nuage de vapeur (VCE) [3] Le secteur pétrolière en Algérie a également enregistré des catastrophes industrielles marquantes ayant occasionné des impacts et des effets négatifs dévastateurs sur les biens, sur la population et sur l'environnement, telle que l'explosion de Skikda en 2004, ou un (VCE), initié dans une chaudière des trains de gaz naturel liquéfié (GNL), a causé la mort de 27 personnes et plus 80 autres blessés. Ces accidents majeurs indésirés ont eu de graves conséquences en termes de pertes de vies humaines en premier lieu, et de pertes des centaines de millions de dollars à l'économie [4]. Ces pertes humaines et financières pourraient être évitées si les scénarios des accidents étaient préalablement identifiés et correctement atténués par des barrières de sécurité. Cette situation négative a engendré des changements importants : des lois, directives [5], ainsi que normes [6] ont été élaborées pour améliorer le niveau de sécurité à tous les niveaux. Pour cela une méthodologie de prédiction des risques est nécessaire [7].

Le développement rapide de la technologie dans les installations industrielles existantes et émergentes, l'amélioration de la sécurité de ces installations est devenue une phase importante

pour minimiser les risques. Au cours des dernières décennies, plusieurs méthodes d'analyse des risques (qualitatives et semi-quantitatives) ont été développées, telles que l'analyse des couches de protection, en anglais (layer of protection analysis LOPA), la matrice des risques, la carte des risques, etc. Cependant, ces méthodes se révèlent souvent insuffisantes à elles seules sans les compléter par des modèles analytiques [8]. Pour cela, et dans telles situations, les analystes de risques se réfèrent souvent à l'analyse quantitative des risques (QRA), qui repose sur la compréhension et la quantification des caractéristiques des phénomènes accidentels à travers différentes méthodes et modèles qui donnent des résultats proches de la réalité.

L'analyse quantitative des risques (QRA) a d'abord été utilisée dans les industries nucléaires, puis étendue à d'autres domaines industriels. Cependant, son application dans ce domaine n'est pas toujours claire, en raison de l'hétérogénéité des procédés, des matières dangereuses et des équipements employés. Cette complexité nécessite un développement continu et une optimisation des approches et techniques relatives à un (QRA) [9].

Le (QRA) est une approche solide et cruciale pour une bonne évaluation et une bonne gestion des risques industriels. Elle consiste essentiellement à identifier les événements accidentels potentiels, à estimer leur fréquence et à analyser leurs conséquences, en utilisant des méthodes appropriées (HAZOP ou HAZID, arbre des défaillances, arbre des événements, modèles physiques et empiriques des effets, modèles de vulnérabilité, etc.). L'objectif est d'estimer les risques individuels et sociétaux et, par conséquent, d'étudier et d'appliquer des mesures appropriées qui répondent efficacement à cette évaluation [10–12]. Il convient de souligner que l'analyse des conséquences est un élément clé de (QRA) et constitue une étape indispensable dans le processus de gestion des risques où les conséquences de chaque événement accidentel potentiel doivent être quantifiées et évaluées. Divers modèles et algorithmes de vulnérabilité ont été développés pour modéliser différents types d'accidents majeurs et pour prévoir leurs conséquences [13–15].

Des efforts importants ont été faits pour étudier les différents angles et mécanismes de ces accidents. De nombreux chercheurs ont développé des approches basées sur des modèles physiques simplifiés ou des corrélations empiriques par exemple la procédure de (the netherlands organisation for applied scientific research TNO) et la courbe équivalente (TNT) qui permettent d'estimer la surpression en fonction de la distance réduite [16–29]. Pourtant, de telles approches ne sont pas très satisfaisantes car elles incluent généralement un facteur de réduction ajusté expérimentalement et surestiment en fait les effets d'incendie et explosion [30–32]. De plus, ils

n'ont pas pleinement pris en compte l'impact des installations, des obstacles sur les installations complexes surpeuplées environnantes, et les résultats fournis par ces approches ne peuvent pas garantir un répertoire suffisant pour mener une analyse quantitative approfondie des risques.

Dans ce contexte, le modèle d'explosion de région obstruée (OREM) peut être utilisée comme solution pour la prise en compte de l'impact des installations sur l'entourage. Pour approfondir la compréhension du phénomène physique menant à l'incendie et explosion, basé sur des modèles analytiques tels que celui de multi-énergie, modèle de risque (VULN) & modèle (MPACT). Ces derniers permettent de modéliser les phénomènes accidentels et de calculer leur impact sur la population et sur les structures environnantes [33].

Par ailleurs, il est nécessaire d'utiliser l'outil SAFETI pour la modélisation, qui semble être un puissant outil supplémentaire pour la recherche expérimentale et théorique (QRA). En fait, la capacité des processeurs informatiques modernes (unités centrales de traitement) continue d'augmenter, faisant de SAFETI un outil puissant pour résoudre efficacement les problèmes de (QRA).

En fait, la simulation utilisant SAFETI a été largement utilisée dans la sécurité des procédés industriels pour évaluer les conséquences d'accidents majeurs, tels que les explosions, les incendies et la propagation de substances inflammables et toxiques causées par des rejets accidentels [11],[13]. En utilisant une résolution numérique suffisamment fine, il est possible de réaliser une simulation de phénomènes d'incendie et d'explosion, en tenant compte de la phase de matière, de la pression et de la température comme des inputs. Et en tenant compte également des outputs comme la turbulence, des processus de combustion, du transfert de chaleur et des formes géométriques.

Finalement, les niveaux de gravité et de probabilité d'occurrence sont croisés dans une matrice de criticité afin de positionner les zones de risque. Les effets des conséquences indésirables modéliser pour le GL1K Skikda ou habitat autour du complexe présentant le niveau de gravité. La matrice Gravité/Occurrence (voir Annexe A) est proposée par la grille de criticité de la réglementation française (circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents) [34].

2. Objectifs de l'étude

La matrice des risques est une représentation cartographique de la fréquence d'occurrence et de la gravité de l'impact d'un ou de plusieurs risques. Les risques sont présentés de manière à identifier les risques les plus significatifs. Dans ce sens, notre travail a pour l'identification, l'évaluation et le contrôle des risques liés à la zone industrielle GLIK de la ville de Skikda. En premier lieu, cette étude portera, sur le recensement des risques engendrés par ce type d'industrie et de les présenter de façon permettant de repérer les risques majeurs, en d'autres termes de dresser un état des lieux complet des vulnérabilités. Le travail mené répondre aux questions méthodologiques en intégrant des modèles de la physique analytique et numérique dans la (QRA). Le premier modèle (OREM) proposé permettra d'estimer les effets d'un accident d'incendie ou d'explosion avec différentes caractéristiques, notamment les effets thermiques et la surpression, et d'estime également les zones à risque afin d'établir un plan d'intervention ou d'évacuation. Le modèle (VULN) convertit les résultats obtenus par le model (OREM) en probabilité de préoccupation. Enfin Le modèle (MPACT) calcule l'impact du rejet inflammable sur la population.

La dernière étape de cette étude porte sur la réalisation d'une matrice des risques qui constitue un outil d'aide à la décision pour les responsables de l'entreprise Sonatrach.

3. Structure de la thèse

Le présent manuscrit de thèse comporte quatre chapitres :

— Le premier chapitre a pour objectif de présenter une vue générale sur les concepts de sécurité et risque.

— L'objectif du deuxième chapitre est de présenter l'état de l'art en matière d'analyse quantitative des risques. Nous commençons par décrire les objectifs d'une étude (QRA), puis nous examinons le fonctionnement de l'approche quantitative en expliquant ses différentes étapes. Enfin, nous décrivons les diverses applications de la (QRA) dans le secteur des procédés industriels, ses avantages et ses inconvénients.

— Dans le troisième et quatrième chapitre, nous présentons d'abord l'approche de modélisation analytique basée sur le modèle multi-énergie en décrivant ses principes et ses fondements théoriques. Nous présentons également une validation de l'approche proposée avec des données issues de différentes expériences. Enfin, nous présentons les modèles de calcul du risque sociétal

et individuel avec les modèles proposés avec le modèle de risque (VULN) et le modèle MPACT et d'autres modèles physiques simplifiés et empiriques.

—Afin de démontrer l'intérêt pertinent des approches proposées dans les chapitres précédents, le cinquième chapitre sera consacré à leur application à un système opérationnel l'unité 5P situé au GL1K liquéfaction de gaz naturel de la compagnie Sonatrach situé dans la zone industrielle pétrochimique de Skikda.

Enfin, cette thèse est clôturée par une conclusion générale décrivant les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives envisagées.

Chapitre 1

Aperçu des concepts de sécurité et de risque

1. Introduction

Le risque industriel est aujourd'hui omniprésent dans notre vie quotidienne. Avec l'émergence et la multiplication des grandes industries, les dangers et les accidents se multiplient. En effet, la fabrication de la plupart des produits de grande consommation nécessite des industries chimiques ou pétrolières qui sont génératrices des risques. Les substances dangereuses utilisées par ces industries, ce sont des matières inflammables et ils présentent des risques pour la santé et l'environnement, parmi ces substances les hydrocarbures [35].

À l'origine de tout événement il existe un risque ou danger qui sous certaines conditions peut conduire un accident grave. Les risques majeurs sont à l'origine des accidents industrielle générés par les ateliers de fabrication et les aires de stockage des différents produits chimiques comme les hydrocarbures. Par ces caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité, les hydrocarbures présentent des risques d'accidents majeurs qui apparaissent lors d'exploration, de production, de raffinage, de stockage et de transport. Les risques causés par les activités pétrolières se manifestent sous quatre formes : le risque d'incendie, le risque d'explosion, le risque toxique et le risque environnementale [36].

Dans ce présent chapitre, nous exposerons tout d'abord les définitions du risque industriel et ses différentes formes. Nous présenterons ensuite les causes des accidents industriels et leurs impacts sur la santé des personnes, l'environnement et l'économie. Et puis, nous essayerons d'exposer la méthode d'analyse et de gestion des risques industriels.

2. Aperçu des concepts de sécurité et de risque

2.1 Définition des concepts de base

Dans les pages qui suivent, nous allons essayer de présenter un aperçu des concepts de base requis pour parcourir le reste des chapitres. La plupart des définitions sont citées à partir de normes et de références internationales.

2.1.1 Risques et dangers

On trouve de nombreuses définitions des termes « risque » et « danger » dans la littérature ; le tableau 1 résume certaines de ces définitions :

Tableau 1 : résumé des définitions de risque et danger.

| Terme | Définition | Référence |
|------------------------------------|---|---|
| Risque | Combinaison de la probabilité de survenance d'un événement dangereux ou d'une exposition et de la gravité des blessures ou de la mauvaise santé pouvant être causées par l'événement ou l'exposition | (British Standards Institution 2007) [37] |
| | Une combinaison de danger et de probabilité d'occurrence du danger | (Khan et Abbasi 1998)[38] |
| | La réponse combinée à trois questions : (1) Qu'est-ce qui peut mal tourner ? (2) Quelle est la probabilité que cela se produise ? Et (3) Quelles sont les conséquences ? | (Rausand 2011) [2] |
| Risque technologique majeur | Le risque technologique majeur, dû à l'activité humaine, est la menace d'un événement de grande ampleur lié à la manipulation, au stockage ou au transport de substances dangereuses et dont on craint des conséquences graves, immédiates ou différées, pour l'homme et l'environnement. | INIRIS [39] |
| Risque chimique | Une conséquence de la présence de dangers | (Reniers 2010) [40] |
| Danger | Source, situation ou acte susceptible de nuire en termes de blessure ou de mauvaise santé humaine, ou une combinaison de ces éléments. | (British Standards Institution 2007) [37] |
| | Le degré de préjudice causé aux êtres humains, aux biens, à la société ou à l'environnement | (Khan et Abbasi 1998) [38] |
| | Toute condition réelle ou potentielle pouvant causer des blessures, des maladies ou la mort du personnel ; les dommages à un système, un équipement ou un bien, ou la perte de ceux-ci ; ou les dommages causés à l'environnement. | (MIL-STD-882D 2000) [41] |
| | Une source de danger qui peut causer un préjudice à un bien. | (Rausand 2011) [2] |
| | Un événement ou une situation susceptible d'entraîner des conséquences négatives ou dommages à l'homme et/ou à l'environnement. | (Hale et Glendon et Villemeur) [42] |
| Danger chimique | Un ensemble de circonstances qui peuvent avoir des conséquences néfastes | (Rausand 2011) [2] |

2.1.2 Autres concepts associés au risque

- Incident

Un incident peut être défini comme un "événement qui a donné lieu à un accident ou a eu le potentiel de conduire à un accident" [37] ou "un événement non planifié et imprévu qui peut ou non entraîner des dommages à un ou plusieurs biens" [2].

- Accident

Un accident est défini dans la norme OHSAS 18001 (British Standards Institution 2007) [37] comme un "événement indésirable entraînant la mort, la mauvaise santé, des dommages corporels ou une perte". Selon [2], un accident est "un événement ou une séquence d'événements soudains, non désirés et non planifiés qui entraîne des dommages aux personnes, à l'environnement ou à d'autres biens".

- Sécurité

La sécurité est l'absence de conditions susceptibles de causer la mort, des blessures, des maladies professionnelles, des dommages ou des pertes d'équipements ou de biens, ou des dommages à l'environnement [41].

- Matières dangereuses

Toute substance qui, en raison de sa nature chimique, physique ou biologique, suscite des préoccupations en matière de sécurité, de santé publique ou d'environnement, dont la gestion nécessiterait un niveau d'effort élevé [41].

- L'effet domino

L'effet domino est la propagation d'un événement accidentel primaire aux unités voisines, causant leurs dommages et d'autres événements accidentels secondaires résultant en un scénario global plus grave que l'événement primaire qui a déclenché l'escalade [43].

- Défaillance

Une défaillance c'est une condition anormale qui peut entraîner une détérioration ou une perte de la capacité d'une unité à remplir une fonction requise [44].

- Détection et diagnostic des défaillance

Ces techniques sont généralement utilisées pour détecter, évaluer et déterminer le lieu et le moment de la détection de la panne la plus possible [44].

- Fiabilité

Ce concept est défini par (ISO 1994) [45] comme "la capacité d'un élément (composant, sous-système ou système) à remplir une fonction requise, dans des conditions environnementales et opérationnelles données et pendant une période de temps déterminée".

- Qualité

Défini par (ISO 1994) [45] comme "l'ensemble des caractéristiques et des propriétés d'un produit ou d'un service qui influent sur son aptitude à satisfaire des besoins déclarés ou implicites".

- Disponibilité

La capacité d'un objet à remplir sa fonction requise à un moment donné ou pendant une période donnée" [46]. La disponibilité au moment t est :

$$A(t) = \text{Pr}(\text{le poste fonctionne au temps } t) \quad (1.1)$$

La disponibilité moyenne (A_{av}) est de :

$$A_{av} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR}) \quad (1.2)$$

Où : MTBF (Mean Time Between Failures) est le temps moyen de fonctionnement de l'article, et MTTR (Mean Time to Repair) est le temps moyen d'immobilisation après une panne.

- Sécurité du système

L'application de principes, critères et techniques d'ingénierie et de gestion pour parvenir à un risque d'accident acceptable, dans les limites de l'efficacité et de l'adéquation opérationnelles, du temps et du coût, à toutes les phases du cycle de vie du système [41].

- Ingénierie de la sécurité des systèmes

Une discipline de l'ingénierie qui fait appel à des connaissances et des compétences professionnelles spécialisées dans l'application de principes, de critères et de techniques scientifiques et d'ingénierie pour identifier et éliminer les dangers, afin de réduire le risque d'accident associé [41].

- Critères d'acceptation des risques

Les critères d'acceptation des risques sont définis par comme des "critères qui sont utilisés pour exprimer un niveau de risque considéré comme la limite supérieure pour que l'activité en question soit tolérable" [47].

- Sécurité et Risque

Cet aspect est défini par Arendt & Lorenzo [48] comme "une mesure de la blessure humaine, du dommage environnemental ou de la perte économique en termes de probabilité d'incident et d'ampleur de la perte ou de la blessure".

- Sûreté et Risque

C'est comme "la probabilité qu'une menace définie exploite une vulnérabilité spécifique d'une cible attrayante particulière ou d'une combinaison de cibles pour provoquer un ensemble donné de conséquences" [49].

2.2 Risques industriel majeurs

Le risque industriel majeur est défini comme un événement accidentel se produisant sur un site industriel mettant en jeu des produits et/ou des procédés dangereux et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement. Afin d'en limiter la survenue et les conséquences, les établissements les plus dangereux sont soumis à une réglementation particulière (classement des installations) et à des contrôles réguliers. Néanmoins, ce n'est pas parce qu'un site n'est pas classé qu'il ne présente pas de danger [6].

Les principaux risques majeurs auxquels l'industrie est confrontée sont les incendies, les explosions et les rejets toxiques. Parmi ces trois risques, l'incendie est le plus courant mais, l'explosion est particulièrement importante en termes de décès et des pertes pour les biens ou l'environnement [50]. Au Royaume-Uni, l'explosion à Flixborough a tué 28 personnes, tandis qu'au large, 167 hommes sont morts dans l'explosion et l'incendie de la plate-forme pétrolière Piper Alpha [51].

Pour éviter l'occurrence des risques industriel majeurs, c'est essentiellement d'éviter la perte de confinement. Il s'agit non seulement de maîtriser la dispersion de matériaux à cause de fuites, mais aussi d'éviter une explosion à l'intérieur des cuves et des tuyauteries de l'usine [52].

Voici quelques facteurs qui déterminent la gravité du danger.

- (1) Stockage ;
- (2) Le facteur énergétique ;
- (3) Le facteur temps
- (4) Les relations intensité-distance ;
- (5) Le facteur d'exposition

(6) Les relations entre l'intensité des dommages et l'intensité des blessures.

Ces facteurs sont décrits ci-dessous :

2.2.1 Stockage

Le facteur principal qui détermine la gravité du danger est le stockage de la matière dangereuse. Plus le stockage de matériel est grand, plus le dégât potentiel est important. Comme les zones industrielles ont augmenté leur dimension et leur production, les métiers en traitement et en stockage ont augmenté. Par conséquent l'importance des inventaires est reconnue. Il est important de souligner que le Stockage n'est pas le seul facteur qui détermine la gravité du danger [52], [53].

2.2.2 Le facteur énergétique

Pour qu'un inventaire de matières dangereuses explose à l'intérieur de l'usine ou se disperse sous la forme d'un nuage de vapeur inflammable ou toxique. Dans la plupart des cas, cette énergie est stockée dans la matière elle-même sous forme d'énergie de réaction chimique ou d'état de la matière. En particulier, une matière qui est maintenue sous forme liquide au-dessus de son point d'ébullition normal à haute pression et à haute température, c'est-à-dire surchauffée, contient de grandes quantités d'énergie, qui font qu'une grande partie de celle-ci se vaporise par éclatement instantané et se disperse en cas de perte de confinement. Par contre, une substance qui est maintenue sous forme de liquide réfrigéré à la pression atmosphérique contient moins d'énergie et ne se vaporise pas dans la même façon de cas précédente en cas de perte de confinement. Dans ce cas, l'énergie nécessaire à la vaporisation doit être fournie par l'extérieur (conduction ou rayonnement), ce qui est un processus relativement lent [54]. De même, le danger présenté par un matériau ultra toxique dépend très largement de la disponibilité de l'énergie nécessaire à sa dispersion. Il y a un danger, par exemple, si une substance toxique est produite comme sous-produit dans un réacteur chimique dans lequel une réaction exothermique peut se produire. Mais s'il n'y a pas de telle source d'énergie, le danger est bien moindre. Le besoin en énergie est donc une autre caractéristique fondamentale. Si elle n'est pas prise en compte dans le calcul, les scénarios envisagés peuvent être non seulement improbables, mais littéralement impossibles physiquement [55].

2.2.3 Le facteur temps

Un autre facteur est l'évolution du danger dans le temps [56]. Le facteur temps affecte à la fois le taux de libération et le temps d'avertissement. La nature et l'ampleur du danger sont souvent déterminées par le taux de libération en plus de facteur de stockage. Ainsi, c'est le taux de libération qui détermine la taille d'un nuage de gaz inflammable formé à partir d'un jet d'hydrocarbure liquide, comme cela s'est produit à Flixborough. De même, le danger présenté par une fuite de gaz toxique dépend du taux de rejet. Il existe une différence considérable dans les concentrations atteintes entre un rejet instantané et un rejet continu de gaz toxique [51].

Le temps d'alerte disponible pour prendre des contre-mesures d'urgence et réduire le nombre de personnes exposées est également très important. Une explosion donne un temps d'alerte qui est généralement mesuré en secondes et peut-être zéro, alors qu'un rejet toxique donne un avertissement qui est souvent mesuré en minutes [56].

2.2.4 La relation intensité-distance

Une caractéristique importante du danger est la distance sur laquelle il peut causer des blessures et/ou des dommages. En général, le feu a la plus courte distance potentielle, puis l'explosion et enfin le rejet toxique. La distance d'effet d'une boule de feu est considérable et la distance d'effet d'un incendie ou d'une explosion à partir d'un nuage de vapeur est beaucoup plus étendue si le nuage s'éloigne de sa source de dispersion. Il est possible de dériver des modèles physiques plus simples pour les différentes expressions analytiques des dangers qui donnent la variation de l'intensité de l'effet physique (rayonnement thermique, surpression, concentration toxique) en fonction de la distance. Pour certains modèles, la variation suit approximativement la loi de l'inverse du carré [57]. En ce qui concerne l'exposition du public aux dangers des procédés, il est intéressant de connaître la distance à laquelle il pourrait y avoir un nombre important de décès ou de blessures et la distance maximale à laquelle tout décès ou blessure pourrait se produire. Les estimations de la distance nécessaire pour réduire le risque d'incendie et d'explosion pour les membres du public à un niveau que l'on suppose non inacceptable, sur la base de critères tels que le rayonnement thermique du feu et la surpression due à l'explosion, sont généralement de l'ordre de (250_ 500 m) pour une grande installation manipulant des hydrocarbures, mais peuvent être inférieures ou supérieures. Les estimations de la distance nécessaire pour réduire le risque de rejet toxique ont tendance à être un peu plus importantes [37], [58–60]. La distance maximale à laquelle

il pourrait y avoir des morts ou des blessés ne peut être déterminée avec une grande précision. L'effet d'explosion qui peut se produire à la plus grande distance est l'éclatement du bac cela s'est produit à des distances allant jusqu'à 20 miles d'une très grande explosion [1], [61], [62] Mais dans de tels cas, l'énergie des fragments de bacs est faible et ne cause que très rarement des blessures. De même, les cas de blessures causées par un gaz toxique à grande distance, disons plus de 10 miles, sont rares, mais on signale qu'ils se sont produits [63]. Les effets de l'incendie et de l'explosion sont examinés plus en détail dans les chapitres qui suivent. Bien qu'un effet potentiel d'un danger soit souvent exprimé en fonction de la distance, c'est la zone couverte par l'effet qui détermine le nombre de personnes à risque [64].

2.2.5 Le facteur d'exposition

Un facteur qui peut grandement atténuer les effets potentiels d'un incident est la réduction de l'exposition des personnes qui se trouvent dans la zone touchée [55]. Cette réduction de l'exposition peut être due à des caractéristiques qui s'appliquent avant que le danger ne se développe, ou à des mesures d'urgence qui sont prises après que le danger ait été reconnu. Les principales caractéristiques atténuantes sont l'abri et la fuite. La fuite peut se faire par une initiative personnelle ou par une évacuation planifiée à l'avance. Il ne faut pas supposer que les mesures d'urgence sont synonymes d'évacuation. Une combinaison d'évacuation, d'abri sur place ainsi que d'autres mesures peuvent être prises en fonction de l'événement ainsi que des évaluations de la planification préalable [65].

Pour les rejets de substances inflammables, l'évacuation du personnel dehors la zone à risque est toujours bénéfique et permet de réduire le nombre de victimes. En outre, pour les rejets toxiques, les instructions d'urgence peuvent consister à évacuer la zone, mais il est plus probable qu'elles consistent à rester à l'intérieur et à sceller l'espace. Les mesures d'urgence peuvent être très utiles pour réduire le nombre de victimes d'un incident majeur. Pour une explosion qui ne donne pas d'avertissement préalable, il n'y a pas de temps pour des mesures d'urgence telles que l'évacuation. Cela ne signifie pas pour autant que l'évacuation n'a aucun rôle à jouer en ce qui concerne l'incendie et l'explosion. Au contraire, bien que l'événement initial puisse être soudain, il y a souvent d'autres risques d'incendie et d'explosion. L'évacuation peut alors être applicable [65], [66].

2.2.6 Les relations intensité-dommages et intensité-blessures

La portée du danger dépend également des relations entre l'intensité de l'effet physique et la proportion de personnes qui souffrent de blessures à ce niveau de l'effet [67], [68]. La zone annulaire à l'intérieur de laquelle la blessure se produit est déterminée par l'étendue de la distribution des blessures. Si l'étendue est faible, la zone de la blessure sera relativement étroite, tandis que si elle est large, la zone peut s'étendre beaucoup plus loin. Des considérations similaires s'appliquent aux dommages [69], [70].

3. Analyse, évaluation et gestion des risques

3.1 Analyse des risques

L'analyse des risques peut être définie comme une utilisation systématique des informations disponibles pour identifier les dangers et estimer le risque pour les personnes, les biens et l'environnement [71]. Cette approche proactive comporte principalement trois étapes, comme le montre la figure 1. La première étape consiste à identifier les dangers, les menaces et les événements dangereux potentiels. Ensuite, les causes possibles de chaque événement dangereux sont identifiées ainsi que la probabilité (fréquence) en utilisant des données d'expérience et/ou des jugements d'experts ; cette étape est classée comme une analyse déductive. [10]. Enfin, les résultats et leur probabilité d'occurrence, induits par une séquence d'événements dangereux, sont identifiés dans l'analyse des conséquences (analyse inductive) [2].

3.2 Évaluation des risques

Dans cette approche, l'analyste compare généralement les résultats de l'analyse des risques et les critères d'acceptation des risques pour définir la conséquence la plus dangereuse (celle qui dépasse les critères d'acceptation des risques est considérée comme dangereuse). L'évaluation des risques est définie par comme le "processus par lequel des jugements sont portés sur la tolérabilité du risque sur la base d'une analyse des risques et en tenant compte de facteurs tels que les aspects socio-économiques et environnementaux" [71].

3.3 Gestion des risques

La gestion des risques est un processus de gestion continu ayant pour objectif d'identifier, d'analyser et d'évaluer les dangers potentiels dans un système ou liés à une activité, et d'identifier

et d'introduire des mesures de contrôle des risques afin d'éliminer ou de réduire les dommages potentiels pour les personnes, l'environnement ou d'autres actifs [2]. La figure 1 résume les trois approches susmentionnées (analyse des risques, évaluation des risques et gestion des risques) et leurs principales étapes.

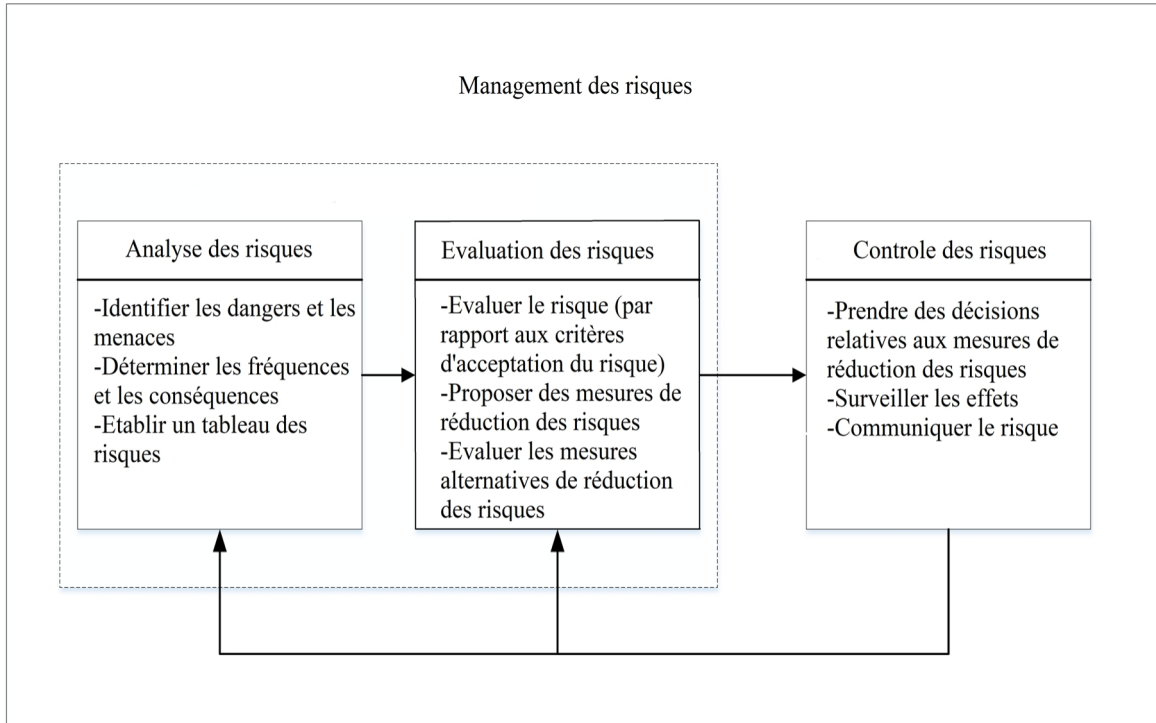


Figure 1 : Analyse, évaluation et gestion des risques [2].

4. Développement de la sécurité des procédés

La demande croissante d'énergie, de produits alimentaires et chimiques (par exemple, les détergents et les peintures) due au développement social et technologique entraîne la complexité des usines de transformation. Cette complexité augmente la probabilité de nouveaux dangers qui menacent les alentours de ces usines. Le danger dans ces usines doit être prévenu et atténué car il peut provoquer des accidents catastrophiques. Les chercheurs et les industriels mettent au point de nombreuses méthodes d'analyse de la sécurité, des risques et de la fiabilité en essayant d'éviter l'apparition d'accidents [38]. Malheureusement, il semble que des accidents se produisent encore et les méthodes développées ne réussissent qu'à diminuer le nombre et la gravité des accidents, mais pas à les éviter définitivement. Faisal Khan et ses collaborateurs [8] ont passé en revue les accidents de procédés survenus au cours des deux dernières décennies en utilisant une base de données open-source telle que le conseil de sécurité chimique des États-Unis. Les résultats de la

base de données utilisée sont présentés dans la figure 2. On peut noter que les occurrences d'accidents et leurs conséquences montrent une fluctuation non uniforme qui peut s'expliquer par l'incertitude et le comportement imprévisible des accidents et de leurs conséquences [8]. Il est évident qu'une solide sécurité des processus et une gestion des risques sont nécessaires pour mieux comprendre le mécanisme des accidents et mettre en place des barrières de sécurité pour prévenir et atténuer leur gravité.

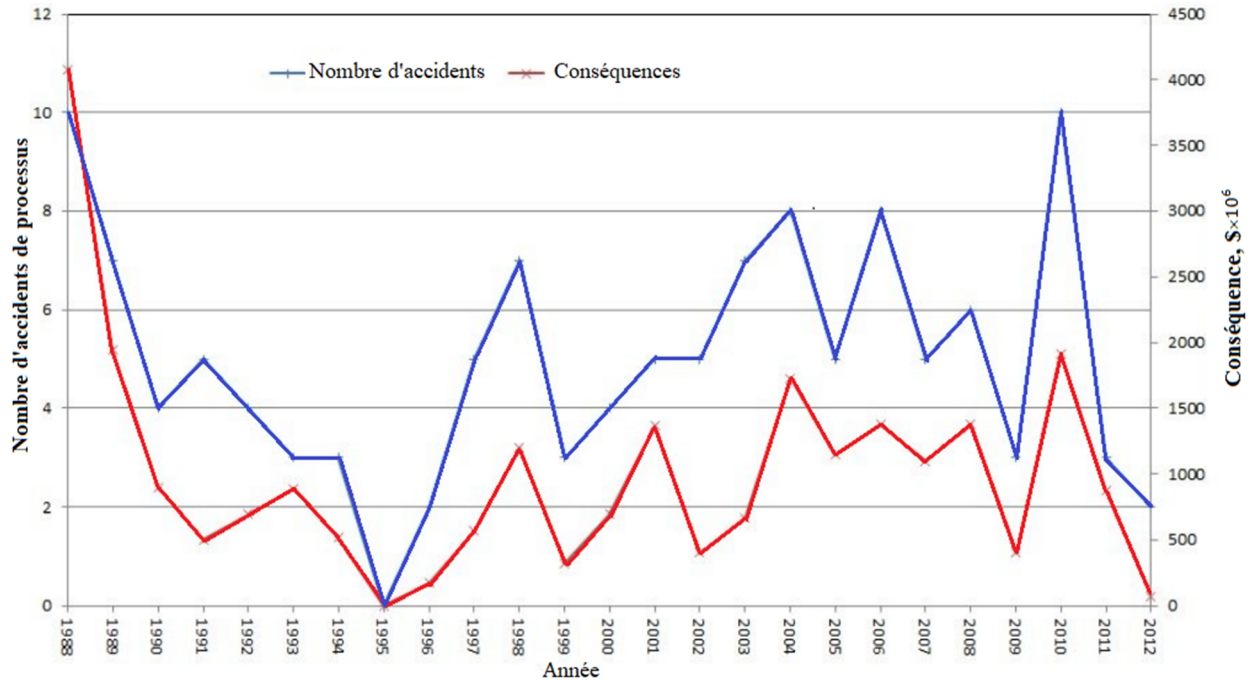


Figure 2 : Analyse des tendances des accidents de 1988 à 2012 [8].

La sécurité des processus et la gestion des risques comprennent différents domaines tels que l'identification des dangers, l'évaluation et la gestion des risques, la modélisation des accidents et la sécurité inhérente. Tous ces aspects partagent un objectif commun, qui est de réduire les risques à un niveau tolérable. À cette fin, des chercheurs de différentes disciplines (en particulier les sciences et l'ingénierie) ont essayé de développer des méthodes pour atteindre la sécurité des processus. La figure 3 montre l'évolution des disciplines relatives à la sécurité des procédés. Dans notre travail, nous nous concentrerons davantage sur les statistiques et l'ingénierie de la fiabilité en utilisant les réseaux bayésiens (ovale jaune et rectangle jaune) et l'intersection entre les statistiques et l'ingénierie de la fiabilité et le système et le contrôle des équipements de procédé.

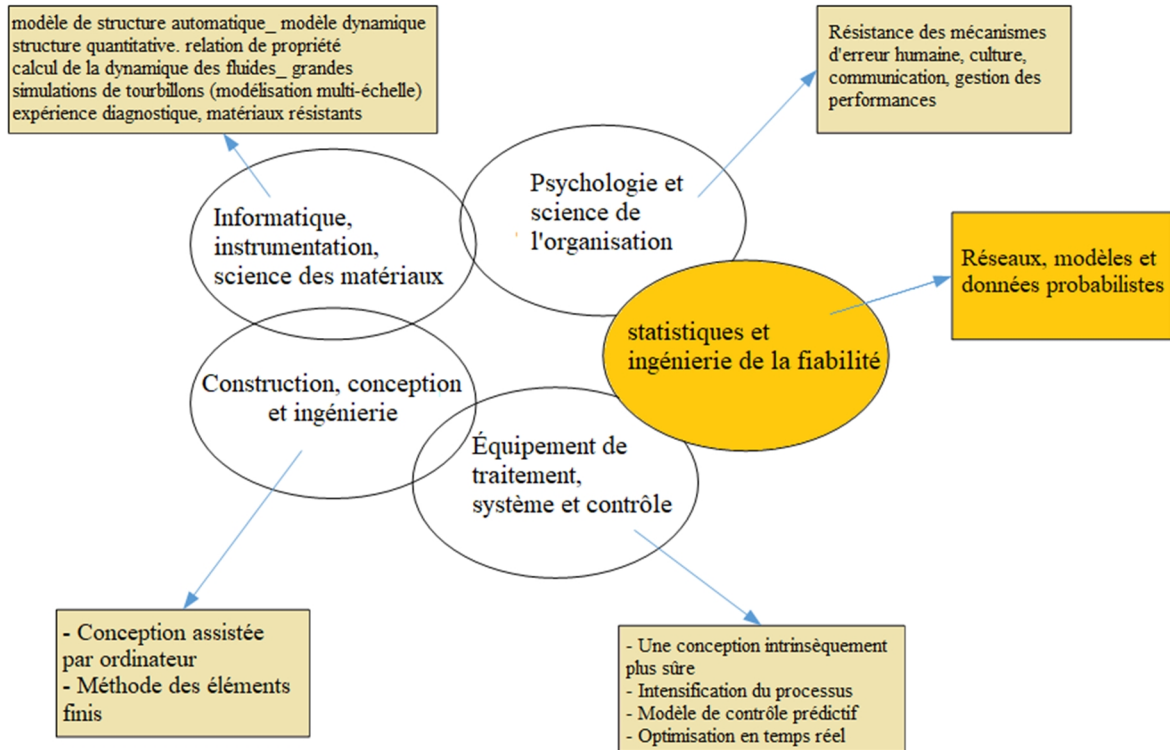


Figure 3 : Développements en science et en ingénierie pertinents pour la sécurité des procédés [72].

4.1 Les accidents les plus catastrophiques des trois dernières décennies

Malgré les efforts considérables déployés pour garantir la sécurité dans l'industrie de transformation en élaborant des mesures de sécurité et en promulguant des lois, des accidents continuent de se produire. Le tableau 2 passe en revue certains des accidents les plus catastrophiques survenus entre 1980 et 2011. Dans les pages qui suivent, nous avons choisi quelques accidents célèbres qui ont causé des pertes précieuses en vies humaines et en économie au cours des trois dernières décennies et nous décrivons l'événement en cascade qui a conduit à l'accident.

Vue d'ensemble de certains des accidents majeurs survenus dans le cadre d'opérations mondiales, 1980-2011 [73].

Tableau 2 : revue des certains accidents les plus catastrophiques survenus entre 1980 et 2011.

| Année | Pays | Installation | Type d'accident | Nombre de décès |
|-------|------------|--|---|-----------------|
| 1982 | Canada | Ocean Ranger | Chavirer | 84 |
| 1984 | Brésil | Enchova | Éruptions volcaniques | 42 |
| 1984 | Inde | Union Carbide | Fuite d'isocyanate de méthyle d'un réservoir de stockage | 3787 |
| 1988 | Uk | Piper A | Explosion et incendie | 167 |
| 1989 | Uk | L'Odyssée des océans | Eruption enflammée | 1 |
| 2001 | Brésil | P-36 | Explosion et incendie | 11 |
| 2002 | Brésil | P-34 | Une liste sérieuse | 0 |
| 2004 | Égypte | Temsah | Eruption enflammée | 0 |
| 2004 | Algérie | Complexe GL1/K | Explosion et incendie | 27 |
| 2005 | Inde | Bombay nord haut | Rupture d'un riser enflammé causée par une collision avec un navire de ravitaillement | 22 |
| 2007 | Mexique | Usumacinta | Une explosion sans flamme | 22 |
| 2009 | Australie | Montara/Atlas occidental | Une explosion sans flamme | 0 |
| 2009 | Russie | Centrale électrique de Sayano/Shushenskaya | Défaillance d'une turbine | 75 |
| 2010 | ÉTATS-UNIS | Macondo/ Deepwater Horizon | Eruption enflammée | 11 |
| 2010 | Venezuela | Aban Pearl | Chavirer | 0 |
| 2011 | Japon | La centrale nucléaire de Fukushima I | Tsunami qui a suivi le tremblement de terre de Tohoku | 0 |

4.1.1 La tragédie de l'Ocean Ranger

Localisation : Terre-Neuve et Labrador, Canada.

Date : 15 février 1982.

Pertes : 84 travailleurs sont morts.

Description de l'accident :

La plate-forme d'Ocean Ranger conçue et construite par l'Offshore Drilling and Exploration Company (ODECO) en 1976. Il s'agissait d'une plate-forme de forage offshore semi-submersible automotrice présentant les caractéristiques suivantes 121 mètres de long, 80 mètres de large et 103

mètres de haut. Il s'agissait d'une grande plate-forme qui nécessitait environ 80 à 100 travailleurs pour contrôler et pour les opérations de forage. Les signes de l'accident commencent lorsque l'équipage de la plate-forme reçoit un bulletin météorologique indiquant qu'une forte tempête hivernale se dirige vers son emplacement un jour avant l'accident (dimanche 24 février 1982). Le Ranger a arrêté les opérations de forage pour la sécurité de l'équipage et des installations et s'est préparé au passage de la tempête. Plus tard, les navires de soutien voisins commencent à entendre des messages radio indiquant que certains problèmes sont apparus, notamment des bris de verre et des défaillances d'interrupteurs et de vannes (fonctionnant seuls). Deux heures plus tard, The Ranger confirme par radio que tout va bien et qu'il n'y a pas de problèmes graves. Néanmoins, le lundi matin (1h00), le Ranger a contacté le navire de ravitaillement pour se rapprocher de la plate-forme. Une demi-heure plus tard, l'équipage commence à se diriger vers les postes de sauvetage, c'est le dernier message reçu de l'équipage du Ranger. Deux plates-formes étaient à proximité du Ranger, ils ont envoyé leurs navires de réserve, le navire de ravitaillement "Seaforth Highlander" s'est également dirigé vers la plate-forme. La violence de la tempête rend très difficile l'avancée ou la recherche de survivants. Quelle tragédie, pas un seul homme n'a survécu.

Quelques jours après l'accident, 22 corps ont été retrouvés dans l'eau ; ils sont tous morts de noyade et d'hypothermie. Près d'un mois plus tard, l'enquête sur les causes de la catastrophe a commencé. La Commission royale, qui est responsable de cette enquête, a constaté que plusieurs causes ont contribué à l'accident, notamment des défauts de conception de la plate-forme, un équipement de sauvetage inadéquat et, le plus important, un manque de formation de l'équipage en cas d'urgence [74].

4.1.2 La catastrophe de Bhopal

Localisation : Bhopal, Madhya Pradesh, Inde.

Durée : 2 - 3 décembre 1984.

Les pertes : Décès, au moins 3 787 ; plus de 16 000 demandes d'indemnisation.

Description de l'accident :

La tragédie du gaz de Bhopal est l'un des accidents les plus catastrophiques de l'histoire du monde. La tragédie s'est produite le 3 décembre 1984, lorsqu'un isocyanate de méthyle (MIC) toxique a été libéré d'un réservoir de stockage affilié à l'usine de pesticides Union Carbide India Limited (UCIL) à Bhopal. Le gaz libéré dans l'atmosphère couvre 40 km² de surface et a tué ou affecté des milliers de personnes. Aujourd'hui encore, les habitants de Bhopal souffrent des conséquences de

l'accident. Dernièrement, le gouvernement indien a déclaré qu'environ 200 000 citoyens de Bhopal ont été touchés et souffrent toujours de graves problèmes de santé. La cause principale de cette catastrophe était une "ligne de pontage" reliant un collecteur de soupape de sécurité à un collecteur de purge de pression, permettant à l'eau d'entrer dans le réservoir de stockage MIC 610 [75]. Labib et Champaneri [76] ont préparé un bon rapport sur l'accident et ses causes.

4.1.3 L'accident de la centrale électrique de Sayano-Chushenskaya

Localisation : Rivière Ienisseï, près de Sayanogorsk en Khakassia, Russie.

Heure : 17 août 2009 à 08 :13 (00 :13 GMT)

Les pertes : 75 personnes ont été tuées et des milliards de roubles ont été perdus.

Description de l'accident :

Un rapport du Service fédéral de surveillance environnementale, technologique et atomique du 4 octobre 2009 indique que l'origine de l'accident commence par une vibration de la turbine qui a causé un dommage de fatigue des supports de la turbine 2 et de son couvercle. Ce dernier a manqué au moins six écrous des boulons de fixation du couvercle de la turbine. Ensuite, 49 boulons de la turbine sont examinés ; il est constaté que 41 d'entre eux présentaient des fissures de fatigue et que 8 boulons (sur 41) leur surface de fatigue dépassait 90 % de la surface totale de la section transversale. A 1h20 du matin, une anomalie a été remarqué à la centrale hydroélectrique de Bratsk, l'anomalie a rompu les communications et les systèmes d'entraînement automatique de la centrale. A 8h12, le régulateur de turbine réduit la puissance de sortie de la turbine 2. Après cela, les boulons maintenant le couvercle de la turbine en place se sont cassés, et sous une pression d'eau d'environ 20 bars, la turbine tournante avec son couvercle, son rotor et ses parties supérieures a commencé à monter et a causé la destruction des installations du hall des machines.

Dans le même temps, de l'eau sous pression a inondé les salles et endommagé les constructions des usines. La défaillance de la turbine 2 a provoqué la défaillance du système d'arrêt automatique des vannes des conduites d'admission d'eau, plus de détails peuvent être trouvés dans [77].

4.1.4 La catastrophe nucléaire de Fukushima Daiichi

Localisation : Okuma, Fukushima, Japon.

Heure : 11 mars 2011

Les pertes : Non mortelles, 37 blessures, propagation des radiations.

Description de l'accident :

L'Échelle internationale des événements nucléaires classe l'accident au niveau 7 (accident majeur). Même s'il n'y a pas de décès, on s'attend à la mort de centaines de personnes en raison des radiations provoquées par l'accident. La principale cause de l'accident serait le tsunami qui a suivi le tremblement de terre de Tohoku le 11 mars 2011. Par la suite, les réacteurs actifs ont automatiquement arrêté leurs réactions de fission soutenues. Le tsunami a mis hors service les générateurs de secours qui alimentent en électricité les pompes responsables du refroidissement des réacteurs. Ces derniers souffrent de l'augmentation de la température et ont provoqué trois fusions nucléaires, des explosions chimiques d'hydrogène-air et le rejet de matières radioactives dans trois unités. De plus, la perte de refroidissement des réacteurs entraîne la surchauffe de la piscine qui stocke le combustible irradié du réacteur 4. Après une enquête de la centrale nucléaire de Fukushima

Accident Independent Investigation Commission (NAIIC) Le 5 juillet 2012, il a été constaté que la Tokyo Electric Power Company (TEPCO), qui est l'opérateur de la centrale, n'avait pas mis en œuvre les exigences de sécurité requises, telles que l'évaluation des risques et l'élaboration de plans d'évacuation, pour plus de détails voir [77].

4.1.5 Deep-water Horizon (l'éruption de Macondo)

Localisation : Golfe du Mexique, États-Unis.

Heure : 20 avril 2010

Les pertes : 11 travailleurs sont morts, 17 blessés et des millions de gallons de pétrole se sont déversés dans le Golfe.

Description de l'accident :

Deep-water Horizon a commencé l'opération de forage du puits Macondo en février 2010, sur la côte sud-est de la Louisiane, aux États-Unis. La profondeur de l'eau sur le site était d'environ 1500 m, et le puits était situé à 5500 m sous le niveau de la mer [78]. Une enquête menée par BP en septembre 2010 [79] indique que l'accident commence par la rupture de l'intégrité du puits, suivie d'une perte de contrôle de la pression du fluide dans le puits. De même, la défaillance du bloc obturateur dont le rôle est de sceller le puits en cas de perte de contrôle. Les hydrocarbures ont jailli du puits à une vitesse incontrôlable et se sont enflammés, ce qui a entraîné des explosions sur la plate-forme. La main de l'homme a également sa part dans l'accident. Dans le rapport de BP sur l'accident, ils ont blâmé les propriétaires de la plate-forme "Transocean" pour leur incapacité à

maintenir la BOP. Néanmoins, dans le rapport final de Deepwater Horizon, ils ont déclaré "Cette catastrophe aurait pu être évitée si les directives et pratiques progressives existantes avaient été suivies", mais BP "ne possédait pas de culture de sécurité fonctionnelle". La sécurité fonctionnelle signifie prendre en compte l'ensemble des propriétés du système plutôt que celles d'un seul de ses composants. Ils ont également déclaré que "suite à une cascade de défaillances et d'analyses de signaux profondément impressionnantes, de prises de décisions, de communications et de processus organisationnels et de gestion, la sécurité a été compromise au point que l'explosion a eu des effets catastrophiques".

5. Modèle de processus d'accident

Ces modèles sont généralement utilisés pour les enquêtes et la prévention des incidents. La figure 4 présente le modèle Huston qui examine les facteurs qui contribuent aux incidents et certaines mesures qui peuvent être prises pour les éviter. Le modèle montre que trois facteurs majeurs (input) sont nécessaires pour provoquer un accident : la cible, la force motrice et le déclencheur. Le modèle représente également certaines mesures visant à réduire la gravité de l'incident. La probabilité de contact peut être minimisée par une action préventive. L'efficacité du contact peut être réduite par une réaction adaptative [52]. Cependant, en raison de la complexité des usines actuelles, ce modèle ne peut pas donner une image exceptionnelle de l'accident. On peut trouver de nombreux modèles de processus d'accident dans la littérature, tels que

- Modèle d'arbre de défaillance (figure 5) développé par J. WG et al [80];
- Le modèle de Rasmussen [81] [82] qui intègre le facteur humain ;
- Modèle de Kletz [83] qui montre la séquence des décisions et des actions qui ont conduit à l'accident et indique les recommandations découlant de l'enquête pour chaque étape ;
- Modèle d'analyse des risques industriels basé sur l'approche systémique appelée Méthode d'analyse des systèmes dysfonctionnels (MADS). Comme on peut le voir dans la figure 6, le modèle est composé de deux systèmes principaux, le système cible et la source de danger. Dans ce dernier, on trouve de nombreux sous-systèmes (SS) connectés, plus de détails concernant le modèle (MADS) sont présentés dans [84]. Récemment, de nombreux modèles de processus d'accident ont été proposés, la plupart basés sur les modèles susmentionnés, mais en ajoutant certains éléments pour rendre le modèle plus flexible. Par exemple, Adedigba et al. [85] proposent un nouveau modèle qui intègre des facteurs

externes tels qu'un tremblement de terre, une tempête ou la foudre comme sources potentielles de risques pour les usines de traitement. Les relations de dépendance entre les différents éléments du modèle tels que l'erreur de conception, la défaillance opérationnelle et la défaillance des équipements sont illustrées à la figure 7.

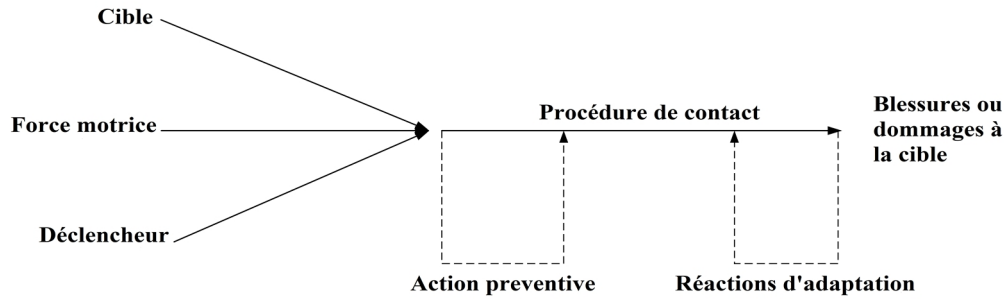


Figure 4 : Modèle de Houston du processus d'accident [86].

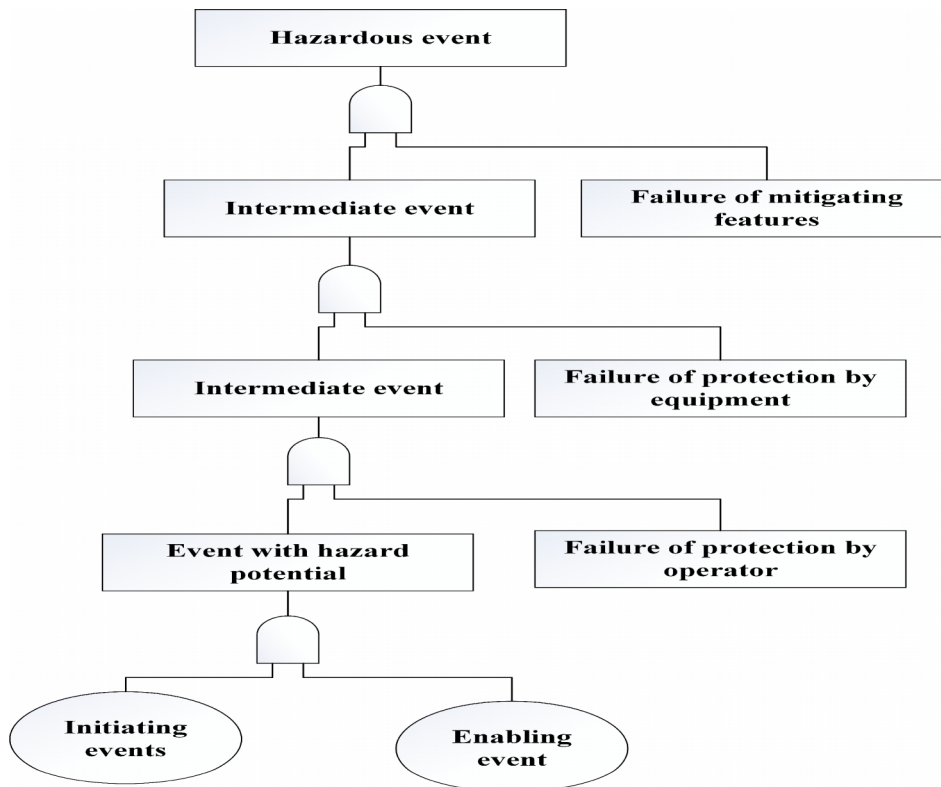


Figure 5 : Modèle d'accident d'arbre de défaillance [87].

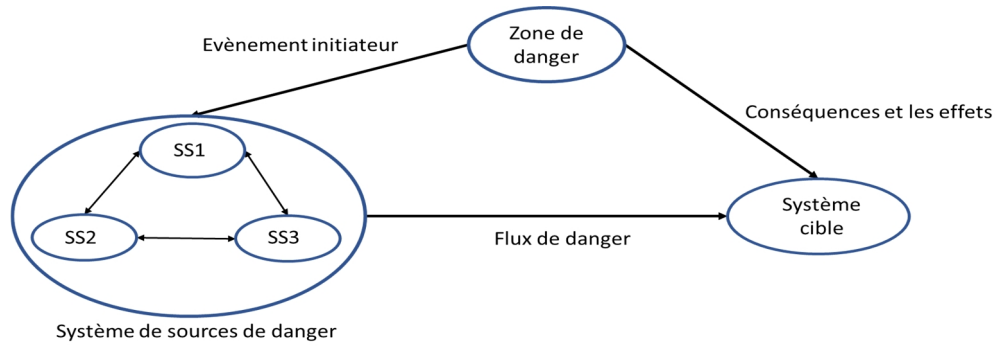


Figure 6 : Modèle MADS [84].

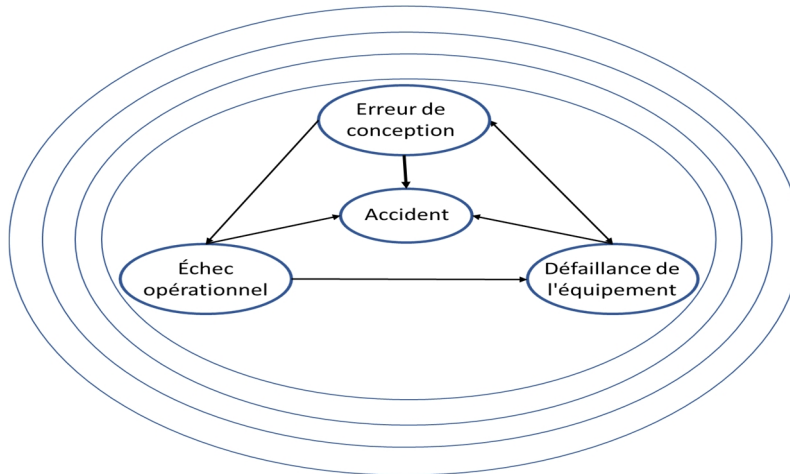


Figure 7 : Modèle d'accident qui intègre les échecs humains, organisationnels et externes [85].

5.1 Techniques d'analyse de la sécurité et des risques

Différentes approches ont été développées pour l'analyse de la sécurité et des risques ; on trouvera une revue de ces techniques dans [38]. Toutes ces techniques ont un objectif commun, qui est d'identifier qualitativement ou quantitativement les causes et conséquences possibles d'un danger ou d'une menace dans le processus. Nous examinerons brièvement certaines techniques et méthodologies qui sont largement utilisées pour l'évaluation des risques des industries de transformation. Comme mentionné précédemment, ces techniques sont divisées en méthodes qualitatives et quantitatives.

5.1.1 Approches qualitatives

Ces techniques dépendent principalement de l'identification des dangers à l'aide de données qualitatives. Il est évident qu'une analyse quantitative des risques (QRA) nécessite des données à la fois qualitatives et quantitatives pour donner une image complète du risque, mais si les donnée

qualitative ne sont pas disponibles pour faire des déductions, résulte à l'impossibilité de l'appliquer (QRA) [88]. De nombreuses techniques sont développées dans la littérature, telles que (HAZOP), (AMDE) ; l'analyse d'hypothèses et les indices de danger. Dans cette section, nous discuterons des méthodes les plus utilisées sur la base de l'étude présentée par [38] :

HAZOP est l'une des techniques les plus utilisées depuis les années 70, elle a été normalisée en 2001 par la norme internationale (IEC 61882) [89], afin de fournir une orientation sur l'application de la technique et sur la procédure d'étude. Elle a été mise en place lorsqu'un écart par rapport aux conditions normales se produit. Les experts dépendent des documents de conception et d'exploitation tels que les (PI&D) et les (PFD) pour construire le tableau (HAZOP). Il faut savoir que cette méthode ne peut être construite que par un groupe d'experts pluridisciplinaires qui disposent de suffisamment d'informations sur la conception, l'exploitation et la maintenance de l'installation de traitement. Le tableau 3 montre certains des écarts qui peuvent survenir dans une installation de traitement. Certaines des caractéristiques remarquables de la méthode (HAZOP) sont qu'elle peut être appliquée à la fois au stade de la conception et au stade opérationnel ; elle donne également des informations sur les dangers potentiels d'une déviation spécifiée ainsi que sur leurs causes et leurs conséquences. Néanmoins, cette méthode prend du temps et ne peut être réalisée que par un groupe d'experts.

AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets)

AMDE est une méthode inductive utilisée pour identifier et éliminer les défaillances, les problèmes, les erreurs connues et/ou potentielles du système, de la conception, du processus et/ou du service. En outre, elle fournit au concepteur les informations nécessaires sur les causes et les effets des défaillances avant que le système, la conception, le processus ou le service ne soit finalisé. De plus, il identifie les actions correctives nécessaires pour éviter que les défaillances n'atteignent le client. Habituellement, (AMDE) examine les composants individuels tels que les cuves, les pompes et les vannes qui pourraient conduire à une défaillance du système. L'un des avantages de cette méthode est qu'elle peut être lancée dès que certaines informations sont connues. Il n'est pas nécessaire que toutes les informations soient connues. Cela dépend de la devise "Faites du mieux que vous pouvez, avec ce que vous avez", car c'est ce que nous faisons dans les tâches de la vie réelle [90]. Certaines des informations requises pour statuer sur (AMDE) comprennent : la structure du système, l'exploitation, le contrôle et la maintenance du système, l'environnement

du système et la modélisation du système. La norme internationale (CEI 60812) [91] fournit une orientation exhaustive ; cette dernière clarifie les étapes procédurales nécessaires pour effectuer une analyse, définit différents termes, hypothèses, mesures de criticité, modes de défaillance et donne les principes de base avec un exemple des feuilles de travail et des tableaux nécessaires. Une extension de cette méthode, appelée analyse des modes de défaillance, des effets et de la criticité (AMDEC), est soumise aux mêmes considérations que celles présentées pour (AMDEC).

Analyse d'hypothèses

Cette analyse consiste à poser une série de questions qui commencent par "et si" et qui visent à identifier un danger dans le système, même si, sans nécessairement utiliser "et si", d'autres expressions peuvent également être utilisées. Voici quelques exemples de ces questions :

- Que faire si la vanne ne s'ouvre pas ?
- Et si le gaz inerte est omis ?

Cette méthode a fonctionné sans avoir besoin de technique de calcul spécialisée et les questions établies ont été utilisées pendant toute la durée du projet. Certaines de ses limites sont que l'utilité de cette méthode est mesurée par les bonnes questions posées et qu'elle est plus subjective par rapport aux autres méthodes (HAZOP et AMDEC), aussi seule une équipe d'experts peut effectuer une analyse de simulation. (SWIFT technique structurée d'analyse d'hypothèses)

La technique structurée d'analyse d'hypothèses (SWIFT) est une extension de la technique susmentionnée. (SWIFT) est une technique d'identification des risques basée sur les systèmes qui a souvent nécessité l'utilisation de mots-guides tels que "timing", "amount" et d'invites (phrases) données par les participants (les phrases commencent par "What if..." ou "How could...") pour vérifier les risques au niveau des systèmes et investir comment ces derniers seront affectés par des déviations par rapport aux opérations normales [92]. SWIFT est une technique flexible qui peut être réalisée plus rapidement et nécessite un niveau de détail moins élevé que les méthodes (HAZOP et AMDEC). Une description détaillée de la méthode (SWIFT) est présentée dans [92].

5.1.2 Approches quantitatives

Les techniques quantitatives consistent à identifier numériquement le risque ou le danger. La probabilité ou la vraisemblance est attribuée à chaque danger pouvant survenir dans l'usine de traitement, ce qui permet de quantifier les résultats possibles et de prendre les bonnes décisions en cas d'incertitude. Certaines de ces méthodes sont examinées ci-après ;

Analyse des arbres de défaillance (ADD)

La ADD est une méthode déductive visant à identifier un événement indésirable (par exemple un accident ou une défaillance du système), puis construite en descendant l'arbre jusqu'à atteindre la cause première de l'événement indésirable. Cette dernière est appelée "Top Event" (TE) et la cause fondamentale est appelée "Primary Event" ou "Basic Event". La ADD peut être appliquée pour un large éventail d'applications telles que l'analyse de la sécurité, de la disponibilité et de la maintenabilité. La norme internationale CEI 61025 [93] traite de deux types d'approches de l'ADD, une approche qualitative où les causes potentielles de (TE) sont recherchées sans s'intéresser à leur probabilité d'occurrence. Dans l'approche quantitative la probabilité d'occurrence est attribuée à chaque événement de base, le résultat de cette approche est la probabilité d'occurrence d'un (TE).

Technique de l'arbre d'événements (ADE)

La norme internationale IEC 62502 [94] spécifie les principes de base de l'analyse par arbre d'événements (ADE) et représente une carte pour l'utilisation de ADE qualitativement et quantitativement dans le contexte de l'analyse de la fiabilité et des risques. Contrairement à ADD, ADE est une méthode inductive qui est souvent utilisée pour l'évaluation des risques et la modélisation de scénarios d'accidents. (TE) utilise des arbres de décision pour modéliser graphiquement les résultats (conséquences) possibles d'un événement déclencheur (EDE) (par exemple, un dysfonctionnement du système ou du processus) capable de produire un résultat accidentel par une séquence d'événements comme le montre la figure 8, ces derniers représentant un exemple de rejet de gaz de pétrole liquéfié (GPL) dans une usine d'alkylation de détergents (DAP).

L'événement déclencheur de la (TE), utilise des conditions dichotomiques (c'est-à-dire succès/échec, vrai/faux ou oui/non) pour identifier les événements séquentiels, les barrières de sécurité et les conséquences dans les différentes branches de l'arbre [95]. La probabilité d'occurrence d'un événement de résultat spécifique (POE) peut être obtenue en multipliant les probabilités de tous les événements ultérieurs $P_i = (P_1 ; P_2 ; \dots ; P_n)$ existant dans un chemin [96] comme indiqué dans l'équation 1.3.

Un exemple de calcul est donné ci-après ;

$$P_O = \prod_{i=1}^n P_i$$

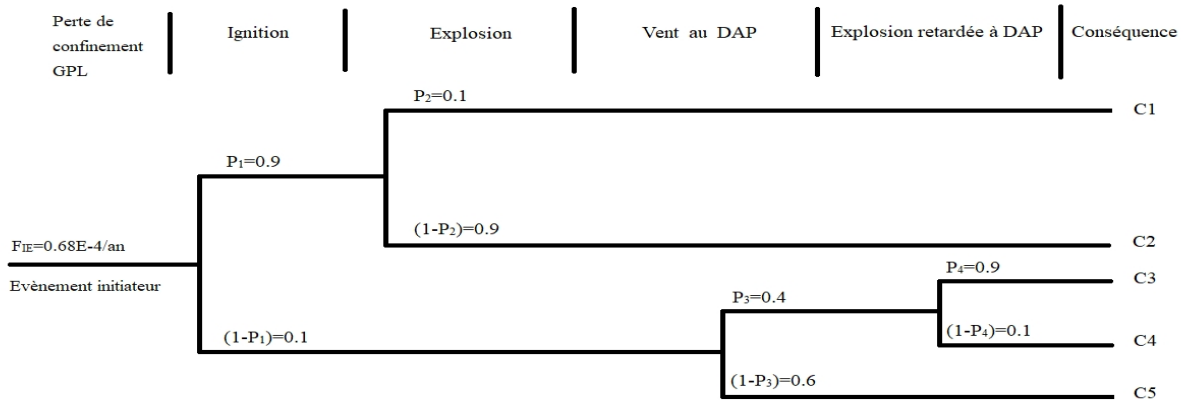


Figure 8 : Arbre d'événements pour les rejets de GPL [95].

Calcul du premier résultat (conséquence 1) :

$$F(C1) = F_{IE} \times P_1 \times P_2 = 0,68 \times 10^{-4} \times 0,9 \times 0,1 = 6,12 \times 10^{-6}/\text{an}$$

Analyse des nœuds papillon (BT)

La combinaison des deux techniques susmentionnées ADD et ADE connue sous le nom d'analyse de nœud papillon (BT).

6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons essayé de faire un bref rappel des concepts liés à la sécurité et à l'analyse des risques. Plusieurs accidents tirés de la littérature ont été abordés, la plupart d'entre eux se sont produits au cours de la dernière décennie. En outre, différents modèles de processus d'accident sont présentés et certaines techniques d'analyse de la sécurité et des risques ont été examinées. Il est évidemment important d'établir une évaluation des risques dans les industries actuelles pour éviter les accidents catastrophiques qui causent des pertes graves (c'est-à-dire des pertes humaines, dommage aux biens et l'environnement). Dans la littérature, on peut trouver un grand nombre d'approches proposées pour l'analyse des risques et de la sécurité. Néanmoins, des accidents se produisent encore, des pertes humaines et des millions de dollars sont perdus en vain. Il est important de tester l'efficacité de ces méthodes en les comparant avec d'autres. Dans les prochains chapitres, nous passerons en détail introduire les applications de l'analyse quantitative des risques (QRA) dans l'industrie de pétrolier et les usines chimiques au cours de la dernière décennie, et nous donnerons une application complète de (QRA) dans le secteur du pétrolier et du gazier.

Chapitre 2

Analyse Quantitative des risques (QRA)

1. Introduction

L'analyse quantitative des risques (QRA) est la plus couramment utilisée dans le secteur industriel des procédés pour quantifier et identifier avec précision le risque des accidents majeurs. Elle est utilisée dans l'industrie pétrolière et gazière (onshore et offshore), le transport de matières dangereuses (TMD), la protection de l'environnement et l'industrie nucléaire [12].

En Europe, conformément à la directive Seveso II, (QRA) a été choisie comme le meilleur outil de gestion des risques et d'aménagement du territoire dans certains pays comme les Pays-Bas, et son adoption dans d'autres pays est actuellement sérieusement envisagée [97]. À l'échelle mondiale, de nombreuses sociétés pétrolières et gazières internationales utilisent cette approche dans le processus décisionnel de nouveaux ou anciens projets. Par conséquent, plusieurs pays, dont l'Algérie, intègrent progressivement leurs exigences de (QRA) dans leur législation nationale pour le secteur industriel.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les objectifs et les processus de (QRA) en décrivant les étapes de l'analyse quantitative des risques. Ensuite, nous décrivons les différentes applications de (QRA) dans l'industrie des procédés, ses avantages et ses limites.

2. Objectifs de l'analyse quantitative des risques

Dans le cadre de management des risques, l'évaluation quantitative des risques peut être utilisée pour aider à la conception, à l'exploitation ou à la supervision d'activités dangereuses. Cela peut être très utile de plusieurs manières [3], [60], [98], notamment pour :

- Estimer le niveau de risque et évaluer son importance. Cela aide à déterminer si le risque doit être réduit.
- Identifier les principaux facteurs d'apparition du danger. Cela aide à comprendre la nature du danger et à recommander des mesures pour réduire le risque.
- Définir les scénarios d'accidents potentiels dès la conception. Ceux-ci peuvent être utilisés comme base pour le management de crise, les secours d'urgence et les plans d'évacuation.
- Évaluer les mesures / barrières pour réduire les risques. (QRA) peut être liée à une analyse coûts-avantages pour aider à sélectionner le moyen le plus rentable pour réduire les coûts.

- Identifier les procédures de sécurité et les équipements critiques. C'est une étape nécessaire pour la réduction des risques et doivent faire l'objet d'une attention particulière au cours du fonctionnement.
- Identifier les précurseurs d'accidents qui peuvent être surveillés pendant l'exploitation pour signaler les tendances défavorables des précurseurs.

Les avantages de (QRA) fournissent généralement une structure raisonnable pour la surveillance des risques et des conseils pour la prise de décision sur les problèmes de sécurité.

3. Méthodologie d'analyse quantitative des risques

La gestion des risques appliquée à l'industrie des procédés chimiques repose sur une analyse quantitative des risques pour identifier les mesures de sécurité et prévenir les accidents technologiques catastrophiques. Dans ce chapitre, une méthode d'analyse quantitative des risques sera mise en œuvre selon une série d'étapes, qui sont illustrées à la figure 9 et détaillées dans les sous-sections suivantes (center for chemical process safety, CCPS) [11], Ronza et al [60], Sellami et al [99].

Méthodologie de l'analyse quantitative des risques adaptée :

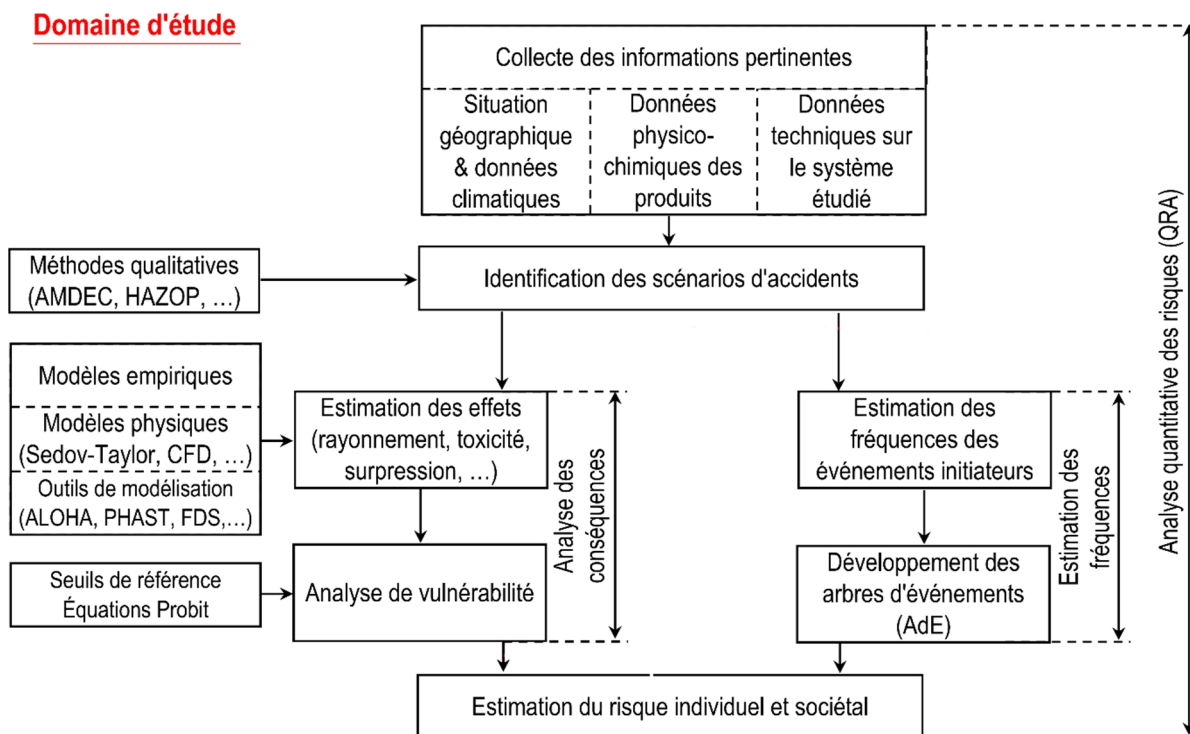


Figure 9 : Méthodologie de l'analyse quantitative des risques adaptée [11], [60].

3.1 Collecte des informations pertinentes

La première étape consiste à collecter toutes les informations nécessaires pour modéliser l'accident et évaluer le risque. Cela peut inclure des informations géographiques du site de recherche (pente topographique, obstacles, altitude, longitude, Etc.), les données climatiques (température ambiante, humidité relative, diagramme du vent, stabilité atmosphérique, rayonnement solaire, etc.), les propriétés physiques et chimiques des substances impliquées, et enfin des informations sur les processus ou systèmes à étudier [11], [12]. En résumé, tous les paramètres nécessaires pour définir et modéliser les caractéristiques d'un accident dangereux sont présentés sur la figure 10.

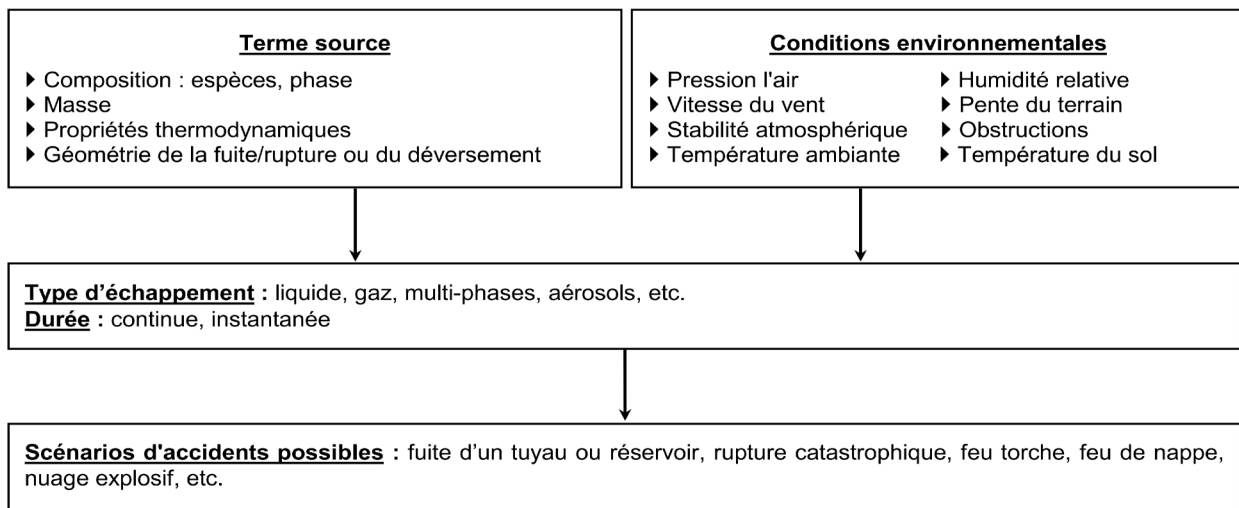


Figure 10 : Paramètres nécessaires à la modélisation d'un scénario d'accidents [99].

3.2 Identification des scénarios d'accidents

Après avoir obtenu les informations nécessaires, il est important de déterminer les situations potentiellement dangereuses (par exemple, rupture d'un pipeline de gaz naturel, explosion d'un appareil sous pression, etc.). Les outils conventionnels tels que Arber préliminaire des risques (APR), (HAZID), (HAZOP), La Commission électrotechnique internationale (IEC 61882) [89] (AMDEC), etc. sont généralement utilisés pour déterminer des scénarios d'accident sur la base d'une analyse qualitative des risques. Ces méthodes permettent d'identifier les causes, les conséquences et les mesures de prévention et de protection dans la modélisation des scénarios d'accident (QRA).

Les substances dangereuses peuvent être à l'origine d'accidents technologiques majeurs. Les dangers associés à ces substances dangereuses sont notamment dus à leurs propriétés physiques et

chimiques (inflammabilité, toxicité, corrosivité, réactivité, etc.), propres à leur quantité et incompatibilité. La figure 11 illustre les accidents potentiels qui se produisent souvent en raison du rejet accidentel de produits chimiques dangereux.

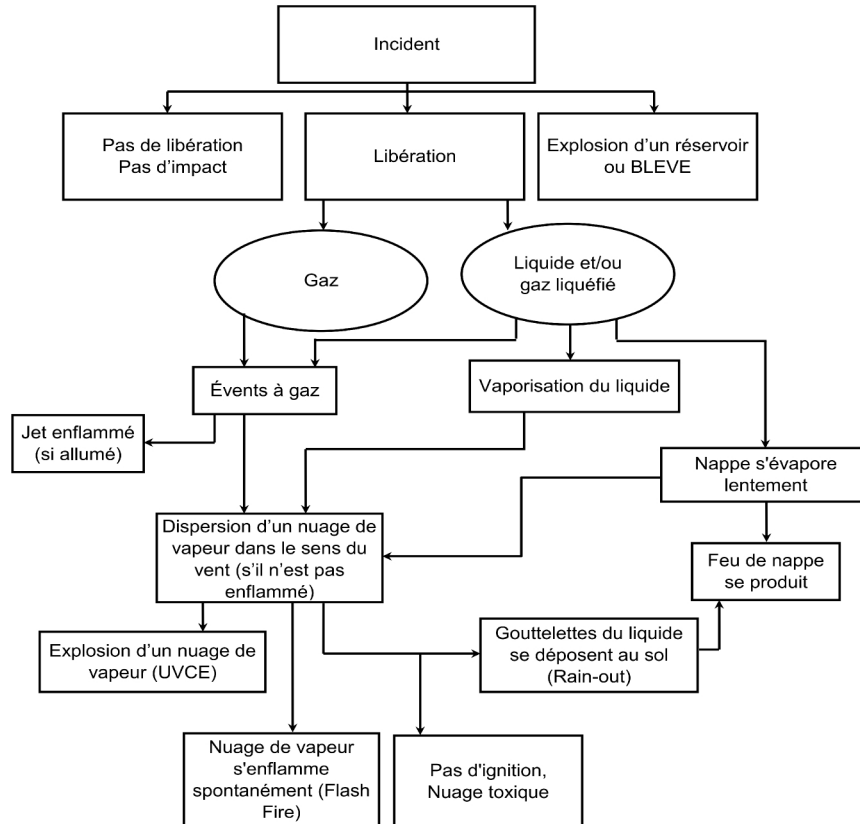


Figure 11 : Arbre typique des incidents potentiels générés par un rejet de produit dangereux [3], [60].

3.3 Estimation des fréquences des événements initiateurs

Il s'agit d'une étape clé dans l'estimation de la fréquence des situations dangereuses. En effet, la sélection d'un événement déclencheur (initial) susceptible de provoquer une situation grave nécessite une compréhension au moins partielle des principaux risques associés au système étudié. Pour les enquêtes post-accidentelles, ces risques sont effectivement connus.

Afin de déterminer la fréquence des événements déclencheurs, (QRA) utilise différentes méthodes d'estimation, telles que le jugement d'experts, la rétroaction empirique et les données générales établies par des bases de données reconnues dans la littérature, Telles que Données de fiabilité offshore et onshore (OREDA) [100]. Le tableau 3 présente certaines valeurs souvent utilisées dans l'industrie des procédés.

3.4 Développement des arbres d'événements (ADE)

Le but de la méthode de l'arbre d'événements est d'étudier l'évolution du système en caractérisant les différentes conséquences causées par l'événement initiateur défini a priori. Contrairement à l'analyse (ADD), cette méthode repose sur une méthode inductive, de cause à effet, c'est-à-dire par ordre chronologique.

Le principe de la méthode de l'arbre d'événements est d'abord de définir l'événement de départ comme une défaillance d'un composant, une perturbation de l'environnement (tonnerre et foudre, gel, etc.) ou un comportement humain imprévu. Ensuite, étudier la propagation et la combinaison d'événements consécutifs ultérieurs qui peuvent se produire en aval de l'événement initial et entraîner des conséquences indésirables. En effet, les barrières de sécurité et leurs fonctions doivent être identifiées en leur attribuant des probabilités de défaillance [101-102]. Comme le montre la figure 12, à cette étape de l'analyse de l'évolution du système, il est nécessaire de se demander si la barrière de sécurité fonctionne (succès ou échec).

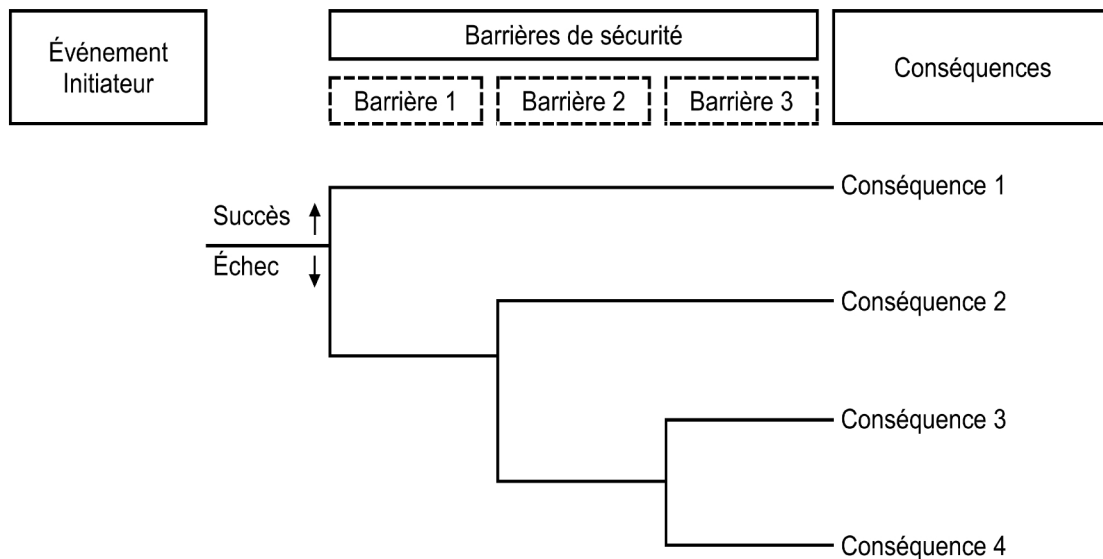


Figure 12 : Schéma d'un arbre des événements.

Ainsi, pour aider à la mise en œuvre de la méthode (ADE), le (CCPS) [103] propose des valeurs de probabilité de défaillance pour différents types de barrières de sécurité. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 4.

Chapitre 2 : l'analyse Quantitative des risques (QRA)

Tableau 3 : Fréquences d'occurrence pour des événements initiateurs [103].

| Évènement initiateur | Intervalle issu de la littérature (/an) | Valeur proposée par LOPA (/an) |
|--|--|--------------------------------------|
| Perte de confinement d'un réservoir pressurisé | 10^{-7} à 10^{-5} | 10^{-6} |
| Rupture d'une canalisation de 100 m | 10^{-6} à 10^{-5} | 10^{-5} |
| Fuite (10% de la section) sur une canalisation de 100 m | 10^{-4} à 10^{-3} | 10^{-3} |
| Perte de confinement d'un réservoir à pression atmosphérique | 10^{-5} à 10^{-3} | 10^{-3} |
| Fuite sur joint d'étanchéité | 10^{-6} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Survitesse d'un moteur avec une Fuite sur le corps de l'équipement | 10^{-4} à 10^{-3} | 10^{-4} |
| Agressions par choc (véhicule, etc.) | 10^{-4} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Chute d'une charge de grue | 10^{-4} à 10^{-3} par levage | 10^{-4} par levage |
| Impact de foudre | 10^{-4} à 10^{-3} | 10^{-3} |
| Ouverture intempestive d'une soupape | 10^{-4} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Défaillance d'un système de refroidissement | 10^{-2} à 1 | 10^{-1} |
| Défaillance d'une garniture (joint d'étanchéité) de pompe | 10^{-2} à 10^{-1} | 10^{-1} |
| Rupture d'un flexible de chargement/déchargement | 10^{-2} à 1 | 10^{-1} |
| Défaillance de la boucle de régulation | 10^{-2} à 1 | 10^{-1} |
| Incendie extérieur de faible ampleur | 10^{-2} à 10^{-1} | 10^{-1} |
| Incendie extérieur de grande ampleur | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Erreur humaine pour exécuter une procédure de routine | 10^{-3} à 10^{-1} par opportunité | 10^{-2} par opportunité |

Tableau 4 : Probabilité de défaillance pour différents types de barrières [103].

| Barrière de sécurité | Intervalle issu de la littérature | Valeur proposée par LOPA |
|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Boucle de régulation (BPCS) | 10^{-2} à 10^{-1} | 10^{-1} |
| Cuvette de rétention | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Système de drainage | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Évent | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Ignifuge (Fireproofing) | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-2} |
| Mur résistant à la surpression | 10^{-3} à 10^{-2} | 10^{-3} |
| Arrête flamme | 10^{-3} à 10^{-1} | 10^{-2} |
| Soupape de sécurité | 10^{-5} à 10^{-1} | 10^{-2} |
| Disque de rupture | 10^{-5} à 10^{-1} | 10^{-2} |
| Conception intrinsèque sûre | 10^{-6} à 10^{-1} | 10^{-2} |
| Action humaine | 10^{-4} à 1 | 10^{-1} |

3.5 Analyse des conséquences

Après avoir identifié les scénarios d'accidents potentiels, il est nécessaire d'estimer les effets des conséquences sur le personnel, les équipements et l'environnement. L'analyse des conséquences est l'étude de divers événements indésirables pouvant être causés par la perte de confinement de matières dangereuses pendant l'exploitation de l'installation [60]. Les événements indésirables peuvent être divisés en trois grandes catégories : la propagation de substances toxiques, les incendies et les explosions (voir figure 13).

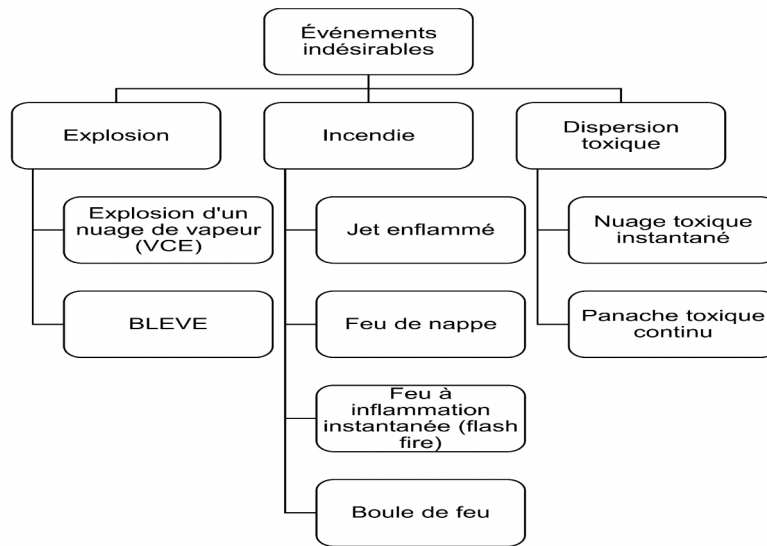


Figure 13 : Classification des événements indésirables [7].

En effet, cette étape permet d'identifier les zones susceptibles d'affecter la sécurité de l'environnement naturel et humain. Ces informations sont généralement utilisées pour la planification d'urgence. Des graphiques et des corrélations empiriques peuvent être utilisés, ou des formules physiques et des modèles de vulnérabilité peuvent être utilisés pour calculer l'impact, de sorte que le comportement physique d'un accident potentiel et ses conséquences sur la cible puissent être modélisés. Certains travaux de recherche et tests expérimentaux portent sur la recherche sur les aspects et les bases théoriques de ces modèles et méthodes de calcul [3], [13], [17], [55], [97], [98], [104–106]. Cependant, certains de ces modèles n'évaluent qu'un nombre limité d'effets physiques, tels que les décharges ou les effets des rayonnements. La figure 14 montre le processus global du modèle d'analyse des effets.

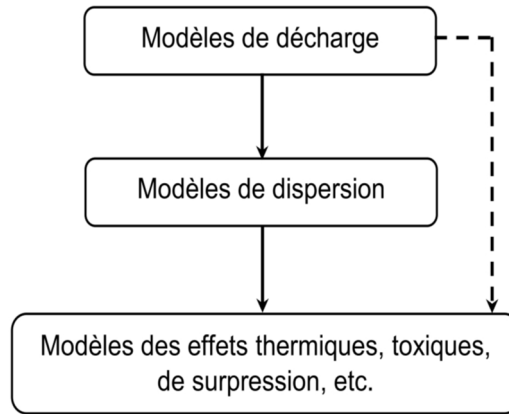


Figure 14 : Processus global d'analyse des conséquences.

La modélisation des conséquences couvre d'une manière générale les aspects suivants :

- Modélisation du terme source/décharge décrivant le comportement des matières libérées ;
- Modélisation de la taille et de la forme des nuages de gaz inflammables et toxiques provenant des rejets accidentels ;
- Modélisation de la fumée produite par la combustion ;
- Modélisation de la flamme et du champ de rayonnement des rejets qui s'enflamment et brûlent sous forme de jets de gaz, de nappes liquides, de boules de feu et de feux à inflammation instantanée (feu de nuage) ;
- Modélisation des surpressions d'explosion.

Des logiciels tels que (PHAST et SAFETI) [107] qui sont largement utilisés dans l'industrie des procédés, des logiciels libres permettant l'automatisation de certaines méthodes de calcul empiriques et semi-empiriques sont également disponibles sur Internet, notamment les logiciels (ALOHA) [108]. Par conséquent, des nombreux outils de dynamique des fluides computationnelle (CFD) ont été développés pour simuler les conséquences. Il existe des logiciels libres développés et maintenus par la communauté open source, tels que (openfoam) et (fire dynamics simulator FDS), et des logiciels commerciaux, tels que (flame acceleration simulator FLACS développé par GexCon) et (FLUENT développé par ANSYS) [109]–[111]. Puisqu'ils ont été largement vérifiés à l'aide de données expérimentales, ces deux types de logiciels sont de plus en plus utilisés dans l'analyse des résultats et la recherche.

3.6 Analyse de vulnérabilité

Le but de cette étape est d'évaluer l'impact de l'effet en fonction de la vulnérabilité des éléments sensibles (personnel et équipement). L'évaluation d'impact par rapport au seuil de vulnérabilité est souvent utilisée. En effet, il n'y a pas de norme uniforme, mais le seuil est déterminé par le projet européen (ARAMIS accidental risk assessment methodology for Industries in the framework of the seveso II directive) [112], notamment la méthode française [62], [64], [113-114] est largement utilisée dans l'industrie algérienne. Les tableaux 5 et 6 résument les seuils pour les niveaux d'impact liés respectivement à la surpression et au rayonnement thermique.

Tableau 5 : Seuil d'effet de surpression défini par la réglementation française [114-115].

| Surpression (mbar) | Effets sur l'homme | Effets sur les structures |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 20 | Effets indirects | Destructions significatives de vitres |
| 50 | Effets irréversibles | Dégâts légers sur les structures |
| 140 | Premiers effets létaux | Dégâts graves sur les structures |
| 200 | Effets létaux significatifs | Effets domino |

Tableau 6 : Seuils d'effets thermiques définis par la réglementation française [115].

| Flux surfacique/dose thermique | Effets sur l'homme | Effets sur les structures |
|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| 5 kW/m ² ou 600 [(kW/m ²) ^{4/3}] · s | Effets irréversibles | - |
| 12,5 kW/m ² ou 1000 [(kW/m ²) ^{4/3}] · s | Premiers effets létaux | Destructions significatives de vitres |
| 37,5 kW/m ² ou 1800 [(kW/m ²) ^{4/3}] · s | Effets létaux significatifs | Dégâts graves avec effets domino |

3.6.1 Réaction d'une population suite à un accident

Les membres de la population ne réagissent pas de la même manière lorsqu'ils sont affectés par un danger. Pour une dose ou une intensité donnée, certaines personnes ne seront que légèrement touchées, tandis que d'autres seront sévèrement touchées et la plupart des personnes auront une réaction modérée. Selon l'expression suivante, une distribution normale est généralement utilisée pour représenter la réponse globale de la population à cette situation [55], [116].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} E^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.1)$$

Où $f(x)$ est le pourcentage des individus ayant subi une réaction donnée aux effets de l'accident, x est la réponse, σ est l'écart type et μ est la moyenne.

3.6.2 Analyse de probit

Cette fonction doit corrélérer la gravité des conséquences avec le degré de dommage causé (c'est-à-dire la relation dose-réponse) pour évaluer les conséquences de l'accident. La méthode la plus couramment utilisée est l'analyse probit, qui met en corrélation les variables probit avec la probabilité d'atteindre un objectif en raison d'effets indésirables.

Par définition, la variable de probit Y est une mesure du pourcentage de la population souffrant d'un effet dose donnée (V) qui peut subir un degré de dommage donné. Cette variable obéit à une distribution normale et est caractérisée par une valeur moyenne de 5 et un écart type égal à 1. La relation entre la variable de probit (Y) et la probabilité d'atteinte (Pr) peut être définie comme suit [60], [116] :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-5} E\left(\frac{-v^2}{2}\right) dv \quad (2.2)$$

Si le pourcentage global de l'expérience d'une réponse donnée n'est pas représenté par rapport à la dose de l'effet indésirable, mais par rapport au logarithme, alors la formule (2.2) peut être convertie en expression (2.3), qui est généralement utilisée pour estimer les variables de probit La valeur de Y [55], [116]:

$$Y = a + b \ln(V) \quad (2.3)$$

Où a et b sont des constantes déterminées expérimentalement à partir d'informations sur les accidents.

D'après Mannan [55] et Crowl & Louvar [117], l'équation probit pour les effets létaux prend différentes formes, en fonction de la nature de l'effet nocif, comme le montre le tableau 7 qui présente diverses équations probit pour différents types d'exposition.

Tableau 7 : Corrélations probit pour différents types d'exposition [117].

| Type de blessure ou de dommage | Variable causale | Paramètres Probit | |
|--|--------------------------|----------------------------|------|
| | | a | b |
| Incendies : | | | |
| Décès dû au flux thermique | $q_r^{4/3} \cdot t$ | -14,9 | 2,56 |
| Explosions : | | | |
| Décès dû à une hémorragie pulmonaire | p_s | -77.1 | 6.91 |
| Rupture du tympan | p_s | -15.6 | 1.93 |
| Dommages à la structure | p_s | -23.8 | 2.92 |
| Bris de glace | p_s | -18.1 | 2.79 |
| Rejets toxiques : | | | |
| Décès dû à l'ammoniac | $\sum C^{2.0} \cdot t^*$ | -35.90 | 1.85 |
| Décès dû au monoxyde de carbone | $\sum C^{1.0} \cdot t^*$ | -37.98 | 3.7 |
| Décès dû au chlore | $\sum C^{2.0} \cdot t^*$ | -8.29 | 0.92 |
| Décès dû à l'oxyde d'éthylène | $\sum C^{1.0} \cdot t^*$ | -6.19 | 1.00 |
| Décès dû au chlorure d'hydrogène | $\sum C^{1.0} \cdot t^*$ | -16.85 | 2.00 |
| Décès dû au dioxyde d'azote | $\sum C^{2.0} \cdot t^*$ | -13.79 | 1.40 |
| Décès dû à l'oxyde de propylène | $\sum C^{2.0} \cdot t^*$ | -7.42 | 0.51 |
| Décès dû au dioxyde de soufre | $\sum C^{1.0} \cdot t^*$ | -15.67 | 1.00 |
| Décès dû au toluène | $\sum C^{2.5} \cdot t^*$ | -6.97 | 0.41 |
| q : flux surfacique radiatif reçu (kW/m ²) | | t : temps d'exposition (s) | |
| Ps : surpression (N/m ²) | | C : concentration (ppm) | |
| t* : temps d'exposition (min) | | | |

Une fois la valeur de Y déterminée, la variable de probabilité doit être convertie en probabilité d'atteinte (pourcentage) afin d'évaluer les conséquences réelles de l'accident sur la population (par exemple, le nombre de personnes blessées ou tuées). Cela peut être fait en se référant à la figure 15. (CCPS) [60] exprime une autre forme d'expression, qui établit un lien entre une variable de probit et la possibilité d'atteindre un objectif par un effet néfaste donné :

$$P = 0.5 \left(1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right) \quad (2.4)$$

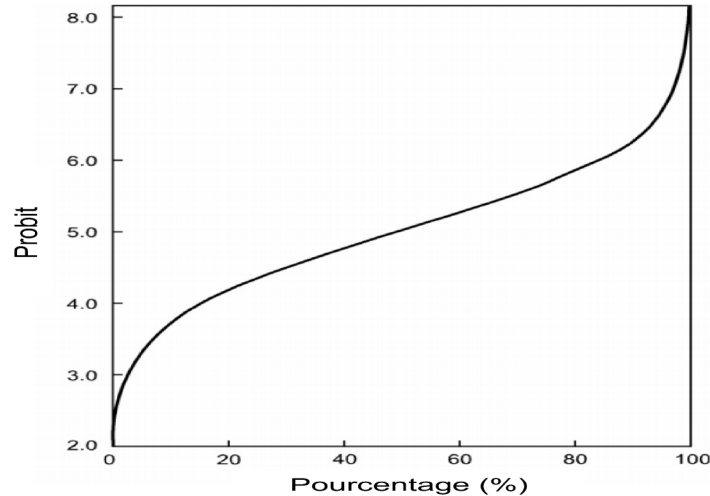


Figure 15 : Relation entre la variable probit et le pourcentage d'atteinte [55].

Actuellement, les équations probit sont largement utilisées pour évaluer les conséquences des accidents majeurs sur les cibles. Toutefois, le choix de l'équation est déterminant car, pour le même effet dangereux, la prédiction peut varier considérablement selon l'expression choisie.

3.7 Estimation du risque individuel et sociétal

Lors de l'estimation des risques associés à l'installation, le risque peut être calculé pour chaque conséquence (perte économique, blessure, décès, etc.).

Cependant, l'analyse quantitative des risques considère généralement la létalité, car la norme d'acceptabilité repose principalement sur le risque de décès. En effet, dans le cadre de (QRA), après avoir déterminé la probabilité d'émergence des événements indésirables et leurs conséquences, les deux mesures représentatives suivants le risque personnel et le risque sociétal sont ensuite utilisées pour évaluer le risque.

3.7.1 Risque individuel

Le risque individuel correspond à une fonction de coordonnées spatiales, qui représentent la probabilité qu'un individu en un point fixe meure dans l'année qui suit un accident dans une usine, une installation ou une route de Transport [116]. L'unité de mesure du risque individuel est an^{-1} . Le concept de risque individuel est généralement illustré sur la carte par les contours des risques égaux individuels (la distance à laquelle l'individu peut subir le plus grand impact sur la mort).

Le risque individuel dans une zone géographique donnée peut être exprimé comme suit [118]:

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{i=n} I_{x,y,i} \quad (2.5)$$

Où $IR_{x,y}$ est le risque individuel total à l'endroit géographique (x, y) , $IR_{x,y,i}$ est le risque individuel à l'endroit géographique (x, y) suite à un scénario d'accident i et n est le nombre total de scénarios d'accidents retenus dans l'étude.

Le $IR_{x,y,i}$ peut être exprimé en fonction de la probabilité de mort et de la fréquence d'occurrence par :

$$IR_{x,y,i} = fC_{,i} \cdot Pr_{d,i} \quad (2.6)$$

Où $fC_{,i}$ est la fréquence d'occurrence du scénario d'accident i et $Pr_{d,i}$ est la probabilité que ce scénario d'accident entraîne un décès à l'endroit (x, y) .

La valeur de la $Pr_{d,i}$ est obtenue à l'aide des modèles de vulnérabilité. La $fC_{,i}$ est obtenue en multipliant la fréquence de l'événement initiateur, f_i , par la probabilité de la séquence d'événements conduisant au scénario d'accident i , $Pr_{seq,i}$, soit alors :

$$fC_{,i} = f_i \cdot Pr_{seq,i} \quad (2.7)$$

Les contours d'iso-risque associent tous les emplacements géographiques autour d'activités potentiellement dangereuses au même risque individuel, c'est-à-dire que tous les emplacements ont la même probabilité de décès. La figure 16 présente un exemple de contours d'iso-risque individuel. Si l'impact physique de l'accident se propage également dans toutes les directions, le profil du risque personnel peut être circulaire, et si l'intensité de l'impact diffère selon la direction de propagation, le profil du danger peut être irrégulier. Par conséquent, nous pouvons distinguer le risque radial du risque directionnel :

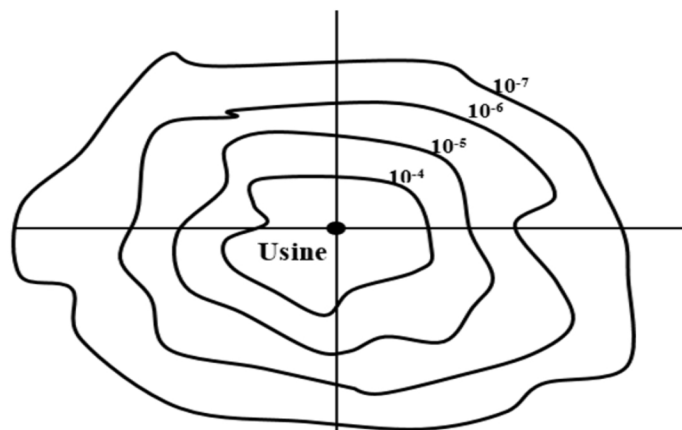


Figure 16 : Exemple de contours d'iso-risque individuel [119].

- Le risque radial conduit à des contours iso-risques circulaires, où la valeur du risque diminue avec le rayon. Les scénarios d'accidents généralement associés à ce type de risque

sont les explosions, où le rayonnement thermique et la surpression se propagent de façon uniforme dans toutes les directions.

- Le risque directionnel génère des courbes iso-risques irrégulières en raison de la distribution non homogène de la direction du vent en fonction du temps (rose des vents) et de la variété des classes de stabilité atmosphérique. Les scénarios d'accident associés à ce type de risque sont la dispersion atmosphérique de substances inflammables et/ou toxiques et la projection des fragments lors de l'explosion d'un récipient de type cylindrique.

Les étapes suivantes sont généralement utilisées pour calculer un seul contour de risque individuel (voir figure 17) :

1. Définissez une grille de points et utilisez-la pour calculer le risque individuel. La grille doit inclure le processus à analyser et doit couvrir au moins la distance maximale sur laquelle toutes les conséquences potentiellement mortelles peuvent être observées. Pour les distances inférieures à 300 m, la grille est généralement de 25 m / 25 m ; pour les distances plus longues, la grille est généralement de 100 m / 100 m.
2. Établissez les coordonnées (x, y) de l'origine de la scène de l'accident (i). Déterminez la fréquence f_i des événements initiateurs pour ce scénario d'accident.

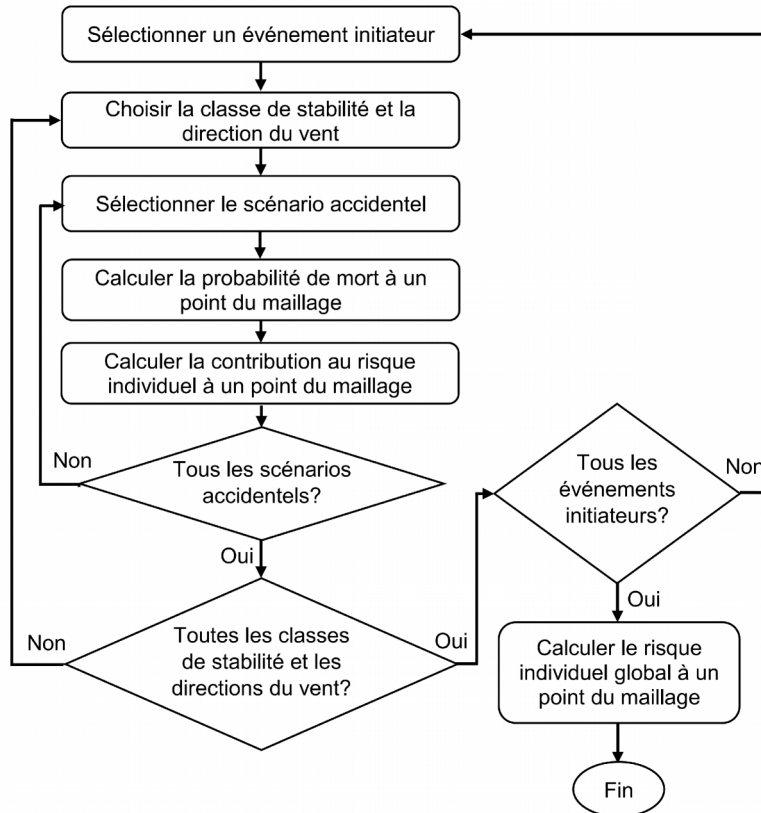


Figure 17 : Étapes de calcul des contours du risque individuel [116].

3. Etablir des données climatiques : la probabilité relative au niveau de stabilité (Pr_{cs}), et la probabilité de direction du vent (Pr_{vent}) de chaque secteur. Pour les scénarios d'accident générant un rayonnement thermique, $Pr_{cs} = Pr_{vent} = 1$.
4. Évaluer la probabilité globale de la séquence d'événements menant au scénario d'accident i (Pr_{seq}). Déterminez la zone couverte par l'effet létal et la probabilité de décès (Pr_d) pour chaque niveau de stabilité et direction du vent de chaque point de la grille.
5. Estimer la contribution du lieu d'accident sélectionné au risque individuel ($\Delta IR_{i, seq, cs, vent}$) en sélectionnant la fréquence des événements déclencheurs et la probabilité d'une série d'événements menant au lieu de l'accident, et la stabilité en un point donné de la grille Probabilité de catégorie, probabilité de direction du vent et probabilité de décès :

$$\Delta IR_{i, seq, cs, vent} = f_i \cdot Pr_{seq} \cdot Pr_{cs} \cdot Pr_{vent} \cdot Pr_d \quad (2.8)$$

6. Le risque individuel global (IR) à un point donné du maillage est donné par :

$$I_i = \sum_i \sum_s \sum_c \sum_v \Delta I_{i, s, c, v} \quad (2.9)$$

Les courbes d'iso-risque sont habituellement tracées pour des ordres de grandeur. Il s'agit d'un processus relativement complexe qui s'effectue couramment par l'application de codes informatiques appropriés.

3.7.2 Risque sociétal

Le risque sociétal peut également être exprimé sous la forme d'une courbe F-N, comme présenter dans la figure 18. Ces valeurs sont obtenues en suivant la fréquence cumulée (en fonction de N) des scénarios d'accidents causant N décès ou plus par an.

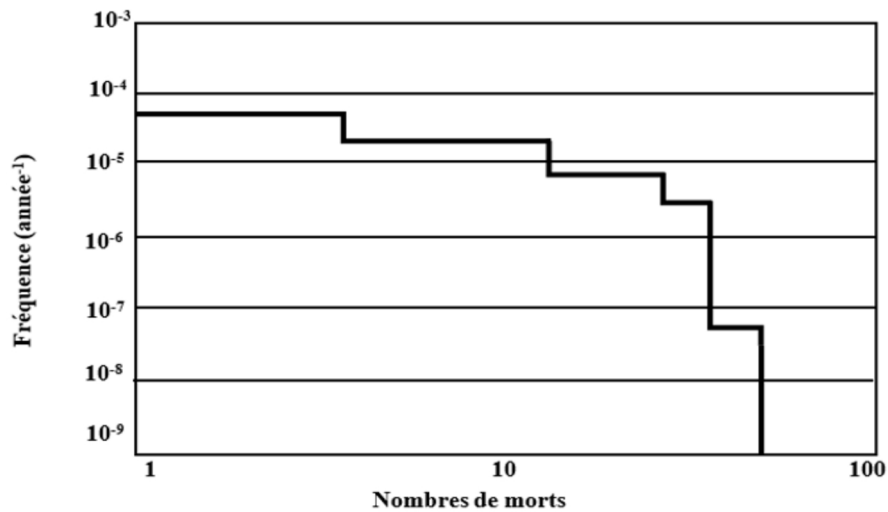


Figure 18 : Exemple d'une courbe F-N [118].

Afin d'établir la courbe de risque sociétal F-N, il est important de combiner correctement la fréquence d'occurrence et le nombre de décès. Le nombre de décès N_i dans chaque scénario d'accident est exprimé comme [60]:

$$N_i = \sum_{x,y} p_{x,y} \cdot P_r \quad (2.10)$$

Où $p_{x,y}$ est le nombre de personnes exposées au danger à l'endroit (x, y) et P_r est la probabilité que le scénario d'accidents i entraîne un décès à l'endroit (x, y) .

Le nombre de décès et sa fréquence doivent être évalués pour chaque scénario d'accident.

Les fréquences cumulatives sont par conséquent exprimées par :

$$f = \sum_i f \quad (2.11)$$

Pour tous les scénarios d'accidents i pour lesquels $N_i \geq N$

Où f_N est la fréquence de tous les scénarios d'accidents avec N ou plus de morts (an^{-1}), f_C , i est la fréquence du scénario d'accidents i (an^{-1}) et N_i est le nombre de décès suite au scénario d'accidents i .

4. Application de la (QRA) dans l'industrie des procédés

Le (QRA) et certaines de ses technologies associées ont été développés à l'origine dans les industries de l'énergie nucléaire, de l'aérospatiale et de l'électronique, et sont appelés (probabilistic risk assessment: PRA, en anglais). Son application s'est étendue à l'industrie des procédés chimiques dans les années 1970 et 1980, en particulier dans Canvey research [120] et Rijnmond research [121] sont des exemples bien connu.

Au début des années 2000, la (QRA) était principalement utilisé comme activité de vérification [122], mais l'approche a joué maintenant un rôle important dans tous les aspects du cycle de vie du processus de traitement. Des études [123] ont démontré la valeur de l'application de (QRA) dès les premières étapes du processus de conception (étapes de faisabilité et de conception) afin de comprendre les caractéristiques de sécurité inhérentes à la conception. Comme le soulignent [63], (QRA) est souvent utilisé pour la conception détaillée et l'ingénierie, car dans les premières étapes de cette phase, les concepteurs manquent généralement d'informations sur le niveau de risque d'installation.

Une autre application connexe de (QRA) est qu'après que de nombreux chercheurs et industriels aient résolu ce problème, l'intégration de (QRA) aux activités d'exploitation et de maintenance a été largement reconnue [124–126]. La maintenance basée sur les risques vise à étudier les modes de défaillance et leurs effets, à déterminer leurs risques et à formuler des stratégies de maintenance pour minimiser l'occurrence des modes de défaillance les plus critiques.

Cependant, l'application du (QRA) n'est pas uniquement dédiée aux étapes susmentionnées du cycle de vie de l'installation. Elle a également été appliquée à des zones industrielles entières [127] et à l'aménagement du territoire [128-129]. De plus, ces dernières années, les gens ont accordé une grande attention à l'inclusion de (QRA) dans l'évaluation quantitative de l'effet domino [14], [43]. Une approche globale a également été développée pour inclure les risques naturels (NaTech), tels que les inondations [130-131], et étendre ses potentialités à l'évaluation quantitative de leur contribution au risque industriel. Les problèmes de sécurité tels que les attaques terroristes et les sabotages éventuels [132-133] sont également de plus en plus inclus dans les évaluations

quantitatives des risques afin de rendre compte des risques qui représentent la situation réelle de manière détaillée et réaliste. Récemment, Goerlandt [134] et d'autres ont fait d'excellentes critiques sur différentes applications de (QRA). [8], [135 -136].

5. Avantages de l'approche (QRA)

La liste des avantages de (QRA) peut également être déterminée sur la base des vues de Greenberg [137] et Apostolakis [138] qui soulignent que:

- Le principal avantage du (QRA) est qu'il peut fournir aux concepteurs et aux opérateurs des conseils sur la manière de minimiser les risques d'accidents. Ces lignes directrices sont plus objectives que celles fournies par d'autres techniques qualitatives et semi-quantitatives.
- (QRA) permet aux futurs exploitants d'installations d'évaluer quantitativement les risques auxquels leur personnel peut être confronté.
- Lorsque l'analyse coûts-avantages est incluse, elle peut également calculer et comparer les avantages potentiels de la réduction des risques fournis par différentes mesures de contrôle des risques. Par conséquent, l'approche (QRA) est un outil efficace pour fournir une aide à la décision pour l'acceptabilité des risques.
- L'application du (QRA) peut apporter un soutien à la prise de décision judiciaire afin d'obtenir des résultats plus éclairés sur les risques, comme en témoignent les résultats des tests évaluant la responsabilité de l'explosion du dépôt pétrolier de Buncefield en 2005 [139].

6. Limites de l'approche (QRA)

Bien que l'approche (QRA) soit efficace, son application est très coûteuse en temps et nécessite des experts qualifiés. En fait, (QRA) n'a pas pris soin de plusieurs aspects, ce qui a ouvert la voie à de nouvelles améliorations. Plusieurs auteurs [12], [60], [135-136] ont souligné les limites de (QRA), qui peuvent être résumées comme suit :

- L'objectivité et la validité des résultats de (QRA) dépendent de la disponibilité des données, mais en fait, cela ne peut se faire sans avis d'experts et bases de données, en particulier pour les nouveaux projets.
- Le risque personnel ou sociétal est généralement exprimé sous la forme d'une valeur unique. Cependant, divers modèles sont utilisés pour calculer les résultats de (QRA) avec une précision limitée [1]. Par conséquent, les résultats des calculs (QRA) ont leurs

incertitudes associées. En effet, dans (QRA), chaque étape, qu'elle soit qualitative ou quantitative, est une source potentielle d'incertitude.

On peut distinguer trois types d'incertitudes :

- Les incertitudes liées à l'exhaustivité : elles sont liées au choix et à la pertinence du phénomène accidentel étudié et à la relation causale qui y est liée.
- Incertitudes liées à la modélisation : elles concernent les déficiences et les déficiences des modèles utilisés pour les calculs de probabilité (en particulier de conséquence).
- Incertitude liée aux paramètres d'entrée (QRA) : par manque d'information ou par ignorance, sa source potentielle est l'imprécision voire l'indisponibilité des données sur différents paramètres. Cette incertitude est inhérente à toutes les étapes de (QRA).

7. Conclusion

L'analyse quantitative du risque des accidents technologiques majeurs fait partie d'un processus plus large de gestion des risques. Sa réalisation permet de connaître l'existence d'accidents potentiels liés à l'installation. La connaissance des conséquences et les risques pour les populations, l'environnement et les installations environnantes, contribue à une meilleure gestion de ceux-ci par leur réduction par la mise en place de mesures de sécurité et d'atténuation. En fonction de la nature des accidents majeurs potentiels identifiés, prévoir des mesures d'urgence et des plans de gestion des risques.

Les faits ont prouvé que l'estimation quantitative des conséquences des accidents majeurs est la tâche la plus difficile en (QRA). Dans le prochain chapitre, nous passerons en détail à introduire les applications des modèles numériques (OREM) et d'outils informatiques avancés (SAFETI). Pour analyser les effets d'incendie et explosion dans l'industrie pétrolier et gazier qui nécessite un traitement rigoureux.

Chapitre 3

Modèle d'explosion des régions obstruées (OREM)

1. Introduction

Ce chapitre décrit la théorie du modèle (OREM) pour prédire les effets de risque d'explosion dans les installations industrielles pétroliers. Le modèle est basé sur le modèle multi-énergie décrit dans le livre jaune néerlandais [97] pour la modélisation des conséquences [140], [141]. Par souci de concision, le modèle multi-énergie sera appelé "ME".

ME dans (OREM) prédit les conséquences des explosions de nuages de vapeur sous forme de surpressions de pointe et leur durée dans la région autour de l'explosion en utilisant les courbes de souffle développées par TNO [97] pour une charge stœchiométrique hémisphérique idéale de combustible-air. La distance de l'explosion peut être spécifiée, puis la surpression et la durée sont calculées à l'aide de ME. On peut aussi entrer une surpression cible ou une durée de phase positive et ME renvoie la distance à l'effet visé à partir du centre de l'explosion.

Utilisé de cette manière, le modèle est une simple fonction de recherche et il exige d'identifier la source de l'explosion pour établir deux paramètres corrélés, à savoir l'énergie totale de combustion et la force d'explosion pour l'évaluation des conséquences et des risques.

2. Modèle standard d'explosion

En utilisant ME, une liste des volumes obstrués est donnée pour chaque cas modélisé. Chaque volume doit recevoir un numéro de courbe ME. La modélisation considère chaque volume comme une source d'explosion distincte. L'énergie de chaque explosion est déterminée en fonction de la masse totale inflammable dans le nuage, le volume obstrué et les effets de l'explosion sont calculés en conséquence [142].

2.1. Modèle d'explosion de régions obstruées (OREM)

Le nombre de sources d'explosion d'un cas et leurs énergies d'explosion sont déterminés en utilisant le comportement variable dans le temps des nuages inflammables à partir de la modélisation de la dispersion et de la disposition des régions obstruées autour du rejet de l'accident. La puissance de chaque explosion peut être donnée en entrée ou déterminée par ME en utilisant les corrélations (guidance for the application of the multi-energy, acronyme du projet "GAME") [143] basées sur les caractéristiques clés de la régions obstruées.

2.2 Contexte

Le potentiel de dommages aigus des explosions de nuages de vapeur a été prouvé par des incidents réels, y compris un potentiel important de pertes de vies humaines, de biens et de production. Les explosions de Flixborough en 1974 et de Texas City et Buncefield en 2005 en sont des exemples [51], [144]. En conséquence, les explosions de nuages de vapeur ont fait l'objet de recherches approfondies, notamment par le développement de modèles prédictifs.

La catégorie de modèle la plus ancienne et la plus simple établit une corrélation entre les distances et les niveaux de dommages (niveaux définis en termes d'effets de dommages spécifiques tels que les fenêtres brisées) et l'énergie libérée lors d'une explosion. Le modèle équivalent TNT étend ces corrélations pour prédire les surpressions de pointe en fonction de la distance du centre de l'explosion [118]. Ces modèles sont simples et faciles à appliquer. La recherche permettant de mieux comprendre la physique des explosions de nuages de vapeur, des modèles avancés ont été mis au point pour résoudre les équations fondamentales régissant les VCE [3] en s'appuyant sur les techniques de la dynamique numérique des fluides (CFD) [145]. Les résultats expérimentaux et les informations fournies par la modélisation détaillée ont mis en évidence les limites des modèles équivalents TNT. Toutefois, les modèles mathématiques avancés sont généralement trop exigeants en ressources humaines et informatiques pour être applicables et les chercheurs se sont efforcés de dériver des méthodes de prédiction meilleure que les approches équivalentes TNT mais moins coûteuse que la modélisation CFD [146].

L'une des principales conclusions de la recherche est que, lorsque le nuage de vapeur brûle et se dilate, les gaz commencent à se déplacer et des turbulences sont générées pour provoquer une vitesse de flamme bien supérieure à la vitesse de combustion laminaire typique, ce qui peut entraîner des surpressions importantes. En l'absence de cette turbulence, le nuage brûlera comme un feu instantané avec différentes conséquences en termes de danger et surtout sans générer des fortes surpressions. Cependant, des turbulences importantes peuvent être générées par des obstacles rencontrés par une flamme lorsqu'elle se propage à travers le nuage de vapeur dans les régions obstruées [146]. Ce processus est soumis à une rétroaction positive, de sorte que plus les obstacles sont nombreux, plus les turbulences sont générées, ce qui accélère encore la flamme. Ce sont les explosions qui se produisent en présence d'obstacles qui peuvent générer des surpressions susceptibles de causer des dommages importants [146].

Il est peut-être utile de noter que la densité des obstacles est parfois appelée congestion et que la région qui les accueille est considérée comme une région encombrée dans la littérature. Dans ce chapitre, nous utilisons les termes "obstruction", "obstacles" et "région encombrée".

Un autre facteur clé pour déterminer l'ampleur de la surpression est le degré d'empêchement de l'expansion du nuage. Lorsque le nuage brûle, il se réchauffe et se dilate, et si le nuage est contraint de se dilater dans une ou deux dimensions seulement, le mécanisme de rétroaction positive entraîne des surpressions plus importantes que si le nuage peut se dilater librement. Par exemple, si le nuage de vapeur en combustion et donc en expansion peut se déplacer dans les trois dimensions, les surpressions générées seront plus faibles que si le nuage est contraint de se développer dans seulement deux dimensions, comme sous un réservoir de stockage surélevé, ou dans une dimension, comme dans un tunnel routier. Cette contrainte d'expansion est souvent appelée degré d'expansion ou degré de confinement [3].

Des modèles d'explosion simples qui tiennent compte de l'importance de l'obstruction et du confinement sur l'accélération de la flamme dans les explosions de nuages de vapeur et la génération subséquente de surpression de souffle ont été développés au cours de la dernière décennie et plus encore. Le modèle multi-énergie TNO tel que décrit dans le yellow book [97] en est un, le modèle Baker-Strehlow-Tang [17] en est un autre et ces deux modèles et autres sont disponibles dans SAFETI pour l'analyse des conséquences des risques.

En raison de la complexité accrue, ces modèles sont moins faciles à appliquer aux scénarios d'accident envisagés que le type de modèle équivalent TNT, plus simple. Un problème particulier est que différents analystes peuvent faire des hypothèses différentes et obtenir des résultats divergents. Cela a conduit à des recherches supplémentaires comparant les résultats du modèle multi-énergie à des modèles et mesures plus précis afin de produire des orientations et une procédure formelle sur la manière d'appliquer le modèle multi-énergie à des usines réelles.

Entre 1993 et 1995, un projet industriel commun parrainé par 12 organisations a étudié les moyens de fournir des "orientations pour l'application du modèle multi-énergie" "GAME". Ce travail a été publié en 1995 [140]. Deux corrélations ont été développées dans ce projet pour estimer la surpression de pointe initiale des explosions de nuages de vapeur sur la base des caractéristiques du nuage et des régions obstruées que le nuage a couvertes. Les surpressions estimées sont ensuite utilisées pour sélectionner les courbes de souffle.

Les corrélations de GAME ont fourni une approche systématique pour appliquer le modèle multi-énergie. Cependant, des incertitudes subsistent quant au choix de la corrélation et à la définition de ses paramètres pour des installations de traitement réelles. Une autre projet industriel conjoint a suivi pour étudier l'application pratique des orientations de GAME à des exemples de scénarios spécifiques. Dans ce travail, les résultats du modèle multi-énergie ont été comparés aux informations détaillées fournies par les prédictions et les mesures de la CFD. Ce travail a été publié en 1998 [141] sous l'acronyme du projet "GAMES" (GAME, deuxième phase).

Parallèlement à ce travail, le Yellow Book a été mis à jour, de sorte qu'une partie des recherches et des orientations ont été reflétées dans la version de 1997 du Yellow Book [97].

Une autre zone d'incertitude particulière est la distance de séparation qui empêche les régions se comportent comme une seule grande région. Cette situation est suffisamment préoccupante pour qu'un autre projet conjoint soit financé pour l'étudier (research to improve guidance on separation distance for the multi-energy method, l'acronyme du projet est RIGOS) [147]. Ce travail comprend un programme expérimental et donne un aperçu de l'influence de la distance de séparation entre les régions obstruées sur le comportement de l'explosion. Les résultats ont été publiés en 2002.

OREM dans SAFETI a été développé pour permettre à modéliser les effets de souffle des nuages de vapeur se dispersant dans les régions contenant des obstacles selon les informations publiées dans la collection de rapports et d'articles ci-dessus.

2.3 Modèles d'explosion de régions obstruées vs modèles CFD

Une explosion réelle de nuage de vapeur dans une usine chimique n'est pas seulement un événement très dangereux, elle est aussi très complexe en termes de thermodynamique et de dynamique des fluides. La modélisation directe de ces explosions fait l'objet des modèles d'explosion les plus complexes appartenant à la catégorie de la dynamique des fluides numérique [3]. L'application de tels modèles est exigeante en termes de personnel et de ressources informatiques et ne peut donc être justifiée lorsqu'il existe un besoin particulier d'obtenir les meilleures prévisions possibles pour un nombre limité de cas. Ces caractéristiques rendent également ces méthodes inadaptées à une inclusion de routine dans les études (QRA) [73].

(OREM) propose des modèles d'explosion très simplifiés qui fournissent toujours les principaux résultats nécessaires à l'analyse des conséquences et à (QRA). Ce modèle se distingue également du modèle plus simple équivalent au TNT en incluant l'effet des obstacles et du confinement

partiel. Il a été démontré que les influences de ces facteurs donnent des différences caractéristiques importantes entre les explosions d'explosifs solides et les sources de nuages de vapeur. L'utilisation de (OREM) signifie que ces facteurs sont pris en compte dans une étude de danger et/ou une (QRA) [8],[99].

L'approche de SAFETI peut également être utilisée comme une étape de sélection pour qualifier la décision de mener un (CFD) et de sélectionner les cas critiques pour l'analyse de la (CFD).

3. Aperçu du modèle multi-énergie

3.1 Courbes de souffle pour les effets d'explosion

Le modèle multi-énergie fait partie d'un groupe de modèles utilisant des courbes de souffle pour prédire les conséquences des (VCE) [3]. Les autres modèles de ce groupe comprennent le modèle équivalent TNT, le modèle baker-strehlow-tang et le modèle d'évaluation des zones de congestion (CAM). Les courbes de souffle sont généralement élaborées sur la base de simulations (CFD) de cas idéalisés et fournissent une surpression latérale et une impulsion ou une durée de surpression positive en fonction de la distance de l'explosion.

Le modèle multi-énergie consiste en une famille de courbes de souffle pour les surpressions de pointe, la pression dynamique et la durée en fonction de la distance. Ces courbes ont été dérivées des prédictions détaillées du modèle pour un scénario d'explosion idéalisé. L'explosion est basée sur un nuage de vapeur hémisphérique au niveau du sol, rempli d'une charge d'air-carburant à concentration stichométrique. Pour générer la famille de courbes, différentes vitesses de flamme sont supposées et ces vitesses de flamme sont spécifiées comme étant constantes pendant l'explosion [142].

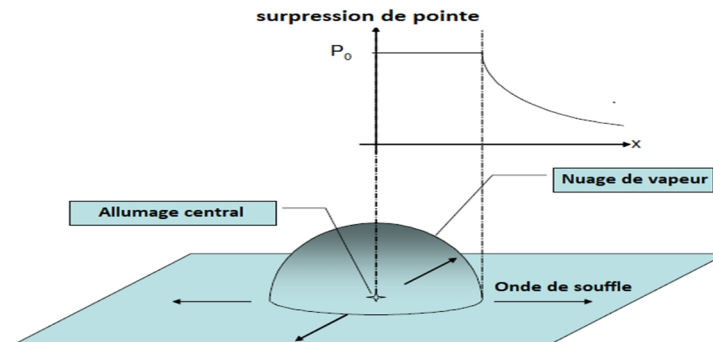


Figure 19 : Explosion idéale d'un nuage de vapeur comme base des courbes multi-énergie [3].

La figure 19 illustre le scénario idéalisé et les principales caractéristiques du modèle. La géométrie est symétrique en rotation avec un rayon initial r_0 . La symétrie est préservée en prescrivant un allumage central. Le front de flamme se propagera alors symétriquement à partir du centre. En raison de la symétrie, une seule courbe peut décrire le comportement de l'explosion dans toutes les directions. La zone de combustion est caractérisée par une seule surpression initiale de pointe constante, P_0 . Ensuite, en dehors de cette zone, l'explosion est modélisée comme une onde de souffle qui se désintègre avec la distance, comme le montre la figure 20 pour la surpression latérale et la figure 21 pour la pression dynamique

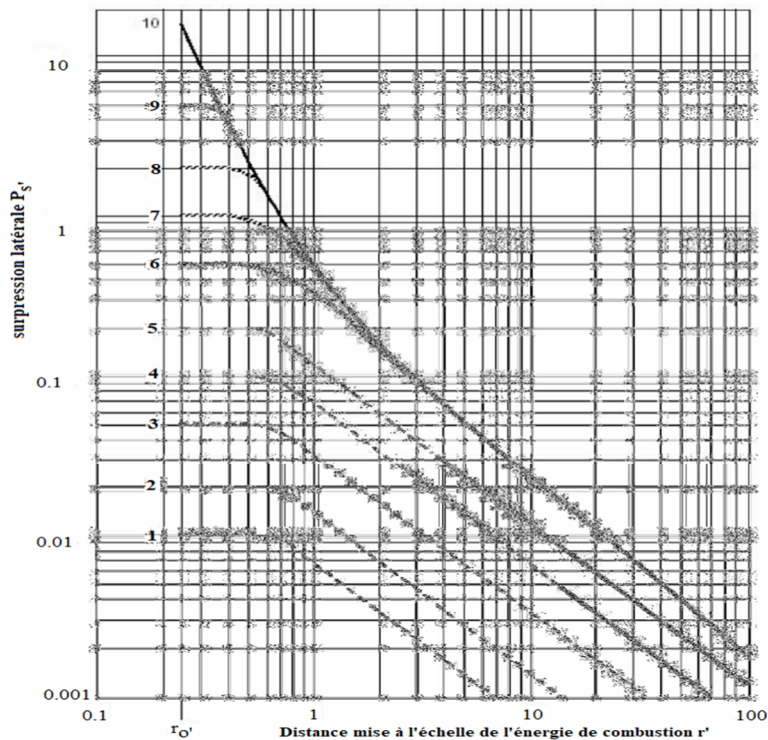


Figure 20 : Décroissance de la surpression latérale de pointe en fonction de la distance [3].

La surpression et la distance sont mises à l'échelle des paramètres non dimensionnels comme suit

$$P'_s = \frac{P}{P_a} \quad (3.1)$$

$$P'_d = \frac{P}{P_a} \quad (3.2)$$

$$r' = \frac{r}{(E/P_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.3)$$

Où E est l'énergie totale de combustion de l'explosion, c'est-à-dire l'énergie de l'explosion, P_s est la surpression latérale maximale, P_a est la pression atmosphérique et r est la distance du centre de

l'explosion. Dans le modèle multi-énergie TNO original [97], l'énergie totale de l'explosion est calculée en supposant que tout le combustible présent brûle et que $3,5\text{MJ/m}^3$ a été utilisé comme chaleur représentative de la combustion pour les hydrocarbures. Le choix que l'analyste doit faire pour appliquer le modèle multi-énergie consiste à quantifier E et à sélectionner la courbe de souffle la plus appropriée.

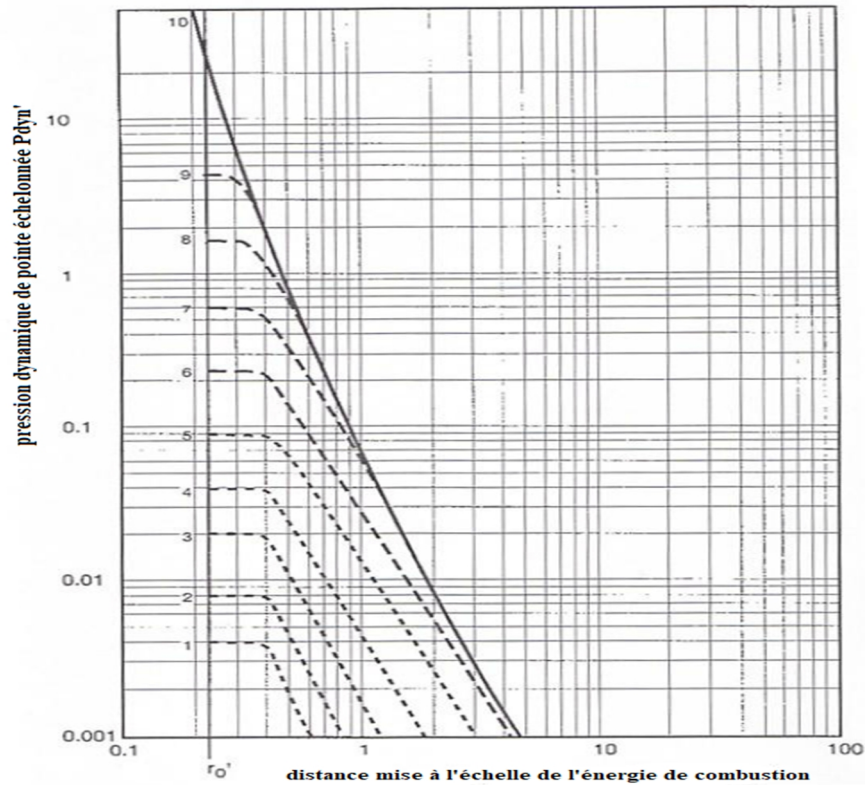


Figure 21 : Décroissance de la pression dynamique de pointe en fonction de la distance [3].

La durée de l'onde de choc est obtenue de la même manière comme une famille de courbes, comme le montre la figure 23.

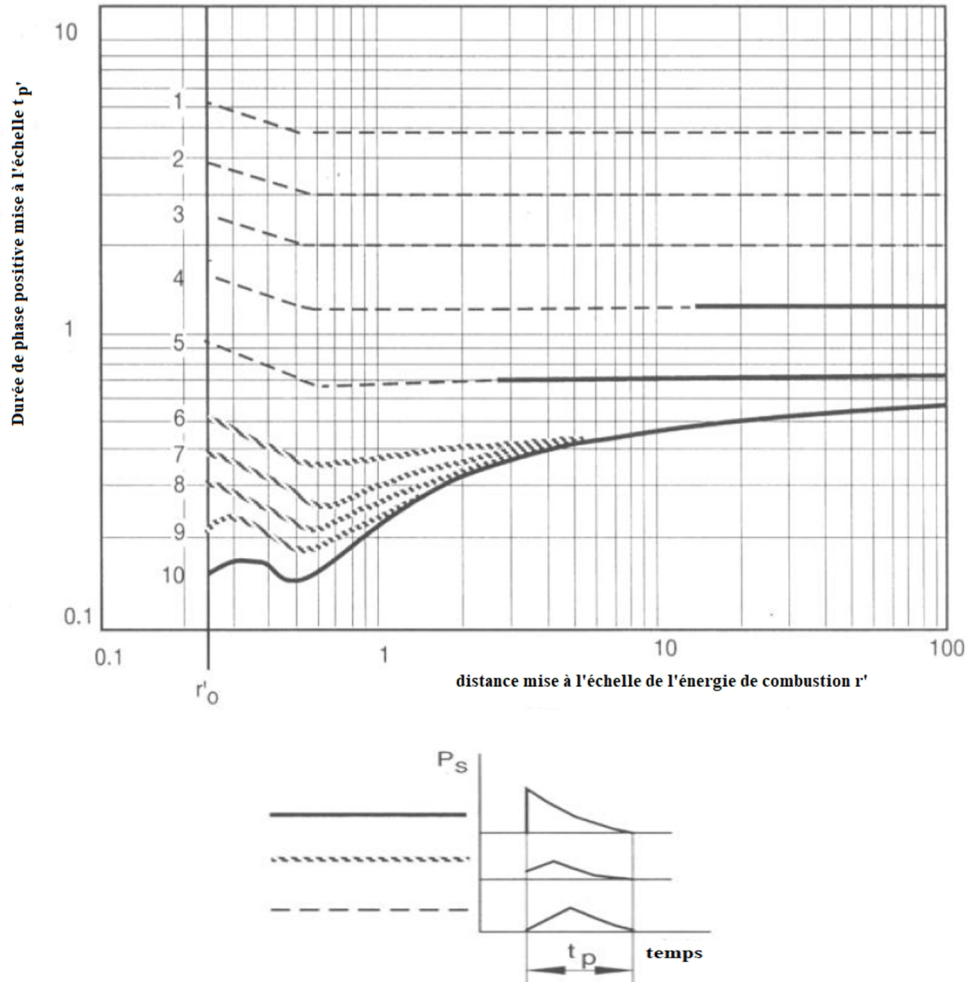


Figure 23 : Durée de l'impulsion Vs à l'échelle de la distance du centre de l'explosion et de la forme de l'impulsion [3].

La durée de la phase positive échelonnée est définie comme suit ;

$$t'_p = \frac{t_p v_a}{(E/P_a)^{\frac{1}{3}}} \quad (3.4)$$

Où t_p est la durée de la phase positive et v_a est la vitesse du son dans l'air. La forme du souffle est indiquée dans la figure 23. La ligne pleine indique la plage de comportement de l'onde de choc (c'est-à-dire le changement de phase de la surpression) tandis que les deux lignes pointillées indiquent une accumulation plus progressive jusqu'à la valeur de surpression maximale des ondes de pression [97].

Pour appliquer le modèle, l'analyste doit convertir le scénario réel en une explosion de nuage de vapeur hémisphérique idéalisée équivalente la plus proche possible, puis utiliser la courbe appropriée pour rechercher les valeurs des surpressions de pointe et de la durée à des distances données du centre de l'explosion. Le modèle est donc très différent de la classe de modèles CFD

où une explosion spécifique est modélisée mathématiquement. En conséquence, les modèles CFD peut prévoir des résultats beaucoup plus détaillés, tels que le comportement de la surpression en fonction du temps et du lieu d'allumage qui peut se trouver à la limite d'une source d'explosion, au lieu d'un allumage central [7]. En utilisant le modèle multi-énergie, les sorties sont limitées aux surpressions de pointe et à la durée de la phase positive et l'explosion est symétrique.

3.2. Définition des régions encombrées

L'explosion d'un nuage de vapeur implique une flamme qui se déplace à travers un mélange air-carburant. En l'absence de toute turbulence, le nuage brûle comme un Feu de nuage sans générer de surpression importante. Cependant, des turbulences importantes peuvent être générées par des obstacles rencontrés par une flamme lorsqu'elle se propage à travers le nuage de vapeur dans les régions obstruées. Ce processus est soumis à un retour d'information positif, de sorte que plus les obstacles sont nombreux, plus les turbulences sont générées, ce qui accélère encore la flamme [3]. Ce sont les explosions qui se produisent en présence d'obstacles qui peuvent générer des surpressions susceptibles de causer des dommages importants. La définition de la région obstruée est donc une partie très importante de l'application de OREM.

Contrairement à la description des nuages qui est générée par les modèles de décharge et de dispersion, les régions obstruées doivent être saisies par l'analyste. Ce processus commence par la définition d'une boîte englobante qui contient les obstacles pertinents. La manière dont cela peut être réalisé en pratique est sujette à interprétation et peut entraîner de grandes différences dans les conséquences et les prévisions de risques. Pour faciliter ce processus, le yellow book [148] explique comment les régions obstruées doivent être définies pour le modèle multi-énergie. Des exemples d'application de la recette étape par étape dans les usines de traitement pour le modèle multi-énergie se trouvent dans le yellow book.

3.3 Orientations du yellow book sur la définition des régions encombrées

3.3.1. Évaluer la zone d'intérêt et la décomposer en formes géométriques

La méthode commence par l'évaluation des objets dans la zone d'intérêt. Les limites de la zone d'intérêt peuvent être dérivées de la distance sous le vent des limites LII (niveau d'inflammabilité le plus bas) des éventuels nuages de vapeur et/ou d'une considération de l'étendue des objets qui peuvent contribuer à l'obstruction des nuages [148]. Ensuite, les objets eux-mêmes (supposés être

des éléments de plantes tels que des tuyaux, des récipients, des structures de support, etc) peuvent être approximés sous forme de formes géométriques :

- Cylindres avec longueur lc et diamètre dc
- Boîtes de dimensions $b1, b2, b3$
- Sphères de diamètre ds

3.3.2. Supposons un lieu d'allumage

Il s'agit d'une étape nécessaire avant les jugements qui seront rendus à l'étape (3.3). Bien entendu, dans la pratique, le lieu d'allumage sera variable et peut avoir un impact sur les calculs ultérieurs. Aucune tentative n'a été faite pour automatiser cette variation, de sorte qu'un lieu représentatif doit être choisi pour tous les scénarios d'allumage. On peut se référer aux exemples travaillés dans le rapport GAMES [143] pour des exemples de la manière d'appliquer cette pratique d'étape. Par exemple, s'il y a une seule région obstruée, l'hypothèse normale serait de supposer l'allumage au centre de la région obstruée. Il s'agit là d'une hypothèse systématiquement prudente. S'il y a plusieurs régions obstruées, l'hypothèse de différents lieux d'inflammation peut conduire à la définition de plusieurs régions obstruées en fonction des résultats de l'application des règles de l'étape (3.4).

3.3.3 Déterminer l'orientation des obstacles

Prenez donc la plus petite dimension orientée dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de la flamme pour être $D1$;

- $D1 = lc$ ou dc pour un cylindre
- $D1 = le$ plus petit de $b1$ et $b2, b2$ et $b3$, ou $b1$ et $b3$ pour une boîte
- $D1 = ds$ pour une sphère

Prenez la dimension de l'obstacle parallèle à la propagation de la flamme pour être $D2$.

3.3.4 Construction d'une région obstruée

Cette étape consiste à définir quels sont les obstacles appartenant à la région obstruée. La méthode utilise 3 paramètres : un facteur 10 comme multiple de $D1$, 1,5 comme multiple de $D2$ et une distance de 25 m. En partant du centre de la région obstruée, les obstacles sont ajoutés selon les critères si la distance de centre à centre entre les objets est inférieure à $10 D1$ ou $1,5 D2$, sauf si la

distance de séparation dépasse 25m (la distance de séparation étant basée sur la limite extérieure et non sur la distance de centre à centre) [148].

3.3.5 Définition d'une boîte contenant la région obstruée

Les régions obstruées de OREM sont limitées à des cases rectangulaires comme l'illustrent les exemples travaillés dans le rapport TNO [147]. Les orientations du TNO sont les suivantes ;

Inclure l'espace entre les obstacles extérieurs et toute surface de confinement (par exemple le sol) si la distance de séparation répond aux critères $<10 D1$ ou $<1,5 D2$.

Exclure les parties des obstacles qui s'étendent au-delà de la région obstruée - par exemple la partie supérieure des cheminées, des colonnes de distillation et des tuyaux.

Le volume libre de la région obstruée est défini comme V_{void} et peut être déduit en soustrayant le volume des obstacles du volume de la boîte de délimitation.

3.3.6. Subdivision en plusieurs cases

La région obstruée peut également être subdivisée en plusieurs cases pour réduire l'espace libre à l'intérieur de la région lorsqu'une seule case rectangulaire a inclus trop d'espace libre. Ces sous-boîtes sont rectangulaires et adjacentes sans se chevaucher.

3.3.7. Définir des régions obstruées supplémentaires, le cas échéant

Il pourrait y avoir plus d'une région obstruée sur l'usine. Des recherches sont menées pour déterminer si les explosions de chaque région doivent être traitées ensemble ou séparément.

Après avoir passé ce processus, le résultat est une ou plusieurs boîtes rectangulaires qui représentent une région obstruée. Si d'autres régions de la plante contiennent des obstacles, elles peuvent être décrites en répétant ce processus.

3.4 Caractérisation des régions obstruées pour ME

À ce stade, le volume de la région obstruée V_{or} est assez bien caractérisé et l'étape suivante consiste à compléter la description des régions obstruées afin de pouvoir sélectionner les courbes de souffle appropriées pour les calculs des conséquences.

ME Les deux types de régions obstruées pour ME sont l'obstruction "Force définie" et l'obstruction "Force calculée". La force de l'explosion, c'est-à-dire celle indiquée par le numéro de la courbe de souffle, est saisie directement pour une explosion définie par une obstruction de "force définie".

Le numéro de la courbe d'une explosion définie par une obstruction de "force calculée" est déterminé par le modèle à l'aide des corrélations du GMAE [53] basées sur les données fournies via l'interface graphique pour la région obstruée.

Les données requises pour définir une obstruction "Force calculée" sont :

- Degré d'expansion, 2D ou 3D
- Rapport de blocage du volume, c'est-à-dire le rapport entre le volume de tous les obstacles et le volume total de la région obstruée.
- Diamètre typique des obstacles. Il peut être donné directement ou calculé comme le diamètre hydraulique en fournissant au modèle la surface des obstacles
- Longueur du trajet de la flamme. Celle-ci peut être fournie directement ou calculée par le modèle en supposant une forme de nuage hémisphérique

Lorsque plusieurs régions obstruées sont incluses à l'intérieur d'une source d'explosion, les courbes de souffle de l'explosion sont sélectionnées sur la base des caractéristiques combinées des régions obstruées.

4. Dérivation des sources d'explosion

4.1 Parties non obstruées et obstruées d'un nuage de vapeur

Nous sommes préoccupés par le risque d'explosion causé par la partie d'un nuage de vapeur qui se trouve dans les limites d'inflammabilité à un moment donné. Par conséquent, la limite LII du nuage à un moment donné est la description principale du nuage. Pour décrire le nuage, nous prenons les résultats du modèle de dispersion utilisé généralement (unified dispersion model UDM) [149]. Ensuite, diverses fonctions de post-traitement sont appliquées pour obtenir la description requise du nuage à un moment donné, c'est-à-dire une vue du nuage.

Une vue de nuage est divisée en un nombre donné de marches ou de marches d'une taille donnée.

Les données permettant de définir une vue en nuage sont les suivantes :

Tableau 8 : données permettant de définir un nuage.

| |
|---|
| Temps à partir du début du segment |
| Le pas de temps de la vision |
| Taille des pas |
| Numéro de l'étape |
| Positions des marches au vent |
| Hauteur de l'axe central aux positions sous le vent |

| |
|--|
| Demi-largeur à LII (fraction) aux positions sous le vent |
| Demi-hauteur à LII (fraction) aux positions sous le vent |
| Masse inflammable dans les positions sous le vent |

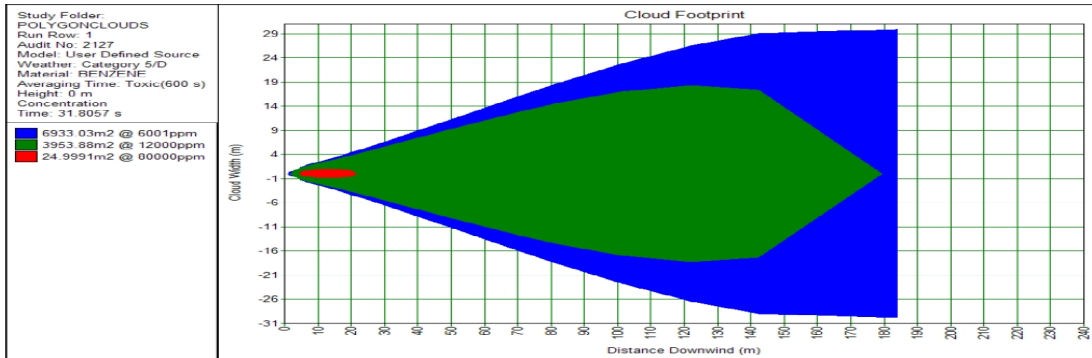


Figure 24 - Exemple de limites du nuage à un moment précis [159].

Un nuage peut ou non exister dans une région obstruée. Si ce n'est pas le cas, nous avons alors la situation la plus simple dans le sens où nous pouvons avoir une seule source d'explosion non confinée pour ce cas pour le modèle multi-énergie [143]. Malgré cela, nous devons encore définir le centre, déterminer la courbe à utiliser et l'énergie totale de combustion de l'explosion. En règle générale, les dommages causés par une telle explosion seront limités puisque sans les obstructions, la surpression générée sera faible. Ce type de scénario n'est donc pas d'un grand intérêt pour l'explosion.

Les nuages dont tout ou partie du volume inflammable se trouve dans des zones d'obstacles sont susceptibles de causer des dommages beaucoup plus importants par l'explosion. La figure 25 illustre une vue simple d'un tel nuage de vapeur. Il commence dans une région obstruée et se disperse sous le vent de sorte qu'une partie du nuage se trouve dans la région obstruée et une autre partie à l'extérieur. En dehors de l'explosion confinée, la ME pourrait également définir une source d'explosion non confinée par la partie située à l'extérieur de la région obstruée [146].

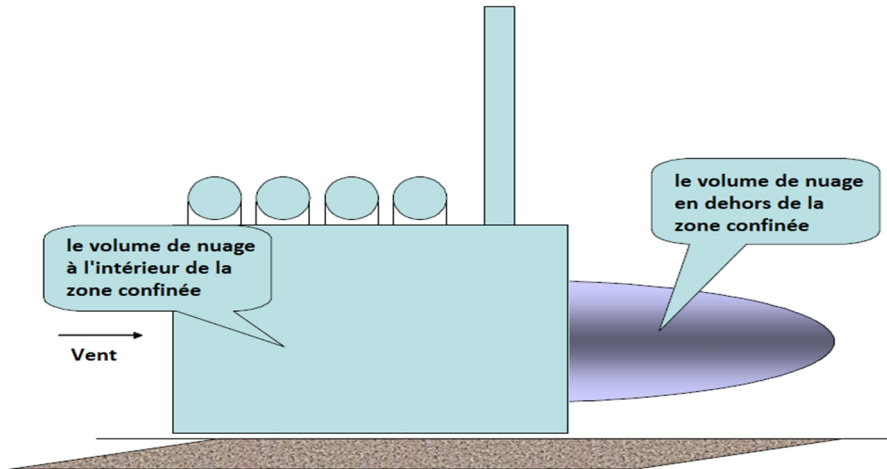


Figure 25 : Exemple d'un nuage de vapeur commençant dans une région obstruée [3].

Un point essentiel apparaît lorsque l'on observe le nuage de cette manière. Les modèles de dispersion utilisés ne modélisent pas explicitement les obstructions. Certaines entrées peuvent être réglées pour affecter les résultats de la dispersion de manière générale. Par exemple, le dégagement peut être défini comme " impacté " et/ou le facteur de rugosité de surface peut être fixé à un niveau élevé. Cependant, le fait est que le nuage n'interagit pas directement avec les obstructions [149].

Pour gérer cette importante limitation, trois options sont proposées aux utilisateurs ;

- 1) l'influence des obstructions sur le nuage est déjà prise en compte dans le modèle de dispersion.
- 2) lorsque le nuage commence dans une région obstruée, cette région se remplit d'abord avant que le nuage ne se déplace sous le vent (dans cette méthode, le nuage est simplement empêché de quitter la région obstruée jusqu'à ce que le volume du nuage soit égal au volume de la région obstruée. Ensuite, seul le volume excédentaire du nuage est modélisé en dérivant sous le vent. Il peut alors rencontrer d'autres régions obstruées où il se comporte maintenant comme les nuages de l'option 1).
- 3) une forme cylindrique s'étendant dans toutes les directions est supposée pour le nuage (une forme cylindrique avec un rapport hauteur/rayon donné est utilisée pour un nuage inflammable libéré à l'intérieur d'une région obstruée).

L'option 1 permet d'utiliser les résultats de dispersion de (UDM) comme données d'entrée pour le modèle d'explosion. Les options 2 et 3 signifient que les prévisions de dispersion sont manipulées avant d'être utilisées par le modèle d'explosion [149].

Nous avons donné ici un exemple simple, mais les cas généraux seront plus complexes. Le nuage de vapeur peut avoir plusieurs segments ou être présent dans plusieurs régions obstruées, de sorte qu'un scénario peut avoir plusieurs sources d'explosion. Dans ces cas, la séparation entre les régions obstruées devient importante.

4.2 Méthodes pour appliquer la distance de séparation critique

Un aspect important de l'application des modèles multi-énergie est la détermination des sources d'explosion, ce qui est difficile si un nuage de vapeur inflammable couvre plus d'une région obstruée séparée par des espaces ouverts. Si les espaces ouverts sont suffisants, la flamme de l'explosion d'un nuage de vapeur ralentira considérablement avant d'atteindre les régions obstruées adjacentes et, par conséquent, l'explosion développe de multiples explosions séparées. Cependant, si les espaces sont petits, la flamme se propagera dans les régions obstruées adjacentes sans ralentir de manière significative, par conséquent l'explosion ne produira qu'un seul souffle et devrait être modélisée avec l'énergie combinée de toutes les régions obstruées. La distance critique de séparation est la distance seuil qui permet de distinguer entre un seul souffle combiné ou des souffles multiples [146].

Le livre jaune [148] définit une zone encombrée comme une zone dans laquelle les obstacles sont situés à une distance de 10 m diamètres d'obstacle les uns des autres avec une limite supérieure de 25 m pour l'application du modèle multi-énergie. Cela suggère une distance de séparation critique égale à 10 m diamètres d'obstacles avec une limite supérieure de 25 m.

Le projet RIGOS [147] a constaté que la distance de séparation suggérée par le livre jaune pour le modèle multi-énergie n'est pas toujours conservatrice, en particulier dans la plage de surpression d'explosion la plus élevée. Sur la base de mesures provenant d'une série de tests contrôlés, RIGOS a recommandé un rapport de séparation critique basé sur la surpression d'explosion, comme le montre la figure 26 :

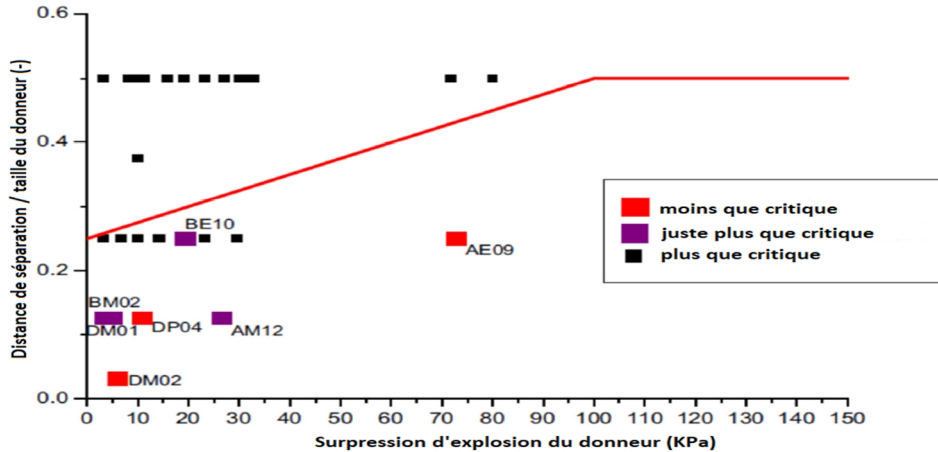


Figure 26 : Distance critique de séparation recommandée par le RIGOS [147].

Ainsi, la distance critique de séparation n'est pas une valeur fixe pour toutes les explosions, mais dépend de la surpression de l'explosion du donneur comme :

- Une distance de séparation critique est égale à la moitié de la dimension du donneur si la surpression de l'explosion du donneur est supérieure à 100 kPa.
- Une distance de séparation critique est égale à 1/4 de la dimension du donneur si la surpression de l'explosion du donneur est inférieure à 10 kPa.
- Une interpolation linéaire pour la surpression entre les deux.
- La connexion d'obstacles ayant une section transversale suffisante peut augmenter considérablement le seuil de la distance de séparation [147].

OREM a proposé deux options pour définir la distance de séparation critique comme suit

- Option 1 : Distance de séparation. Dans cette méthode, les utilisateurs fournissent une distance de séparation directement comme la recommandation du livre jaune pour le modèle multi-énergie [148].

En utilisant cette option, (OREM) calculera alors la plus courte distance bord à bord entre deux régions obstruées, une séparation inférieure à la distance de séparation spécifiée indiquant de combiner le nuage de vapeur à l'intérieur de celles-ci pour former une source d'explosion combinée, et de séparer les sources d'explosion autrement.

- Option 2 : Un ratio de séparation critique. Dans ce cas, les utilisateurs fournissent un rapport de séparation critique tel que recommandé par RIGOS [147] pour le modèle multi-énergie.

En utilisant cette option, (OREM) compare la distance la plus courte entre deux régions obstruées à leur plus grande dimension (c'est-à-dire longueur, largeur ou hauteur), un rapport inférieur à la valeur donnée indiquant de combiner le nuage de vapeur qui s'y trouve pour former une source d'explosion combinée, et de séparer les sources d'explosion dans le cas contraire. Ainsi, la plus grande région obstruée est toujours considérée comme la source donneuse dans ce processus, ce qui est une approche prudente [147].

Dans (OREM), le rapport de séparation critique est donné comme une constante et appliqué à toutes les régions obstruées et n'est pas ajusté en fonction des surpressions d'explosion prévues comme le recommande le (RIGOS). Afin d'appliquer rigoureusement les recommandations du RIGOS, il est conseillé de calculer le taux de séparation critique sur la base de leur expérience ou des résultats préliminaires de surpression de la plus grande explosion [147].

4.3 Méthodes de définition des sources d'explosion

L'une des tâches essentielles de l'application de la ME consiste à déterminer l'énergie de combustion de chaque explosion. Comme il peut y avoir plusieurs régions obstruées couvertes par un nuage, il peut y avoir plusieurs sources d'explosion à calculer.

Dans l'outil (SAFETI), la masse inflammable et sa distribution dans un nuage sont connues grâce à la modélisation de la dispersion, il semble donc logique de l'utiliser pour définir l'énergie totale de combustion. Cependant, la concentration stœchiométrique d'une matière ne peut pas brûler plus que la concentration stœchiométrique d'une matière dans la région obstruée en raison de l'apport limité d'air, de sorte que l'énergie de combustion dérivée du nuage doit être limitée localement par la concentration stœchiométrique [3].

L'approche adoptée par (OREM) pour ME consiste à utiliser les limites LII du nuage et à calculer le volume qui chevauche les régions obstruées et la masse inflammable à l'intérieur du volume. L'énergie d'explosion est ensuite calculée avec l'une des deux options :

- Masse intégrée. L'énergie d'explosion de cette méthode est définie par l'énergie de combustion de la masse inflammable contenue dans les régions chevauchées, mais limitée par la concentration stœchiométrique aux endroits de forte concentration de vapeur et un facteur d'efficacité. Le facteur d'efficacité a une valeur par défaut de 100 %.

- Concentration stœchiométrique. Dans cette méthode, l'énergie d'explosion est le produit du volume superposé, de la chaleur spécifique de combustion de la vapeur inflammable concernée et d'un facteur d'efficacité [149].

4.3.1 Volume et centre des explosions confinées

Ainsi, l'évaluation de la masse inflammable obstruée nécessite le calcul du volume de matériau inflammable piégé dans les régions obstruées et de son centre. Comme l'illustre la figure 27 pour un nuage se dispersant à travers une partie d'une plante, la région obstruée sera en général à un angle par rapport au nuage. Le volume du nuage obstrué est obtenu par intégration sur l'étendue des régions obstruées [149].

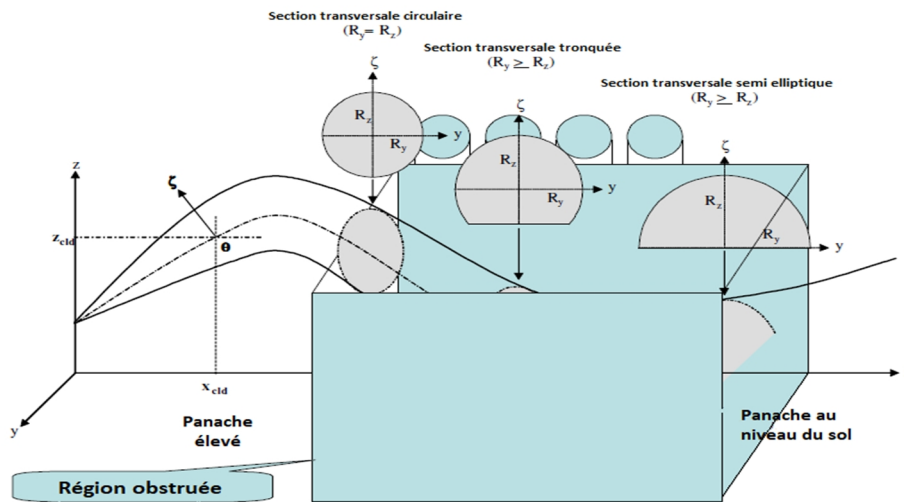


Figure 27 : Illustration d'un nuage UDM se déplaçant à travers une région obstruée [3].

Évaluation du volume des nuages obstrués

Une intégration est nécessaire le long de la trajectoire du nuage dans la direction x sous le vent pour obtenir le volume obstrué. La région obstruée peut être composée de plusieurs sous-régions. Ces sous-régions ne se chevauchent pas et peuvent avoir des hauteurs et des écarts différents entre elles. Comme l'illustre la figure 28, la région obstruée est construite à partir de 3 sous-régions appelées A, B et C. L'intégration commence à la plus grande des deux positions suivantes : la position x du nuage inflammable sous le vent, $x_{l,c}$ et la position x la plus basse des régions obstruées, $x_{l,o}$. Elle se termine à la plus basse de la limite sous le vent du nuage inflammable, $x_{h,c}$ et de la plus grande position x des régions obstruées, $x_{h,o}$. [149].

L'équation (3.8) définit le volume du nuage obstrué par la o -ième région obstruée et $A_{i,o}$ est la surface de la section transversale du nuage obstrué dans la région obstruée à la i -ième distance de discrétisation, comme indiqué plus loin [149].

$$V_{gr,0} = \sum_{i=1}^{i=N-1} (x_{i+1} - x_i) A_{i,0} \quad (3.8)$$

Le volume total obstrué V_{gr} d'une source d'explosion confinée est la somme des intersections entre le nuage et toutes les régions obstruées comme

$$V_{gr,0} = \sum_{i=1}^{i=N-1} \left((x_{i+1} - x_i) \sum_{o=1}^{o=N_0} A_{i,0} \right) \quad (3.9)$$

Ici N_0 est le nombre de régions obstruées incluses dans l'explosion, NX le nombre de distances de discrétisation sous le vent, et les distances de discrétisation sous le vent x_i ($i=1, \dots, NX$) données par

$$x_i = x_1 \frac{i-1}{NX-1} (x_{NX} - x_1) \text{ Avec } x_1 = \max(x_{1,c}, x_{1,o}), x_{NX} = \min(x_{h,c}, x_{h,o}). \quad (3.10)$$

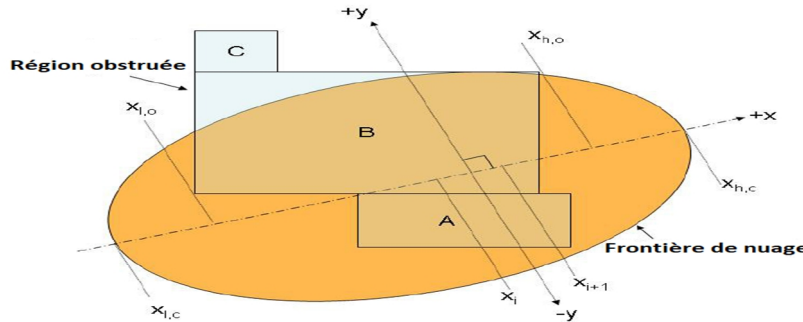


Figure 28 - Coupe horizontale d'une vue de nuage coupée par des régions obstruées [149].

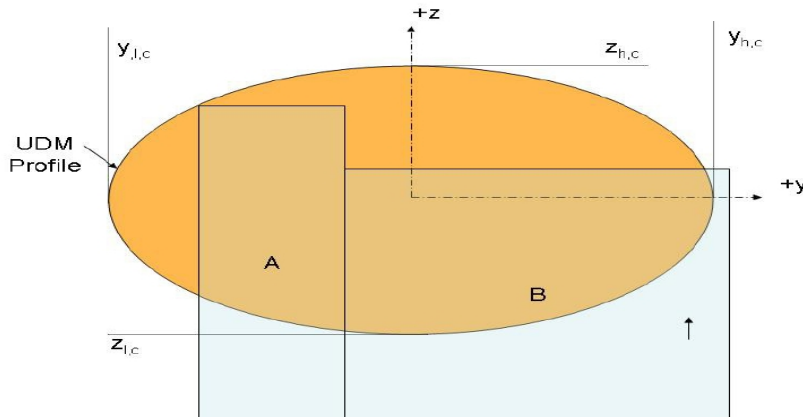


Figure 29 - Coupe verticale d'une vue de nuage et des régions obstruées [149].

L'algorithme utilisé dans OREM pour calculer la section transversale est basé sur la formule d'une ellipse tronquée. Si l'on considère une seule ligne de troncature, comme le montre la figure 30, la surface ombrée peut être calculée selon l'équation (11). Des applications successives de cette formule peuvent être appliquées pour obtenir les valeurs requises de $A_{i,o}$ et $A_{tll,i}$. [149].

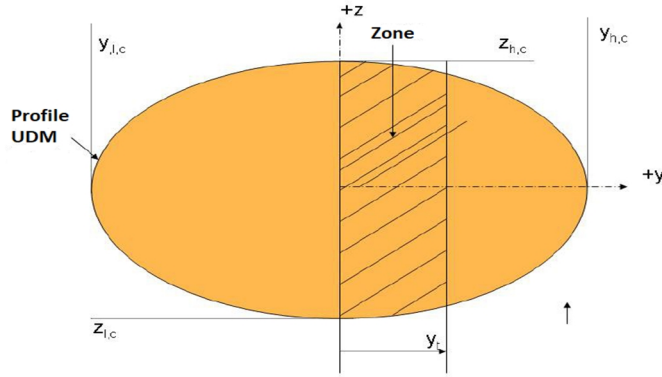


Figure 30 : Surface d'une ellipse tronquée [149].

$$A_t = by_t \sqrt{1 - \left(\frac{y_t}{a}\right)^2} + b \operatorname{péché}^{-1} \left(\frac{y_t}{a}\right) \quad (3.11)$$

La surface totale de la section transversale d'intersection de l'explosion aux i -èmes distances de discrétisation comme

$$A_{t_i, i} = \sum_{o=1}^{o=N_0} A_{i,o} \quad (3.12)$$

Centre de l'explosion

Le centre d'explosion est nécessaire pour déterminer la distance d'une explosion pour l'évaluation des conséquences et des risques [149]. Il est défini comme étant le centre moyen pondéré du volume superposé comme :

$$x_e = \frac{\sum_{i=1}^{i=N-1} \left(\frac{(x_{i+1}-x_i)}{2} (x_{i+1}-x_i) \sum_{o=1}^{o=N_0} A_{i,o} \right)}{V} \quad (3.13)$$

$$y_e = \frac{\sum_{i=1}^{i=N-1} \left((x_{i+1}-x_i) \sum_{o=1}^{o=N_0} \left(\frac{y_{i,h,o}-y_{i,l,o}}{2} \right) A_{i,o} \right)}{V} \quad (3.14)$$

$$z_e = \frac{\sum_{i=1}^{i=N-1} \left((x_{i+1}-x_i) \sum_{o=1}^{o=N_0} \left(\frac{z_{i,h,o}-z_{i,l,o}}{2} \right) A_{i,o} \right)}{V} \quad (3.15)$$

4.3.2 Énergie d'explosion par intégration de la concentration et de la distribution

Dans cette méthode, l'énergie d'une explosion est définie comme l'énergie de combustion de la masse inflammable piégée à l'intérieur des régions chevauchées entre un nuage et les régions obstruées à l'intérieur de la source d'explosion, mais limitée par la concentration stœchiométrique aux endroits de forte concentration de vapeur comme équation (3.16).

$$M_{gr} = \sum_{i=1}^{i=N-1} \min \left(\frac{m_n}{A_n} \frac{i}{i} A_{t_{l,i}}, A_{t_{,i}} (x_{i+1} - x_i) C_S \rho_v \right) \quad (3.16)$$

Ici, $m_{cloud,i}$ est la masse inflammable du nuage à l'intérieur de la i -ième distance de discrétisation (c'est-à-dire entre x_i et x_{i+1}) qui est supposée être distribuée uniformément sur la surface de la section transversale $A_{cloud,i}$ mais qui varie avec la position x , ρ_v est la densité du matériau inflammable sans mélange avec l'air et C_S est la fraction de concentration stœchiométrique du matériau [150].

La densité du carburant ρ_v dans l'équation (3.16) varie avec la température des nuages et elle est élevée à basse température. Cela indique que le même volume contiendrait plus de masse inflammable à basse température, et donc plus d'énergie de combustion. D'autre part, la VCE d'un nuage à basse température brûle généralement à une vitesse lente au départ, ce qui entraîne une moindre efficacité d'explosion et donc une moindre énergie de combustion [146]. Une prise en compte précise de l'effet de la température sur le processus de combustion d'une VCE nécessitera des outils de modélisation plus avancés, tels que la CFD [145]. L'équilibre adopté par OREM consiste à ignorer l'effet de la température sur le rendement d'explosion f_e , ce qui peut légèrement surestimer l'énergie d'explosion, puis à utiliser la densité du combustible à la température ambiante comme ρ_v dans l'équation (3.16), ce qui sous-estime généralement l'énergie. Il faut espérer que ces deux effets se compensent et que l'énergie de combustion de l'explosion soit calculée comme

$$M_{gr} = f_e H_p \sum_{i=1}^{i=N-1} \min \left(\frac{m_n}{A_n} \frac{i}{i} A_{t_{l,i}}, A_{t_{,i}} (x_{i+1} - x_i) C_S \rho'_v \right) \quad (3.17)$$

Ici ρ'_v est la densité de la matière inflammable sans mélange avec l'air à la température atmosphérique

4.3.3 Estimation de l'énergie d'explosion à l'aide de la concentration stœchiométrique

Lorsque l'énergie d'explosion est estimée à l'aide de la concentration stœchiométrique, elle est calculée comme suit

$$E = f_e H_p C_S \rho'_v m (V_v, V_{gr}) \quad (3.18)$$

Ici, V_{void} est le volume de vide des régions obstruées dans une source d'explosion et il agit comme une limite supérieure ici parce que le blocage des obstacles n'est pas pris en compte dans V_{gr} , f_e est le facteur d'efficacité de l'explosion, et ρ'_v est la densité de la matière inflammable sans mélange avec l'air à la température atmosphérique [148].

L'équation (3.18) a supposé une concentration stœchiométrique à l'intérieur du nuage obstrué, par conséquent, la masse inflammable équivalente de cette énergie peut être en fait supérieure à la masse inflammable piégée à l'intérieur du volume obstrué si le nuage a une concentration généralement inférieure à la concentration stœchiométrique. Ainsi, cette méthode devrait toujours produire des prévisions plus prudentes que l'estimation de l'énergie d'explosion par intégration de la concentration du nuage. Cette méthode est similaire à l'approche adoptée par GAMES pour le modèle multi-énergie [141], mais elle est spécifique à chaque matériau car la chaleur de combustion du matériau concerné est utilisée ici, au lieu d'une valeur typique pour tous les matériaux.

4.3.4 Source d'explosion du modèle d'explosion standard

Dans SAFETI, les régions obstruées n'ont pas été prises en compte en détail comme décrit ci-dessus pour définir les sources d'explosion. Au lieu de cela, le volume des régions obstruées est fourni par une interface graphique sans géométrie. La source d'explosion est définie avec une masse d'explosion basée sur le volume obstrué fourni et le centre de l'explosion au front ou au centroïde du nuage lorsqu'il est allumé. Cette méthode est appelée modèle standard [149].

4.3.4.1 Le nuage stœchiométrique équivalente

Le point de départ de cette méthode est d'obtenir la masse inflammable du nuage M_c (masse de carburant dans le nuage avec une concentration supérieure au LII). Ensuite, on définit un "nuage stœchiométrique équivalent", c'est-à-dire un nuage ayant une masse inflammable de M_c à la concentration stœchiométrique C_{ST} , avec un volume donné par ;

$$V_{t_i} = \frac{M_c V_F}{C_S} \quad (3.19)$$

- C_{ST} Fraction de concentration stœchiométrique du carburant (m^3 de carburant / m^3 de mélange) à la température atmosphérique
 M_c Masse inflammable totale dans le nuage de vapeur (kg)
 V_F Volume spécifique du carburant calculé dans les conditions atmosphériques (m^3/kg)
 V_{Total} Volume total du nuage équivalent (m^3)

Ce calcul suppose que la concentration des nuages inflammables est uniforme, toute vapeur (c'est-à-dire aucune fraction liquide du carburant) et dans les conditions atmosphériques (température et pression) [149].

4.3.4.2 Masse de carburant obstruée

Le volume obstrué est spécifié comme étant le volume $V_{or,j}$, où $j=1, N_{obstr}$. Le modèle fonctionne en utilisant des fractions du volume total, de sorte que la fraction est calculée en fonction de

$$f_j = M \left(\frac{V_{o,j}}{V_T} \min \left(\frac{V_T}{\sum_{i=1}^{N_o} V_{o,i}}, 1 \right), 1 \right) \quad (3.20)$$

Où N_{obstr} est le nombre de volumes obstrués fournis.

La masse inflammable M_{gr} d'une explosion confinée est ;

$$M_j = f_j M_c \quad (3.21)$$

Pour ME, la masse inflammable de l'explosion non confinée est calculée comme suit :

$$M_{s, f \text{ èr}} = M_c - \min \left(M_c, \sum_{j=1}^{N_o} M_j \right) \quad (3.22)$$

4.3.4.3 Centre de l'explosion

Lorsqu'un nuage inflammable atteint une source d'inflammation, une explosion est alors définie avec son centre soit au front du nuage, soit au centroïde du nuage (c'est-à-dire Paramètres/Paramètres d'explosion/Surpressions) [147].

4.3.4.4 Courbe de souffle des explosions

ME La courbe de souffle de chaque explosion est fournie sous forme de force d'explosion par l'interface graphique.

5. Effets de l'explosion

5.1 Courbes de souffle des sources d'explosion formées de région obstruée

Deux types d'obstruction sont disponibles pour ME, c'est-à-dire l'obstruction "force définie" et l'obstruction "force calculée". Pour une explosion formée par une obstruction de force définie, la force de l'explosion est saisie directement (c'est-à-dire le numéro de la courbe de souffle). Avec le volume inflammable, la masse et le centre d'explosion de la source d'explosion, comme indiqué dans les sections précédentes, la courbe de souffle est utilisée pour effectuer des prévisions de conséquences et de risques.

Pour une explosion formée par une obstruction de force calculée, le numéro de la courbe de souffle est déterminé par ME sur la base de paramètres définissant la région obstruée, y compris le degré d'expansion, le VBR, le diamètre typique de l'équipement et la longueur du trajet de la flamme en utilisant une des deux corrélations (comme décrit à la page 9 dans la section "caractérisation de la force de la source" du rapport GAMES) [53].

Pour l'expansion de la 3D ;

$$P_0 = 0.84 \left(\frac{V \cdot Lp}{D} \right)^{2.7} S_L^{2.7} D^{0.7} \quad (3.23)$$

Et pour l'expansion en 2D ;

$$P_0 = 3.38 \left(\frac{V \cdot Lp}{D} \right)^{2.2} S_L^{2.7} D^{0.7} \quad (3.24)$$

Où P_0 est la surpression de pointe au centre de l'explosion (c'est-à-dire la surpression de pointe initiale d'une explosion), VBR est le taux de blocage du volume de la région obstruée, Lp est la longueur du trajet de la flamme et D est le diamètre typique des obstacles. S_L est la vitesse de combustion laminaire qui est une propriété du matériau inflammable.

Une fois que P_0 est calculé, la courbe de souffle appropriée peut être sélectionnée en comparant cette valeur avec la valeur de la surpression pour chaque courbe du modèle multi-énergie à des rayons inférieurs à r'_0 .

Pour utiliser ces corrélations du GAME, on doit spécifier des détails supplémentaires de la région obstruée comme indiqué ci-dessous [53].

5.2. Degré d'expansion

Comme il existe deux corrélations, l'analyste doit caractériser le niveau d'expansion et, très souvent, celui-ci se situe entre la 2D et la 3D, par exemple une région partiellement couverte par

des panneaux en hauteur. La section "Choix d'une corrélation" (p13) dans les lignes directrices de GAMES [143] indique que le rapport hauteur/longueur doit dépasser une valeur comprise entre 5 et 10 pour séparer les corrélations, mais logiquement, nous interprétons cela comme la réciproque de ce rapport. Cette interprétation est confirmée par la description de la page 96 où il est conseillé d'utiliser un rapport de 5 comme critère. De plus, les exemples indiquent que le modèle multi-énergie a tendance à être conservateur, il est donc conseillé ici de ne spécifier le confinement en 2D que si la géométrie est sans ambiguïté ou si l'on souhaite être prudent.

5.3 Dimension typique, D

La dimension D typique peut être calculée de différentes manières. Le diamètre hydraulique a été trouvé dans la recherche GAMES pour donner des prédictions globales raisonnables (voir la section Conclusions et recommandations, p99) [140].

Il est défini comme suit :

$$D_{hy} = \frac{4V_o}{A_o} \quad (3.25)$$

Le diamètre hydraulique est utilisé comme diamètre typique par ME si la surface des obstacles est fournie au GUI, au lieu du diamètre typique, pour définir une région obstruée.

Rapport de blocage en volume, *VBR*

Le rapport de blocage du volume *VBR* est le rapport du volume total des obstacles divisé par le volume de la région obstruée comme

$$V = \frac{V_o \cdot s}{V_o} \quad (3.26)$$

Longueur du trajet de la flamme, *L_p*

En ME, la longueur du trajet de la flamme peut être spécifiée directement ou utiliser la méthode recommandée par le rapport GAMES [143] qui fixe la longueur du trajet de la flamme au rayon d'un hémisphère de même volume que le nuage obstrué, tel que donné par l'équation (3.27).

$$L_p = \left(\frac{3V_g}{2\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.27)$$

5.4 Résultats de l'explosion à un moment donné

Le modèle contient un certain nombre de méthodes de résultats (point, transect, grille et installation) pour le calcul des conséquences et des risques. Comme il s'agit d'extensions de la méthode ponctuelle, la description se limite ici à la méthode ponctuelle [151].

Un point est une position dans l'espace. Aucune tentative n'est faite pour prédire le comportement des résultats de l'explosion en fonction de la hauteur, de sorte que les résultats sont indépendants de la hauteur. Le point est donc décrit par ses coordonnées x et y et la distance d'une explosion est la distance dans le plan x - y . Les résultats de l'explosion à un point donné sont la surpression latérale maximale, la surpression réfléchie, l'impulsion et les méthodes utilisées pour calculer ces valeurs sont décrites ici.

ME Pour le modèle multi-énergie, on obtient la surpression latérale de pointe $P_{s,i}$, $P_{dyn,i}$ et la durée de la phase positive tp,i . La surpression totale est calculée comme suit

$$P_{t,i} = P_{s,i} P_{d,i} \quad (3.28)$$

Lorsqu'une onde de choc frappe une installation, elle est perturbée et, par conséquent, les murs de l'installation sont soumis à des surpressions réfléchies. Le calcul de la surpression réfléchie est expliqué ci-dessous.

5.4.1 Surpression réfléchie (P_{ref})

La surpression réfléchie est plus élevée que la surpression latérale en raison de l'impact d'une onde de choc sur un plan récepteur (par exemple, un mur d'installation) et est principalement utilisée pour l'évaluation des risques liés aux installations. Le rapport entre la surpression réfléchie et la surpression latérale au point d'impact dépend de l'angle d'incidence, de la surpression latérale au point d'impact et du type d'onde de choc, comme l'explique le green book de TNO [150]. La surpression réfléchie perpendiculairement d'une onde de choc peut être calculée à l'aide d'une formule comme

$$P_{ref,9} = 2P_s \frac{(\gamma+1)P_s^2}{(\gamma-1)P_s + 2\gamma P_a} \quad (3.29)$$

γ = Ratio des chaleurs spécifiques ($\gamma \forall 1,4$ pour l'air)

P_a = Pression ambiante [N/m^2]

Cependant, il est relativement rare de voir des détonations et du DDT dans des explosions de nuages de vapeur résultant de rejets accidentels à l'air libre (Yellow book) [148]. L'inhomogénéité du nuage de vapeur, qui est inhérente au processus de dispersion des turbulences atmosphériques, empêche généralement la propagation de la détonation. Par conséquent, la plupart des VCE dans les régions obstruées sont susceptibles de produire des ondes de pression.

Sans obtenir une formule analytique spécifique pour la surpression réfléchie des ondes de pression, l'équation (3.29) est utilisée pour estimer la surpression réfléchie pour toutes les ondes de souffle

dans le modèle. À un angle d'incidence de 0° (c'est-à-dire une réflexion perpendiculaire), la surpression réfléchie ($P_{ref, 0}$) peut être estimée à partir de la surpression latérale (P_S) de l'onde au point d'impact par l'expression suivante dérivée de l'équation (3.29) :

$$P_{ref,9} = \frac{AP_S^2 B}{P_S + C} \quad (3.30)$$

Où

$$A = 2 + \frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)} \quad B = \frac{4\gamma P_a}{(\gamma-1)} \quad C = \frac{2\gamma P_a}{(\gamma-1)} = \frac{B}{2} \quad (3.31)$$

Il est nécessaire de modéliser $P_{ref, \tau}$, c'est-à-dire la surpression réfléchie à tout angle d'incidence τ , mais aucune expression analytique simple n'a été trouvée pour relier $P_{ref, \tau}$, $0 \leq \tau \leq \pi/2$, en fonction de τ et P_S . On suppose donc la relation suivante :

$$P_{ref, \tau} = P_S(P_{ref,9} - P_S) \cos \tau \quad (3.32)$$

$P_{ref, \tau}$ est à son maximum tel que donné par l'équation (3.30) à $\tau = 0$, alors qu'à $\tau = 90^\circ$, $P_{ref, 90} = P_S$. En substituant $P_{ref,0}$ dans l'équation (3.30) à l'équation (3.32) et en rappelant de l'équation (3.31) que $B = 2C$, on obtient les expressions suivantes :

$$P_{ref, \tau} = \frac{J \frac{2}{S} + K}{P_S + C} \quad (3.33)$$

Où

$$J = 1 + (A - 1) \cos \tau \quad K = C(1 + \cos \tau) \quad (3.34)$$

Même si l'équation (3.30) est dérivée pour la surpression réfléchie des ondes de choc et la relation supposée de l'équation (3.32), l'équation (3.33) a raisonnablement prédit la surpression réfléchie des ondes de pression comme l'illustre la figure 31.

Comme le montre la figure 5 du green book de TNO [150], la surpression réfléchie des ondes de choc ne se comporte pas comme la relation supposée de l'équation (3.32) avec l'angle d'incidence. Pour une explosion d'onde de choc, la surpression réfléchie est presque la même que la surpression de réflexion perpendiculaire pour une large gamme d'angles d'incidence, par exemple entre $0-25^\circ$ pour $P_S/P_0 > 2,73$ et entre $0-75^\circ$ pour $P_S/P_0 = 0,136$. Aucune formule analytique simple n'a été développée pour estimer la surpression réfléchie pour les ondes de choc dans le modèle. Pour des prédictions prudentes, au lieu d'utiliser la relation supposée de l'équation (3.32), il est recommandé d'utiliser un angle d'incidence fixe de 0° pour l'estimation de la surpression réfléchie pour les explosions d'ondes de choc.

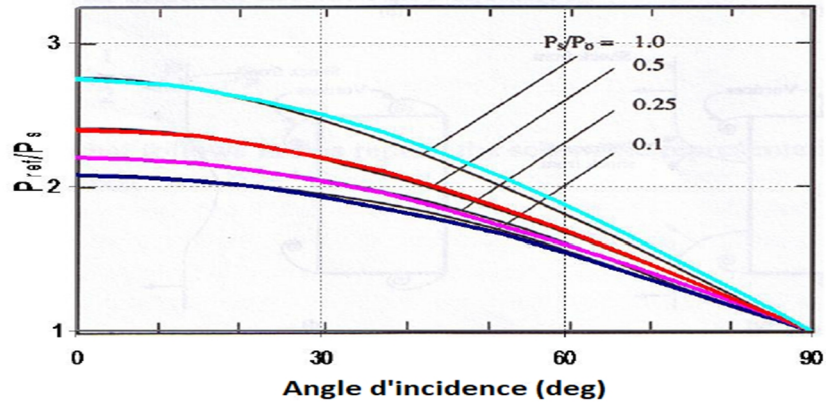


Figure 31 : Validation de la surpression réfléchie prédite par l'équation (33) pour les ondes de pression [150].

5.4.2 Sources d'explosion multiples

Lorsqu'il y a plusieurs sources d'explosion, il y aura plusieurs séries de pics de surpression et d'impulsion à un point d'observation donné. On suppose que les ondes de souffle arrivent à des moments différents et ne se combinent donc pas. Par conséquent, la surpression latérale de pointe pour le point en question est simplement le maximum calculé pour toutes les sources. La durée et l'impulsion sont fixées aux valeurs correspondant à cette surpression de souffle maximale. Cela permet d'éviter de confondre les combinaisons de valeurs pour différentes ondes de souffle et parce que les modèles de vulnérabilité pour le calcul des risques peuvent utiliser la surpression et l'impulsion ensemble.

5.5 Calculer la distance pour une surpression donnée

L'évaluation de la distance pour une surpression donnée, nécessite l'inverse du calcul de la surpression à une distance donnée. L'équation : " $P_S = \text{Valeur cible}$ " est résolue par une méthode de bisection. Il s'agit d'un algorithme de bisection simple qui part d'une distance initiale de 100m. Un deuxième point est recherché pour mettre la solution entre crochets. Le deuxième point est trouvé soit en doublant la distance, soit en divisant la distance par deux, selon la valeur du nouveau point. L'algorithme se termine lorsque la distance est mise entre crochets avec une précision suffisante [150].

5.6 Risques de construction

5.6.1 Effets des explosions

Lorsqu'une onde de choc frappe une installation, elle est perturbée et par conséquent, une charge est exercée sur les murs de l'installation. Cette charge dépend de la taille, de la forme et de l'emplacement de l'installation ainsi que des caractéristiques de l'onde de choc et varie dans le temps. En supposant que le mur frontal de l'installation ne soit pas brisé par l'impact, la figure 32 ci-dessous illustre l'interaction entre une onde de choc et une installation en quatre phases et le tableau 8 énumère les charges sur les murs de l'installation. Comme le modèle ne prévoit pas le comportement des résultats de l'explosion en fonction de la hauteur, l'interaction entre l'onde de choc et le toit de l'installation n'est pas prise en compte dans les calculs des risques liés à l'installation [150].

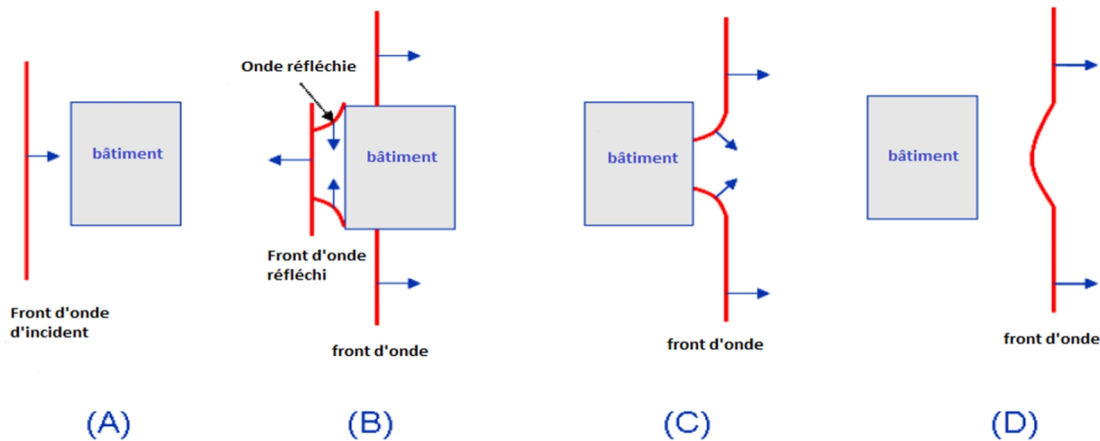


Figure 32 : Interaction entre l'onde de choc et l'installation [150].

Tableau 9 : Charges exercées sur l'installation par une onde de choc incidente [150].

| Phase d'interaction | Charge sur les murs de l'installation par une onde de choc |
|--|---|
| (A) Avant l'impact. | Pas de charge supplémentaire |
| (B) Le front d'onde atteint et est réfléchi par les murs de façade de l'installation | La charge sur les parois frontales (c'est-à-dire orientées vers la source de l'explosion) augmente en raison de la surpression réfléchie |
| (C) L'onde de choc enveloppe l'installation | La pression diminue sur les parois frontales en raison de la raréfaction, et augmente en raison des surpressions latérales ou réfléchies sur les autres parois |
| (D) L'onde de choc a dépassé l'installation | La charge d'explosion de l'installation se réduit d'abord à une surpression négative (c'est-à-dire $< Pa$) et revient progressivement à zéro. Les surpressions de la première phase positive sont généralement beaucoup plus élevées que celles de la phase négative |

Dans le modèle d'explosion des régions obstruées de SAFETI, le risque d'explosion des installations et des populations à l'intérieur de ceux-ci est lié aux charges d'explosion sur les murs

des installations par des méthodes de vulnérabilité. Les méthodes de vulnérabilité relient la vulnérabilité d'une installation (c'est-à-dire la probabilité de décès de la population à l'intérieur) aux surpressions et/ou aux impulsions sur les murs de l'installation à partir des calculs des conséquences. Deux méthodes sont fournies pour le calcul des risques liés aux installations :

- (1) Le pire point
- (2) Moyenne arithmétique

Le pire point

Dans cette méthode, la vulnérabilité d'une installation est représentée par le point de l'installation où la vulnérabilité la plus élevée est prédite en utilisant les méthodes de vulnérabilité sélectionnées. Le point le plus défavorable est déterminé en calculant les conséquences et le risque d'explosion sur tous les murs de l'installation. La vulnérabilité maximale d'une installation à une explosion se produit normalement sur le mur le plus proche faisant face à la source de l'explosion car il est soumis à la plus forte surpression et impulsion. Cette méthode permet de prévoir le scénario le plus défavorable pour les dommages aux installations [151].

La surpression pour le modèle de vulnérabilité est peut-être l'une des quatre options pour la ME comme :

- 1 Surpression latérale
- 2 Pression dynamique
- 3 Surpression dynamique + latérale
- 4 Surpression réfléchie

L'impulsion de la surpression sélectionnée est calculée comme suit :

$$I_i = \frac{1}{2} P_i t_{p,i} \quad (3.35)$$

Moyenne arithmétique

Dans cette méthode, la vulnérabilité d'une installation est représentée par la moyenne des vulnérabilités maximales sur les murs de l'installation. Cette méthode devrait produire des dommages plus précis pour les grandes installations ou les installations ayant un très grand rapport d'aspect (c'est-à-dire longueur/largeur).

Comme mentionné ci-dessus, la vulnérabilité maximale d'une installation à une explosion se produit normalement sur le mur le plus proche de la source de l'explosion. La vulnérabilité minimale se produit généralement sur les murs arrière qui font face à la source de l'explosion. Le

modèle calcule les surpressions sur ces murs arrière comme si l'onde de choc traversait l'installation, peut-être en raison de la rupture des fenêtres ou de dommages aux murs sur son passage, et donc les murs arrière sont également soumis à des surpressions réfléchies. Cette hypothèse devrait conduire à des estimations prudentes de la surpression réfléchie sur les murs de l'installation et, par conséquent, à des estimations prudentes des vulnérabilités si la surpression réfléchie est sélectionnée pour l'évaluation des risques de l'installation [151].

5.6.2 Effets de Feu de nuage

Le risque pour les installations et les populations à l'intérieur de ceux-ci en cas d'incendie instantané est lié à la fraction des installations qui se trouvent dans un nuage inflammable au moment de l'allumage. Le volume de la *i*-ième installation à l'intérieur du nuage, c'est-à-dire $V_{bgr,i}$, est déterminé de la même manière que celle décrite dans la section 3 pour déterminer le volume de chevauchement entre un nuage et une région obstruée par intégration tridimensionnelle. Ainsi, le risque d'incendie instantané est calculé en tenant compte de la géométrie de l'installation (y compris la hauteur) par rapport à la vue 3D du nuage inflammable dans OREM [159].

La vulnérabilité de l'installation, c'est-à-dire la probabilité de décès de la population à l'intérieur, en raison d'un Feu de nuage de ce nuage est définie comme suit :

$$P_f = \frac{V_{g,i}^b}{V_i^b} \quad (3.36)$$

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un modèle analytique (OREM) qui est basé sur la théorie du modèle multi-énergie depuis des articles publiés. Ce modèle a été mis en œuvre dans SAFETI utilisant une approche simplifiée qui est efficace et permet d'estimer les effets thermiques et de surpression générés par le phénomène dangereux.

OREM a étendu le modèle multi-énergie pour modéliser directement les régions obstruées et les phénomènes dangereux comme décrit dans ce chapitre. Les résultats de OREM devraient être plus réalistes et permettre de prendre des mesures plus efficaces pour réduire et contrôler les risques.

Pour mettre en exergue l'intérêt du modèle proposé, une comparaison avec le modèle équivalent TNT et d'autres modèles est discutée. Les résultats de validation du purple book confirment la bonne convergence entre les prédictions et les expériences avec une légère erreur qui peut être

Chapitre 3 : Modèle d'explosion des régions obstruées (OREM)

considérée comme acceptable à l'échelle industrielle. Il a été également démontré que le modèle OREM convient mieux aux explosions à grande échelle.

Dans le prochain chapitre, nous passerons en détail à introduire les modèles analytiques utilisés pour calculer la vulnérabilité des installations et l'impact des risques industriels majeurs sur la population autour du complexe GL1K de Skikda.

Chapitre 4

Modèle du risque, (VULN) & (MPACT)

Introduction

Les gens sont Vulnérables aux explosions de plusieurs façons ; les causes de décès comprennent l'effondrement d'une installation, l'impact par des débris volants générés à l'intérieur des installations, l'impact par des débris volants provenant d'objets partant à l'écart du installation, les brûlures et les lésions pulmonaires primaires [151]. Des recherches considérables ont été menées pour comprendre ces mécanismes, dont une grande partie est orientée vers le sujet de la guerre.

Des travaux ont également été orientés vers les besoins de la gestion de la sécurité dans l'industrie pétroliers, le green book [150] et le HSE [151], [152] sponsor des travaux parrainés sur les façons dont les personnes et les installation peuvent être endommagés par les effets des phénomènes industriel majeurs.

Nous sommes particulièrement intéressés par la possibilité de calculer la probabilité de décès à partir des informations reliait aux effets des incendies et des explosions pour l'utiliser dans l'analyse des risques et les études (QRA). Pour ceci, il existe des publications qui expliquent comment faire cela en pratique ; le Purple book, et ceux de la CIA [154], CCPS [155] et de API [156]. Ces méthodes établissent un lien entre la probabilité de décès et les informations sur la surpression et/ou l'impulsion provenant des calculs d'explosion et nous utilisons le terme "vulnérabilité" pour désigner ces méthodes.

Nous sommes aussi intéressés par les modèles de modélisation de l'impacts des phénomènes dangereux sur la population environnante tel que le modèle MPACT qui calcule l'impact du rejet d'un produit inflammable sur la population. Les résultats sont présentés sous différentes formes, notamment les courbes F-N pour le risque sociétal [1], le risque individuel présenté sous forme de grille sur la zone de calcul, les tableaux de classement pour la contribution de chaque événement.

1.1 Modèle (VULN)

La mise en œuvre actuelle du modèle (VULN) convertit les résultats de la modélisation des rayonnements et des explosions en probabilité de préoccupation. La vulnérabilité aux radiations est modélisée comme une méthode de recherche relativement simple. Pour les explosions, il contient un certain nombre de méthodes permettant d'atteindre différents objectifs. Ces méthodes sont basées sur des expérimentations et retour d'expériences, tel que l'approche du purple book 1 [12]. En principe, le modèle peut être utilisé conjointement avec n'importe quel modèle d'explosion

et sa première application consiste à permettre l'utilisation des résultats des modèles multi-énergie dans un (QRA) [8].

1.2 Vulnérabilité aux radiations

1.2.1 Méthode de l'intensité de rayonnement

Les données d'entrée de cette méthode sont l'intensité de rayonnement et la durée d'exposition. Les vulnérabilités sont fournies sous forme de tableau et la vulnérabilité doit augmenter avec l'intensité de rayonnement. Il existe également une entrée définissant le temps d'exposition nécessaire pour causer ce niveau de dommage et ce temps est commun à tous les niveaux d'intensité [141].

Lorsque le modèle calcule la vulnérabilité, il utilise le niveau de rayonnement observé et le temps d'exposition pour rechercher la vulnérabilité selon le tableau. Il n'y a pas d'interpolation, le modèle se comporte donc comme une étape [70]. Par exemple, les niveaux de rayonnement dans la gamme $4 \text{ Kw} \geq \text{Intensité} < 12,5 \text{ Kw}$ auront une vulnérabilité de 0,5 selon l'entrée du tableau. En dessous du niveau d'intensité le plus bas dans le tableau, la vulnérabilité est nulle. En dessous de la durée d'exposition requise, la vulnérabilité est nulle.

1.3. Vulnérabilité aux explosions

1.3.1 Méthode du surpression discrète (purple book)

La méthode de la surpression discrète est basée sur les seuls niveaux de surpression

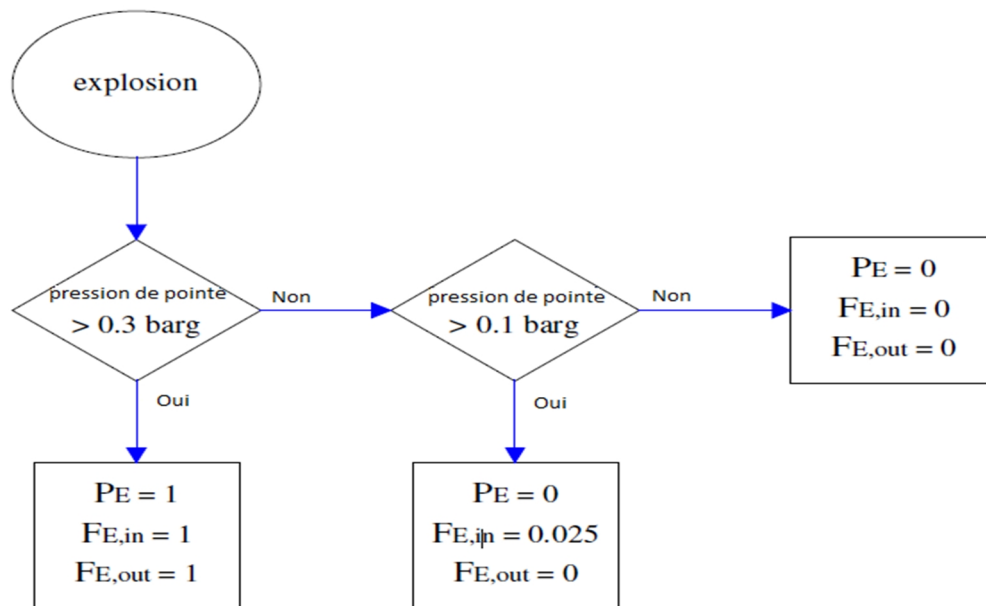


Figure 33 : Calcul de la probabilité de décès, PE, et FE,in et FE due à de l'exposition à une explosion/explosion [70].

Il existe donc deux niveaux de surpression clés et discrets qui définissent la vulnérabilité, 0,1 et 0,3 bar. Ainsi, en utilisant le modèle, nous définissons deux niveaux de vulnérabilité :

Tableau 10 : Population à l'intérieur [70].

| Niveau | Vulnérabilité intérieure | P ₀ /barg |
|--------|--------------------------|----------------------|
| 1 | 1 | 0.3 |
| 2 | 0.025 | 0.1 |

Tableau 11 : Population à l'extérieur [70].

| Niveau | Vulnérabilité extérieure | P ₀ /barg |
|--------|--------------------------|----------------------|
| 1 | 1 | 0.3 |
| 2 | 0 | 0.1 |

1.3.2 Méthode de la CIA (surpression interpolée par logarithme)

Dans cette méthode, il existe une famille de lignes qui définissent la vulnérabilité selon le type d'installation. Comme pour le Purple book, la méthode est basée sur la seule surpression, mais l'utilisation de lignes présente la vulnérabilité (probabilité conditionnelle de décès) sous forme de fonctions continues plutôt que de niveaux discrets [154].

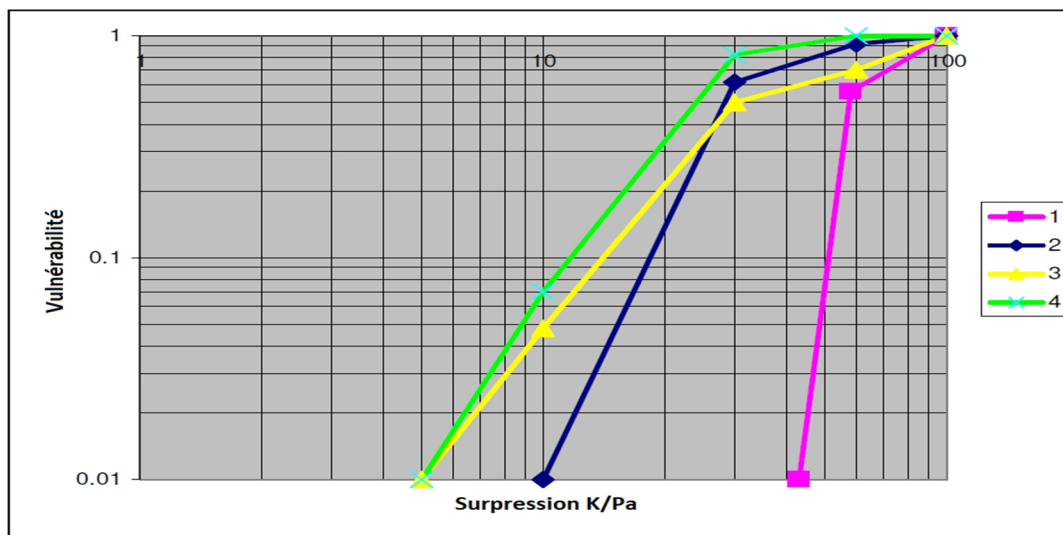


Figure 34 : vulnérabilité pour les 4 différents types de installations [154].

Les points de données utilisés dans le modèle sont énumérés ci-dessous ;

Type d'installation 1 Installation à structure renforcée : construction spéciale, sans fenêtres.

Tableau 12 : Type d'installation 1 [154].

| Point | P ₀ /kPa | Vulnérabilité intérieure |
|-------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 43 | 0.01 |
| 2 | 58 | 0.56 |
| 3 | 100 | 1 |

Type d'installation 2 Immeuble de bureaux typique : quatre étages, charpente et toit en béton, panneaux muraux en blocs de briques.

Tableau 13 : Type d'installation 2 [154].

| Point | P ₀ /kPa | Vulnérabilité intérieure |
|-------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 10 | 0.01 |
| 2 | 30 | 0.62 |
| 3 | 60 | 0.92 |
| 4 | 100 | 1 |

Type d'installation 3 Installation domestique typique : deux étages, murs en briques, planchers en bois.

Tableau 14 : Type d'installation 3 [154].

| Point | P ₀ /kPa | Vulnérabilité intérieure |
|-------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 5 | 0.01 |
| 2 | 10 | 0.048 |
| 3 | 30 | 0.5 |
| 4 | 60 | 0.7 |
| 5 | 100 | 1 |

Installation de type 4, construction en bois de type "Portacabin", de plain-pied.

Tableau 15 : Type d'installation 4 [154].

| Point | P ₀ /kPa | Vulnérabilité intérieure |
|-------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 5 | 0.01 |
| 2 | 10 | 0.07 |
| 3 | 30 | 0.82 |
| 4 | 60 | 1 |
| 5 | 100 | 1 |

1.3.3 Méthode d'Interpolation Linéaire

Cette méthode est la même que celle de la CIA, mais elle effectue l'interpolation pour la vulnérabilité et la surpression sur une base linéaire [154].

1.3.4 Méthode de pression et d'impulsion

Les méthodes précédentes n'utilisent que des critères de surpression, cependant, la surpression et l'impulsion sont toutes deux influentes pour déterminer la réponse d'une installation à une onde de choc. La vulnérabilité peut être exprimée en fonction de ces deux entrées et la forme normale de la relation est généralement une famille de courbes tendant vers une forme en L ; On trouve des exemples de telles courbes dans le green book, le livre du CCPS où la pression et l'impulsion sont indiquées sur des graphiques logarithmiques [118], [150].

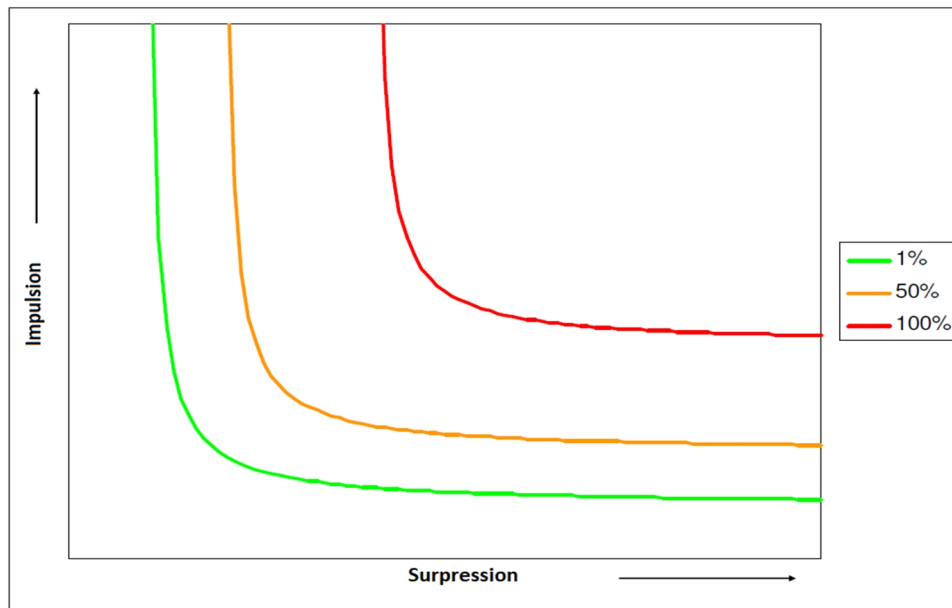


Figure 35 : Exemple de pression d'impulsion montrant une vulnérabilité de 1 %, 50 % et 100 [150].

On peut utiliser des courbes dérivées pour un type d'installation particulier à partir de ces publications ou dériver des courbes spécifiquement pour une installation particulière en consultation avec un ingénieur en structure.

Pour appliquer la relation de surpression et d'impulsion dans ce modèle, nous profitons de la forme commune de ces courbes pour définir la relation de vulnérabilité [156].

$$I_i = I_{0,i} \left(\frac{P - P_{0,i}}{A_i} \right)^{-E_i} \quad (4.1.1)$$

Où

I_i : Impulsion pour un niveau de vulnérabilité donné, i et niveau de surpression P

$I_{0,i}$: Niveau seuil d'impulsion pour le niveau de vulnérabilité i

P : Niveau de surpression

$P_{0,i}$: Niveau seuil de surpression pour le niveau de vulnérabilité i

A_i : Forme de la courbe de la constante à l'échelle pour le niveau de vulnérabilité i

E_i : Exposant à la forme de la courbe d'échelle pour le niveau de vulnérabilité i

1.3.5 Méthode Probit

Les méthodes Probit ont été appliquées aux dommages causés par l'explosion. Par exemple, le green book utilise certaines fonctions probit pour définir les niveaux de dommages aux installations en fonction de la surpression et de l'impulsion [150] (annexe IV). Une relation probit simple basée sur la seule surpression a été présentée par Hurst et al du HSE en 1989 [157]. Afin de fournir au modèle DNV un support pour la méthode de type probit, offre la possibilité de définir des constantes A , B et N (sur une base SI) et les fonctions probit habituelles sont utilisées pour calculer la probabilité de décès. Les constantes par défaut sont basées sur le document HSE ;

$$P_r = 1.47 + 1.35 \ln\left(\frac{P}{p}\right) \quad (4.1.2)$$

Qui se convertit en utilisant les unités SI pour la pression (Nm^{-2}) en (en utilisant le facteur $6894,7572 \text{ Nm}^{-2}$ par psi)

$$P_r = 10.462 + 1.35 \ln\left(\frac{P}{N^{-2}}\right) \quad (4.1.3)$$

1.3.6 Méthode des impulsions discrètes

La méthode de la pression et de l'impulsion peut être utilisée pour calculer la vulnérabilité, mais par souci d'efficacité, cette méthode est fournie pour calculer la létalité sur la base de l'impulsion uniquement. Elle fonctionne de manière très similaire à la méthode de la pression discrète mais utilise uniquement des valeurs d'impulsion à la place [150].

1.3.7 Limites

La vulnérabilité est toujours comprise entre 0 et 1 inclus. Pour les surpressions inférieures aux valeurs les plus basses des tableaux, la vulnérabilité est supposée être nulle. Pour les surpressions

supérieures aux valeurs les plus élevées du tableau, la vulnérabilité maximale est maintenue sans augmentation supplémentaire [151].

1.4 Discussion

Une comparaison de toutes les méthodes de "surpression uniquement" révèle un comportement apparemment assez similaire à celui de la figure 36, mais cela est assez trompeur compte tenu des axes logarithmiques. Par exemple, aux niveaux de pression les plus élevés, toutes les méthodes donnent une létalité de 1 sur 1 bar, sauf la méthode probit qui donne un peu plus de 0,5. Le choix de la méthode peut introduire une nouvelle incertitude dans (QRA) [122].

D'autre part, la réponse d'une installation spécifique peut être modélisée par la méthode de pression-impulsion, ce qui permet à (QRA) de correspondre au comportement attendu d'une installation donnée.

En appliquant ces relations de vulnérabilité au calcul des risques, il est également possible de prendre en compte l'effet de la réflexion et les effets dynamiques. SAFETI suppose que la vulnérabilité est basée sur des surpressions "side-on" et que la réflexion augmentera la pression "side-on" équivalente à comparer aux courbes définies.

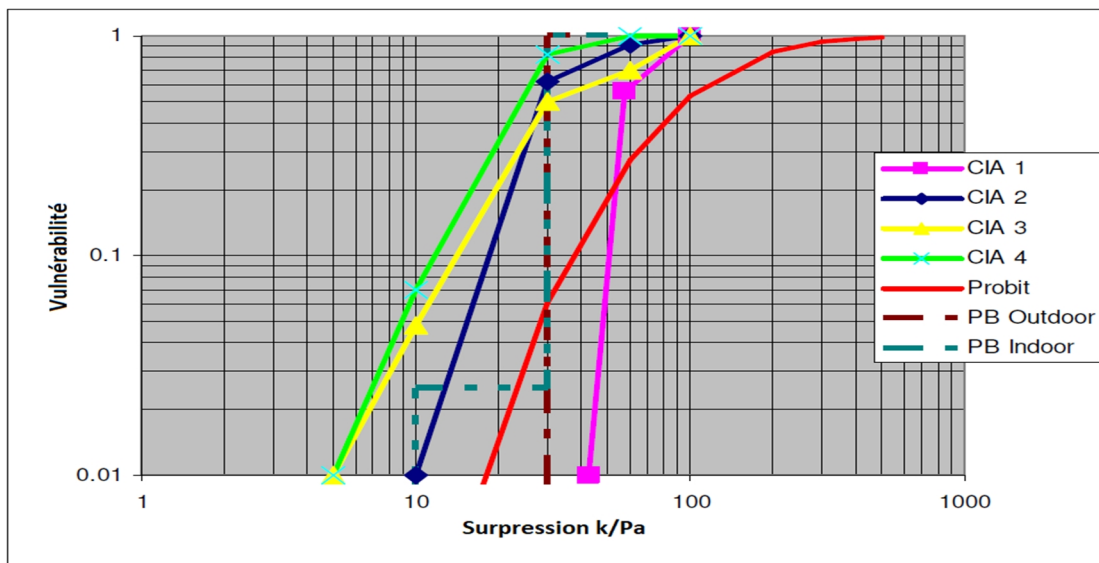


Figure 36 : Comparaison des méthodes de la CIA, du Probit et du Purple Book [150], [154].

Les méthodes du purple book [12] et de la CIA [154] offrent un moyen simple de calculer la vulnérabilité.

2.1 Modèle MPACT

Le modèle MPACT calcule l'impact du rejet d'un produit inflammable sur la population. Il prend les résultats des calculs des conséquences des effets inflammables, ainsi que des données supplémentaires sur la direction du vent, les sources d'inflammation, les niveaux d'obstructions génératrices de surpression, la localisation et la fréquence des événements et les superpose à la population pour calculer le risque de décès dans la zone environnante. Les résultats sont présentés sous différentes formes, notamment les données F-N pour le risque sociétal [1], le risque individuel présenté sous forme de grille sur la zone de calcul, les tableaux de classement pour la contribution de chaque événement, le taux global de mortalité et d'autres mesures sommaires du risque sociétal telles que définies par les régulateurs aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. En plus des risques pour les personnes, le modèle peut également être utilisé pour intégrer les conséquences et les risques financiers.

2.2 Aperçus des modèles

2.2.1 Entrée du modèle

MPACT est un modèle mathématique qui calcule un certain nombre de résultats relatifs à l'impact sur les sites et la population potentiellement touchées par les différents événements inflammables qui sont définis comme des entrées.

Le MPACT part du principe que chaque événement peut être traité indépendamment des autres événements. Cette hypothèse peut être faite parce que la fréquence des rejets accidentels dans l'industrie chimique est mathématiquement très faible par rapport à la durée des effets dangereux eux-mêmes. Le modèle ne modélise pas automatiquement l'escalade des effets vers d'autres navires, mais la fonction de classement des risques par points peut être utilisée pour prédire le risque d'atteindre des niveaux d'effets seuils qui pourraient conduire à des événements d'escalade. L'intégration du risque de tous les événements possibles peut donc être construite événement par événement et c'est l'un des principes qui sous-tendent l'algorithme MPACT [142].

Bien que chaque événement puisse être traité séparément, cela ne signifie pas nécessairement un "résultat" distinct. Un événement de libération donné peut donner lieu à des résultats différents. Les rejets de matières inflammables, en particulier, peuvent donner lieu à toute une série de phénomènes dangereux en fonction d'un certain nombre de facteurs. Le moment de l'inflammation,

le niveau de confinement, le comportement de tout liquide dans le rejet peuvent tous influencer la gamme des résultats possibles.

Comme le MPACT est concerné par le risque, il a également besoin de fréquences pour chaque événement et résultat possible. Ces fréquences sont calculées à l'aide d'arbres d'événements. Dans le cadre du MPACT, la fréquence de chaque résultat est calculée à partir de la fréquence de l'événement lui-même et des probabilités définies sur chaque branche de l'arbre d'événements. Les probabilités et les fréquences des événements de l'arbre d'événements constituent donc une autre entrée importante du MPACT [151].

Pour les événements inflammables, le moment de l'allumage affecte les probabilités d'un "allumage retardé" sur les arbres d'événements. MPACT comprend un modèle d'allumage pour prédire ces probabilités. Ce modèle dépend de la définition des sources d'inflammation, qui constituent donc une autre donnée importante pour MPACT.

Pour certains résultats, la direction, la vitesse et éventuellement la classe de stabilité du vent sont des facteurs importants. La probabilité de direction du vent doit être prise en compte afin que le risque soit correctement réparti dans la région à risque à partir de la collecte des événements. Les probabilités de direction du vent en fonction de la vitesse et de la stabilité constituent donc une autre donnée importante [158].

Enfin, pour permettre un ajustement fin des calculs de risque, divers paramètres d'entrée du modèle et des modificateurs de la probabilité de décès sont également définis comme entrée dans MPACT. En outre, ces paramètres peuvent être utilisés pour représenter les dommages causés à différents types d'objets, de sorte que les dommages causés aux équipements de l'usine peuvent être pris en compte. Cette facilité permet d'appliquer le modèle au calcul du risque financier.

Les exigences en matière de données d'entrée pour le modèle sont donc étendues et, pour résumer, comprennent :

- Résultats des conséquences pour chacun des événements à inclure dans l'analyse
- Données de fréquence et de localisation pour chacun des événements à inclure dans l'analyse
- Valeurs de fréquence de l'arbre d'événements pour chacun des scénarios considérés par le modèle
- Valeurs de probabilité de décès pour chacune des branches de l'arbre des événements pour les événements inflammables
- Données météorologiques indiquant les probabilités directionnelles pour chacune des combinaisons vitesse/stabilité du vent utilisées pour la modélisation de la dispersion

- Divers autres paramètres spécifiques au modèle
- Données sur la répartition de la population
- Données sur la répartition des sources d'inflammation
- Informations sur les régions obstruées pour déterminer les effets de l'explosion à l'aide du multi Energy [159]
- Informations sur la vulnérabilité pour différents types de installations
- Population dans des catégories spécifiques et des installations spécifiques

En raison de ces exigences étendues en matière de données, le modèle constitue le cœur du produit SAFETI. La figure 37 illustre la manière dont le MPACT constitue le point central de regroupement des différentes formes de données d'entrée et produit tous les résultats de risque. Ceux en rouge sont des extensions plus récentes.

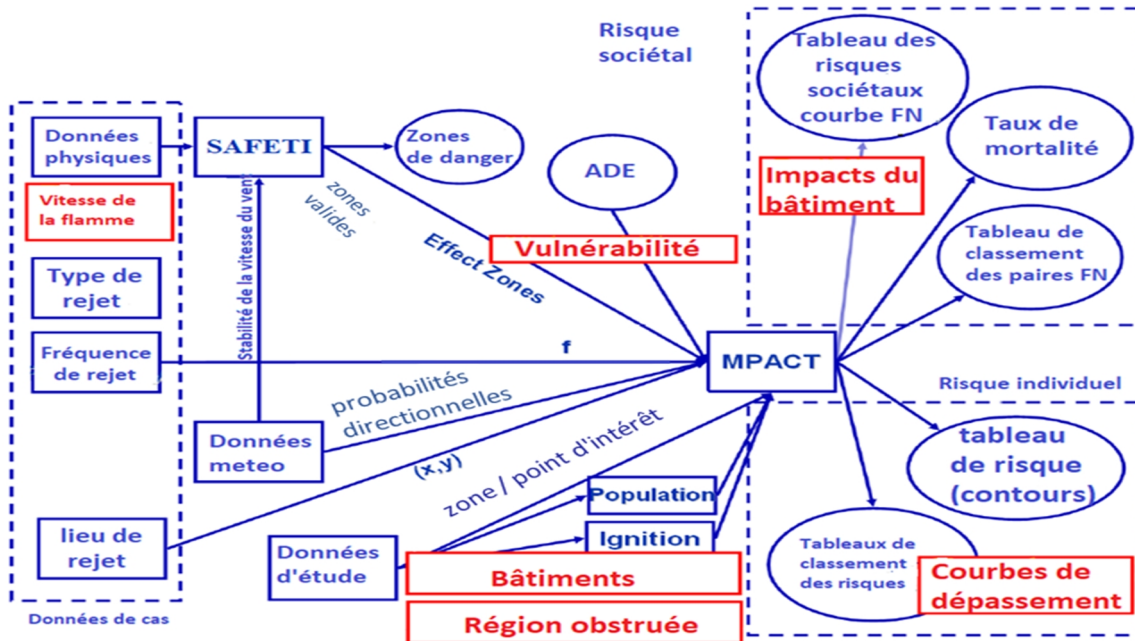


Figure 37 : Données globales d'entrée et de sortie pour le modèle MPACT [159].

2.2.2 Calculs des risques individuels

Comme nous l'avons déjà dit, le MPACT analyse le risque un événement à la fois. Il peut être utilisé dans ce mode pour traiter tous les résultats de risque pour un seul événement. En pratique, il est généralement exécuté en "mode batch", c'est-à-dire qu'il traite et additionne les risques pour une série d'événements fournis comme données d'entrée. De cette façon, il peut construire une image composite du risque pour une série de résultats possibles. Il le fait en interne en réduisant

les résultats, quel que soit le type de résultat, en deux catégories communes, le risque individuel et le risque sociétal [160], [161].

2.2.2.1 Définition du risque individuel

Le risque individuel est considéré comme le risque qu'une personne se trouvant à un endroit spécifique soit un décès au cours d'une période donnée. Il est généralement calculé sur une base annuelle. Il suppose qu'il y a une personne à ce stade continuellement exposée au risque. On parle parfois de "risque individuel spécifique à un lieu" plutôt que de "risque individuel spécifique à une personne" qui dépendrait des mouvements d'un individu donné [156].

Considérons le risque individuel $IR_{x,y|w}$ d'un événement de défaillance spécifique (équivalent discrete failure EDF) à l'endroit x,y étant donné qu'un temps spécifique w (combinaison vitesse du vent/stabilité) se produit. Ici, x,y sont horizontaux Coordonnées cartésiennes. Nous pouvons maintenant écrire l'équation (4.2.1) pour le risque individuel $IR_{x,y|w}$, en fonction de la fréquence F_{edf} de la défaillance survenant dans la période de temps, de la probabilité que l'événement se produise dans une direction particulière Θ (angle dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, radians) et de la probabilité de décès compte tenu de cette direction et du temps,

$$I_{l \ x,y|w} = F_e \int_{\theta_1}^{\theta_2} [P_{\theta|w} P_{d|\theta}] d\theta \quad (4.2.1)$$

Où

Θ est la direction du communiqué

Θ_1 est la valeur inférieure de Θ qui a un impact sur le point de calcul

Θ_2 est la valeur supérieure de Θ qui a un impact sur le point de calcul

$P_{\theta|w}$ est la probabilité que le rejet se produise dans cette direction compte tenu du temps

$P_{d|\theta w}$ est la probabilité de décès compte tenu de la direction de la diffusion et du temps

Il s'agit de la contribution au risque individuel d'un événement donné, compte tenu d'une météo spécifique. Pour obtenir le risque individuel global à un moment donné, tous les événements possibles doivent être pris en compte. Notez également qu'à ce stade, nous avons reporté la discussion concernant les causes de la distribution de probabilité directionnelle. Nous avons également négligé toute mention du temps - ceci est implicite dans le calcul de $P_{d|\theta w}$. [159].

Le MPACT a la capacité de résumer les événements au fur et à mesure qu'il les traite. Le risque individuel global représenté par un EDF est calculé par sommation sur tous les temps selon l'équation (4.2.2) où P_w est la probabilité d'un temps spécifique.

$$I_{i,x,y|w} = \sum_T I_{i,t|e} P_w \quad (4.2.2)$$

L'équation (4.2.3) exprime le risque individuel comme étant la somme de tous les événements représentés par l'ensemble complet des FED, tel que spécifié par l'analyste.

$$I_{i,T,x,y} = \sum_T I_{i,t|e} \quad (4.2.3)$$

Il est évident que le résultat global dépend fortement de la liste des FED qui entrent dans le modèle. Pour les besoins de ce document théorique, la liste est supposée être correcte et l'accent est mis sur la présentation de la solution correcte aux équations ci-dessus [159].

2.2.2.2 Zone de calcul

Jusqu'à présent, nous avons écrit des équations en tenant peu compte de l'orientation de l'événement et du lieu envisagé pour le risque individuel. En général, la répartition du risque individuel sur une zone est le résultat utile et il est préférable de présenter ces résultats sous forme de contours de risque. Le MPACT facilite cela en définissant une grille sur laquelle il va effectuer l'intégration du risque. Conceptuellement, MPACT calcule le risque pour le lieu situé au centre de chacune des cellules de la grille définie par cette grille. Un algorithme de contourage peut ensuite être utilisé pour présenter ces résultats sous forme de contours de risque [159].

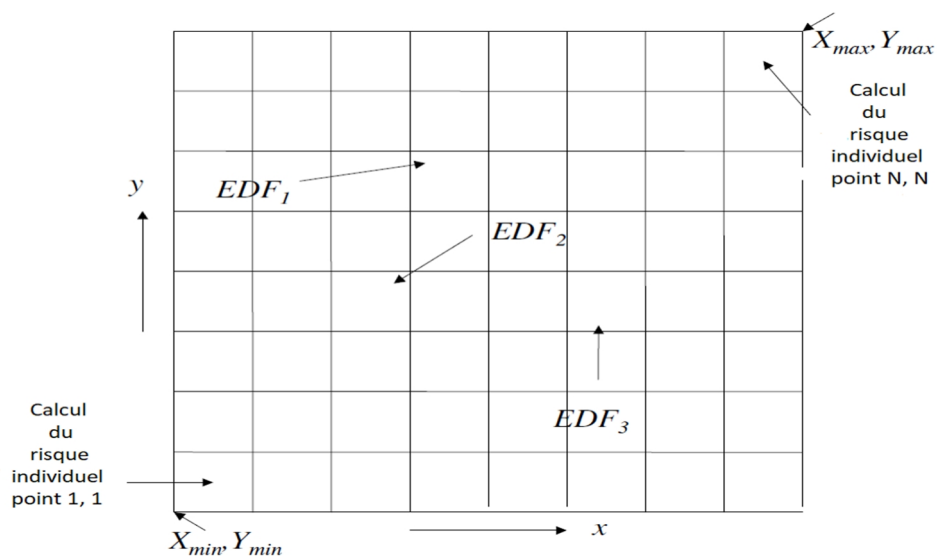


Figure 38 : La grille de calcul des risques MPACT [159].

La figure 38 illustre la grille définie par MPACT pour le calcul du risque individuel. La grille forme une séquence de carrés et le risque est calculé au centre de chacune de ces cellules carrées de la grille. L'emplacement initial de chaque EDF peut être défini n'importe où dans une cellule (pas seulement au centre de la cellule) et ceci est illustré en indiquant les emplacements possibles pour 3 événements dans la figure 38 [159].

2.2.2.3 Distribution et direction du vent

Ces sites EDF ne représentent que la localisation initiale du danger. L'emplacement de la ou des zones dangereuses par rapport à cet emplacement initial dépendra de la direction du rejet et/ou de la direction du vent.

La direction du vent est particulièrement importante pour les rejets qui dérivent avec le vent et présentent encore des dangers importants. De tels événements comprennent des nuages de matières très toxiques ou de très grandes quantités de matières inflammables denses. L'impact des nuages toxiques dépend normalement beaucoup de la direction du vent. Les rejets en général sont donc considérés comme se déplaçant dans la direction du vent, quelle que soit leur orientation initiale. D'autres événements tels que les feux de torche réaction peuvent dépendre davantage de la direction du trou de sortie que de la direction du vent. En pratique, le MPACT ne traite que certains feux de torche réaction horizontaux comme s'ils étaient indépendants de la direction du vent. Lorsque l'élan initial est considéré comme le phénomène physique dominant, la direction initiale des feux à réaction horizontaux est distribuée uniformément sur 360° [159].

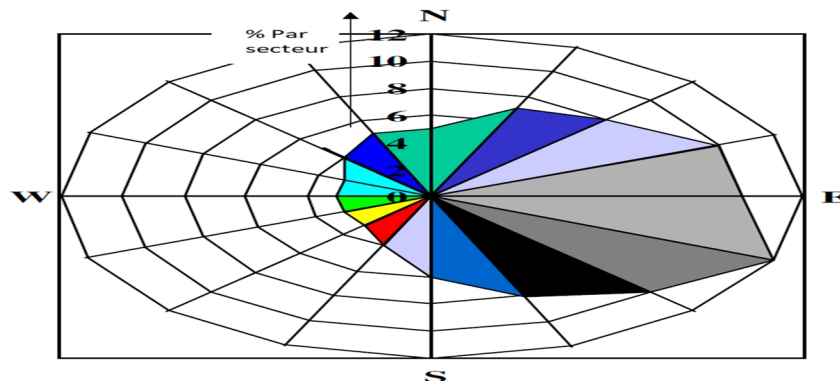


Figure 39 : Probabilités de direction du vent illustrées comme une dose de vent [159].

La figure 39 illustre les probabilités de direction du vent qui pourraient se produire si un vent dominant passait du sud-est au nord-ouest. Notez la convention selon laquelle une forte probabilité

de vent du sud-est signifie des risques plus élevés au nord-ouest car tout nuage sera conduit dans cette direction.

2.2.2.4 Arbres d'événements (résultats toxiques ou inflammables)

MPACT utilise des arbres d'événements pour modéliser les résultats possibles d'un événement donné et dépend de la contribution des probabilités de chacun des résultats. L'exception concerne les résultats d'inflammation retardée pour lesquels il existe un modèle représentant la probabilité d'inflammation dans une période donnée.

MPACT prend chaque EDF à tour de rôle et le traite selon une logique représentée par un arbre d'événements généralisés dans la figure 40.

Les trois premiers types de scénario d'événement, toxique, BLEVE et Feu de nappe, sont traités comme des résultats uniques et exclusifs dans le cadre du MPACT. Pour ces types d'événements, il n'est pas nécessaire d'examiner plus avant les arbres d'événements et le modèle d'inflammation n'a aucune influence sur les calculs [155].

Plusieurs résultats sont possibles pour d'autres scénarios. Tout d'abord, les résultats immédiats de l'allumage sont pris en compte. Définition des probabilités de ces résultats. Il existe un large éventail de résultats possibles, y compris la possibilité de résultats inflammables combinés (un feu instantané combiné à un Feu de nappe par exemple).

S'il existe une probabilité résiduelle que le rejet ne s'enflamme pas immédiatement, le MPACT intègre le risque d'inflammation différée dans le temps. Le modèle d'allumage calcule la probabilité d'un allumage retardé en superposant la zone inflammable du nuage sur les sources d'allumage définies. Les branches de l'arbre des événements pour l'allumage retardé représentent les résultats possibles et leur probabilité conditionnelle [159].

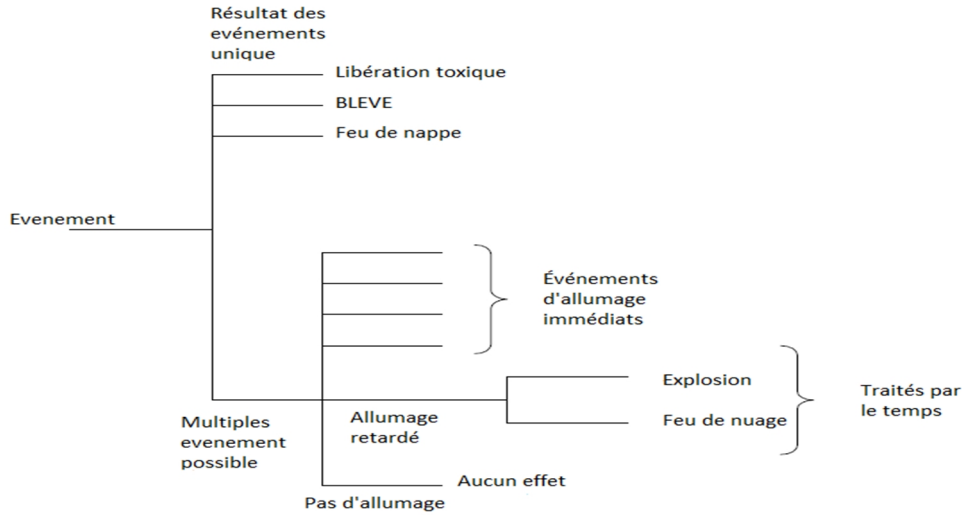


Figure 40 : Arbre d'événements généralisé illustrant la logique appliquée dans MPACT [159].

2.2.2.5 Sources d'inflammation et distribution

Pour compléter l'aperçu du traitement des événements inflammables, il est nécessaire d'introduire le modèle d'allumage qui est utilisé pour calculer la probabilité de résultats d'allumage retardés.

Les sources d'inflammation sont définies comme des points, des lignes droites, des poly-lignes, des zones ou volumes rectangulaires et des zones polygonales. Elles peuvent être situées n'importe où, mais dans la pratique, les sources sont assemblées selon la définition de la grille de risque telle que définie dans la figure 38. En fait, chaque cellule de la grille contient sa propre source d'allumage, en fonction des parties des sources d'allumage d'entrée qui sont déterminées comme étant à l'intérieur de la cellule. La source d'allumage équivalente est considérée comme étant distribuée uniformément à l'intérieur du carré. La forme générale du modèle est définie dans l'équation (4.2.4) [159].

$$P_{x,y,t} = f_{x,y}(1 - e^{-w_{x,y,t}}) \quad (4.2.4)$$

Où

$P_{x,y,t}$ est la probabilité d'inflammation dans la cellule de la grille x,y sur l'intervalle de temps t

$f_{x,y}$ est le facteur de présence pour la cellule de la grille (la proportion de temps pendant laquelle la source est présente et active)

$w_{x,y,t}$: est le facteur d'efficacité d'allumage pour la cellule de la grille

t : est l'intervalle de temps en question

La figure 41 est une représentation graphique montrant les termes définis ci-dessus pour un facteur de présence de 0,8, et une probabilité d'inflammation (lorsqu'elle est présente) de 0,5 en 30 secondes.

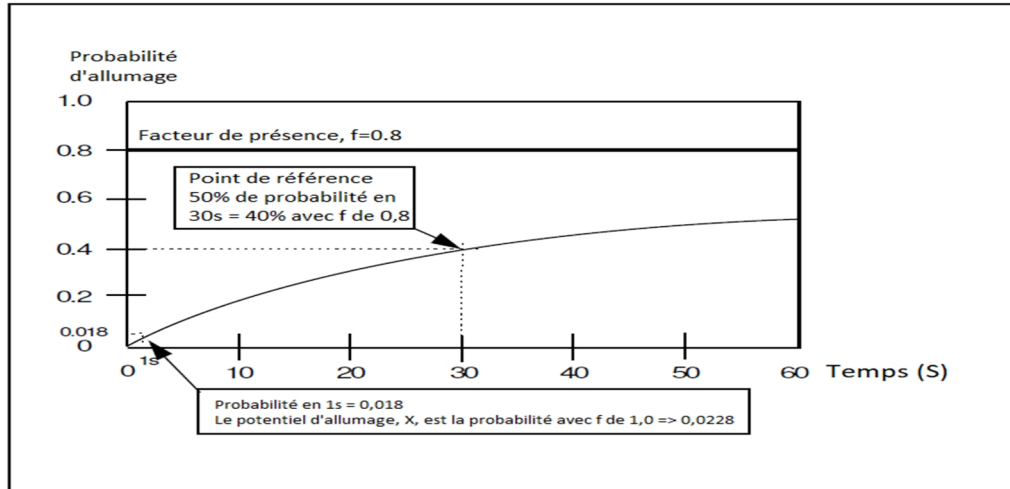


Figure 41 : Un exemple de la fonction de probabilité d'allumage [159].

MPACT modélise le nuage qui dérive sous le vent et, ce faisant, intègre les sources d'inflammation dans la zone inflammable, ce qui donne la probabilité d'inflammation avec le temps. Pour chaque pas de temps, il y a deux branches sur l'arbre des événements - allumage ou pas d'allumage. La branche "pas d'allumage" est passée à l'étape suivante. Il est possible que le nuage ne s'enflamme pas du tout lorsqu'il est dans un état inflammable. Cela donne lieu à une probabilité résiduelle de non-inflammation. Ceci est particulièrement important pour les matériaux qui sont à la fois toxiques et inflammables [159].

2.2.2.6 Matériaux inflammables et toxiques

En réalité, la probabilité de décès pour un événement donné pourrait être le résultat d'effets toxiques ou inflammables ou une combinaison des deux selon les propriétés des matériaux libérés. L'oxyde d'éthylène et le méthyl isocyanate sont des exemples courants de ces matériaux toxiques et inflammables.

La combinaison des événements toxiques et inflammables représente le risque total présenté par l'événement de libération d'un matériau possédant ces deux propriétés [159].

2.2.2.7 Résultats des calculs de risques individuels

Pour chaque météo w , MPACT produit le tableau des risques individuels totalisés pour tous les événements traités. Ce tableau représente le risque $IRTot_{x,y|w}$ aux points x,y au centre de chaque cellule comme défini dans la figure 38.

La figure 42 donne un exemple de l'affichage du contour du risque fourni par le produit.

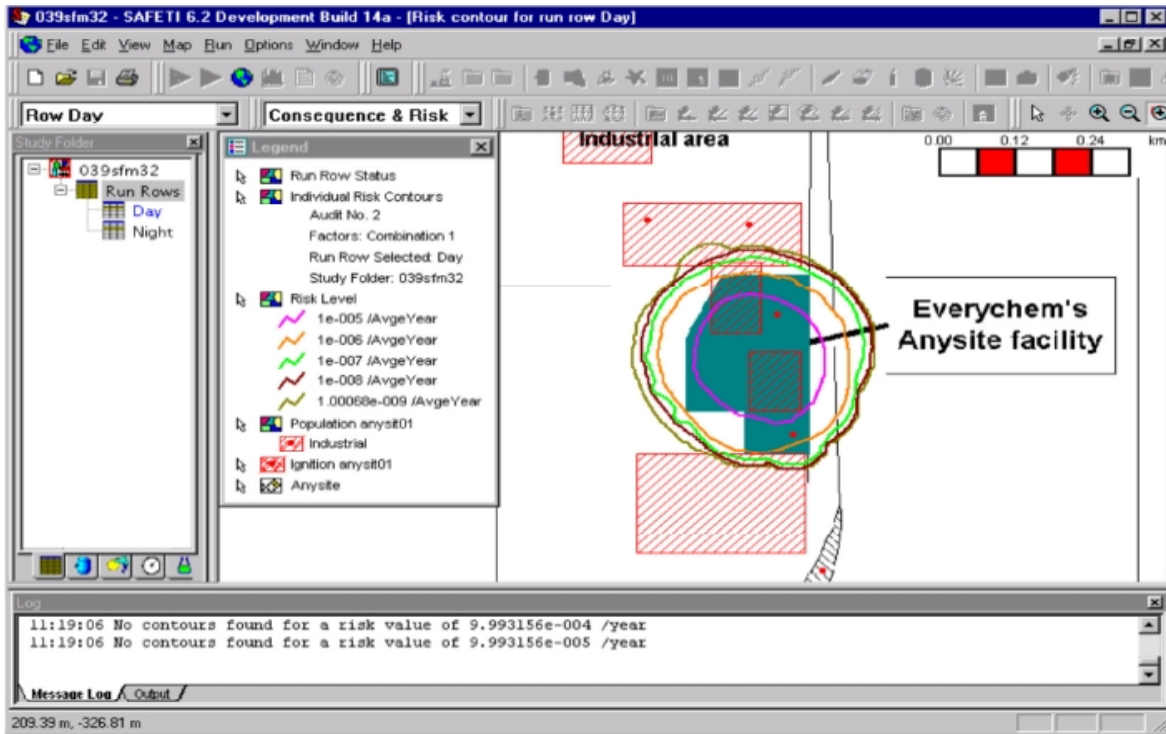


Figure 42 : Exemple de l'affichage du contour du risque [159].

La contribution de chaque événement au risque à chaque point du tableau des risques n'est pas disponible une fois que tous les résultats ont été additionnés. Il s'agit d'une limitation imposée par les exigences prohibitives de stockage des données que cela entraînerait.

Toutefois, le MPACT fournit cette ventilation des contributions d'événements à un nombre limité d'endroits du tableau des risques. Cela permet de comparer l'importance relative des différents événements. La figure 43 donne un exemple de classement des risques individuels fourni. Aux points de classement des risques, le modèle peut également signaler les effets d'explosion pour chaque résultat. Ces effets comprennent la fréquence, la surpression, l'impulsion et la durée [159].

| Risk Increment Results (all data in SI units except frequency/yr) | | | | |
|---|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Grid Information | | | | |
| NX | NY | SE X Corner | SE Y Corner | Cell Width |
| 200 | 200 | -2.18E+03 | -2.18E+03 | 2.20E+01 |
| No | X | Y | IX Grid | IY Grid |
| 1 | -3.18E+01 | 3.18E+01 | 98 | 101 |
| 2 | 1.56E+01 | 3.18E+01 | 100 | 101 |
| 3 | -8.27E+01 | 3.18E+01 | 96 | 101 |
| Event No | Weather | Direction | Square | Frequency |
| 15005 | 0 | 0 | 3 | 1.00E-06 |
| 15005 | 0 | 0 | 1 | 1.00E-06 |
| 15005 | 0 | 0 | 2 | 1.00E-06 |
| 15006 | 0 | 0 | 3 | 2.50E-07 |
| 15006 | 0 | 0 | 1 | 1.00E-06 |
| 15006 | 0 | 0 | 2 | 1.00E-06 |
| 15007 | 0 | 0 | 2 | 1.56E-07 |

Figure 43 : Exemple de résultats des points de classement des risques individuels [159].

2.2.3 Calculs des risques sociétaux

2.2.3.1 Définition du risque sociétal

Jusqu'à présent, la discussion a porté sur la manière dont le modèle calcule le risque individuel. Les autres mesures de risque calculées par MPACT couvrent le risque sociétal en incluant le nombre de personnes touchées par chaque résultat. Pour ce faire, le MPACT doit disposer des données de distribution de la population fournies en entrée. Dans une extension récente, le modèle accepte également des données sur les catégories de population et rend compte des résultats sociétaux en conséquence. Cela permet à comprendre la répartition du risque au sein de la population exposée [1].

Au sein du SAFETI, la répartition de la population peut être définie comme un nombre quelconque de points, de zones rectangulaires ou de polygones. Ces données sont distribuées sur la grille de risque définie dans la figure 38 en analysant la proportion de population de chaque objet de population défini qui existe dans chaque cellule de la grille. MPACT stocke alors un nombre total de personnes par cellule $N_{x,y}$. La population peut également être définie comme faisant partie des données des installations et les décès dans ces installations sont calculés en plus de la population sur la grille [159].

Les calculs de risque doivent maintenant déterminer le nombre de personnes tuées par un événement particulier et le rattacher à la fréquence associée pour former une paire F-N [162]. La probabilité de décès est fournie à MPACT dans le cadre de l'entrée des conséquences, il ne reste donc à MPACT qu'à intégrer la probabilité de décès pour chaque événement sur la population spécifiée.

$N_{edf|o}$ représente le nombre de personnes tuées par un événement donné, la combinaison d'une catégorie météorologique particulière et de la direction du vent et, s'il est inflammable, le type de résultat. Il est calculé pour la population sur la grille selon l'équation (4.2.5).

$$N_{e|o} = \iint_{d,c} n_{x,y} P_{d,x,y|o} d \quad (4.2.5)$$

Notez que dans le calcul, la densité de population par cellule, $n_{x,y}$, est utilisée, ce qui correspond au rapport entre $N_{x,y}$ et la superficie de la cellule. Conceptuellement, cela signifie que les personnes définies dans une cellule donnée de la grille sont uniformément réparties sur la zone plutôt que situées au centre. Cela est conforme à l'approche adoptée pour les sources d'inflammation. $P_{d,x,y|o}$ représente la probabilité de décès due à l'événement et cela dépendra des conséquences et des paramètres entrés dans MPACT. Le calcul de $N_{edf|o}$ peut avoir lieu dans une seule cellule de la grille MPACT ou couvrir plusieurs cellules. En général, les meilleurs résultats seront obtenus avec la plus petite taille de cellule de grille possible. MPACT inclura également les décès dans des installations spécifiques si ceux-ci sont inclus dans l'analyse.

Chaque événement conduit normalement à un certain nombre de résultats, puis les résultats F-N peuvent être additionnés pour tous les résultats de l'événement afin de former une image globale du risque où F est calculé comme le produit de la fréquence de l'événement, de la catégorie météorologique / probabilité de direction du vent, de la probabilité d'inflammation, etc. Les résultats F-N peuvent être présentés sous la forme d'une courbe de la fréquence des décès de N personnes ou plus. Ce format est souvent utilisé à des fins réglementaires [60].

Résumé des mesures

Pour simplifier davantage le résumé de l'analyse de risque, d'autres mesures de risque peuvent être calculées. Celles-ci comprennent le calcul d'un taux moyen global de décès calculé comme

$$R_d = \sum_T u_e \sum_o F_{e,o} N_{e|o} \quad (4.2.6)$$

Cela permet de connaître le nombre prévu de décès sur une base annuelle. On l'appelle parfois le taux d'accidents mortels ou la valeur escomptée.

D'autres mesures sommaires du risque tiennent compte de la plus grande aversion de la société pour les incidents où la valeur de N augmente. L'une de ces mesures est appelée "risque intégrale" par le HSE UK [163]. Cette mesure est considérée comme étant appropriée pour l'aménagement du territoire [164].

$$R_L = \sum_T \mu_e \sum_0 F_e ,0 (N_e |0 N_e^2 |0)/2 \quad (4.2.7)$$

Les approches précédentes ont élevé N à la puissance d'un "indice d'aversion" (>1). Hirst et Carter [163] indiquent que cet indice se situe entre 1,2 (publié par Okren)[165] et 2 (publié par Schofield) [166]. L'intégrale du risque basée sur cet indice d'aversion, a_i , est définie dans l'équation (8).

$$R_a = \sum_T \mu_e \sum_0 F_e ,0 N_e^a |0 \quad (4.2.8)$$

Tant que l'indice d'aversion est supérieur à 1, cela donne une mesure du risque qui reflète l'impact plus important sur la société des incidents qui causent un nombre élevé de décès. La valeur appropriée à utiliser dépend probablement de l'application de l'analyse des risques. Hirst et Carter [161] recommandent une valeur de 1,4 pour une application de type COMAH, mais avec une valeur plus élevée si la population adjacente comprend des éléments particulièrement sensibles tels que les écoles et les hôpitaux.

Laheij, Post et Ale [160] présentent d'autres mesures pour l'aménagement du territoire. Une mesure des "pertes potentielles de vies humaines" (PLL) pour la population exposée aux risques modélisés peut être dérivée de la grille des risques individuels et de la grille de la population. Cette mesure est basée sur les résultats des risques individuels.

$$R_I = \sum_T \sum_{x,y} N_{x,y} I_{T,x,y} \quad (4.2.9)$$

Un autre indicateur de risque peut être tiré de la valeur de la probabilité cumulative de tous les incidents mortels. Il s'agit d'une mesure PLL basée sur les calculs du risque sociétal. Ces deux dernières mesures peuvent différer parce que o des hypothèses de vulnérabilité différentes sont appliquées pour les calculs du risque individuel et du risque sociétal. Dans cette équation, $F(N)$ représente la fréquence cumulée dans la plage $N-1$ à N .

$$R_I = \sum_{N=1}^{\infty} F(N) \quad (4.2.10)$$

2.2.3.2 Résultats des calculs de risques sociétaux

Les résultats des risques sociétaux du MPACT sont présentés sous les formes suivantes ;

En traitant chaque événement produit par MPACT, il accumule la fréquence des événements qui donnent lieu à N valeurs dans des plages prédéfinies. Ces résultats sont disponibles sous forme de tableaux et de graphiques. Une courbe F-N typique est illustrée à la figure 44.

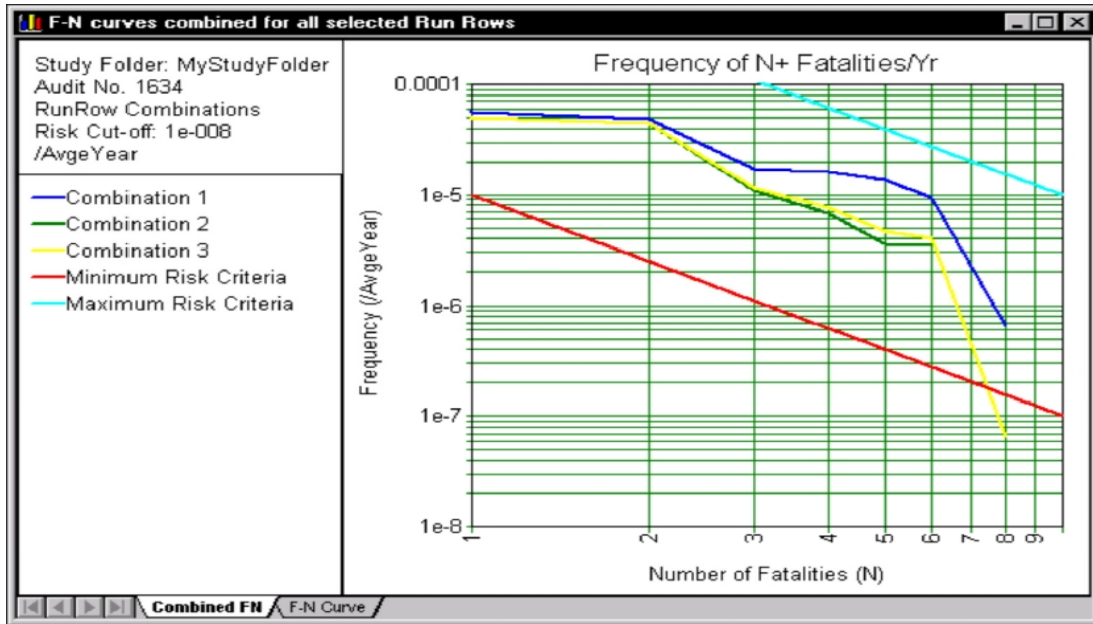


Figure 44 : Exemple d'une courbe FN [162].

MPACT produit également un tableau des paires F-N pour chaque résultat d'événement pour chaque combinaison catégorie météo/direction du vent. Cela permet de classer les événements et de se concentrer sur les contributions les plus importantes au risque. Un exemple est présenté à la figure 45.

| FN Outcome Results (all data in SI units except frequency/yr) | | | | | |
|---|---------|-------------|-------------|------------|----------|
| Grid Information | | | | | |
| NX | NY | SE X Corner | SE Y Corner | Cell Width | |
| 200 | 200 | -2.18E+03 | -2.18E+03 | 2.20E+01 | |
| Event No | Weather | Direction | Frequency | N | Sigma |
| 15001 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.92E+04 | 0.00E+00 |
| 15002 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.98E+04 | 0.00E+00 |
| 15003 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.92E+04 | 0.00E+00 |
| 15004 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.88E+04 | 0.00E+00 |
| 15005 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.86E+04 | 0.00E+00 |
| 15006 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.86E+04 | 0.00E+00 |
| 15007 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.88E+04 | 0.00E+00 |
| 15008 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.92E+04 | 0.00E+00 |
| 15009 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.98E+04 | 0.00E+00 |
| 15010 | 0 | 0 | 1.00E-06 | 3.92E+04 | 0.00E+00 |
| 15011 | 1 | 1 | 1.10E-11 | 1.62E+03 | 0.00E+00 |
| 15011 | 1 | 1 | 7.32E-12 | 1.62E+03 | 0.00E+00 |
| 15011 | 1 | 1 | 1.15E-11 | 1.62E+03 | 0.00E+00 |

Figure 45 : Exemple de résultats en matière de risques sociétaux [162].

Taux de mortalité

Le MPACT calcule le taux global de décès donné par l'équation (4.2.6) comme mesure du risque sociétal.

3. Conclusion

L'approche de la modélisation des explosions a été basée sur le modèle multi-énergie. Le modèle d'éclatement de bacs est inclus dans les calculs de risque. Les effets des explosions ainsi que leur fréquence sont signalés, ce qui permet de signaler les courbes de dépassements thermiques et de pression. La population peut être située dans des installations d'un type spécifique. Cela permet de prendre en compte les effets protecteurs des différents types d'installations. Les catégories de population sont désormais prises en compte dans les calculs de risque, de sorte qu'il est possible de regrouper les résultats sociétaux par catégorie de population. La vulnérabilité des installations peut être représentée par des critères de rayonnement et de durée d'exposition plutôt que par l'utilisation de la méthode existante de probit de radiation. Cela rend la nouvelle modélisation plus applicable à l'analyse des risques industriels majeurs.

Dans un but d'une validation des modèles proposés précédemment, basée sur une étude de cas réel, nous présenterons dans le chapitre 5 une application à un procédé gazier au niveau complexe GL1K de la zone industrielle de Skikda.

Chapitre 5

Application : étude de cas

1. Introduction

L'évolution technologique et sociale des regroupement industriels a entraîné une augmentation significative de la complexité du processus dans les usines chimiques. L'incapacité à maîtriser certains risque, peut conduire à des risques plus graves, par conséquent, tous les risques doivent être réduits à un niveau acceptable et les empêchés de se produire [4], [167], [168]. Pour ce faire, l'évaluation quantitative des risques (QRA) a été proposée comme un outil efficace pour faire face à la complexité des systèmes et pour obtenir de meilleurs résultats dans l'évaluation des risques des installations industrielles. L'évaluation des risques est une phase importante dans toute entreprise pour augmenter sa sécurité. L'identification et l'évaluation des risques pourraient se faire à l'aide de nombreuses méthodes telles que Hazard Identification (HAZID).

Pour comprendre comment (QRA) peut contribuer à l'analyse des risques et à la modélisation de l'événement indésirable qui se produit, tout en tenant compte des risques individuels et sociétaux dans les installations industrielles, ce travail présente l'effet de multiples scénarios accidentels sur le complexe GL1K, en utilisant une combinaison de deux outils principaux, l'approche (QRA) (HAZID et Bow Tie ont été utilisés) et le logiciel SAFETI.

2. Étude de cas et définition du problème

Le point central de cette étude est une évaluation quantitative des risques (QRA) appliquant les modèles (OREM, VULN, Mpact) présentés dans les chapitres précédents, sur l'unité de liquéfaction de GNL l'unité 5P dans l'usine GL1K de Skikda comme un exemplaire détaillé. L'utilisation de la méthode d'identification HAZID permet d'identifier les différents dangers liés aux scénarios accidentels qui affectent la vie individuelle et sociétale, ce qui permet de mesurer le risque dans les limites des usines et à l'extérieur [73].

La méthodologie que nous suivrons pour enquêter sur les risques possibles de l'unité 5P du GNL est la suivante : étape 1, L'identification des causes possibles et des événements dangereux. Ainsi, leur classement en fonction de leur gravité et les fréquences d'occurrence. En 2^{ème} étape, le choix des scénarios en matière de gravité et fréquence d'occurrence comme des scénarios représentatifs pour cette étude. En 3^{ème} étape, la modélisation des effets du phénomène dangereux pour calculer les distances et les types d'effet sur la région a risque cibler, en 4^{ème}, l'application des résultats obtenue depuis les étapes précédentes pour calculer le risque en matière de risque individuel et de

risque sociétal présenté par les courbes de dépassement et les courbes FN qui utilisent à la base les fréquences et les gravités calculé respectivement. Enfin, la 5ème étape on construit une matrice des risques qui peut utiliser comme un outil d'aide a décision et propose des recommandations pour diminuer ou minimiser les gravités des phénomène dangereux.

La figure 46 illustre la méthodologie de notre étude, et les différentes étapes appliquées

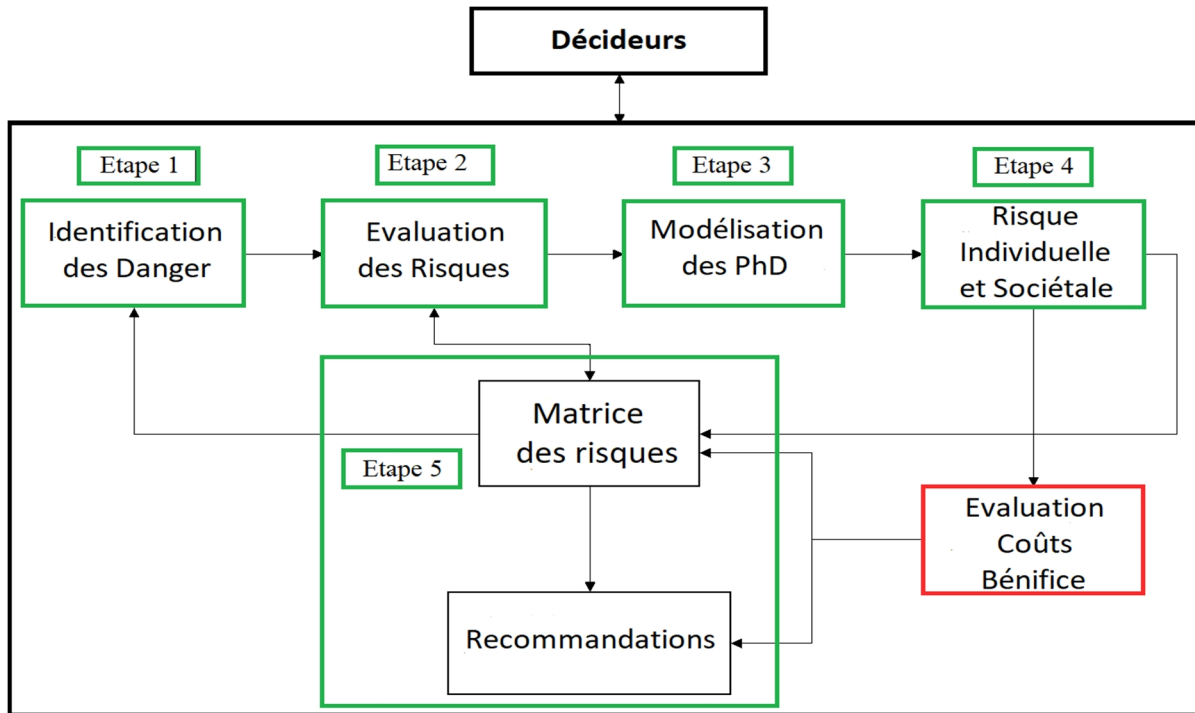


Figure 46 : méthodologie de l'étude [73],[122].

3. Analyse quantitative des risques

Cette partie montre la démarche de l'évaluation quantitative des risques dans l'unité 5P de liquéfaction de GNL.

Le procédé développé par PRITCHARD (voir figure 47) est basé sur le principe de la pression unique. Le fluide frigorigène est réparti sur 8 boîtes froides. Le GNL passe par différentes étapes de refroidissement jusqu'à ce qu'il atteigne une température de -162°C , puis est expédié vers le réservoir de stockage de GNL. L'unité dispose d'une chaudière qui produit la vapeur nécessaire à l'entraînement de la turbine du compresseur [169], [171].

L'évaluation des scénarios de risques potentiels est basée sur deux cas de rejet qui comprennent des fuites et des ruptures dans les différentes sections de l'unité 5P [65].

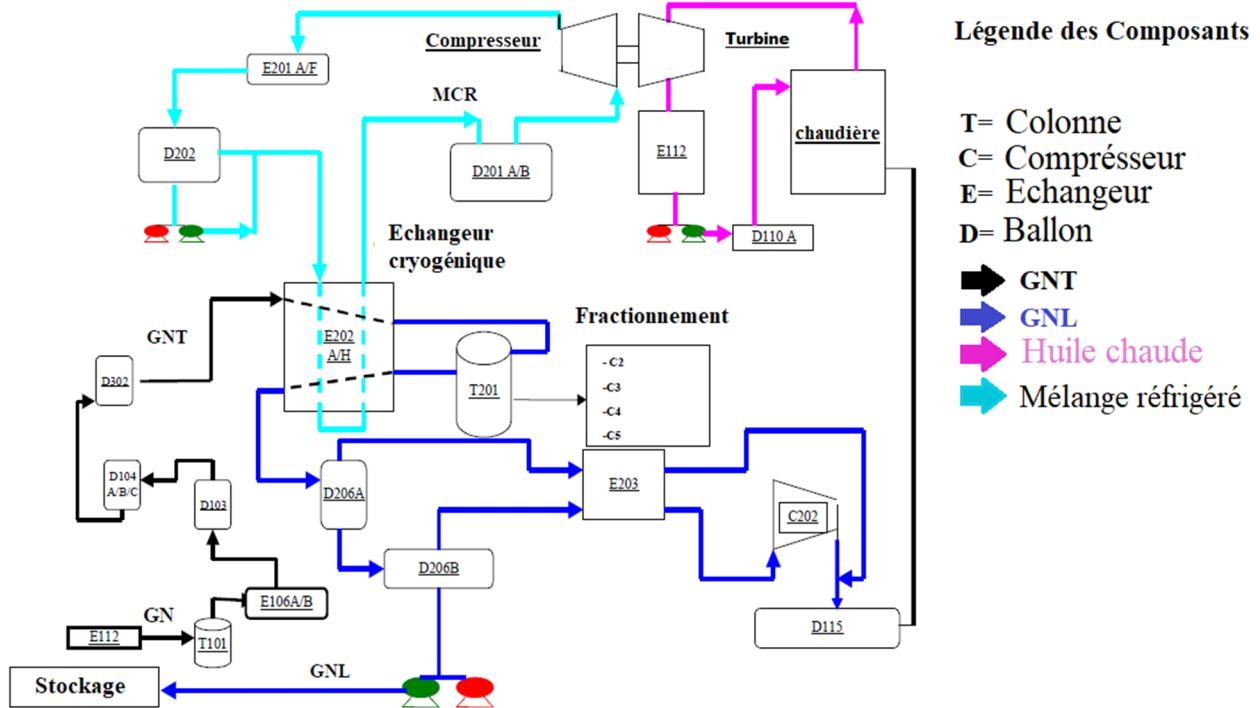


Figure 47 : schémas de processus de l'unité 5P [171].

3.1 Identification des dangers

Pour mettre en place une étude d'une installation, il est essentiel de définir ces systèmes et ces composants, ces limites et ces fonctions. L'identification des dangers (HAZID) est utilisée pour identifier les risques, les causes et les effets possibles de chaque section de l'étude. Dans cette étude, nous considérons que notre système est l'unité 5P. Le tableau 16 ci-dessous montre les systèmes et sous-systèmes et les composants étudiés qui limitent le périmètre de l'étude [171].

Tous les systèmes que nous avons estimé avoir ou qui pourraient avoir des effets importants sur le complexe du GNL, ou sur la zone industrielle environnante sont pris en considération, tout autre élément est exclu.

En appliquant HAZID à l'unité 5P, pour identifier les dangers en fonction de leurs causes principales, ce qui nous permettra d'estimer les phénomènes dangereux émergents. Le tableau 2 dans l'annexe A présente l'analyse complète de la méthode HAZID.

Tableau 16 : sections de l'unité 5P.

| Unité | Sections | Composants |
|----------|--------------------------------------|--------------|
| Unité 5P | Liquéfaction circuit MCR | Ballon D202 |
| | Liquéfaction stockage et appoint MCR | Ballon D208 |
| | Liquéfaction circuit GNT /GNL | Ballon D206A |
| | Fractionnement Dééthanisation | Colonne T202 |
| | Fractionnement Débutanisation | Colonne T203 |

Les sources de risques que nous avons identifiées (voir tableau 2 de l'annexe A, qui regroupe des dangers identifiés) sont modélisées par le logiciel SAFETI en deux types de rejets qui sont la fuite et la rupture.

Chaque système est étudié seul comme une entité définie par son type de rejet et les différents scénarios qui peuvent être générés.

3.2 Évaluation probabiliste des dangers potentiels

Pour évaluer le niveau de risque dans les installations industrielles de GNL, il est très important de connaître les fréquences d'occurrence de l'événement indésirable, qui pourraient être recueillies à partir des bases de données d'événements antérieurs ou connexes [172].

La fréquence est quantifiée à l'aide des sources de fuite génériques [173] (tel que Purple Book [12], Loss Prevention [52] et base de données du HCRD [174]). Les fréquences que nous avons utilisées sont calculé à partir de données d'évènement redouté central (ERC) et non pas directement à partir d'évènement intermédiaire (Ein), d'évènement central (EC) ou d'évènement initiateur (EI). Cela est possible parce qu'il existe des bases de données des fréquences de ERC reconnues au niveau international pour les industries pétrolières et pétrochimiques. Les barrières de prévention standard (agissant en amont de ERC) sont déjà prises en compte dans les fréquences de ERC sélectionné, dans les nœuds papillon.

La quantification de la fréquence des accidents majeurs est effectuée selon la méthodologie suivante :

- Détermination des fréquences d'occurrence de ERC à partir des banques de données probabilistes.
- Estimation des probabilités d'échec des mesures de détection, de protection et d'atténuation par l'attribution d'un niveau de confiance à ces barrières.

- La fréquence d'occurrence des dommages, calculée en prenant le produit de la fréquence d'occurrence de ERC et de la probabilité de défaillance des barrières d'atténuation et/ou de protection [175].

- La fréquence des fuites d'allumage, calculée comme le produit de la fréquence d'occurrence obtenue ci-dessus et de la probabilité de perte totale d'allumage en fonction de la phase et du débit [175].

Les valeurs de fréquence obtenues à partir de bases de données et calculées par Bow-tie [175] permettent son utilisation dans les usines de GNL Skikda, où manquent les bases de données de fréquences relatives aux installations cryogéniques.

3.2.1 Scénarios de l'arbre des événements

L'estimation du risque individuel autour de la zone de l'unité 5P a été effectuée sur la base d'un arbre d'événements considérant le cas d'une rupture catastrophique du circuit GNL/GNT, comme l'événement indésirable indiqué dans l'arbre d'événements Figure 48. Utilisation de l'arbre d'événements pour identifier des scénarios possibles différents dans un point de risque connu autour de l'unité 5P. La fréquence résultante est la probabilité que l'événement dangereux se produise dans un cadre temporel spécifique qui est d'un an.

La méthodologie du "purple book" néerlandais (réf. / 7 /) [172] est utilisée pour calculer la probabilité d'une inflammation immédiate qui dépend de la taille et de la phase du rejet ainsi que du niveau de réactivité du matériau. Ces valeurs du tableau 17 s'appliquent aux équipements fixes et stationnaires.

Tableau 17: Probabilité d'inflammation immédiate [176].

| Type et taille de la décharge | | Type de matériel rejeté | | | | | |
|-------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Continue (kg / s) | Instantanée (kg) | K0 Gas ; liquide : Tfp <0°C | | K1 liquide : Tfp < 21°C | K2 liquide : Tfp < 55°C | K3 liquide : Tfp < 100°C | K4 liquide : Tfp < 100°C |
| | | Réactivité : Moyenne /Elevée | Réactivité : faible | | | | |
| < 10 | < 1000 | 0,2 | 0,02 | 0,065 | 0,01 | 0 | 0 |
| 10 - 100 | 1000 - 10,000 | 0,5 | 0,04 | 0,065 | 0,01 | 0 | 0 |
| > 100 | > 10,000 | 0,7 | 0,09 | 0,065 | 0,01 | 0 | 0 |

* Tfp signifie point d'éclair.

Il convient de noter que les différents cas de rejet nécessiteront des probabilités de connexion différentes car les variations du matériau rejeté, la localisation du rejet et ses conditions, ainsi que les niveaux de congestion dans les zones environnantes, devront être adaptés aux probabilités de ramification de l'arbre. Il n'est donc pas possible de détailler toutes les branches de probabilité dans ce document.

La figure 48 suivante présente l'arbre des événements de la rupture du circuit GNL/GNT. L'événement déclencheur utilisé pour estimer la fréquence des scénarios dangereux qui servira de base pour calculer le risque individuel en points de classement des risques définis autour de l'unité 5P.

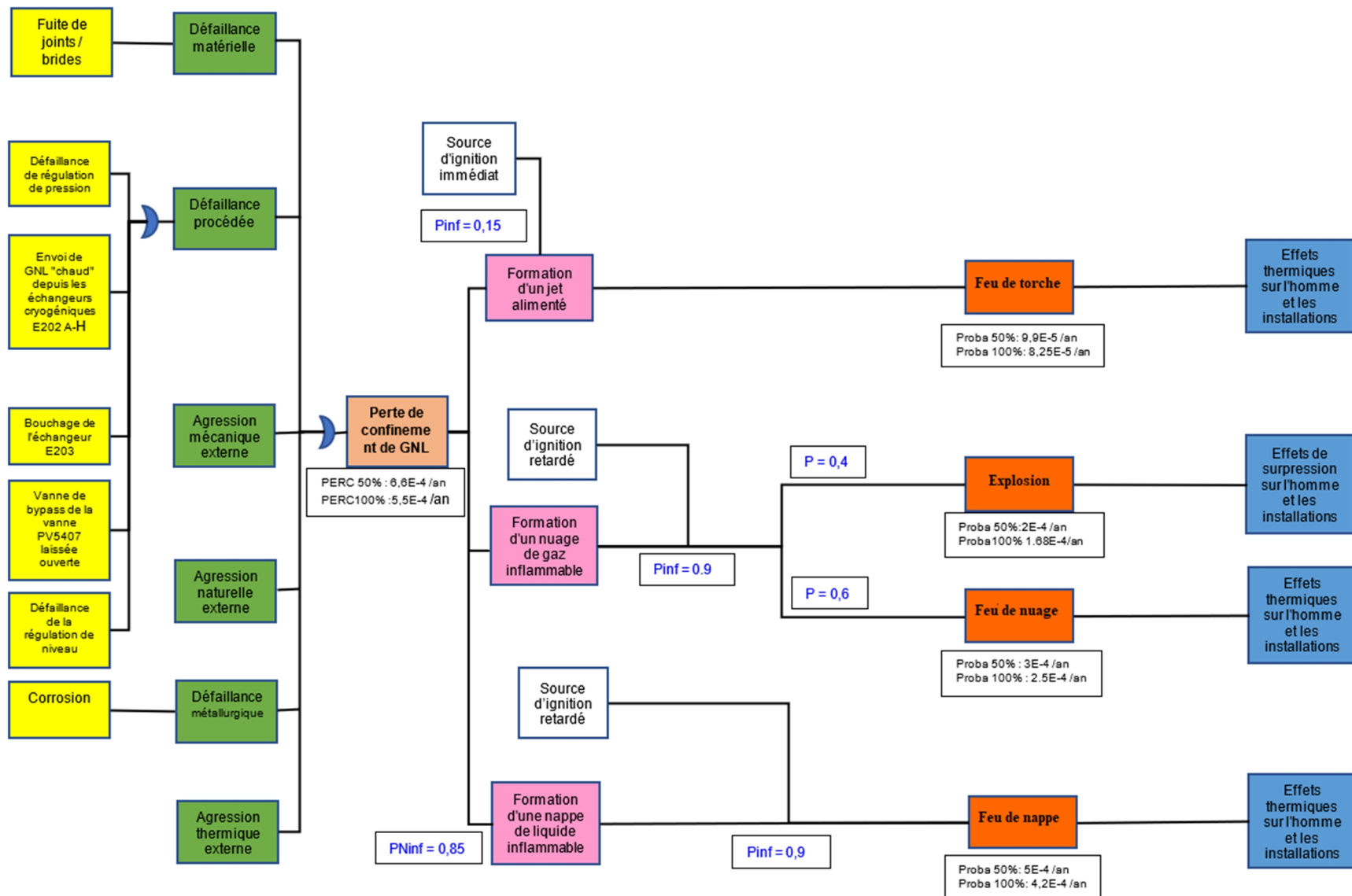


Figure 48 : noeud papillon de scénario rupture de Circuit GNL.

3.3 Performance de l'analyse des conséquences

Dans les cas d'une perte de confinement d'un gaz inflammable ou d'un liquide dans un récipient atmosphérique, quels que soient sa forme, son volume, la matière libérée pourrait former un jet de gaz ou une nappe de liquide, qui s'évaporerait et qui se disperserait dans l'atmosphère. En rencontrant une source d'inflammation, le nuage de vapeur provoquera automatiquement un feu à inflammation instantanée ou une explosion, si la substance libérée est liquide, elle enflammera la nappe. La possibilité que le feu de nappe généré provoque des blessures ou des décès est due à l'exposition et au rayonnement du flux thermique. Dans le cas d'un Feu de nuage, la possibilité de blessure dans un tel cas est généralement limitée à l'intérieur du nuage enflammé ; cependant, les explosions ont un autre facteur lié aux ondes de surpression qui ne sont pas limitées par le nuage et qui vont bien au-delà des limites du nuage [177].

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le GNL est principalement composé de méthane (80%), et qui est un fluide cryogénique à -162°C . Sa limite d'inflammabilité inférieure (LII) est de 4,4% et sa limite d'inflammabilité supérieure (LIS) est de 16,5%. Par conséquent, tout nuage de gaz généré par le GNL qui entre ces limites de concentration est inflammable [169].

Le plus important dans l'analyse des risques dans les usines de GNL, c'est la prise en compte de la basse température et la possibilité que les vapeurs s'enflamment en présence de toute source d'énergie.

Habituellement, pour acquérir une compréhension plus logique de la zone sous les effets du feu instantané, nous considérons que le nuage de vapeur commence à brûler dès qu'il atteint l'empreinte maximale du nuage au LII [178]. En outre, les calculs des radiations du feu de nappe sont liés aux probabilités d'allumage immédiat et différé. Dans le SAFETI, on considère qu'un feu de nappe est (primitif) s'il commence à brûler quelques secondes seulement après que la substance inflammable ait été relâchée sur le sol et soit entrée en contact avec la source d'inflammation pour déclencher un feu de nappe, Un feu de nappe (tardif) retardé se produit lorsque la substance inflammable forme une nappe avant d'entrer en contact avec une source d'inflammation.

3.4 Modèles et logiciels

Pour évaluer les résultats potentiels des phénomènes potentiellement dangereux identifiés dans HAZID [179], dans notre étude, nous avons utilisé les modèles disponibles pour développer un moyen d'évaluation et de compréhension des conséquences qui se produisent dans le cas du GNL. Ces modèles sont accessibles dans des ouvrages publiés et des logiciels [8], [11], [13],

[97], [125], [142]. Nous considérons que le SAFETI Risk (DNV) un outil remarquable parmi les autres codes de conséquences validés. Ce logiciel s'applique (UDM) à la représentation de la dispersion des nuages, qui fusionne le modèle de vaporisation des bassins (PVAP) pour évaluer le développement des bassins, leur dispersion et leur vaporisation. Le programme a deux façons de déterminer les effets des feux de torche : Le modèle du cône en combinant [180], JFSH-Johnson [173], [181], [182], Ou JFSH Cook Corrélations [58], Et le modèle API RP521 [145], [183], [184].

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser ces model ajointe avec le model OREM pour donner des résultats plus proches a la réalité.

En ce qui concerne l'importance et large approbation des résultats du code utilisé dans l'évaluation quantitative des dangers, l'analyse des risques que nous avons réalisée en utilisant le logiciel SAFETI [107], qui contient dans ses codes sources toutes les corrélations et modèles que nous avons mentionnés ci-dessus.

3.5 Résultats des Conséquences

En tenant compte des données d'entrée présentées dans le tableau 18 suivant, les scénarios de conséquences probables ont résulté de l'étude HAZID dans laquelle nous avons identifié les causes, les risques et les phénomènes dangereux tout en supposant deux types de rejets qui sont des fuites dues à une fuite de conduite ou à une rupture.

Tableau 18 : les données d'entrée utilisées dans l'étude.

| Sections | Type de libération | Matériel | Volume | Pression | Température | Phase de Rejet | Scenario Possible |
|-------------------------|--------------------|----------|---------------------|----------|-------------|----------------|--|
| Circuit MCR | Rupture | MR | 63 m ³ | 20 bar | 32 deg C | Vapeur | Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| | Fuite | MR | | | | | Feu de torche, Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| Stockage et appoint MCR | Rupture | Propane | 34 m ³ | 13 bar | 38 deg C | Liquide | Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| Circuit GNT / GNL | Rupture | Méthane | 100 m ³ | 3,5 bar | -148 deg C | Liquide | Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| | Fuite | Méthane | | | | | Feu de torche, Feu de nuage, Explosion, Feu de nappe |
| Déméthanisation | Rupture | LPG | 9,11 m ³ | 37 bar | 48 deg C | Liquide | Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| | Fuite | LPG | | | | | Feu de torche, Feu de nuage, Explosion |
| Débutanisation | Rupture | Butane | 3,77 m ³ | 8,5 bar | 135 deg C | Vapeur | Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |
| | Fuite | Butane | | | | | Feu de torche, Feu de nuage, Explosion, Boule de feu |

Les conditions météorologiques ont été recueillies à partir de données relatives aux prévisions météorologiques de Skikda, comme le montre le tableau 19 suivant :

Tableau 19 : Conditions météorologiques.

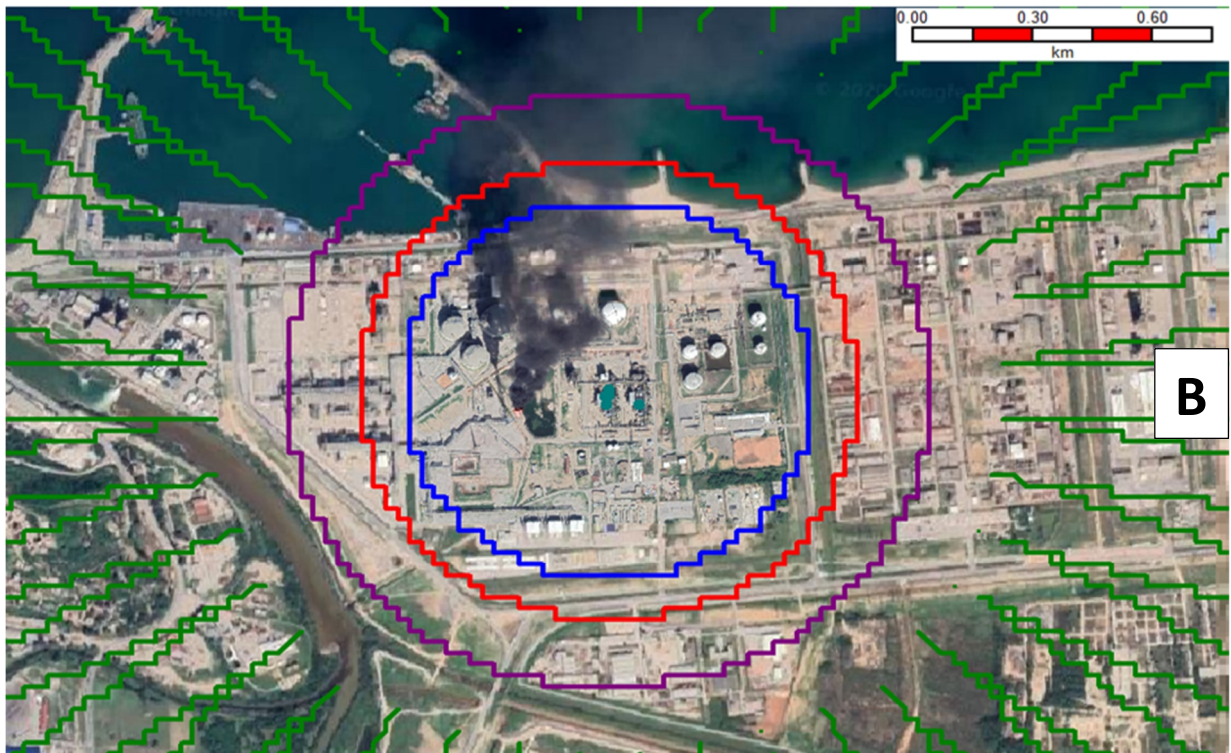
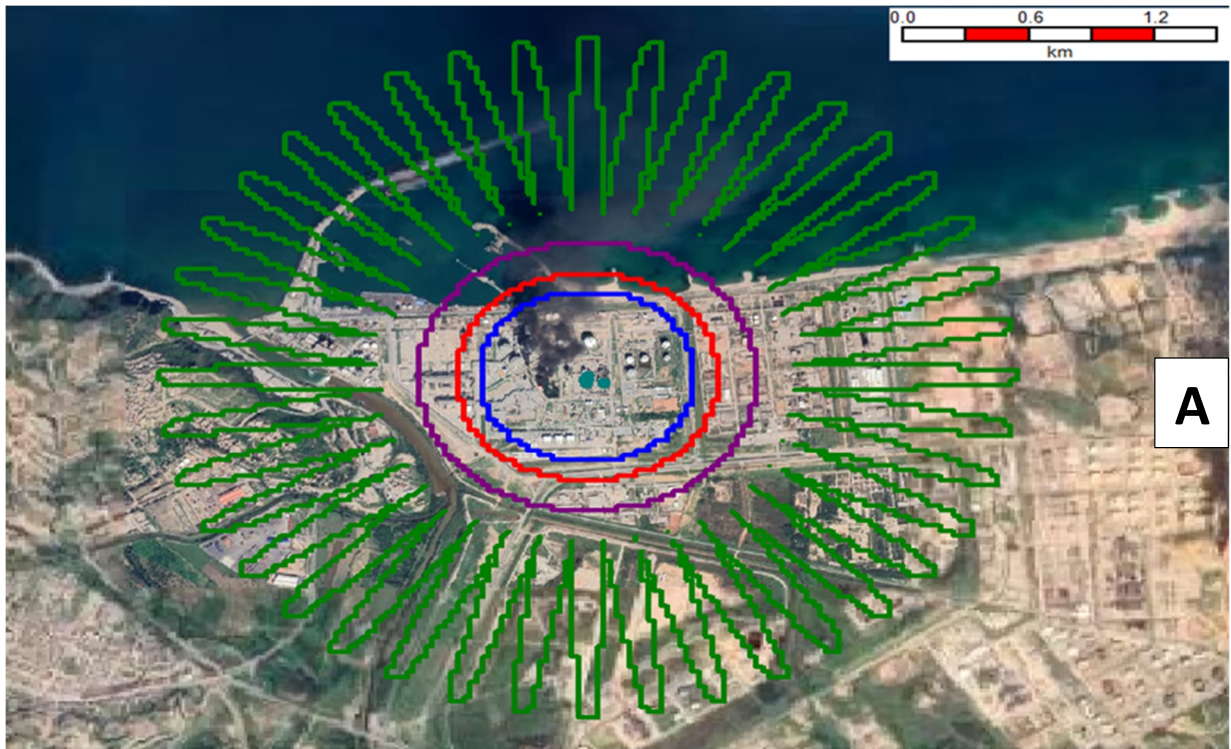
| | |
|---|--|
| Vitesse du vent [m/s] | 6,80556 |
| Pasqual stabilité | G très stable - éventuellement du brouillard |
| Température Atmosphérique [deg C] | 25 |
| Humidité Relative [fraction] | 0,7 |
| Flux de la radiation solaire [kW/m ²] | 0,5 |

Pour que notre étude soit conservatrice et proche de la réalité, nous avons supposé que toutes les fuites étaient dirigées horizontalement, quant aux rejets catastrophiques, ils ont été exemptés de cette hypothèse car la libération instantanée de Stockage devrait être modélisée dans toutes les directions. Les simulations ont pris en compte les possibilités de fuites différentes. Nous avons noté que pour la dispersion des nuages et le rayonnement thermique, les rejets horizontaux sont considérés comme ayant les zones d'impact maximales par rapport aux autres directions.

Les flammes des installations industrielles constituent un réel danger pour les structures et les populations présentes dans la zone. Il est donc important de comprendre l'apparition et le développement d'un incendie dans le domaine industriel. En général, un incendie peut être le résultat de types de rejets différents dus à des types de fuites différents (grandes ou petites) ou à des déversements de liquide provenant de zones différentes de l'usine. Ce qui peut se produire pour diverses raisons telles que la défaillance d'une cuve, d'un tuyau ou d'une pompe, de brides, de points d'échantillonnage et de vidange, etc.

Pour chaque scénario que nous avons étudié, nous avons obtenu des résultats pour la dispersion maximale des nuages, le Feu de nuage, le Boule de feu, la surpression d'explosion, le feu de torche et le feu de nappe.

Les figures 49-50 suivantes décrivent la distance d'effet des différents scénarios sur une carte qui nous aidera à comprendre les différentes distances d'effet et leur gravité pour chaque scénario, comme l'explosion caractérisée par sa surpression (bar) et d'autres types d'incendie caractérisés par leur rayonnement thermique (KW/m²). Ce type de présentation nous aidera à mieux comprendre les dangers et leurs effets afin de préparer davantage de barrières et de mesures pour protéger et empêcher que ces dangers ne se reproduisent. En particulier pour les effets sur les structures et les populations environnantes qui sont la cible principale de ce type de phénomènes dangereux.







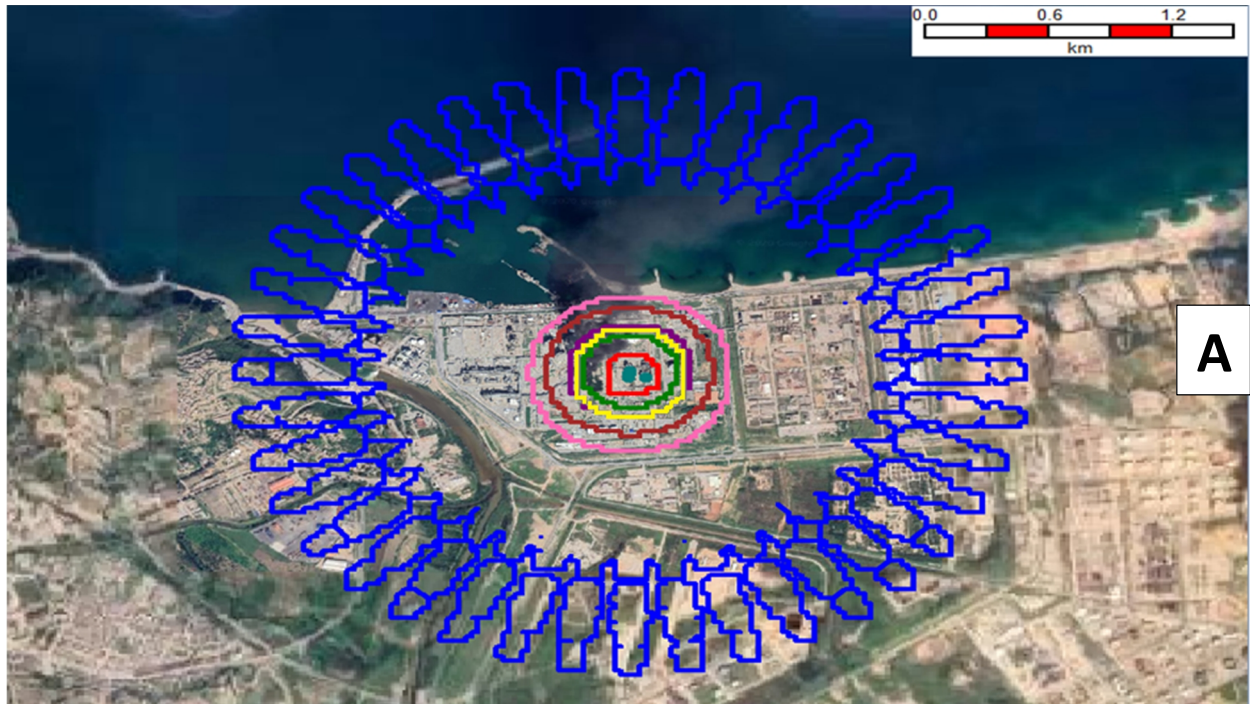
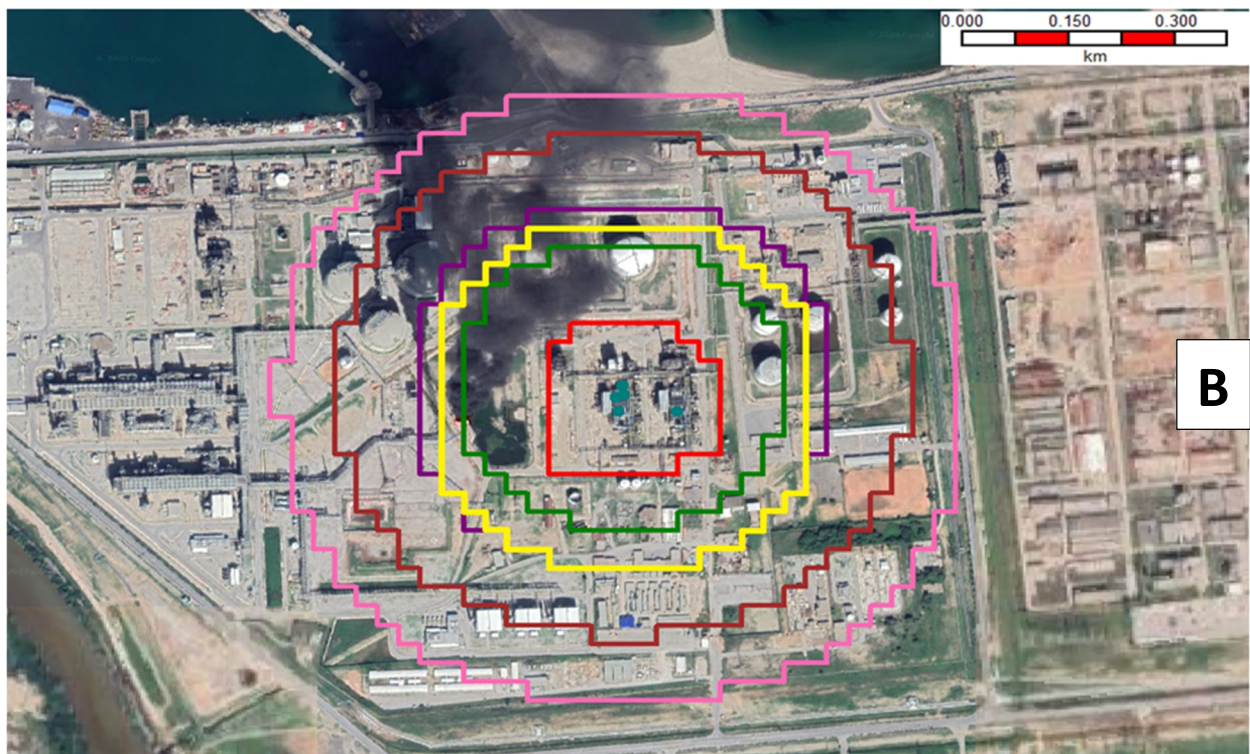
- Effets
-  Niveau d'effet du rayonnement du feu de torche 4Kw/m²
 -  Niveau d'effet du rayonnement du feu de torche 12.5Kw/m²
 -  Feu de nuage au niveau de l'effet de fractionnement LFL
 -  Niveau d'effet du rayonnement du feu de torche 37.5 Kw/m²

Figure 49 : Représentation des zones d'effet de feu de nuage (A) et de feu de torche (B).



A



B

- Effets
- ~ Niveau d'effet du rayonnement de la boule de feu 4 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet du rayonnement de la boule de feu 12.5 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet du rayonnement du feu de nappe 4 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet du rayonnement du feu de nappe 12.5 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet du rayonnement de la boule de feu 37.5 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet du rayonnement du feu de nappe 37.5 kw/m²
 - ~ Niveau d'effet de surpression 0,02 bar

Figure 50 : Représentation des zones d'effet de l'explosion (A), du Boule de feu et du feu de nappe (B).

3.5.1 Résultats de dispersion et feu de nuage

En commençant par l'empreinte maximale du nuage qui représente la dispersion maximale du gaz dans l'air, une concentration égale à 50 % du GNL dans l'air appelée LII ; si cette empreinte du nuage rencontre une source d'énergie qui provoquera éventuellement un effet de feu de nuage, et par conséquent, elle génèrera un rayonnement thermique dans la zone couverte par le nuage. Un feu de nuage est identifié avec le niveau de rayonnement et la distance d'effet de la source de la fuite, en cas de n'importe quel type de dispersion, quelle qu'en soit la nature, si sa concentration est inférieure au LII, il ne brûlera pas [155]. Mais il serait sûr de considérer une concentration de 50 % de LII comme un niveau de concentration inférieur pour déterminer la distance de sécurité dans notre étude. Le tableau 20 suivant représente les distances de feu instantané et d'empreinte maximale résultant de notre cas d'étude pour chaque scénario.

Tableau 20 : résultats de dispersion et feu de nuage.

| Sections | Scenarios | Météorologie | Distance à LIS [m] | Distance à LII [m] |
|-------------------------|-----------|--------------|--------------------|--------------------|
| Circuit MCR | Rupture | F 1.5 m/s | 10,866 | 29,9926 |
| | Fuite | F 1.5 m/s | 72,5227 | 398,328 |
| Stockage et appoint MCR | Rupture | F 1.5 m/s | 36,3124 | 180,366 |
| Circuit GNT / GNL | Rupture | F 1.5 m/s | 214,636 | 482,014 |
| | Fuite | F 1.5 m/s | 310,409 | 1998,9 |
| Déméthanisation | Fuite | F 1.5 m/s | 36,7104 | 277,774 |
| | Rupture | F 1.5 m/s | 20,7951 | 118,907 |
| Débutanisation | Fuite | F 1.5 m/s | 4,17987 | 31,2074 |
| | Rupture | F 1.5 m/s | 3,44979 | 8,55686 |

Comme l'indique dans le tableau 20, la distance d'effet le plus faible possible est générée par une rupture dans la section de Débutanisation avec seulement 8,5 m, ce qui est trop faible pour être considéré comme une menace, mais même cette petite fuite peut générer un effet domino qui entraînera davantage d'accidents avec un plus grand degré d'effet ; c'est pourquoi nous l'avons prise en compte dans cette étude. Nous voyons que la plus grande zone affectée se trouve dans la section du circuit GNT/GNL qui affecte une zone de près de 2 km de la source. Les autres scénarios dépendent du type de fuite et de la section étudiée qui varient entre 30 m et près de 500 m, si nous excluons les distances les plus basses et les plus longues. Bien que la forme du Feu de nuage dépende de la direction du vent ainsi que de la concentration, nous pouvons voir que la figure 49 en vert représente un Feu de nuage qui ressemble à une fleur avec

de multiples pétales et que chacun de ces pétales représente la forme d'un éventuel Feu de nuage dans cette direction spécifique.

Le Feu de nuage peut causer des dommages assez importants, en particulier aux parties (VULN)érables des structures telles que les câbles électriques [155]. Un Feu de nuage pourrait également provoquer une détérioration de la concentration d'oxygène dans la zone, ce qui serait mortel pour la population actuelle.

3.5.2 Résultats de feu de torche

Les Feu de torche pourraient également se produire dans les zones industrielles à partir de divers cas tels que des fissures ou des fuites de tuyaux ainsi que l'éjection de liquides, de brides si elles sont confrontées à une source d'inflammation [155]. Les Feu de torche sont difficiles à gérer car la longueur de la flamme du jet peut atteindre jusqu'à 100 m ou plus dans certains cas [146]. Une autre séquence d'action possible en cas de fuite avec présence instantanée d'une source d'ignition et un feu de torche qui n'est pas considéré comme catastrophique, mais à long terme, il sera la raison principale d'un effet domino s'il est orienté vers d'autres parties ou sections, et s'avérera mortel d'une certaine manière. Les feux de torche sont caractérisés par le rayonnement thermique, la longueur de la flamme et la direction de l'inclinaison.

Le tableau 21 suivant représente les résultats que nous avons obtenus pour chaque section prise isolément. Nous devons comprendre la différence entre la longueur de la flamme et le niveau de rayonnement, car pour la longueur de la flamme, c'est la distance réelle que les flammes atteignent et pour le niveau de rayonnement, c'est la distance d'effet du transfert de chaleur à travers l'air ou d'autres substances.

Tableau 21 : résultats de feu de torche.

| Sections | Scenarios | Météo | Longueur de la flamme [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 1 (4 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 2 (12,5 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 3 (35 kW/m ²) [m] |
|-------------------|-----------|-----------|---------------------------|--|---|---|
| Circuit MCR | Fuite | F 1.5 m/s | 191,447 | 404,943 | 253,944 | 234,945 |
| Circuit GNT / GNL | Fuite | F 1.5 m/s | 338,145 | 763,432 | 507,761 | 478,045 |
| Déméthanisation | Fuite | F 1.5 m/s | 86,7416 | 215,114 | 138,848 | 130,368 |
| Débutanisation | Fuite | F 1.5 m/s | 36,284 | 29,6585 | 12,6578 | 12,6592 |

Nous avons également pu comprendre grâce au tableau 21 que le circuit GNT/GNL a le plus haut niveau d'efficacité car avec une intensité de 35 kW/m² le feu de torche pourrait atteindre une distance de 480 m, et pour la plus faible intensité (4 kW/m²) il atteint 763 m et une longueur de flamme de 338 m. Ceci prouve que c'est l'une des sections les plus dangereuses de l'unité,

suivie du circuit du mélange cycle de refroidissement (MCR) puis de la déméthanisation, et enfin de la Débutanisation. Nous avons pu observer cela dans la figure 49 qui montre les zones touchées par le feu de torche alors que nous avons considéré l'inclinaison horizontale pour la décharge pour montrer les distances réelles pour le feu de torche. Le bleu représente le niveau d'intensité 3 (35 kW/m²) [m], le rouge le niveau d'intensité 2 (12,5 kW/m²) [m] et le violet le niveau d'intensité 1 (4 kW/m²) [m].

3.5.3 Résultats de feu de nappe

Bien que le GLN soit un gaz dans la nature, il existe de nombreux cas où un rejet liquéfié pourrait se produire et où il faudrait un certain temps pour qu'il s'évapore, ce qui provoquerait une nappe autour de la zone de rejet, sans compter que la vitesse de changement de phase de liquide à gaz, dans les conditions atmosphériques, provoquerait un Feu de nappe s'il était confronté à une source d'inflammation. Dans notre étude, nous avons montré qu'il est possible de provoquer un Feu de nappe dans une section circuit GNT/GNL, c'est le scénario d'une fuite dans un court tuyau qui permettra au gaz liquéfié de s'écouler et de provoquer un Feu de nappe. A noter que lorsqu'une nappe brûle, ce qui brûle, en réalité, ce n'est pas le liquide, mais le gaz qui s'en est évaporé et qui a atteint la limite inférieure d'inflammabilité [155], dans ce cas deux scénarios sont possibles. Tout d'abord, un rejet qui provoquera un Feu de nappe dès qu'il commencera à s'écouler de la fissure, nous l'appelons un Feu de nappe primitif, mais un autre scénario peut se produire, c'est qu'après le rejet, il faut un temps considérable pour que la nappe s'enflamme, ce qui provoquera la formation d'une plus grande nappe, et l'évaporation de plus de liquide, avec la formation d'un nuage qui provoquera un feu instantané suivi d'un feu de nappe tardif [146].

Tableau 22 : résultats de feu de nappe.

| Section | Scenario | Météo | Diamètre de nappe [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 1 (4 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 2 (12,5 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 3 (35 kW/m ²) [m] |
|-------------------|----------|-----------|-----------------------|--|---|---|
| Circuit GNT / GNL | Fuite | F 1.5 m/s | 66,5618 | 364,685 | 214,143 | 194,518 |

Nous pouvons observer à partir du tableau 22 que dans ce scénario, s'il n'y a pas d'inflammation dans la première phase de la nappe, le diamètre maximal de la nappe atteindra 66 m, après quoi la combustion de cette nappe générera un rayonnement thermique capable de faire fondre le métal [155]. Les niveaux de rayonnement d'intensité indiqués dans le tableau 22 sont représentés dans la figure 50 qui nous permet de mieux comprendre les distances des niveaux

d'intensité. Le contour de couleur verte représente l'intensité de 35 kW/m² à une distance de 194 m, le contour de couleur violette représente l'intensité de 12,5 kW/m² à une distance de 214 m, et le contour de couleur brune représente l'intensité de 4 kW/m² à une distance de 364 m.

3.5.4 Résultats de boule de feu

L'un des risques majeurs dans l'industrie des GNL est l'explosion qui provoque généralement des destructions et des pertes de vies humaines de grande ampleur. Les explosions sont connues avec deux facteurs [104]. Tout d'abord, les radiations thermiques du gaz explosif qui sera formé en boule de feu et la surpression libérée par son violent dégagement d'énergie. Dans ce travail, nous étudierons les deux phénomènes séparément.

L'un des risques d'incendie importants est celui des Boule de feu [185]. Le Boule de feu pourrait être le résultat de l'éclatement d'un réservoir sous pression et faire partie du BLEVE ou d'un nuage de vapeur. D'autres événements possibles qui pourraient conduire à une Boule de feu, l'un d'entre eux est un jet de gaz liquéfié dans lequel une combustion initiale (boule de feu) de vapeur non allumée aura lieu avant le feu de torche [59]. Un autre est une éruption de pétrole chaud donnant lieu à un dégagement de vapeur brûlante [3]. Nous nous intéressons particulièrement au type de Boule de feu qui se produit dans un jet ou un nuage.

Tableau 23 : résultats de Boule de feu.

| Sections | Scenarios | Météo | Diamètre Boule de feu [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 1 (4 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 2 (12,5 kW/m ²) [m] | Distance sous le vent jusqu'au niveau d'intensité 3 (37,5 kW/m ²) [m] |
|-------------------------|-----------|-----------|---------------------------|--|---|---|
| Circuit MCR | Rupture | F 1.5 m/s | 69,1735 | 216,462 | 114,924 | 42,0934 |
| | Fuite | F 1.5 m/s | 69,1735 | 214,828 | 113,848 | 41,0268 |
| Stockage et appoint MCR | Rupture | F 1.5 m/s | 150,484 | 449,922 | 238,82 | 82,7121 |
| Circuit GNT / GNL | Rupture | F 1.5 m/s | 133,055 | 341,033 | 171,955 | n/a |
| Déméthanisation | Rupture | F 1.5 m/s | 99,6905 | 341,022 | 185,442 | 78,7862 |
| | Fuite | F 1.5 m/s | 25,6103 | 62,6842 | 30,2636 | n/a |
| Débutanisation | Rupture | F 1.5 m/s | 25,6103 | 62,6842 | 30,2636 | n/a |

Le tableau 23 montre les valeurs des différentes sections avec des types de rejets différents de phénomènes possibles de Boule de feu. Il décrit le diamètre de la Boule de feu qui définit la forme et la surface occupée par les flammes ainsi que les distances de l'effet des niveaux d'intensité du rayonnement thermique généré par cette combustion rapide. Nous pouvons

également observer sur la figure 50, la forme et la zone affectée pour chaque niveau d'intensité. Le contour rouge représente le niveau d'intensité de 37,5 KW/m², le contour jaune représente le niveau d'intensité de 12,5 KW/m², et le contour violet représente le niveau d'intensité de 37,5 KW/m². On peut également noter que la section Stockage et appoint MCR a les plus grandes dimensions de Boule de feu et le plus haut niveau d'intensité à 82 m pour le niveau 3 et 150 m pour le niveau 1. Alors que la section de Débutanisation a la plus petite Boule de feu et les effets les plus faibles pour le niveau 3, (les radiations émises par celle-ci n'atteignent pas 37KW/m²) et 62 m pour le niveau 1.

3.5.5 Résultats d'explosion

La surpression générée par les explosions se réfère aux ondes de pression soudaines, causées par la libération massive d'énergie ; plus l'explosion est importante, plus les dommages causés par la surpression sont importants [146]. Ces ondes de pression se déplacent à la vitesse du son, la pression pourrait générer des fragments de matériaux détruits, comme des missiles qui pourraient viser d'autres équipements et les endommager, ce qui entraînerait d'autres accidents. Elle peut également détruire des installations et blesser ou tuer des personnes à l'intérieur ou à l'extérieur [70]. Le tableau 24 suivant indique les distances des effets et leurs valeurs de surpression relative.

Tableau 24 : résultats d'Explosion.

| Sections | Scenarios | Distance du centre d'explosion [m] | Distance sous le vent jusqu'à la surpression 1 (0.07 bar) [m] | Distance sous le vent jusqu'à la surpression 2 (0.15 bar) [m] | Distance sous le vent jusqu'à la surpression 3 (0.3 bar) [m] | Distance sous le vent jusqu'à la surpression 4 (0.5 bar) [m] |
|-------------------------|-----------|------------------------------------|---|---|--|--|
| Circuit MCR | Rupture | 10 | 95.05 | 56.30 | 39.11 | 31.75 |
| | | 20 | 160.584 | 96.54 | 68.1205 | 55.95 |
| | Fuite | 10 | 32.97 | 22.50 | 17.86 | 15.87 |
| | | 382.2 | 426.51 | 409.23 | 402.09 | 399.03 |
| Stockage et appoint MCR | Rupture | 10 | 117.42 | 68.48 | 46.77 | 37.47 |
| | | 149.98 | 307.21 | 244.7 | 216.96 | 205.09 |
| | Rupture | 10 | 134.26 | 77.65 | 52.53 | 41.78 |
| Circuit GNT / GNL | Rupture | 377.81 | 706.75 | 603.45 | 557.61 | 537.99 |
| | | 10 | 30.67 | 21.25 | 17.07 | 15.28 |
| | Fuite | 1990 | 2038.82 | 2016.58 | 2006.71 | 2002.48 |
| Déméthanisation | Fuite | 10 | 44.93 | 29.01 | 21.95 | 18.93 |

| | | | | | | |
|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 575.61 | 704.26 | 661.32 | 642.26 | 634.10 |
| | Rupture | 10 | 99.98 | 58.99 | 40.8 | 33.01 |
| | | 97.5 | 186.64 | 151.72 | 136.23 | 129.60 |
| Débutanisation | Fuite | 10 | 32.33 | 22.15 | 17.64 | 15.71 |
| | | 167.04 | 188.32 | 179.97 | 176.27 | 174.68 |

Le tableau 24 est une présentation détaillée de la surpression due aux explosions et des valeurs de distance du centre de l'explosion pour chaque section et chaque scénario. Nous devons attirer l'attention sur le fait que les explosions provenant de nuages de vapeur ont une caractéristique particulière, à savoir qu'elles peuvent exploser près ou loin de la source de la fuite [55]. En termes simples, un nuage pourrait se déplacer sous l'effet du vent vers d'autres endroits jusqu'à ce qu'il rencontre une source d'inflammation et explose à la fin. Comme le montre le tableau 8, les lectures de surpression différentielles dépendent des distances du centre de l'explosion. On peut également dire que l'aspect dangereux de ce type de danger : sa mobilité.

Dans la figure 50, le contour bleu représente la zone qui pourrait être touchée par la surpression d'explosion pour les cas étudiés. Nous pouvons également dire que toute la zone à l'intérieur du contour bleu est menacée par une éventuelle explosion et que la zone qui pourrait être touchée dépend du vent et de la concentration du nuage. Les résultats des conséquences de chaque phénomène dangereux sont rapportés à l'aide des niveaux d'impact fournis. Des détails supplémentaires sur les effets attendus de ces niveaux d'impact sur la centrale et les populations sont énumérés ci-dessous dans le tableau 25.

Tableau 25 : Les effets des scénarios sur les structures /population [186].

| Conséquence | Niveau de conséquence | Effets sur le installation/personnel |
|-------------------------|-------------------------------------|---|
| Incendie / Feu de nuage | Limite inflammable inférieure (LII) | Inflammation des matériaux facilement inflammables exposés, par exemple, événements de vapeur inflammable, plastiques, tissus, etc. Des incendies secondaires sont possibles mais improbables. |
| Explosion | >500 mbar (7,3psi) | Dégâts à l'usine et aux vaisseaux d'exploitation, parfois substantiels avec une destruction totale probable au-dessus de 1 bar. Les installations non renforcées seront démolies. |
| | 300 mbar (4,4psi) | Seuil de dégâts significatifs aux vaisseaux d'exploitation et à l'installation de tuyauterie. Les installations non renforcées seront probablement endommagées de façon significative ou partiellement détruits. |
| | 150 mbar (2,2psi) | Dégâts à l'usine insignifiants sauf pour les structures faibles telles que des réservoirs de stockage atmosphériques vides. Il faut s'attendre à des dégâts structurels aux installations de type domestique. Dégâts superficiels avec défaillance des murs non soutenus et bris de toutes les fenêtres. Seuil d'effondrement partiel pour les installations à construction faible. |
| | 70 mbar (1psi) | Dégâts à l'usine improbables et uniquement de légers dommages superficiels aux installations en brique. La majorité des vitres sont cassées et les débris de |

| | | |
|---------------|------------------------|--|
| | 30 mbar (0,45psi) | verre provoqueront certainement des blessures à quelques personnes dans l'installation. Verre brisé, mais pas de décès escomptés. |
| Boule de feu | Dans la boule de feu | Inflammation probable de l'installation. Les gens à l'air libre seront tués. |
| | Inflammation spontanée | Le bois pourrait s'enflammer, ce qui entraînerait l'inflammation de l'installation si le matériau externe est charbonneux. Les gens à l'air libre seront tués. |
| Feu de nappe | 100 kW/m ² | Charge de chaleur capable de provoquer la défaillance des structures en acier et de l'équipement après 30 minutes. |
| | 37,5 kW/m ² | Assez pour endommager l'équipement. Décès immédiats |
| | 12,5 kW/m ² | Energie minimum requise pour l'inflammation pilotée du bois, la fonte des tuyaux en plastique. Douleur extrême en 20 secondes et l'instinct pousse à la recherche d'un abri. Flux limite pour les incendies secondaires. |
| Feu de torche | 5 kW/m ² | Pas de dégâts aux installations dans les constructions conventionnelles. Les personnes devraient pouvoir évacuer une installation confrontée à ce niveau de radiation thermique. Douleur ressentie sur la peau non protégée en 10 secondes. Valeur seuil en dessous de laquelle l'évacuation devrait toujours être possible. |

3.6 Effectuer des calculs de risque

Le risque est la valeur que nous utilisons pour quantifier les menaces pesant sur la population, les structures ou les matériaux, ou l'environnement, qui est mathématiquement le résultat de la combinaison de la fréquence d'occurrence d'un ou de plusieurs scénarios accidentels et de la gravité des effets résultant de ces scénarios. Nous définissons le risque dans notre étude en utilisant deux aspects qui sont les risques sociétaux et les risques individuels, nous les considérons comme les fondements de la mesure du risque [187].

Les critères d'acceptation des risques pour l'unité 5P à Skikda décrits ci-dessous sont proposés pour l'évaluation quantitative des risques par DNV [188] et ont été utilisés dans le passé pour évaluer d'autres infrastructures GNL en Algérie. Les critères d'acceptation des risques sont décrits comme suit :

- Critère d'intolérance : niveau de risque maximal, tout risque au-delà est considéré comme intolérable et des mesures de réduction des risques sont extrêmement essentielles.
- Critère tolérable : niveau de risque négligeable, tout risque inférieur à ce niveau est acceptable.
- Région ALARP : les risques entre les critères tolérable et intolérable sont tolérables s'ils correspondent au concept ALARP, ce qui signifie que des mesures de réduction des risques doivent être envisagées et mises en œuvre à moins qu'il ne soit démontré que les coûts sont disproportionnés par rapport aux bénéfices.

Les risques pour les membres du public sont considérés en termes de risques individuels spécifiques à un lieu (LSIR), c'est-à-dire le risque individuel dans un lieu spécifique auquel une

personne présente en permanence à ce point est exposée. Les critères de risque individuel lié à un lieu pour les membres du public sont les suivants

- Critères intolérables : 10^{-5} par an (un ou plusieurs tués tous les 100 000 ans)
- Critère tolérable : 10^{-6} par an (un tué ou moins tous les 1.000.000 d'années)

Cela correspond au risque sur une année complète (présence continue), l'approche LSIR vise principalement à déterminer l'acceptabilité des risques dans les zones habitées ou les zones où les personnes pourraient être présentes la plupart du temps. Il s'agit d'un critère de base qui peut être utilisé pour définir l'acceptabilité générale des risques autour des infrastructures.

Le risque sociétal est la probabilité qu'une population d'une zone définie proche de la zone dangereuse soit Vulnérable à une blessure ou à un décès parce qu'elle est exposée à un éventuel scénario accidentel. Son expression est donnée par des courbes F-N. Les courbes F-N comparent la fréquence cumulée (F) d'occurrences d'événements qui donnent plus qu'un nombre (N) de décès. Les critères F-N ont été définis pour les membres du public et les travailleurs de l'unité 5P [160], comme le montre la figure 51.

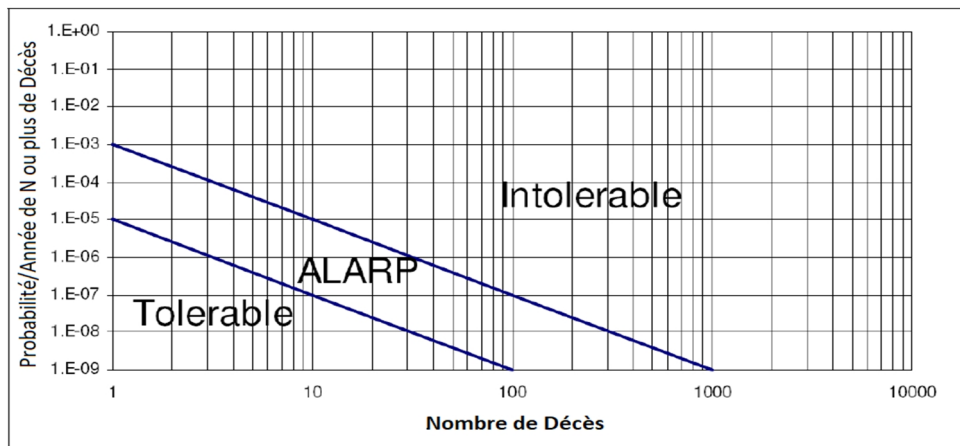


Figure 51 : modèle courbe FN [160].

La courbe F-N pour les membres du public peut être interprétée comme suit :

- Le niveau des risques sociétaux pour le public est intolérable s'il existe un potentiel de causer 1 ou plusieurs personnes tuées tous les 1 000 ans, 10 tuées tous les 100 000 ans, 100 tuées tous les 10 000 000 ans, etc.
- Le niveau des risques sociétaux pour le public est considéré comme tolérable s'il existe un potentiel de causer 1 mort tous les 100 000 ans, 10 morts tous les 10 000 000 ans, 100 morts tous les 1 000 000 000 ans, etc.

Il convient également de noter que les résultats pour les risques présentés ici visent à quantifier uniquement les risques associés aux dangers potentiels émanant de l'unité 5P. Les dangers

provenant de l'autre usine existante ne sont pas couverts par ce (QRA) et les résultats ne représenteront donc pas le risque total pour l'usine de GNL ou le personnel sur site ou hors site. Pour évaluer les risques sociétaux et les risques individuels, il faut construire un arbre d'événements pour comprendre l'évolution de l'événement indésirable vers des scénarios dangereux ; il faut d'abord calculer la fréquence d'occurrence de chaque scénario. La partie suivante explique les cas que nous avons pris en compte pour les arbres d'événements afin d'estimer les risques individuels en fonction des points de classement des risques [160].

3.6.1 Caractérisation de la population

Pour évaluer l'impact d'un rejet dangereux, il est nécessaire de disposer de données sur la présence et la localisation des personnes dans et autour de l'usine. Le nombre moyen de personnes dans chaque zone, y compris les fractions internes supposées, est indiqué dans le tableau 26. La répartition du personnel est basée sur les données fournies par la SONATRACH, tandis que les fractions internes dans chaque zone sont basées sur le meilleur jugement de notre source. La compréhension de la densité de population environnante est une clé essentielle pour calculer les risques sociétaux. De plus, la population présente sur le site est considérée comme une source possible d'inflammation ; elle influence les risques sociétaux et individuels [151].

Tableau 26 : Population sur site.

| Zone/population | Nombre moyen d'effectifs | Intérieure | Extérieure |
|---|--------------------------|------------|------------|
| Train GNL et zone de fractionnement | 5 | 0,1 | 0,9 |
| Salle de contrôle du pôle 1 | 3 | 0,9 | 0,1 |
| Services et réservoirs | 4 | 0,9 | 0,1 |
| Salle de commande production d'énergie électrique | 1 | 0,9 | 0,1 |
| Unité 10 | 12 | 0,1 | 0,9 |
| Unité 50 | 10 | 0,1 | 0,9 |
| Unité 80 | 3 | 0,1 | 0,9 |
| Salle de contrôle (au nord de la zone de stockage de GNL/GPL) | 6 | 0,9 | 0,1 |
| Unité 5P et 6P | 16 | 0,9 | 0,1 |
| Laboratoires | 53 | 0,9 | 0,1 |
| Salle de contrôle Pôle 2 et dépôt | 22 | 0,9 | 0,1 |
| Atelier | 147 | 0,9 | 0,1 |
| Bureaux | 523 | 0,9 | 0,1 |
| Poste 43Kw (GPL) | 3 | 0,9 | 0,1 |
| Personnel d'entretien | 73 | 0,5 | 0,5 |
| Chargement des camions de transport de GPL | 1 | 0,1 | 0,9 |
| Autres installations | 65 | 0,9 | 0,1 |
| Caserne de pompiers | 8 | 0,9 | 0,1 |
| Unité pour hélium | 50 | 0,5 | 0,5 |
| Unité GPL | 20 | 0,5 | 0,5 |
| Installation RH | 20 | 0,9 | 0,1 |
| Sécurité | 150 | 0,9 | 0,1 |
| Total | 1195 | | |

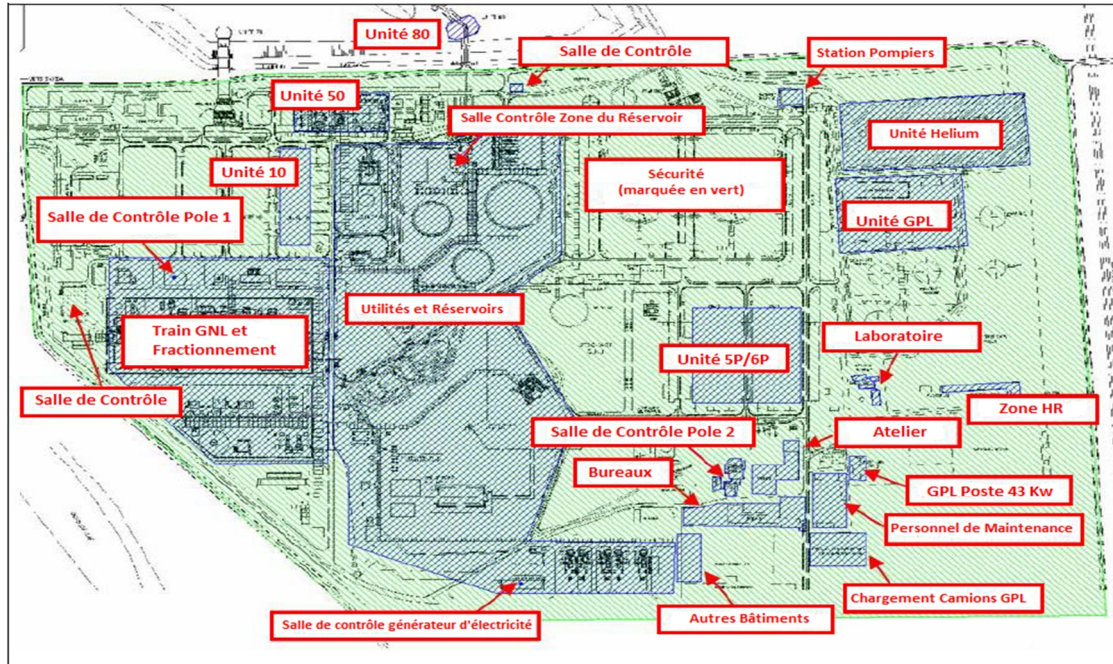


Figure 52 : Répartition de la population dans le site industrielle.

3.7 Résultats en matière de risque

3.7.1 Risque individuels

Utilisation des courbes de dépassement pour chaque point de classement des risques, courbes de dépassement indiquent la fréquence F à laquelle le point de classement des risques subit un niveau d'effet de pression ou de rayonnement thermique supérieur ou égal au niveau d'effet E . Les courbes de dépassement peuvent être générées pour chaque structure identifiée autour de la source accidentelle. Point de classement des risques correspond aux emplacements choisis pour l'évaluation afin de comprendre l'effet de la pression sur les installations environnantes de l'installation étudiée [189]. Les 8 sites ont été choisis en raison de leur proximité et de leur importance. Lorsque les courbes de dépassement auront été générées pour les installations voisins, nous serons capables de mesurer et d'évaluer le risque.

Connaître la capacité du installation à résister à la surpression (tableau 25) générée par le scénario accidentel, implique d'appliquer des critères de risque spécifiques correspondant à une fréquence d'exposition déterminée [70].

Dans notre cas, la fréquence de 1×10^{-6} de l'installation (déformé ou détruit) et de ses habitants (blessés) est définie comme un critère de risque tolérable choisi, tandis que tout ce qui est supérieur à 10^{-5} est considéré comme intolérable, puis la surpression générée qui correspond à cette fréquence spécifique est comparée à la capacité de la structure ciblée à résister à la charge de la force de frappe. Si cette force de frappe peut entraîner une détérioration ou une destruction

de la structure au point de mettre en danger les habitats, nous la considérons ici comme la fréquence d'occurrence du scénario accidentel comme intolérable et nécessitant une certaine atténuation des risques. Si la fréquence de surpression qui en résulte est supérieure aux critères d'intolérabilité et que le niveau de dommage est inférieur aux critères d'intolérabilité (dommage ne pouvant pas affecter les installations et les habitats), nous pourrions le considérer comme tolérable.

Le risque individuel dans un point défini est la combinaison de la fréquence de la conséquence dangereuse et de la possibilité que l'événement se produise vers le point de classement du risque, le tableau 27 suivant résume les résultats obtenus.

Tableau 27 : résultats du risque individuel.

| Point de classement des risques | Conséquence résultat | Risque total [/ <i>AvgeYear</i>] | Risque / Résultat | Description du type de résultat | Risque total [/ <i>AvgeYear</i>] | Risque Pct. | Risque / Résultat |
|--|--|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------------|
| Unité 6P | Feu de nuage a LII, niveau d'effet de fraction | 2.44E-06 | 0.0488 | Feu de nuage seulement | 1.47E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 9.77E-07 | 40 | 1 |
| | Vulnérabilité d'installation | 2.46E-06 | 0.0491 | Feu de nuage Seulement | 1.47E-06 | 59.709 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 9.89E-07 | 40.290 | 0.68 |
| | Surpression 0.04 bar | 6.59E-06 | 0.1317 | Feu de nuage avec explosion | 6.59E-06 | 100 | 1 |
| | Surpression 0.1 bar | 4.55E-06 | 0.0909 | Feu de nuage avec explosion | 4.55E-06 | 100 | 1 |
| | Vulnérabilité extérieure | 9.07E-06 | 0.1813 | Boule de feu Seulement | 6.63E-06 | 73.055 | 0.44 |
| | | | | Feu de nuage Seulement | 1.47E-06 | 16.166 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 9.77E-07 | 10.777 | 1 |
| | Niveau d'effet du rayonnement de Boule de feu 12,5 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 |
| | Vulnérabilité intérieure | 2.46E-06 | 0.0491 | Feu de nuage Seulement | 1.47E-06 | 59.709 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 9.89E-07 | 40.290 | 0.68 |
| Surpression 0.3 bar | 1.22E-06 | 0.0244 | Feu de nuage avec explosion | 1.22E-06 | 100 | 1 | |
| Niveau d'effet du rayonnement Boule de feu 4 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 | |
| Laboratoire + Ressource humaine (RH) | Niveau d'effet du rayonnement de Boule de feu 4 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 |
| | Surpression 0.3 bar | 1.99E-06 | 0.0397 | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 100 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage Seulement | 2.98E-06 | 59.911 | 1 |
| | Vulnérabilité intérieure | 4.97E-06 | 0.0994 | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40.088 | 0.87 |
| | | | | Feu de nuage Seulement | 2.98E-06 | 60 | 1 |
| | Vulnérabilité extérieure | 4.96E-06 | 0.0992 | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40 | 0.99 |
| | Surpression 0.1 bar | 3.42E-06 | 0.0683 | Feu de nuage avec explosion | 3.42E-06 | 100 | 1 |
| | | | | Feu de nuage Seulement | 2.98E-06 | 59.911 | 1 |
| | Vulnérabilité d'installation | 4.97E-06 | 0.0994 | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40.088 | 0.87 |
| Feu de nuage Seulement | | | | 2.98E-06 | 60 | 1 | |
| Feu de nuage a LII, niveau d'effet de fraction | 4.96E-06 | 0.0992 | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40 | 0.99 | |
| | | | Feu de nuage avec explosion | 1.99E-06 | 40 | 0.99 | |
| Surpression 0.04 bar | 5.70E-06 | 0.114 | Feu de nuage avec explosion | 5.70E-06 | 100 | 1 | |
| Unité stockage GPL | Surpression 0.1 bar | 3.24E-06 | 0.0648 | Feu de nuage avec explosion | 3.24E-06 | 100 | 1 |
| | Vulnérabilité extérieure | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 |

| | | | | | | | |
|--|---|----------|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|------|
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 |
| | Vulnérabilité intérieure | 5.14E-06 | 0.1027 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 59.910 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.06E-06 | 40.089 | 0.87 |
| | Niveau d'effet du rayonnement de Boule de feu 4 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 |
| | Surpression 0.3 bar | 1.05E-07 | 0.002 | Feu de nuage avec explosion | 1.05E-07 | 100 | 1 |
| | Vulnérabilité d'installation | 5.15E-06 | 0.1027 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 59.910 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.06E-06 | 40.089 | 0.87 |
| | Feu de nuage a LII, niveau d'effet de fraction | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 |
| | Surpression 0.04 bar | 6.50E-06 | 0.1299 | Feu de nuage avec explosion | 6.50E-06 | 100 | 1 |
| Bureaux | Surpression 0.1 bar | 2.93E-06 | 0.0585 | Feu de nuage avec explosion | 2.93E-06 | 100 | 0.99 |
| | Surpression 0.3 bar | 1.63E-06 | 0.0325 | Feu de nuage avec explosion | 1.63E-06 | 100 | 0.99 |
| | Vulnérabilité intérieure | 4.56E-06 | 0.0912 | Feu de nuage Seulement | 2.73E-06 | 59.946 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 1.83E-06 | 40.053 | 0.92 |
| | Vulnérabilité d'installation | 4.56E-06 | 0.0912 | Feu de nuage Seulement | 2.73E-06 | 59.946 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 1.83E-06 | 40.053 | 0.92 |
| | Niveau d'effet du rayonnement de Boule de feu 4 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 |
| | Surpression 0.04 bar | 5.69E-06 | 0.1138 | Feu de nuage avec explosion | 5.69E-06 | 100 | 1 |
| | Vulnérabilité extérieure | 4.56E-06 | 0.0911 | Feu de nuage Seulement | 2.73E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 1.82E-06 | 40 | 1 |
| Feu de nuage a LII, niveau d'effet de fraction | 4.56E-06 | 0.0911 | Feu de nuage Seulement | 2.73E-06 | 60 | 0.99 | |
| | | | Feu de nuage avec explosion | 1.82E-06 | 40 | 1 | |
| Bacs de Stockage gazoline | Vulnérabilité d'installation | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 |
| | Surpression 0.04 bar | 6.44E-06 | 0.1288 | Feu de nuage avec explosion | 6.44E-06 | 100 | 0.99 |
| | Feu de nuage a LII, niveau d'effet de fraction | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 |
| | Niveau d'effet du rayonnement de Boule de feu 4 Kw/m ² | 1.5E-05 | 0.2999 | Boule de feu Seulement | 1.5E-05 | 100 | 0.99 |
| | Vulnérabilité intérieure | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 |
| | | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 |
| Vulnérabilité extérieure | 5.13E-06 | 0.1025 | Feu de nuage Seulement | 3.08E-06 | 60 | 0.99 | |
| | | | Feu de nuage avec explosion | 2.05E-06 | 40 | 1 | |
| Surpression 0.1 bar | 1.40E-06 | 0.028 | Feu de nuage avec explosion | 1.40E-06 | 100 | 0.99 | |
| Stockage GNL | Surpression 0.04 bar | 2.50E-06 | 0.05 | Feu de nuage avec explosion | 2.50E-06 | 100 | 1 |
| MEGA train | Surpression 0.04 bar | 1.05E-06 | 0.021 | Feu de nuage avec explosion | 1.05E-06 | 100 | 0.99 |
| Unité 10 | Surpression 0.04 bar | 1.08E-06 | 0.021 | Feu de nuage avec explosion | 1.08E-06 | 100 | 1 |

Les résultats du classement des risques individuels donnent le risque qui a dépassé les critères de vulnérabilité ou niveau d'effet par rapport à un point de classement des risques donné, calculé à l'aide d'un ensemble donné de données de vulnérabilité ou le niveau d'effet. Les résultats sont présentés à différents niveaux, jusqu'aux résultats individuels détaillés, permettant une analyse descendante pour étudier les contributions relatives de risque individuel.

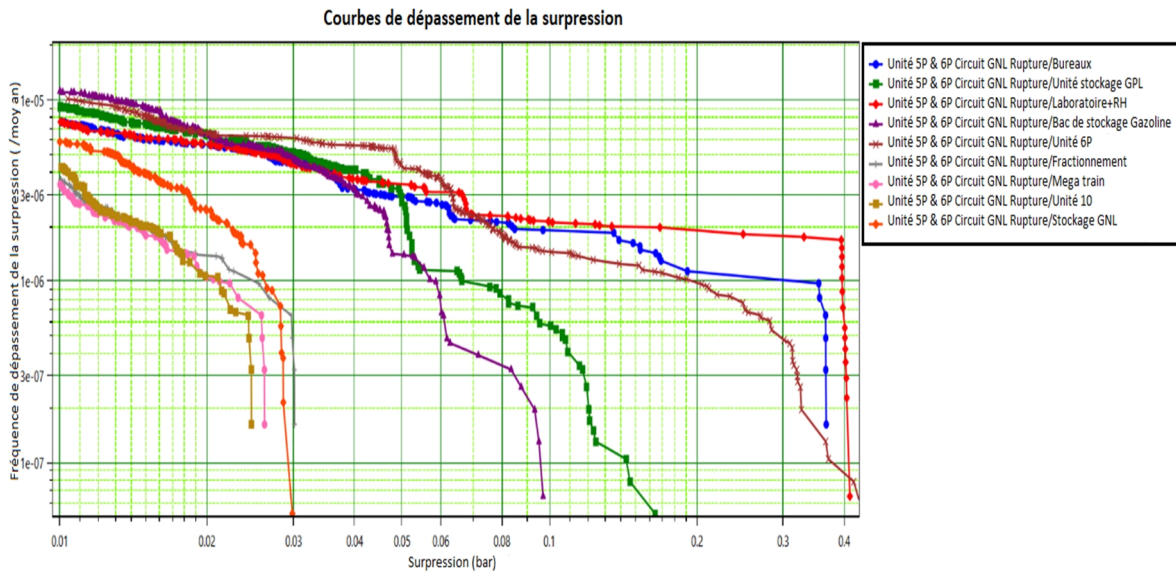


Figure 53 : courbes de dépassement Surpression de scenario de rupture circuit GNL.

La figure 53 montre les résultats des courbes de dépassement pour l'unité 5P. En appliquant le principe décrit ci-dessus, nous avons pu conclure les résultats dans le tableau 28 ci-dessous qui décrivent chaque structure avec sa surpression appliquée correspondante et les fréquences suivantes.

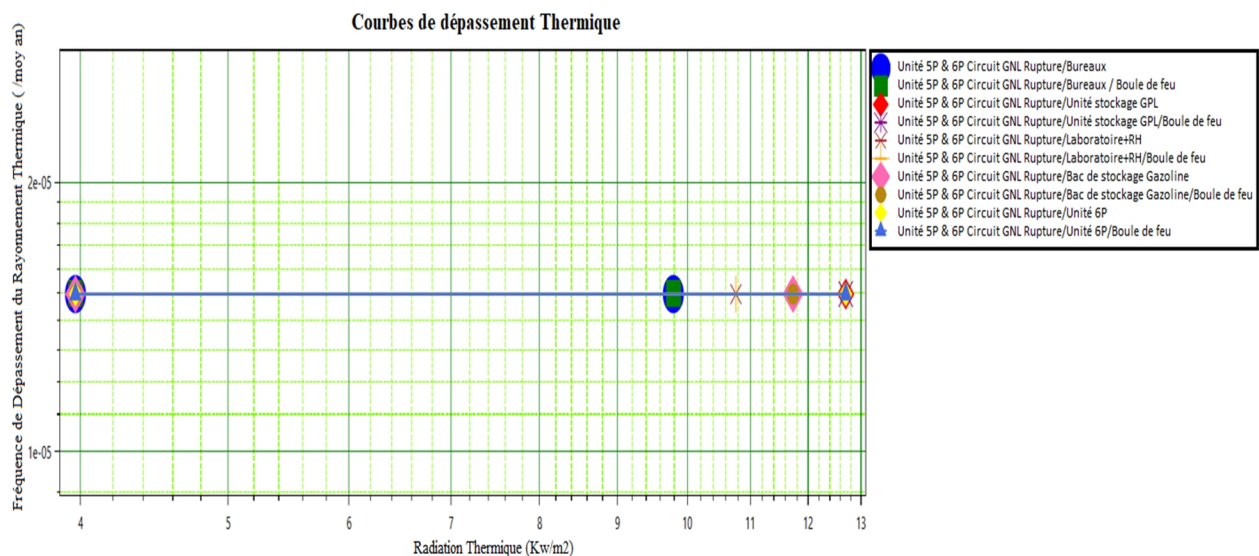
Tableau 28 : répartition de l'installation en fonction de l'énergie reçue.

| Fréquences | Valeurs de surpression | | | |
|-------------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|---------|
| | 0,07 bar | 0,15 bar | 0,3 bar | 0,5 bar |
| Au-dessus 10^{-5} | Na | Na | Na | Na |
| Entre 10^{-5} and 10^{-6} | Unité stockage GPL Bureaux | Bureaux Laboratoire +RH | Bureaux Laboratoire + HR | |
| | Laboratoire + Resource humaine (RH) Unité 6P | Unité 6P | | Na |
| Au-dessous de 10^{-6} | Bac de stockage Gazoline | Unité stockage GPL | Unité 6P | Na |

D'après le tableau 28, nous avons pu constater que les installations les plus menacés par la surpression sont la zone des bureaux, le laboratoire et la zone des ressources humaine (RH), ainsi que les habitats de ces installations. Dans le tableau 25, nous pouvons voir l'effet de chaque valeur seuil de surpression sur les installations et les personnes qui y résident. Quant aux installations qui ne sont pas mentionnés dans le tableau 28, c'est parce que la surpression à ces endroits est bien en dessous des critères pour que les installations aient des dommages ou des menaces pour les habitats.

Ce type de résultat souligne la nécessité soit de changer l'emplacement des installations ciblées, soit de renforcer ces structures pour pouvoir résister à la surpression qui l'influence afin de protéger ses habitats.

L'approche de l'analyse (QRA) nous fournit des résultats quantitatifs pour les effets des scénarios d'explosion potentiels étudiés. La combinaison de la fréquence et des conséquences (donc une approche basée sur le risque), permet de voir les événements ayant des impacts importants malgré leur faible fréquence. Tout en montrant que les événements ayant une fréquence d'occurrence élevée sont ceux qui ont une faible influence de surpression. Dans de nombreux cas, les événements indésirables (ayant l'impact le plus important) peuvent généralement servir d'exemple pour les études dont la fréquence est plus faible pour tomber en dessous du rang des critères d'acceptabilité utilisés dans les études déférentes de (QRA) [190].



Le même principe utilisé dans les courbes de dépassement de la surpression s'applique aux courbes de dépassement thermique. Dans ce cas, nous pouvons voir que l'influence thermique sur les installations est presque inexistante car le rayonnement thermique le plus élevé est de 12,5 KW/m² et cette valeur n'est pas suffisante pour endommager les structures ou les habitats à l'intérieur, même pour les personnes à l'extérieur ; il leur serait possible de s'abriter en moins de 20 secondes, sinon elles ressentiraient tout au plus une douleur extrême du fait d'être exposées à ce niveau de rayonnement, cependant ces effets ne sont pas mortels [191].

3.7.2 Risque sociétal

Les résultats du classement des risques sociétaux donnent les résultats des risques en termes d'intégrale de risque, où l'intégrale de risque pour un résultat individuel donné est calculée comme suit :

$$R = FN^i$$

Où F est la fréquence des résultats, N est le nombre de décès et i est l'indice d'aversion. La valeur d'un scénario est la somme des valeurs des résultats de ce scénario. FN Totaux Cette liste énumère tous les résultats individuels qui contribuent au risque sociétal, en donnant le risque en termes de nombre total de décès causés par le résultat, dans toutes les populations.

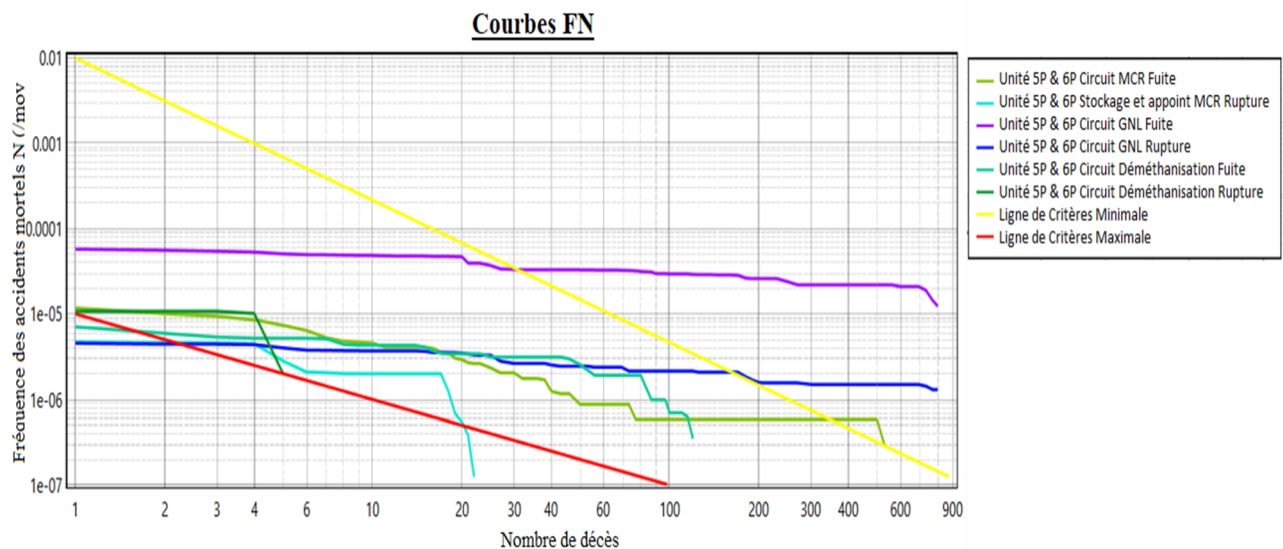


Figure 55 : Les courbes FN de la population sur site.

La figure 55, représente l'effet létal des scénarios vécus séparément par la population à l'extérieur et à l'intérieur autour de l'usine. La combinaison de la fréquence d'occurrence et de la létalité nous permet de mieux comprendre l'effet sociétal des dangers dans les limites de l'installation industrielle. Par exemple, les scénarios de fuite du circuit MCR, de fuite du circuit GNL et de rupture du circuit GNL se situent dans la zone intolérable, ce qui prouve que leur létalité est si élevée qu'elle pourrait atteindre le maximum de 800 morts. Il est vrai que leur fréquence est faible, mais l'impact généré est élevé. Ces scénarios nécessitent des barrières et des mesures préventives plus étendues pour diminuer l'impact sur les structures et les populations afin d'éviter des pertes élevées [190]. Les autres scénarios sont situés dans la zone ALARP, ce qui est acceptable dans notre cas, mais il serait préférable de mettre en place des mesures plus adéquates pour être en alerte si quelque chose se produit.

3.7.3 Détermination de la gravité

Tableau 29 : Niveau de gravité des conséquences indésirable.

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu (Selon le nombre des victimes) | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|--|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 9,9E ⁻⁵ /an | C1 | E | SELS | 80 | Catastrophique |
| | Rupture | 8,25E ⁻⁵ /an | C2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 2E ⁻⁴ /an | C3 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | 1.68E ⁻⁴ /an | C4 | D | SELS | 307 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | 3E ⁻⁴ /an | C5 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | 2.5E ⁻⁴ /an | C6 | D | SELS | 307 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | 5E ⁻⁴ /an | C7 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | 4,2E ⁻⁴ /an | C8 | D | SELS | - | - |

3.7.4 Placement des Phénomènes dangereux dans la matrice de criticité

Tableau 30 : matrice de criticité.

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | C3, C4, C5, C6, C7 | | | |
| 4. Catastrophique | C1 | | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Sur la base des résultats des nœuds paillant (fréquences) et des courbes FN, nous avons pu déterminer le niveau de gravité qui est présenté dans le tableau 29, ainsi que la matrice des risques présentée dans le tableau 30. Ces présentations nous permettent de mieux comprendre la nature des risques dans la zone industrielle et l'ampleur de l'effet possible de ces accidents indésirables sur la population, ce qui est un problème majeur aujourd'hui dans toutes les industries. Comme on peut observer la quasi-totalité des conséquences modélisées dans ce scénario (rupture du circuit GNL/GNT) se situent dans la zone inacceptable. Cela prouve que les mesures de prévention prises sont loin d'être suffisantes et nécessitent des mesures plus

adéquates et adaptées réduisant les risques pour abaisser la fréquence et la gravité de ces accidents à un niveau au moins acceptable.

4. Les résultats globaux de l'analyse des risques dans le GL1K de Skikda

Les résultats suivants concernent toutes les unités génératrices des risques au niveau du complexe GL1K de Skikda

4.1 Analyse détaillée des risques de l'unité 5P / 6P

4.1.1. Section Liquéfaction - Circuit MCR

La détermination de la fréquence de l'événement central redouté (ERC) est effectuée à partir de Stockage des équipements et lignes présentes dans la section susceptible de provoquer un accident majeur.

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|------------------------|
| Fuite | $4,69E^{-4}/\text{an}$ |
| Rupture | $4,15E^{-4}/\text{an}$ |

La probabilité d'inflammation est de **0,3** (gaz, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 31 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|--------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $1.4E^{-4} / \text{an}$ | A1 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | $1.23E^{-4} / \text{an}$ | A2 | D | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $1.18E^{-4} / \text{an}$ | A3 | D | SELS | 32 | Catastrophique |
| | Rupture | $1.03E^{-4} / \text{an}$ | A4 | D | SELS | 32 | Catastrophique |
| Feu de nuage | Fuite | $1.77E^{-4} / \text{an}$ | A5 | D | SELS | 32 | Catastrophique |
| | Rupture | $1.55E^{-4} / \text{an}$ | A6 | D | SELS | 32 | Catastrophique |

Tableau 32 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|----------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | | A3, A4, A5, A6 | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | A1 | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

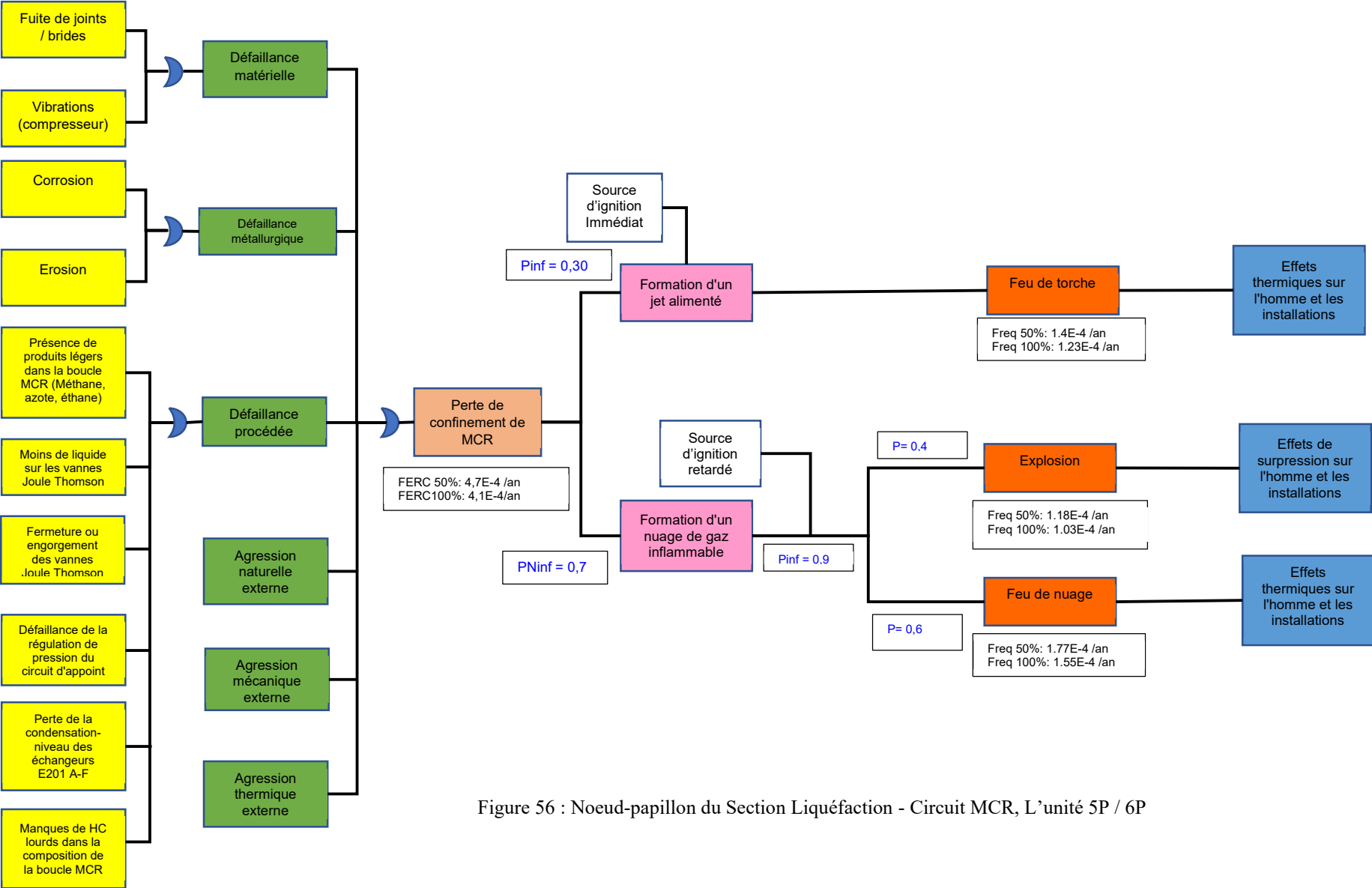


Figure 56 : Noeud-papillon du Section Liquéfaction - Circuit MCR, L'unité 5P / 6P

4.1.2. Section Liquéfaction - Stockage et appoint MCR

Les fréquences d'ERC sont :

Fuite -
Rupture $5,5E^{-5}/\text{an}$

La probabilité d'inflammation est de **0,3** (gaz, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 33 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Explosion | Fuite | - | | - | - | - | - |
| | Rupture | $1,38E^{-5}/\text{an}$ | B1 | E | SELS | 30 | Catastrophique |
| Feu de nuage | Fuite | - | | - | - | - | - |
| | Rupture | $2,08E^{-5}/\text{an}$ | B2 | E | SELS | 30 | Catastrophique |

Tableau 34 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | B1, B2 | | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

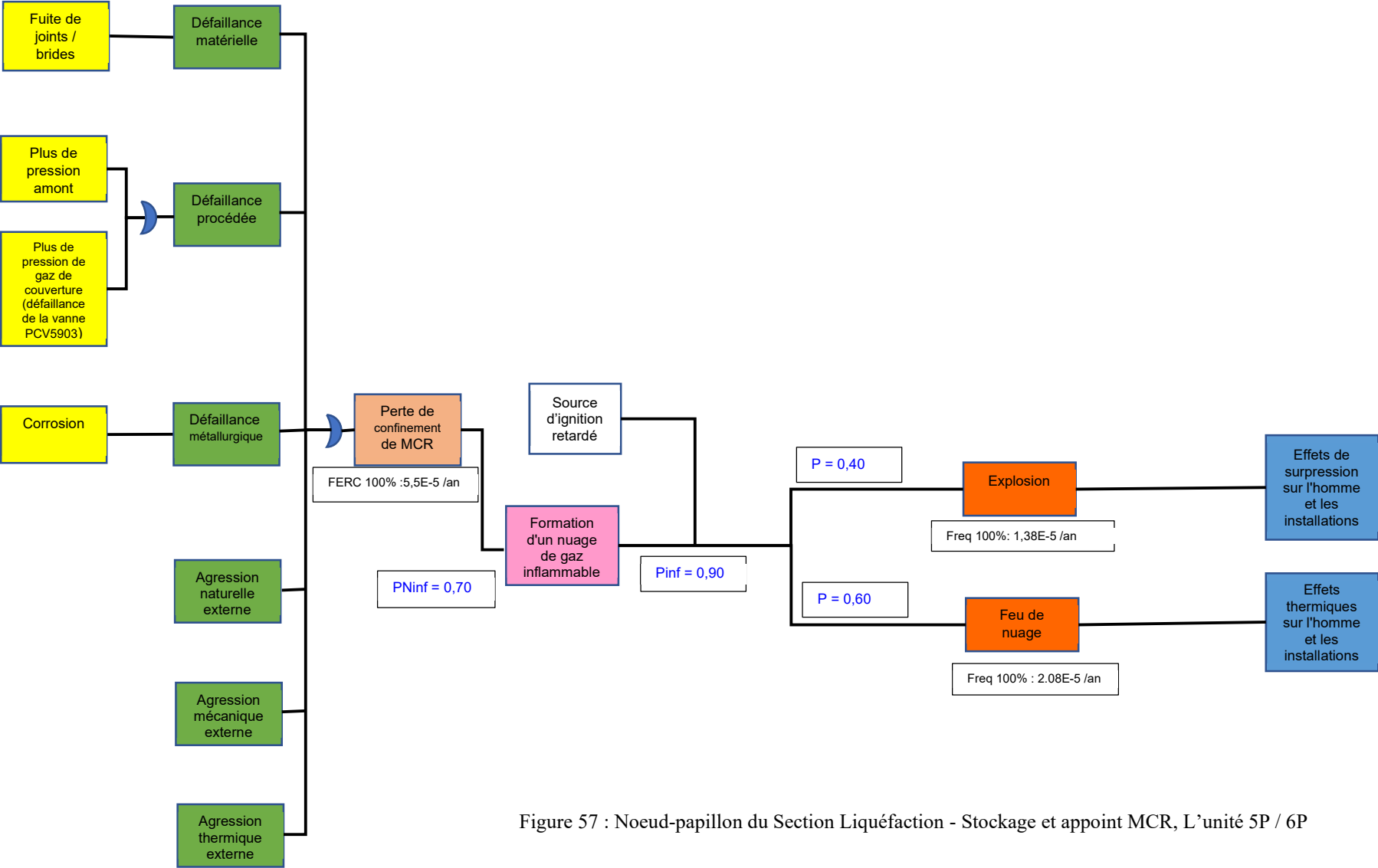


Figure 57 : Noeud-papillon du Section Liquéfaction - Stockage et appoint MCR, L'unité 5P / 6P

4.1.3. Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL

Les fréquences d'ERC sont :

Fuite $6,59E^{-4}/\text{an}$
 Rupture $5,5E^{-4}/\text{an}$

La probabilité d'inflammation est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

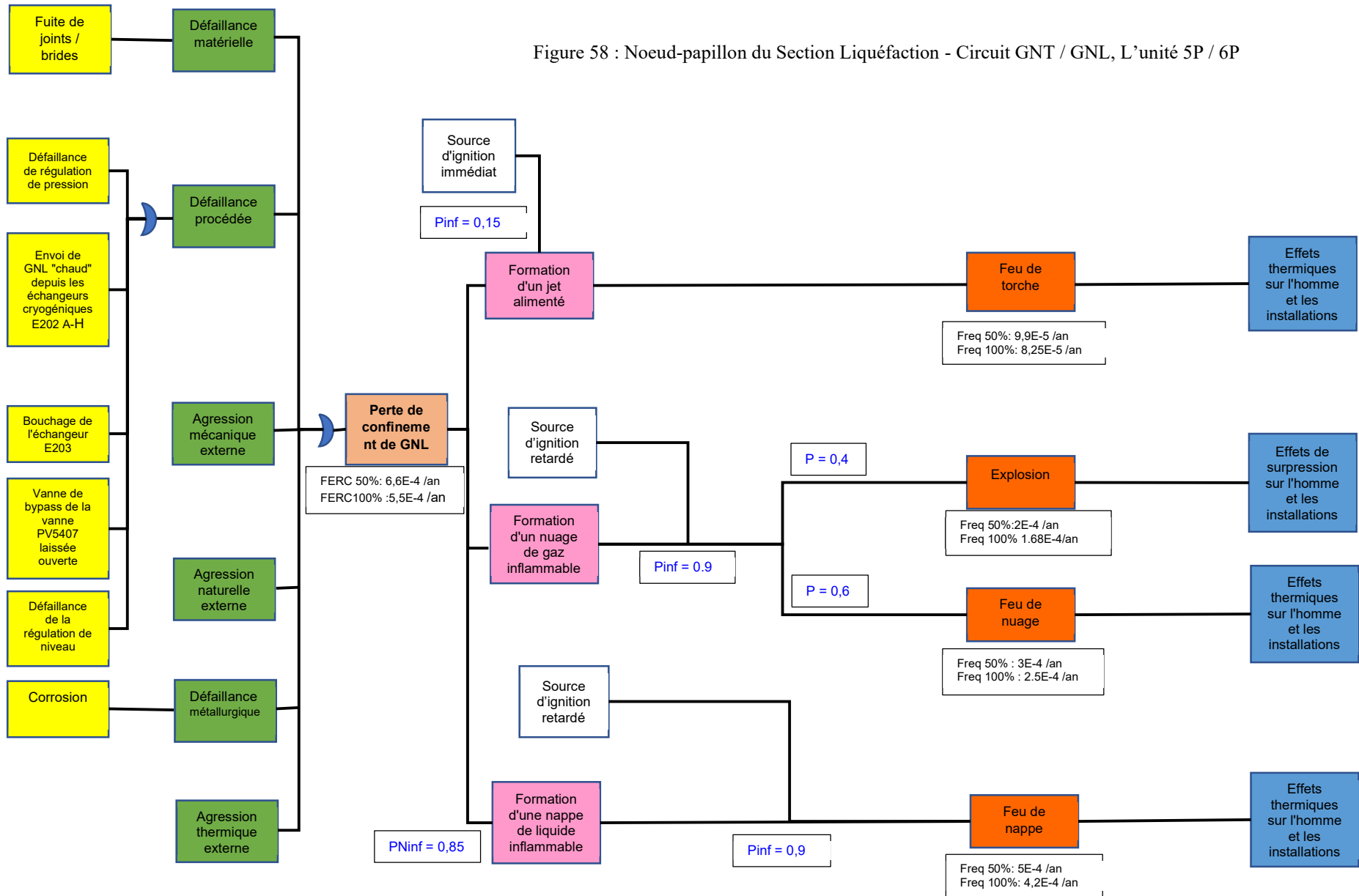
Tableau 35 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $9,9E^{-5}/\text{an}$ | C1 | E | SELS | 468 | Désastreux |
| | Rupture | $8,25E^{-5}/\text{an}$ | C2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $2E^{-4}/\text{an}$ | C3 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | $1.68E^{-4}/\text{an}$ | C4 | D | SELS | 307 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | $3E^{-4}/\text{an}$ | C5 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | $2.5E^{-4}/\text{an}$ | C6 | D | SELS | 307 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | $5E^{-4}/\text{an}$ | C7 | D | SELS | 147 | Désastreux |
| | Rupture | $4,2E^{-4}/\text{an}$ | C8 | D | SELS | - | - |

Tableau 36 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | C1 | C3, C4, C5, C6, C7 | | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 58 : Noeud-papillon du Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL, L'unité 5P / 6P



4.1.4. Section Fractionnement Déméthanisation

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|----------------|-------------------------|
| Fuite | 2,39E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 1,9E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 37 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 3,6E ⁻⁵ /an | D1 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 2,85E ⁻⁵ /an | D2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 7.34E ⁻⁵ /an | D3 | E | SELS | 32 | Catastrophique |
| | Rupture | 5.81E ⁻⁵ /an | D4 | E | SELS | 4 | Important |
| Feu de nuage | Fuite | 1.1E ⁻⁴ /an | D5 | D | SELS | 32 | Catastrophique |
| | Rupture | 8.72E ⁻⁵ /an | D6 | E | SELS | 4 | Important |

Tableau 38 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|--------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | D3 | D5 | | | |
| 3. Importante | D4, D6 | | | | |
| 2. Sérieuse | E1 | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

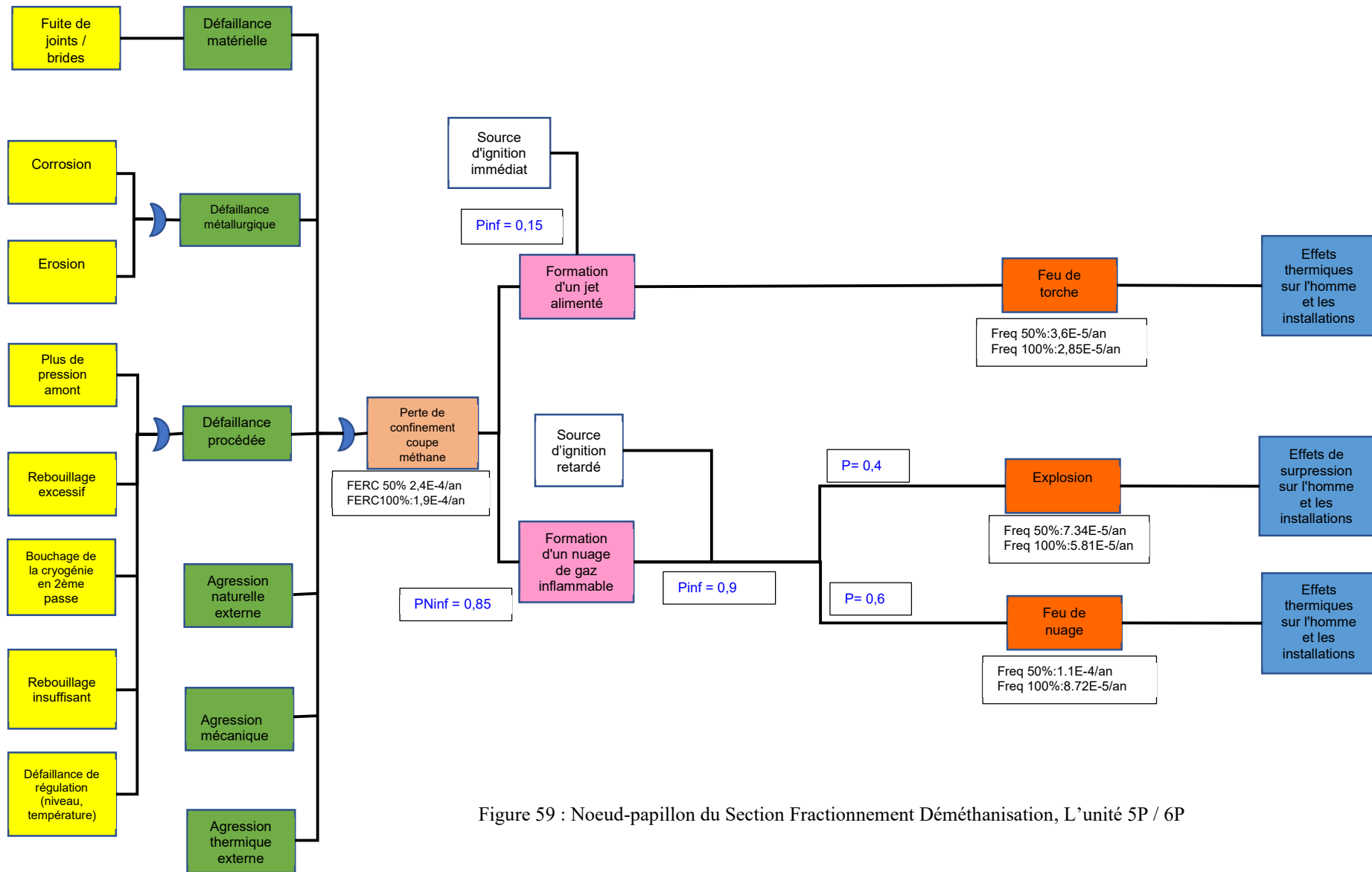
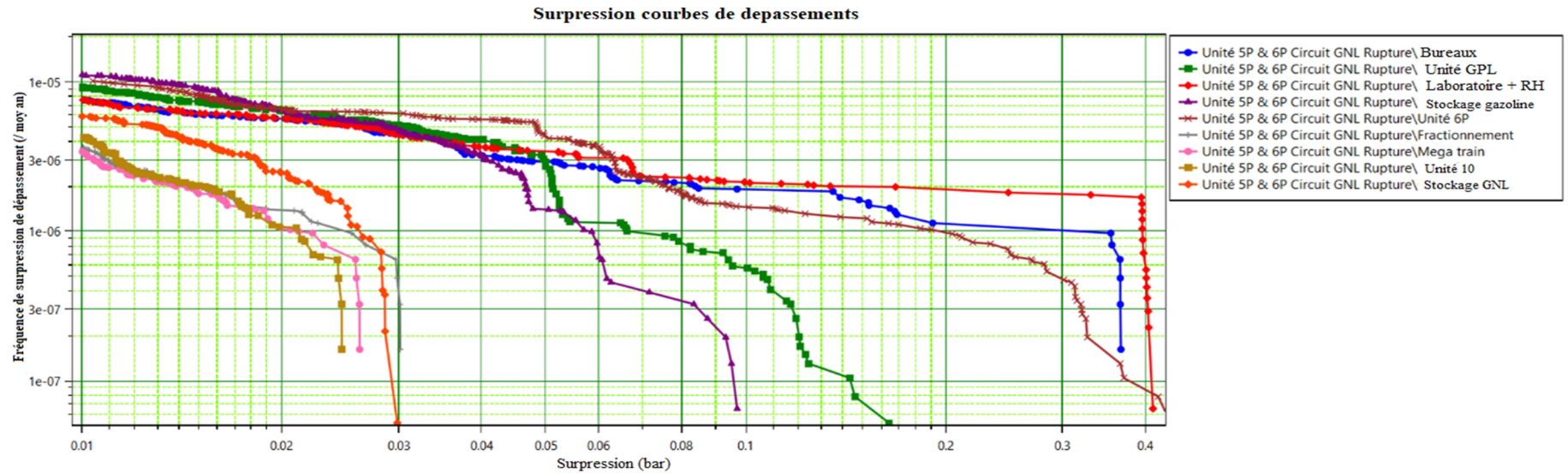
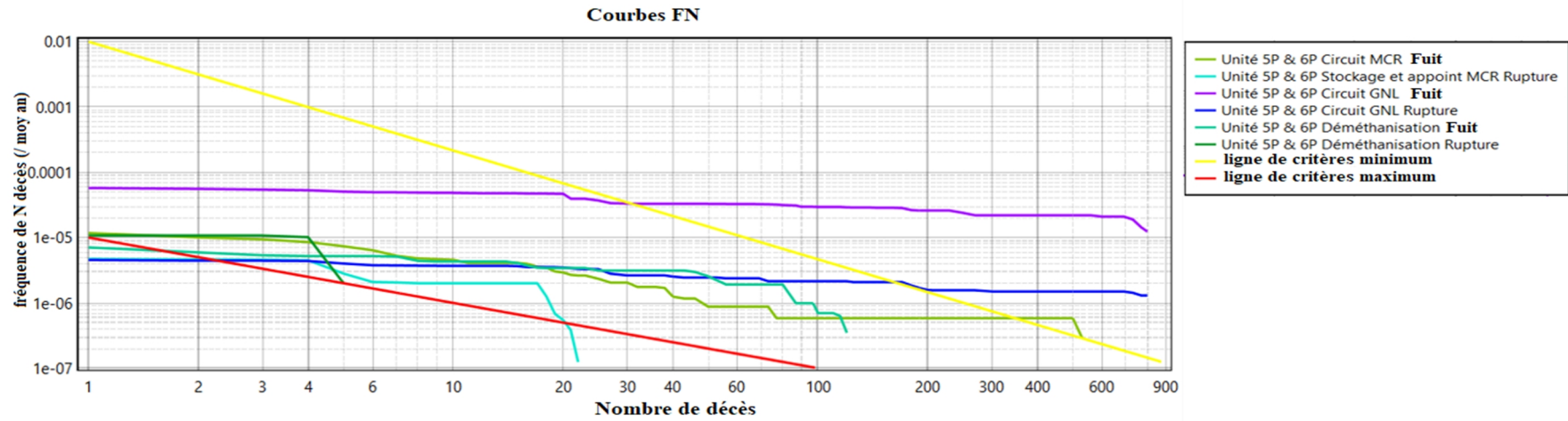


Figure 59 : Noeud-papillon du Section Fractionnement Déméthanisation, L'unité 5P / 6P

Tableau 39 : Les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/ Unité 5P | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------|-----|-----|----------------------------|--------------------------------|------|-----|-----|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----|-----|---------------------------|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Circuit MCR | 4,15E ⁻⁴ /an | 191 | 234 | 253 | 404 | 1.23E ⁻⁴ /an | 10 | 31 | 40 | 56 | 1.03E ⁻⁴ /an | 30 | 1.55E ⁻⁴ /an | | | | |
| | | | | | | | 20 | 56 | 68 | 96 | | | | | | | |
| Stockage et appoint MCR | 5,5E ⁻⁵ /an | | | | | | 10 | 37 | 46 | 68 | 1,38E ⁻⁵ /an | 180 | 2.08E ⁻⁵ /an | | | | |
| | | | | | | | 150 | 205 | 216 | 244 | | | | | | | |
| Circuit LNG / LNG | 5,5E ⁻⁴ /an | 338 | 478 | 507 | 763 | 8,25E ⁻⁵ /an | 10 | 41 | 52 | 77 | 1,68E ⁻⁴ /an | 482 | 2.5E ⁻⁴ /an | 194 | 214 | 364 | 4,2E ⁻⁴ /an |
| | | | | | | | 377 | 537 | 557 | 603 | | | | | | | |
| Demethanization- fractionation | 1,9E ⁻⁴ /an | 86 | 130 | 138 | 215 | 2,85E ⁻⁵ /an | 10 | 33 | 40 | 58 | 5.81E ⁻⁵ /an | 118 | 8.72E ⁻⁵ /an | | | | |
| | | | | | | | 97 | 129 | 136 | 151 | | | | | | | |



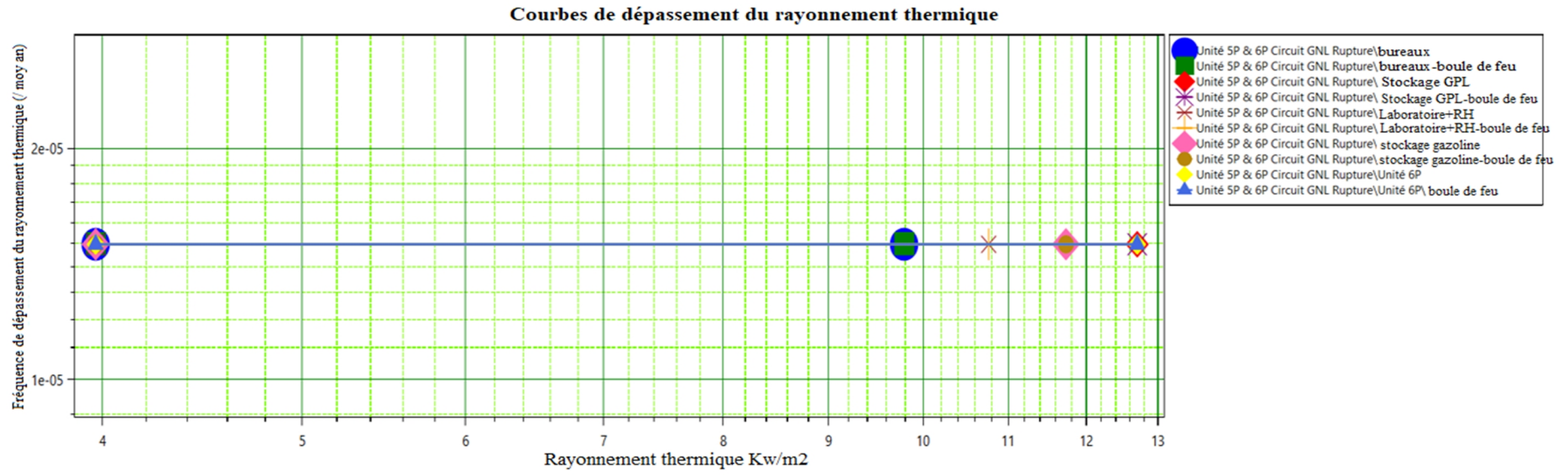


Figure 62 : courbes de dépassements thermique de l'unité 5P

4.2 Analyse détaillée des risques de l'unité 10

4.2.1. Section Circuit GNT / GNL

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|-------------------------|
| Fuite | 5,29E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 3,3E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

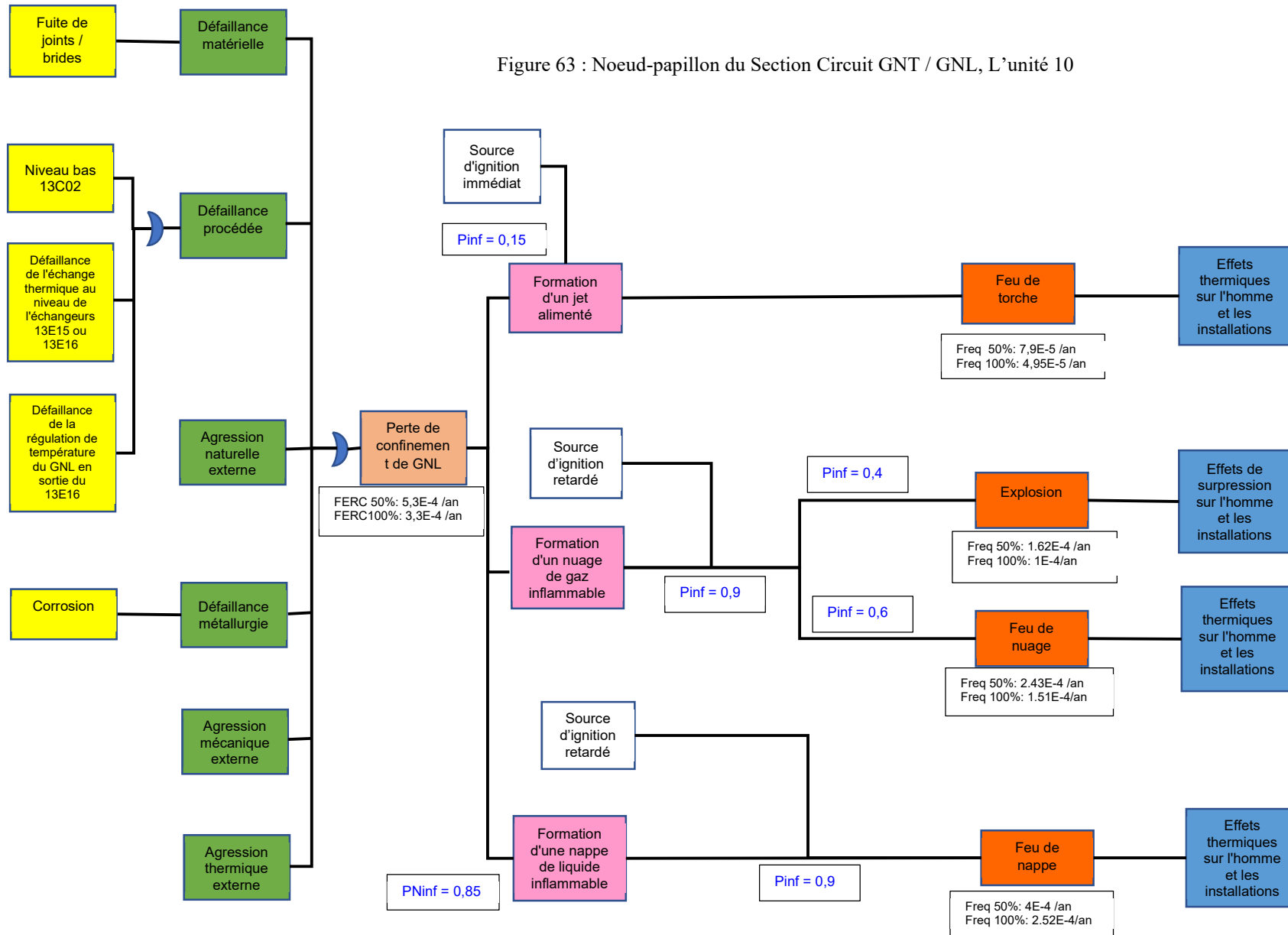
Tableau 40 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 7,9E ⁻⁵ /an | E1 | E | SELS | 3 | Important |
| | Rupture | 4,95E ⁻⁵ /an | E2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 1.62E ⁻⁴ /an | E3 | D | SELS | 223 | Désastreux |
| | Rupture | 1E ⁻⁴ /an | E4 | C | SELS | 223 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | 2.43E ⁻⁴ /an | E5 | D | SELS | 223 | Désastreux |
| | Rupture | 1.51E ⁻⁴ /an | E6 | D | SELS | 223 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | 4E ⁻⁴ /an | E7 | D | SELS | 223 | Désastreux |
| | Rupture | 2.52E ⁻⁴ /an | E8 | D | SELS | 223 | Désastreux |

Tableau 41 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | E3, E5, E6, E7, E8 | E4 | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | E1 | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 63 : Noeud-papillon du Section Circuit GNT / GNL, L'unité 10



4.2.2. Section Circuit MCR

Les fréquences d'ERC sont :

Fuite $3,38E^{-4}/\text{an}$
 Rupture $3,19E^{-4}/\text{an}$

La probabilité d'inflammation est de **0,3** (gaz, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 42 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $1,0E^{-4}/\text{an}$ | F1 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | $9,6E^{-5}/\text{an}$ | F2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $8.56E^{-5}/\text{an}$ | F3 | E | SELS | 25 | Catastrophique |
| | Rupture | $8.06E^{-5}/\text{an}$ | F4 | E | SELS | 25 | Catastrophique |
| Feu de nuage | Fuite | $1,28E^{-4}/\text{an}$ | F5 | D | SELS | 25 | Catastrophique |
| | Rupture | $1.2E^{-4}/\text{an}$ | F6 | D | SELS | 25 | Catastrophique |

Tableau 43 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | F3, F4 | F5, F6 | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | F1 | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

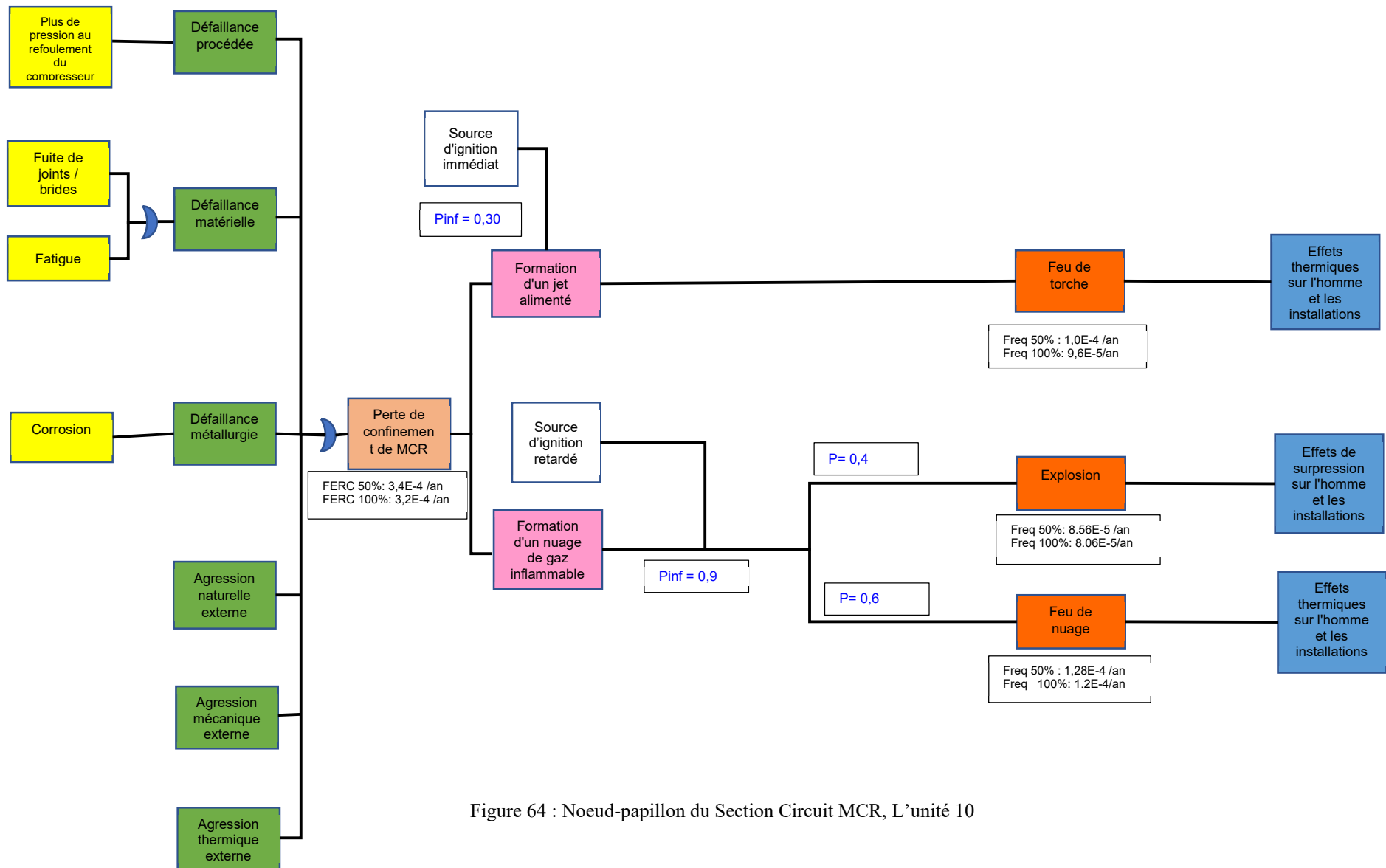


Figure 64 : Noeud-papillon du Section Circuit MCR, L'unité 10

4.2.3. Section Compression MCR

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|-------------------------|
| Fuite | 4,04E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 3,92E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de 0,3 (gaz, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

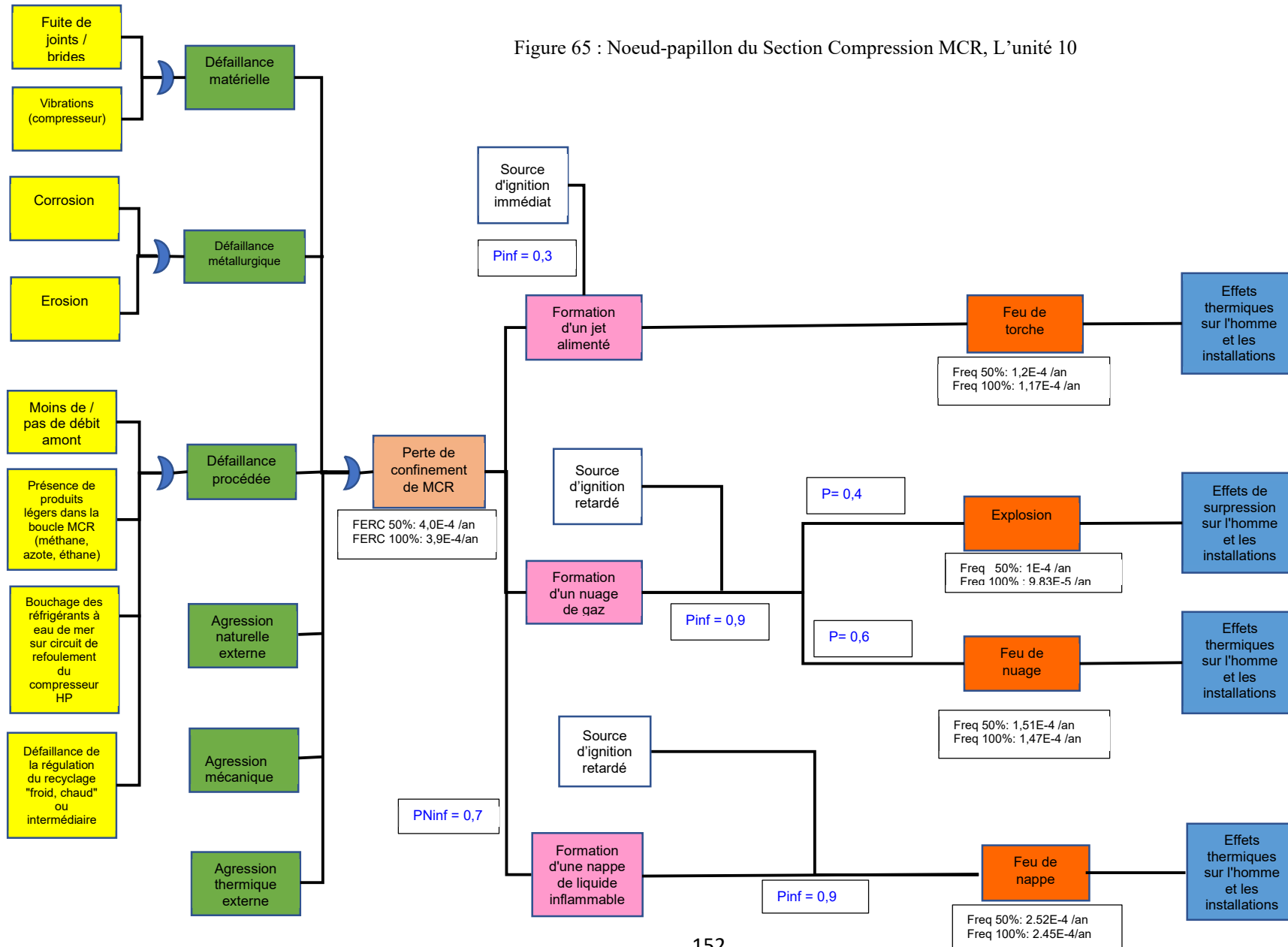
Tableau 44 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 1,2E ⁻⁴ /an | G1 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 1,17E ⁻⁴ /an | G2 | D | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 1E ⁻⁴ /an | G3 | D | SELS | 3 | Important |
| | Rupture | 9.83E ⁻⁵ /an | G4 | E | SELS | 15 | Catastrophique |
| Feu de nuage | Fuite | 1,51E ⁻⁴ /an | G5 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 1,47E ⁻⁴ /an | G6 | D | SELS | 12 | Catastrophique |
| Feu de nappe | Fuite | 2.52E ⁻⁴ /an | G7 | D | SELS | 6 | Important |
| | Rupture | 2.45E ⁻⁴ /an | G8 | D | SELS | 6 | Important |

Tableau 45 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | G4 | G6 | | | |
| 3. Importante | | G3, G7, G8 | | | |
| 2. Sérieuse | | G1, G5 | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 65 : Noeud-papillon du Section Compression MCR, L'unité 10



4.2.4. Section Fractionnement Dééthanisation

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|-------------------------|
| Fuite | 8,49E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 4,59E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de 0,034 (gaz, débit inférieur à 10 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 46 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 2,9E ⁻⁵ /an | H1 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 1,65E ⁻⁵ /an | H2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 2,95E ⁻⁴ /an | H3 | D | SELS | 30 | Catastrophique |
| | Rupture | 1,6E ⁻⁴ /an | H4 | D | SELS | 4 | Important |
| Feu de nuage | Fuite | 4.43E ⁻⁴ /an | H5 | D | SELS | 30 | Catastrophique |
| | Rupture | 2.39E ⁻⁴ /an | H6 | D | SELS | 4 | Important |

Tableau 47 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | | H3, H5 | | | |
| 3. Importante | | H4, H6 | | | |
| 2. Sérieuse | H1 | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

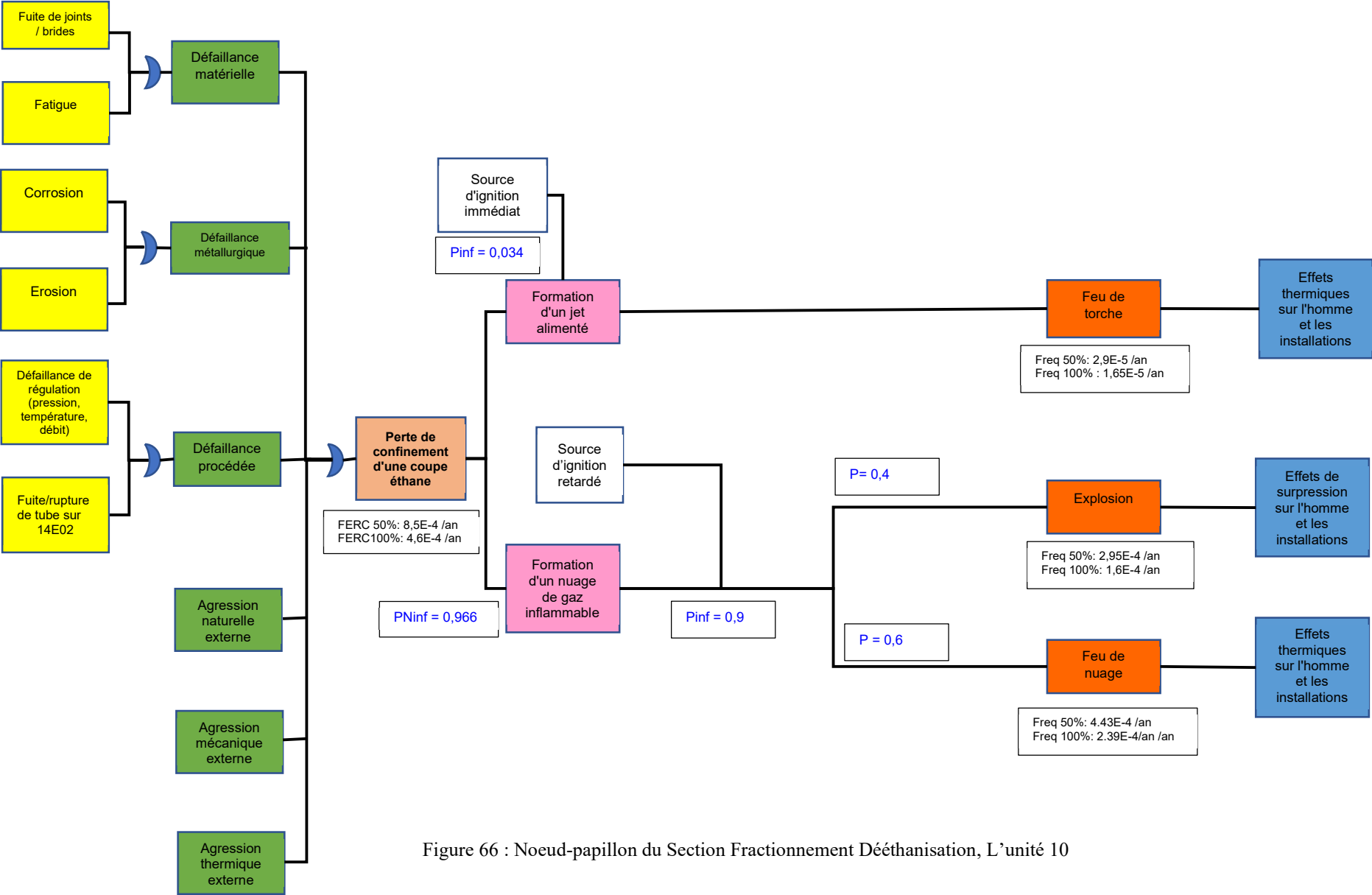


Figure 66 : Noeud-papillon du Section Fractionnement Dééthanisation, L'unité 10

Tableau 48 : les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/ Unité 10 | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------|-----|-----|----------------------------|--------------------------------|------|-----|------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----|-----|-------------------------|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Circuit GNT / GNL | 3,3E ⁻⁴ /an | 355 | 503 | 534 | 798 | 4,95E ⁻⁵ /an | 10 | 71 | 92 | 433 | 1E ⁻⁴ /an | 595 | 1.51E ⁻⁴ /an | 160 | 169 | 232 | 2.52E ⁻⁴ /an |
| | | | | | | | 590 | 653 | 674 | 1024 | | | | | | | |
| Circuit MCR | 3,19E ⁻⁴ /an | 338 | 438 | 477 | 788 | 9,6E ⁻⁵ /an | 10 | 47 | 60 | 267 | 8.06E ⁻⁵ /an | 30 | 1.2E ⁻⁴ /an | | | | |
| | | | | | | | 20 | 81 | 102 | 444 | | | | | | | |
| Compression MCR | 3,92E ⁻⁴ /an | 89 | 128 | 137 | 212 | 1,17E ⁻⁴ /an | 10 | 45 | 56 | 251 | 9.83E ⁻⁵ /an | 257 | 1,47E ⁻⁴ /an | 117 | 135 | 264 | 2.45E ⁻⁴ /an |
| | | | | | | | 250 | 350 | 383 | 938 | | | | | | | |
| Fractionnement Dééthanisation | 4,59E ⁻⁴ /an | 59 | 57 | 61 | 98 | 1,65E ⁻⁵ /an | 10 | 49 | 62 | 277 | 1,6E ⁻⁴ /an | 17 | 2.39E ⁻⁴ /an | | | | |

Courbes FN

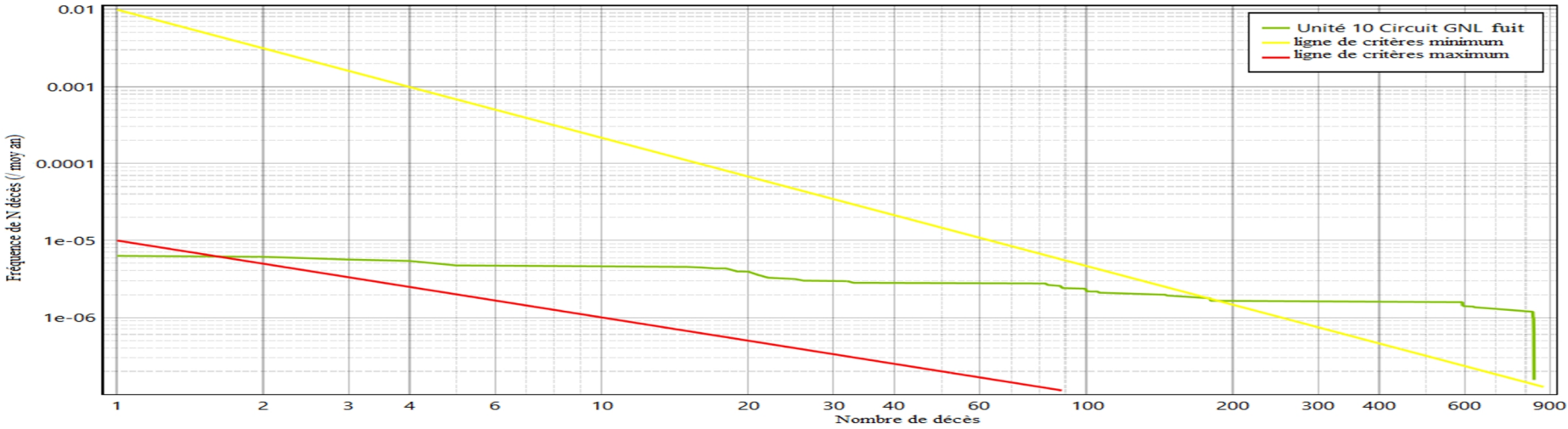


Figure 67 : courbes FN de l'unité 10

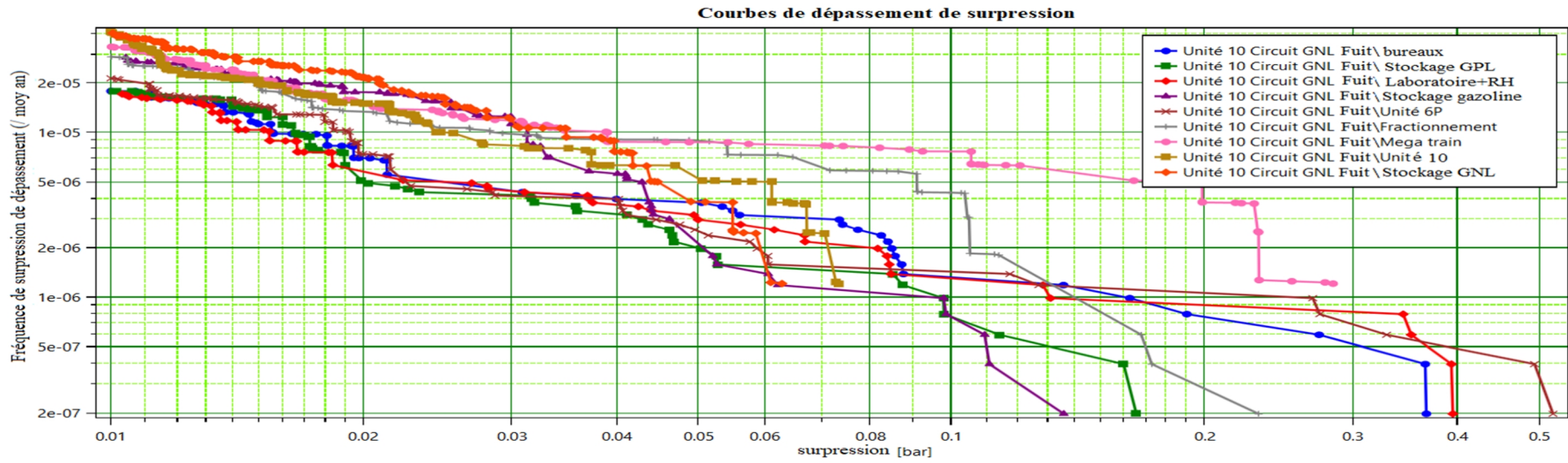


Figure 68 : courbes de dépassements de surpression de l'unité 10

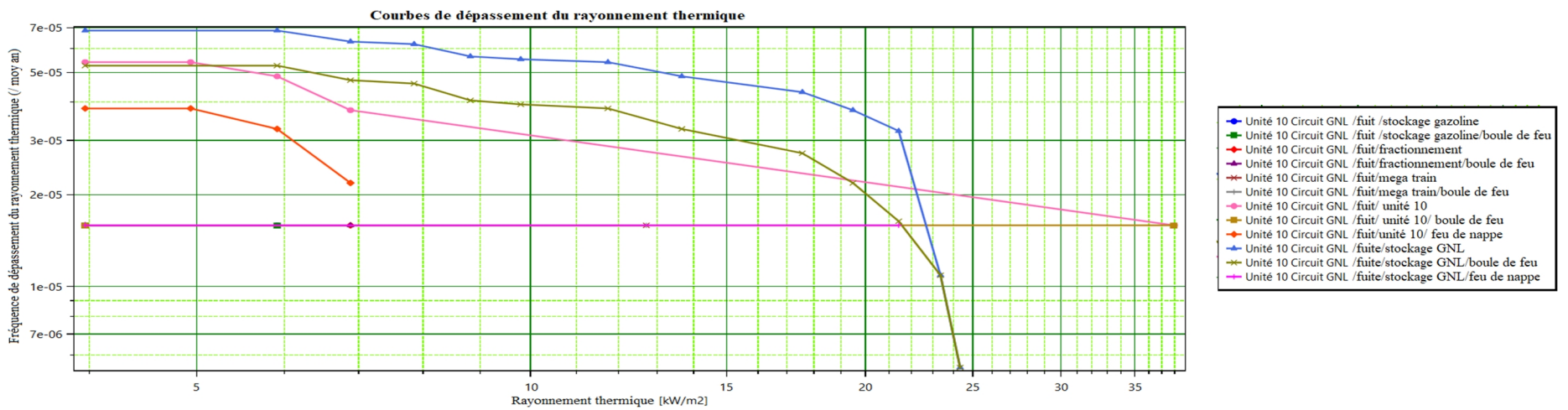


Figure 69 : courbes de dépassements thermiques de l'unité 10

4.3 Analyse détaillée des risques du Stockage du GNL, l'unité GPL et les unités annexes

4.3.1. Bacs du Stockage du GNL

Les fréquences d'ERC sont :

Fuite $3,36E^{-3}/\text{an}$
 Rupture $5,59E^{-4} /\text{an}$

La probabilité d'inflammation est de **0,3** (gaz, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 49 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $1.01E^{-3}/\text{an}$ | I1 | C | SELS | >100 | Désastreux |
| | Rupture | $1,67E^{-4}/\text{an}$ | I2 | D | SELS | >100 | Désastreux |
| Explosion | Fuite | $8.46E^{-4}/\text{an}$ | I3 | D | SELS | >100 | Désastreux |
| | Rupture | $1,4E^{-4}/\text{an}$ | I4 | D | SELS | >100 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | $1.27E^{-3}/\text{an}$ | I5 | C | SELS | >100 | Désastreux |
| | Rupture | $2.11E^{-4}/\text{an}$ | I6 | D | SELS | >100 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | | I7 | | SELS | >100 | Désastreux |
| | Rupture | | I8 | | SELS | >100 | Désastreux |

Tableau 50 : Placement dans la matrice de criticité.

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|----------------|--------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | 12, 13, 14, 16 | 11, 15 | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

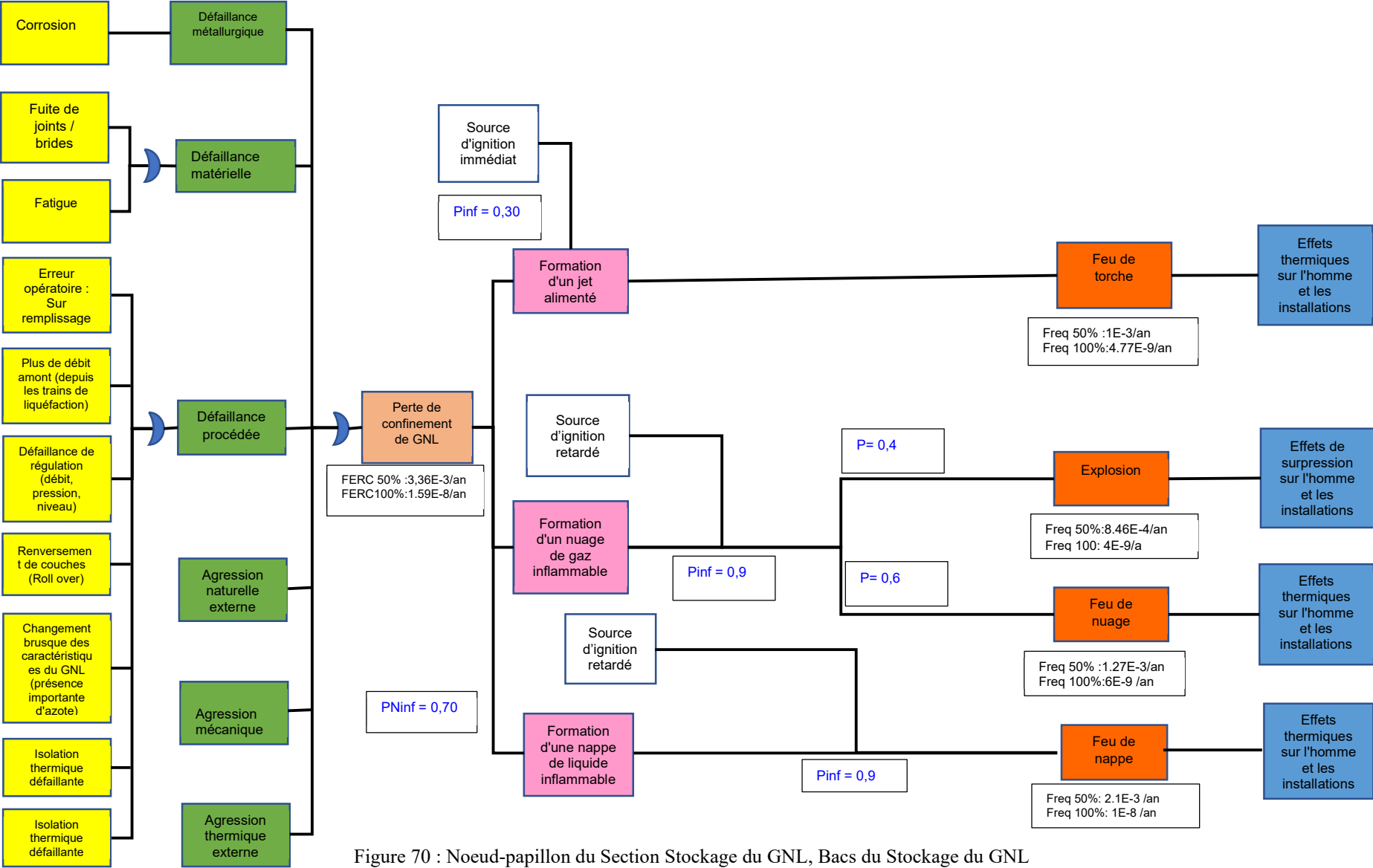


Figure 70 : Noeud-papillon du Section Stockage du GNL, Bacs du Stockage du GNL

Tableau 51 : les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/ Unité Stockage du GNL | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|--|--------------------------|------------------------------------|------|-----|-----|-----------------------------|--------------------------------|------|------|------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----|-----|---|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Bac de stockage GNL | 1.59E ⁻⁸ / an | 156 | 208 | 219 | 320 | 4.77E ⁻⁹ /an | 40 | 181 | 228 | 1012 | 4E ⁻⁹ /an | 7941 | 6E ⁻⁹ /an | 153 | 176 | 350 | |
| | | | | | | | 3500 | 3865 | 3986 | 6000 | | | | | | | |
| Bac de stockage propane | 1.59E ⁻⁸ / an | 168 | 251 | 268 | 413 | 4.77E ⁻⁹ /an | 30 | 126 | 158 | 690 | 4E ⁻⁹ /an | 923 | 6E ⁻⁹ /an | 100 | 118 | 235 | |
| | | | | | | | 920 | 1236 | 1341 | 3090 | | | | | | | |
| Bac de stockage butane | 1.59E ⁻⁸ / an | 158 | 240 | 257 | 400 | 4.77E ⁻⁹ /an | 30 | 117 | 146 | 629 | 4E ⁻⁹ /an | 740 | 6E ⁻⁹ /an | 104 | 121 | 240 | |
| | | | | | | | 740 | 1025 | 1120 | 2696 | | | | | | | |
| Bac de stockage 80 GNL | 1.59E ⁻⁶ / an | 156 | 208 | 219 | 320 | 4.77E ⁻⁷ /an | 30 | 135 | 170 | 752 | 4E ⁻⁷ /an | 8162 | 6E ⁻⁷ /an | 228 | 263 | 524 | |
| | | | | | | | 3500 | 3904 | 4049 | 6283 | | | | | | | |
| Bac de stockage Gazoline | 6.45E ⁻⁶ / an | 62 | 96 | 103 | 163 | 1.93E ⁻⁶ / an | 30 | 84 | 102 | 405 | 1.62E ⁻⁶ / an | 1083 | 2.43E ⁻⁶ / an | na | na | 416 | |
| | | | | | | | 1080 | 1388 | 1491 | 3194 | | | | | | | |
| Sphère gazoline | 6.45E ⁻⁴ / an | 40 | 61 | 65 | 104 | 1.93E ⁻⁴ / an | 10 | 39 | 49 | 211 | 1.62E ⁻⁴ / an | 267 | 2.43E ⁻⁴ / an | na | na | 85 | |
| | | | | | | | 260 | 402 | 450 | 1238 | | | | | | | |

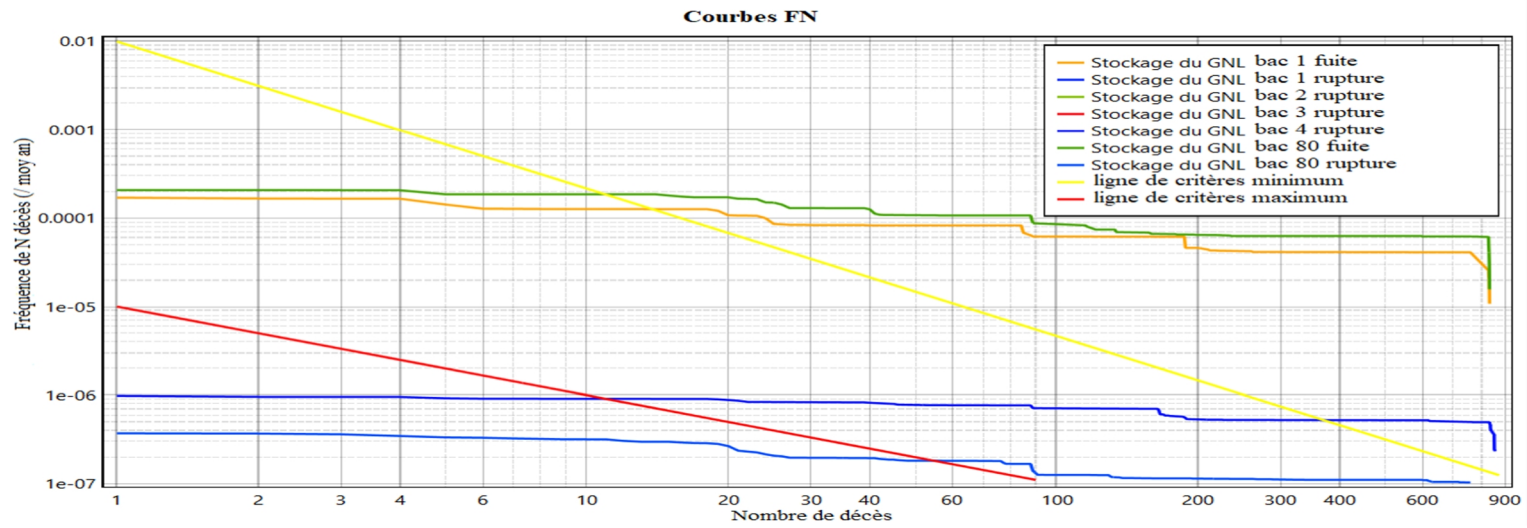


Figure 71 : courbes FN des Bacs du Stockage du GNL

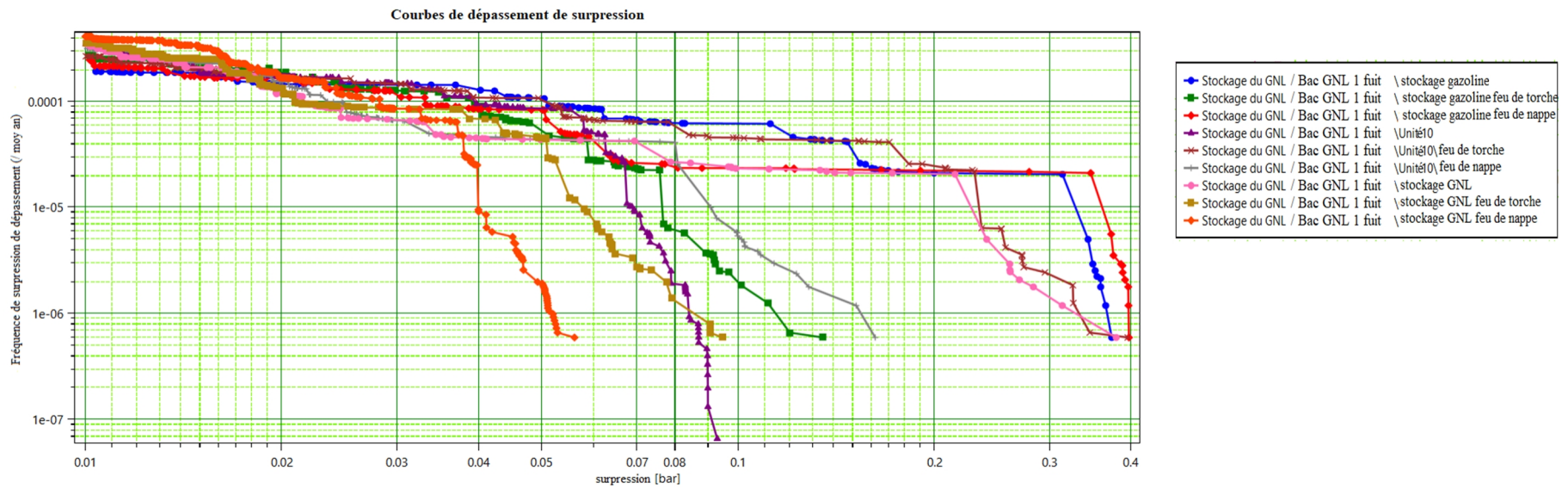


Figure 72 : courbes de dépassements de surpression des Bacs du Stockage du GNL

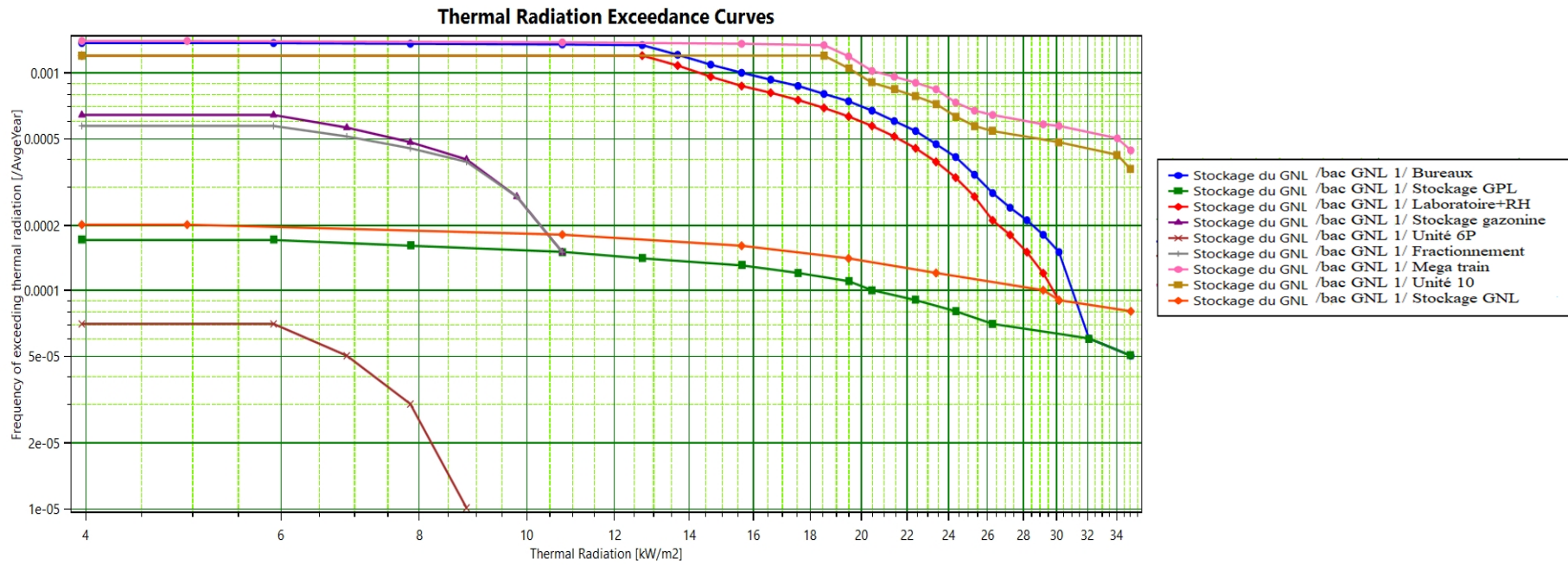


Figure 73 : courbes de dépassements thermiques des Bacs du Stockage du GNL

4.3.2. L'unité GPL

4.3.2.1 Section Séparation propane/butane

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|-------------------------|
| Fuite | 7,2E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 6,15E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 52 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| BLEVE | Fuite | 4.32E ⁻⁵ /an | J1 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 3.72E ⁻⁵ /an | J2 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| Feu de torche | Fuite | 6.48E ⁻⁵ /an | J3 | E | SELS | 0 | Modéré |
| | Rupture | 5.85E ⁻⁵ /an | J4 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 2.2E ⁻⁴ /an | J5 | D | SELS | 5 | Important |
| | Rupture | 1.89E ⁻⁴ /an | J6 | D | SELS | 10 | Important |
| Feu de nuage | Fuite | 3.3E ⁻⁴ /an | J7 | D | SELS | 3 | Important |
| | Rupture | 2.84E ⁻⁴ /an | J8 | D | SELS | 3 | Important |

Tableau 53 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|--------------------------|-----------|----------------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | J5, J6, J7, J8 | | | |
| 2. Sérieuse | J1, J2 | | | | |
| 1. Modérée | J3 | | | | |

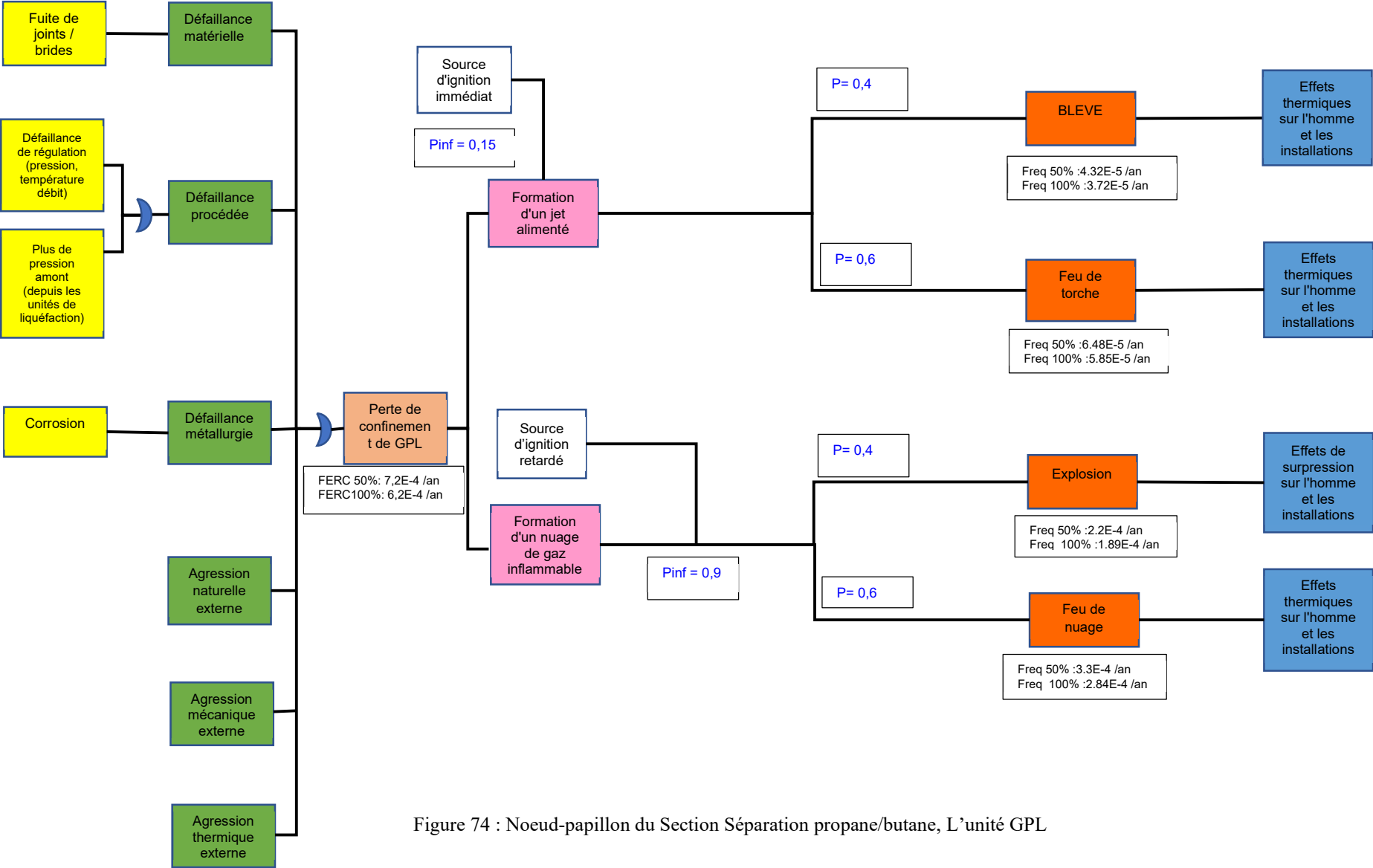


Figure 74 : Noeud-papillon du Section Séparation propane/butane, L'unité GPL

4.3.2.2 Section Stockage et réfrigération du cycle propane

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|----------------|-------------------------|
| Fuite | 6,95E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 4,93E ⁻⁴ /an |

La **probabilité d'inflammation** est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

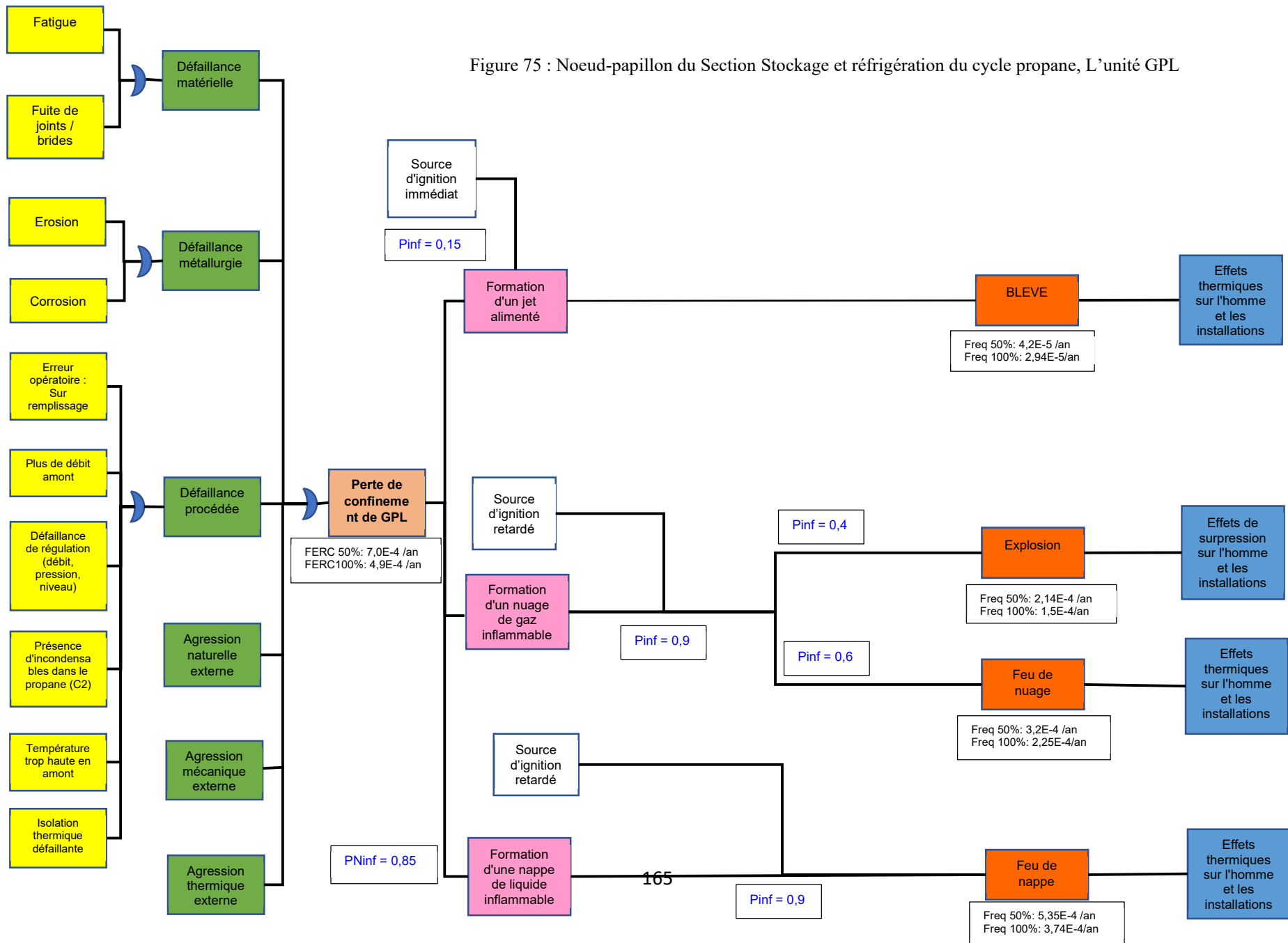
Tableau 54 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| BLEVE | Fuite | 4,2E ⁻⁵ /an | K1 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 2,94E ⁻⁵ /an | K2 | E | SELS | 4 | Important |
| Explosion | Fuite | 2,14E ⁻⁴ /an | K3 | D | SELS | 2 | Important |
| | Rupture | 1,5E ⁻⁴ /an | K4 | D | SELS | 559 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | 3,2E ⁻⁴ /an | K5 | D | SELS | 2 | Important |
| | Rupture | 2,25E ⁻⁴ /an | K6 | D | SELS | 559 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | 5,35E ⁻⁴ /an | K7 | D | SELS | 14 | Catastrophique |
| | Rupture | 3,74E ⁻⁴ /an | K8 | D | SELS | 559 | Désastreux |

Tableau 55 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|--------------------------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | K4, K6, K8 | | | |
| 4. Catastrophique | | K7 | | | |
| 3. Importante | K2 | K3, K5 | | | |
| 2. Sérieuse | K1 | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 75 : Noeud-papillon du Section Stockage et réfrigération du cycle propane, L'unité GPL



4.3.2.3 Section Stockage et réfrigération du cycle butane

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|-------------------------|
| Fuite | 7,07E ⁻⁴ /an |
| Rupture | 4,64E ⁻⁴ /an |

La probabilité d'inflammation est de **0,15** (gaz, débit compris entre 10 et 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 56 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 6,39E ⁻⁵ /an | L1 | E | SELS | 20 | Catastrophique |
| | Rupture | 4,14E ⁻⁵ /an | L2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 2,17E ⁻⁴ /an | L3 | D | SELS | 66 | Catastrophique |
| | Rupture | 1,4E ⁻⁴ /an | L4 | D | SELS | 850 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | 3,26E ⁻⁴ /an | L5 | D | SELS | 66 | Catastrophique |
| | Rupture | 2,11E ⁻⁴ /an | L6 | D | SELS | 850 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | 5,43E ⁻⁴ /an | L7 | D | SELS | 66 | Catastrophique |
| | Rupture | 3,52E ⁻⁴ /an | L8 | D | SELS | 214 | Désastreux |

Tableau 57 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|------------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | L4, L6, L8 | | | |
| 4. Catastrophique | L1 | L3, L5, L7 | | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 76 : Noeud-papillon du Section Stockage et réfrigération du cycle butane, L`unité GPL

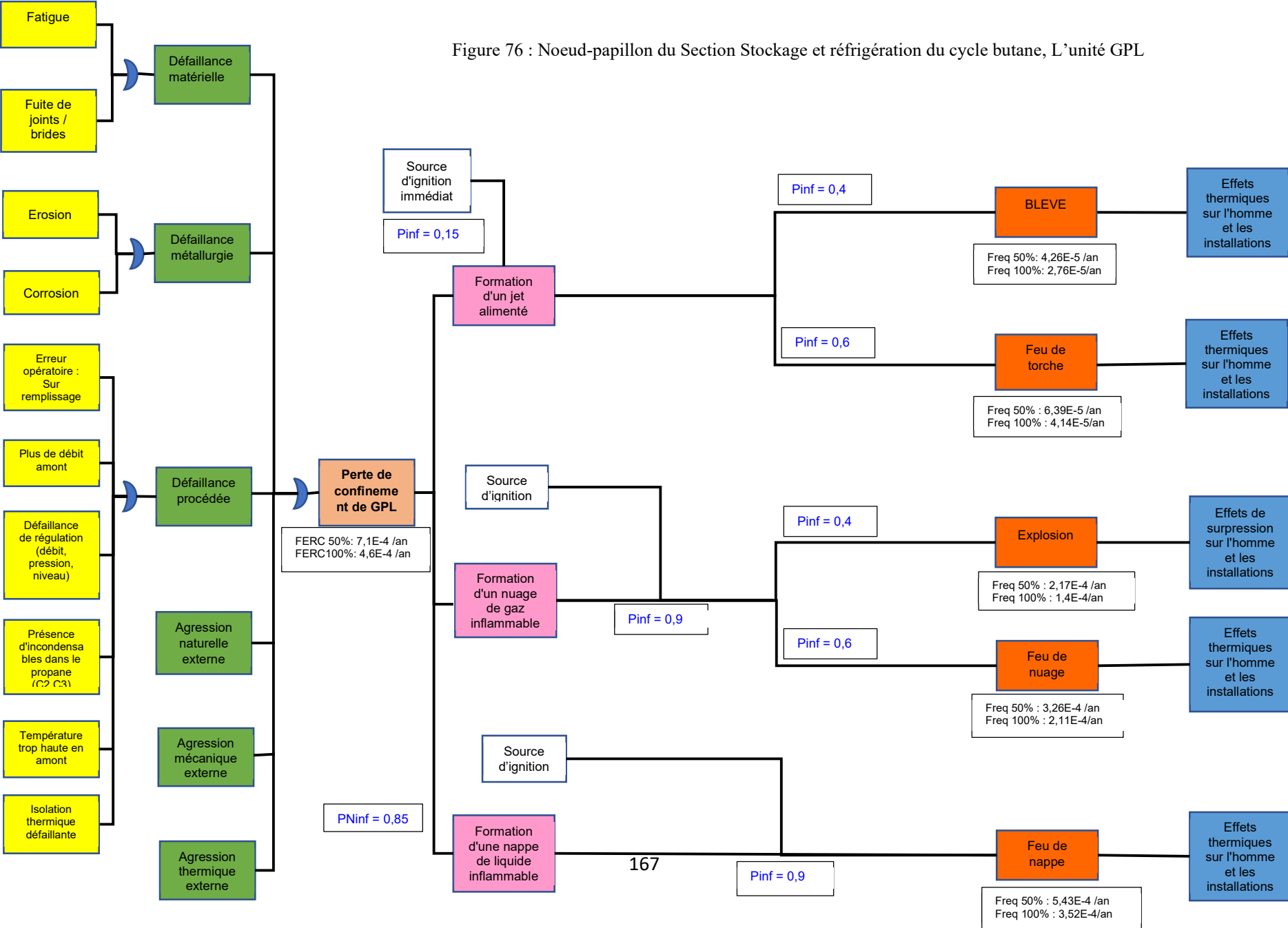


Tableau 58 : les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/Unité GPL | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|------|-----|-----|-------------------------|--------------------------------|------|------|-------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-------------------------|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Séparation propane/butane | 6,15 ^{E-4} /an | 93 | 146 | 156 | 247 | 5,85 ^{E-5} /an | 10 | 47 | 59 | 266 | 1,89 ^{E-4} /an | 281 | 2,84 ^{E-4} /an | | | | |
| | | | | | | | 160 | 234 | 259 | 671 | | | | | | | |
| Stockage et réfrigération du cycle propane | 4,93 ^{E-4} /an | | | | | | 20 | 86 | 108 | 473 | 1,5 ^{E-4} /an | 1102 | 2,25 ^{E-4} /an | 213 | 238 | 400 | 3,74 ^{E-4} /an |
| | | | | | | | 1100 | 1485 | 1614 | 3746 | | | | | | | |
| Stockage et réfrigération du cycle butane | 4,64 ^{E-4} /an | 149 | 220 | 234 | 360 | 4,14 ^{E-5} /an | 10 | 610 | 811 | 4133 | 1,4 ^{E-4} /an | 4921 | 2,11 ^{E-4} /an | 143 | 167 | 333 | 3,52 ^{E-4} /an |
| | | | | | | | 4920 | 6038 | 6411 | 12596 | | | | | | | |

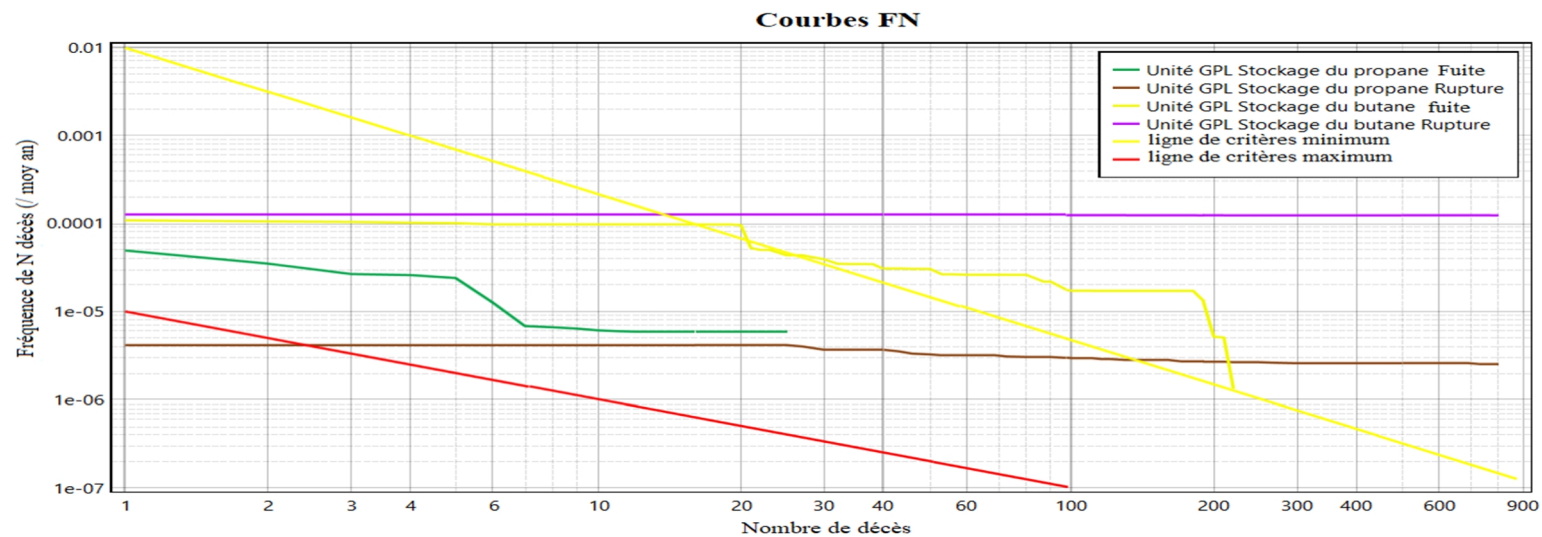


Figure 77 : courbes FN de l'unité GPL

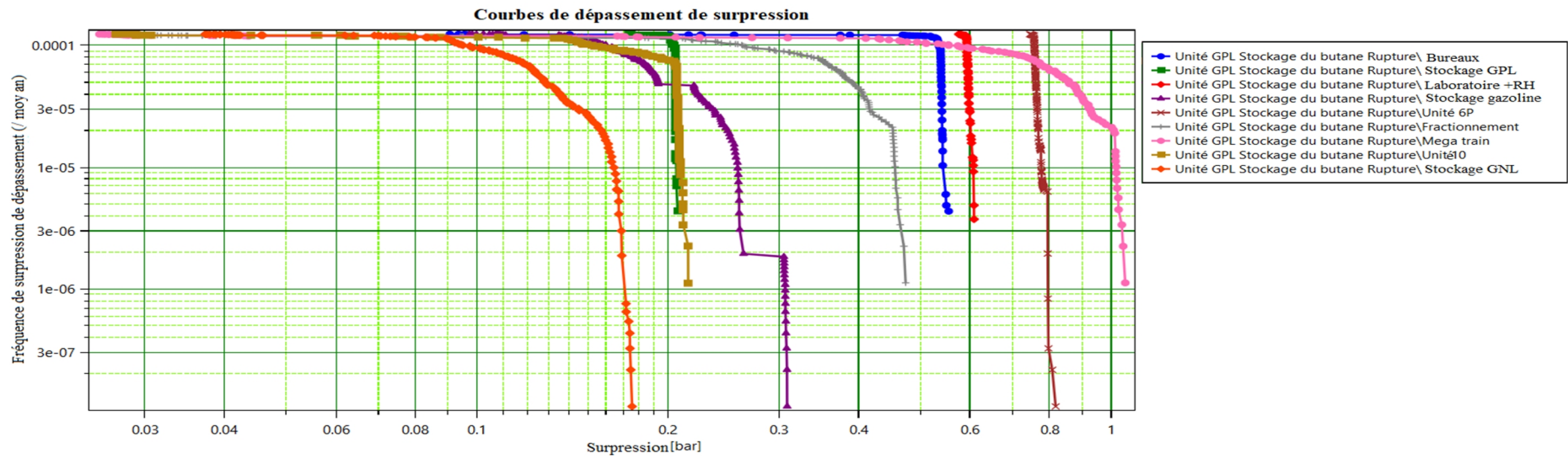


Figure 78 : courbes de dépassements de surpression de l'unité GPL.

4.3.3. Les unités annexes & utilités

4.3.3.1 Section Stockage de gazoline

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|----------------|-------------------------|
| Fuite | 2,96 ^{E-3} /an |
| Rupture | 6,45 ^{E-4} /an |

La **probabilité d'inflammation** est de **0,08** (liquide, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 59 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|--------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | 2,36E ⁻⁴ / an | M1 | D | SELS | - | - |
| | Rupture | 5,16E ⁻⁵ /an | M2 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 9,8E ⁻⁴ /an | M3 | D | SELS | 10 | Important |
| | Rupture | 2,13E ⁻⁴ /an | M4 | D | SELS | 441 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | 1,47E ⁻³ /an | M5 | C | SELS | 10 | Important |
| | Rupture | 3,2E ⁻⁴ /an | M6 | D | SELS | 441 | Désastreux |
| Feu de nappe | | | | | | 441 | Désastreux |

Tableau 60 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|--------------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | M4, M6 | | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | M3 | M5 | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

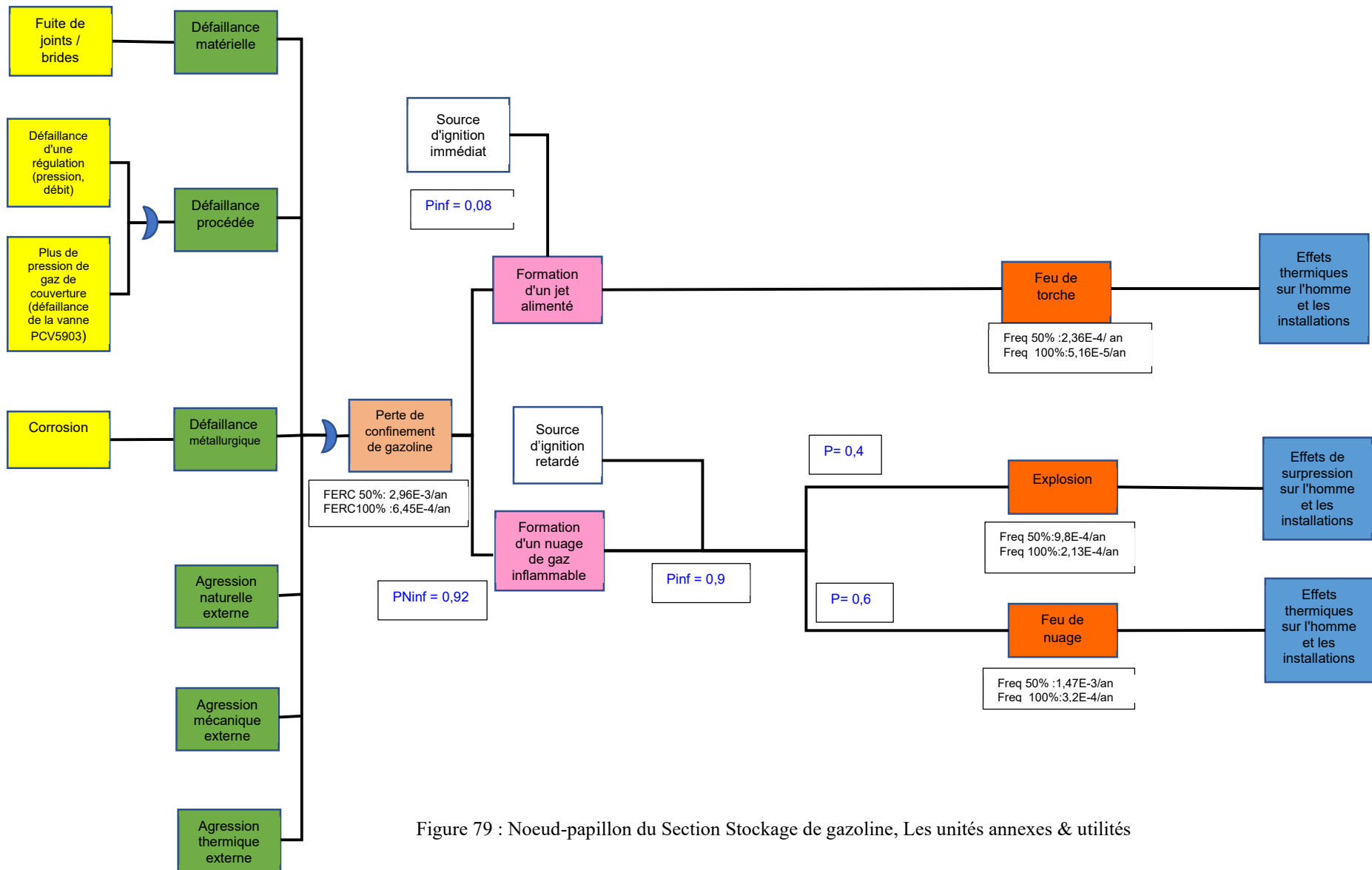


Figure 79 : Noeud-papillon du Section Stockage de gazoline, Les unités annexes & utilisés

Tableau 61 : les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/ unités annexes & utilités | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|---|-------------------------|------------------------------------|------|-----|-----|-------------------------|--------------------------------|------|-----|------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----|-----|---|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Bac de Stockage gazoline | 6,45E ⁻⁴ /an | 51 | 78 | 84 | 131 | 5,16E ⁻⁵ /an | 10 | 26 | 32 | 125 | 2,13E ⁻⁴ /an | 258 | 3,2E ⁻⁴ /an | | | | |
| | | | | | | | 250 | 377 | 420 | 1127 | | | | | | | |
| Sphère de stockage gazoline | 6,45E ⁻⁴ /an | 28 | 42 | 45 | 72 | 5,16E ⁻⁵ /an | 10 | 24 | 29 | 109 | 2,13E ⁻⁴ /an | 305 | 3,2E ⁻⁴ /an | | | | |
| | | | | | | | 300 | 411 | 448 | 1063 | | | | | | | |

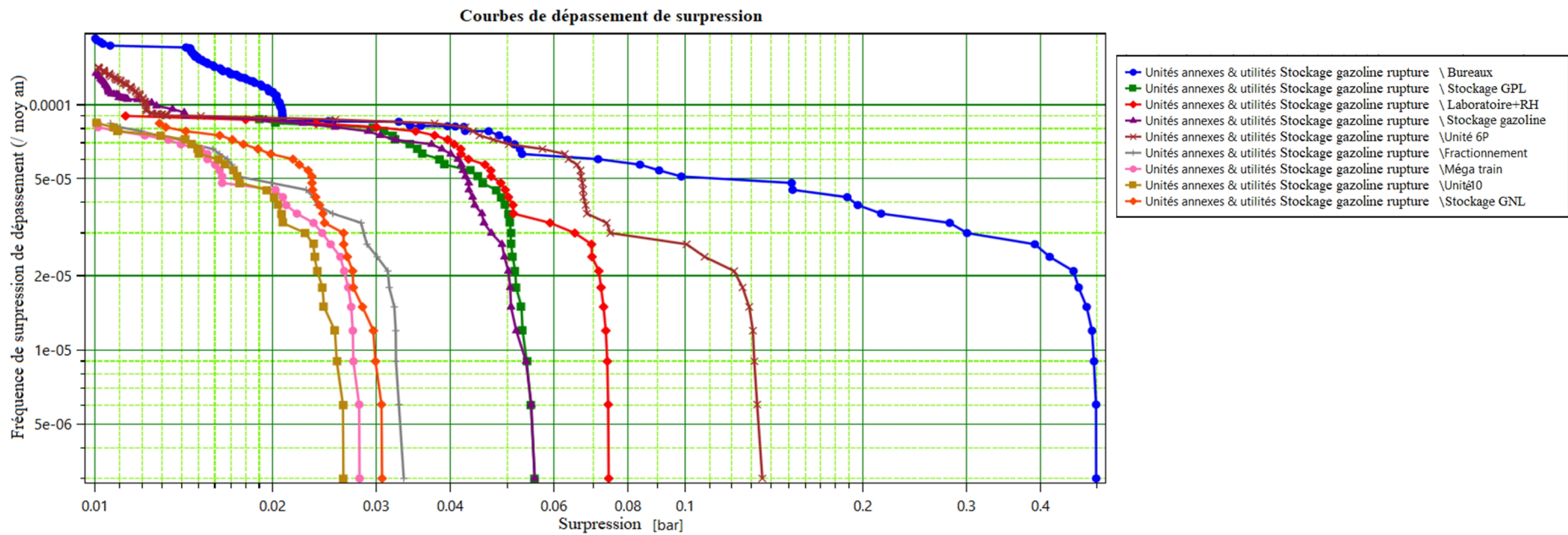


Figure 80 : courbes de dépassements de surpression de Les unités annexes & utilités.

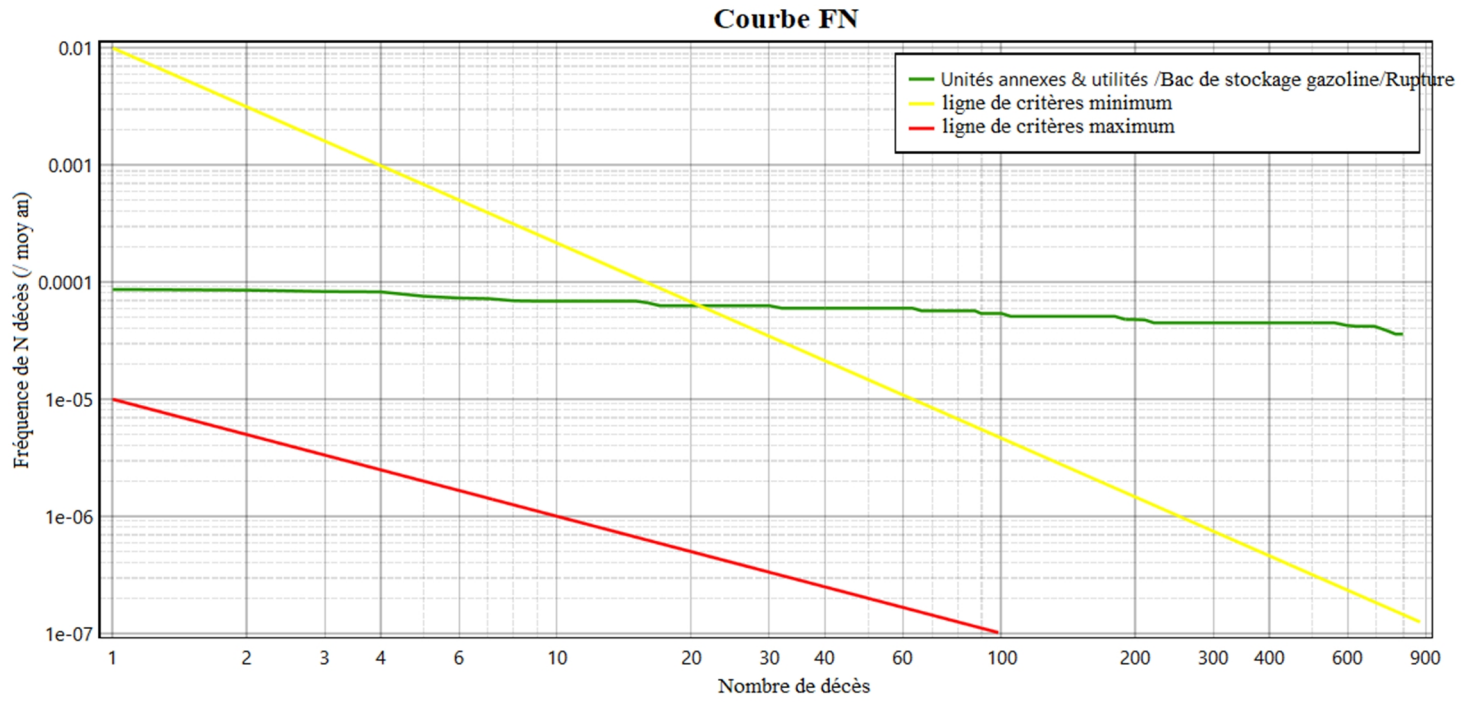


Figure 81 : courbes FN de Les unités annexes & utilités.

4.4 Analyse détaillée des risques de l'unité MEGA Train

4.4.1. Section Liquéfaction

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|----------------|------------------|
| Fuite | $5,86E^{-3}$ /an |
| Rupture | $6,68E^{-4}$ /an |

La **probabilité d'inflammation** est de **0,15**. (liquide, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

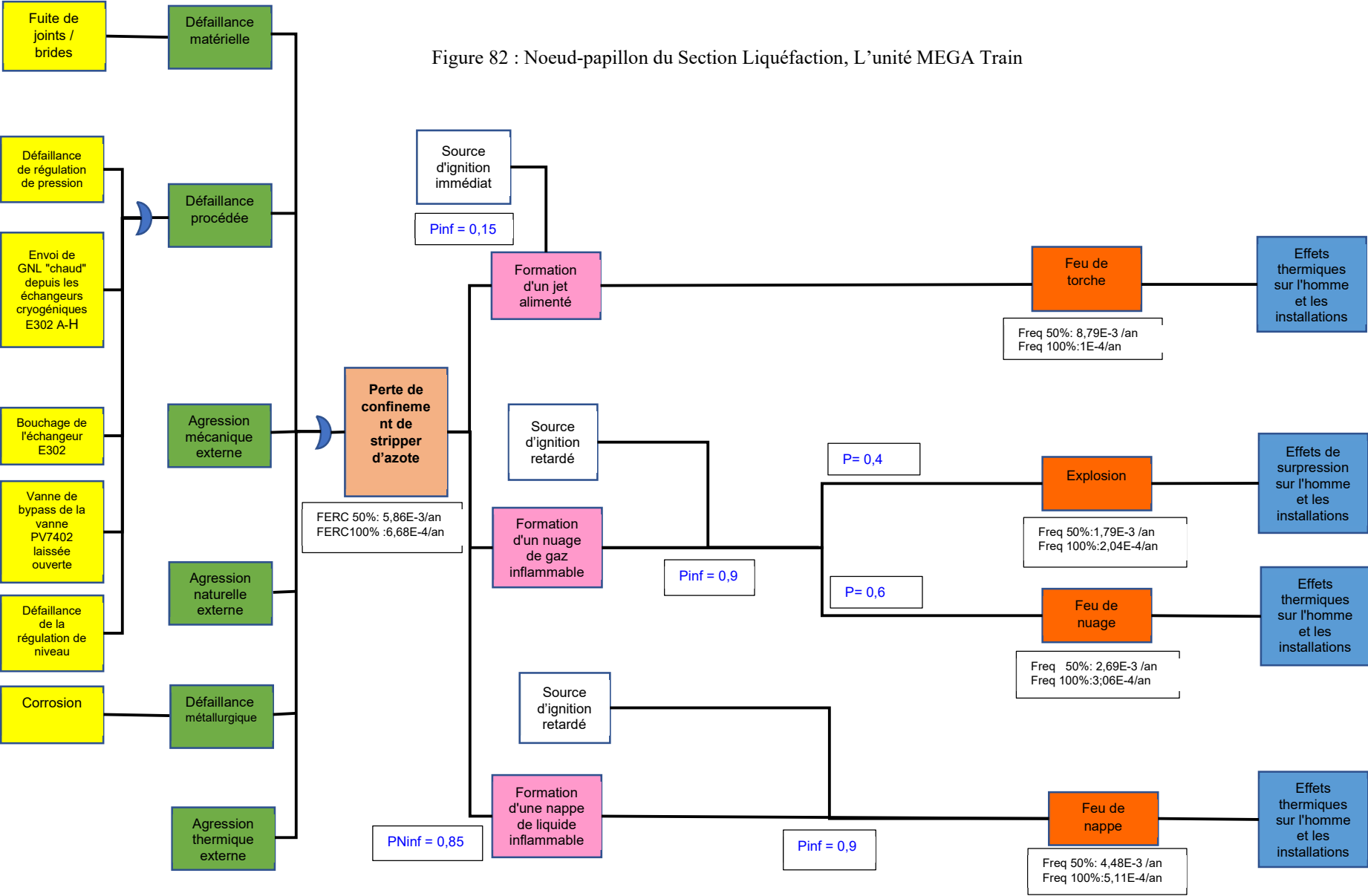
Tableau 62 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $8,79E^{-3}$ /an | N1 | C | SELS | 9 | Important |
| | Rupture | $1E^{-4}$ /an | N2 | D | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $1,79E^{-3}$ /an | N3 | C | SELS | 80 | Catastrophique |
| | Rupture | $2,04E^{-4}$ /an | N4 | D | SELS | 215 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | $2,69E^{-3}$ /an | N5 | C | SELS | 80 | Catastrophique |
| | Rupture | $3,06E^{-4}$ /an | N6 | D | SELS | 215 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | $4,48E^{-3}$ /an | N7 | C | SELS | 150 | Désastreux |
| | Rupture | $5,11E^{-4}$ /an | N8 | D | SELS | 190 | Désastreux |

Tableau 63 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|------------|--------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | N4, N6, N8 | N7 | | |
| 4. Catastrophique | | | N3, N5 | | |
| 3. Importante | | | N1 | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

Figure 82 : Noeud-papillon du Section Liquéfaction, L'unité MEGA Train



4.4.2. Section Fractionnement

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|------------------------|
| Fuite | $1,70E^{-2}/\text{an}$ |
| Rupture | $1,56E^{-3}/\text{an}$ |

La probabilité d'inflammation est de **0,15**. (liquide, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 64 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $2,55E^{-3}/\text{an}$ | P1 | C | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | $2,34E^{-4}/\text{an}$ | P2 | D | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $5,2E^{-3}/\text{an}$ | P3 | C | SELS | 2 | Important |
| | Rupture | $4,77E^{-4}/\text{an}$ | P4 | D | SELS | 8 | Important |
| Feu de nuage | Fuite | $7,8E^{-3}/\text{an}$ | P5 | C | SELS | 2 | Important |
| | Rupture | $7,16E^{-4}/\text{an}$ | P6 | D | SELS | 8 | Important |

Tableau 65 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------|--------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | P4, P6 | P3, P5 | | |
| 2. Sérieuse | | | P1 | | |
| 1. Modérée | | | | | |

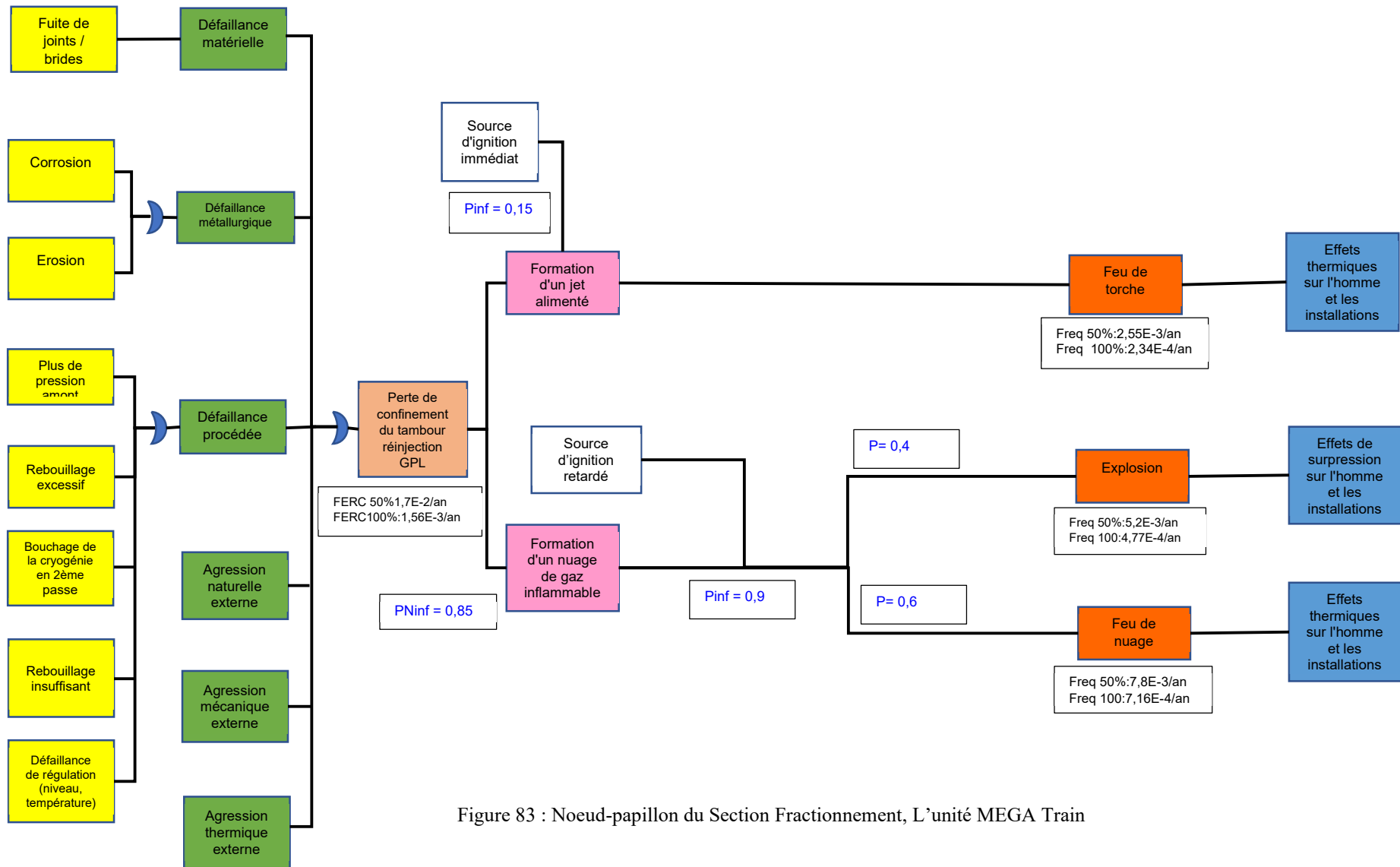


Figure 83 : Noeud-papillon du Section Fractionnement, L'unité MEGA Train

4.4.3. Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|---------|------------------|
| Fuite | $1,21E^{-2}$ /an |
| Rupture | $1,53E^{-3}$ /an |

La probabilité d'inflammation est de **0,15**. (liquide, débit supérieur à 100 kg/s).

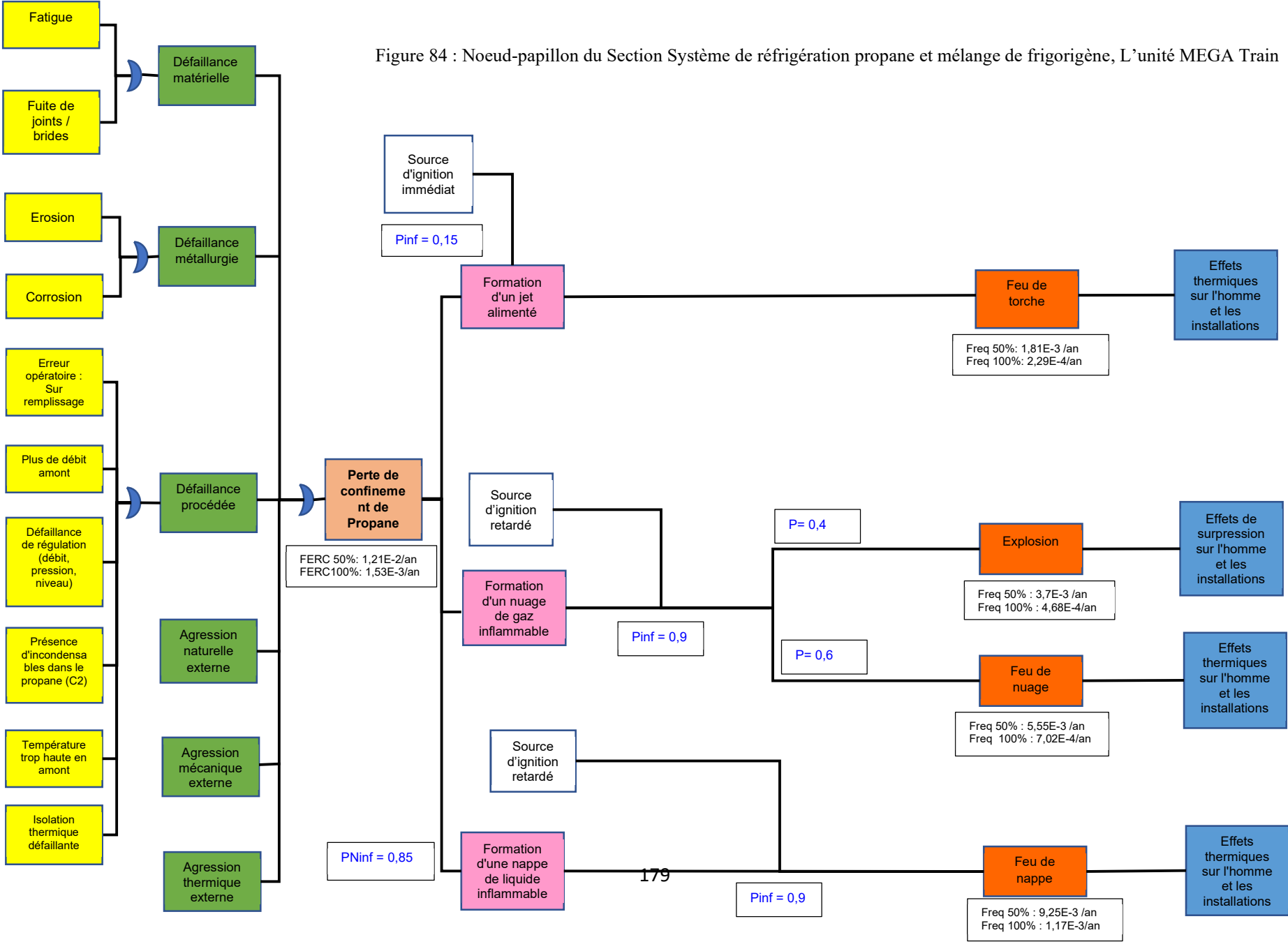
Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 66 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Feu de torche | Fuite | $1,81E^{-3}$ /an | Q1 | C | SELS | 2 | Important |
| | Rupture | $2,29E^{-4}$ /an | Q2 | D | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | $3,7E^{-3}$ /an | Q3 | C | SELS | 194 | Désastreux |
| | Rupture | $4,68E^{-4}$ /an | Q4 | D | SELS | 205 | Désastreux |
| Feu de nuage | Fuite | $5,55E^{-3}$ /an | Q5 | C | SELS | 194 | Désastreux |
| | Rupture | $7,02E^{-4}$ /an | Q6 | D | SELS | 203 | Désastreux |
| Feu de nappe | Fuite | $9,25E^{-3}$ /an | Q7 | C | SELS | 194 | Désastreux |
| | Rupture | $1,17E^{-3}$ /an | Q8 | C | SELS | - | - |

Tableau 67 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|-----------|--------|------------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | Q4, Q6 | Q3, Q5, Q7 | | |
| 4. Catastrophique | | | | | |
| 3. Importante | | | Q1 | | |
| 2. Sérieuse | | | | | |
| 1. Modérée | | | | | |



4.4.4. Section Système frigorigène propane externe

Les fréquences d'ERC sont :

| | |
|----------------|-------------------------|
| Fuite | 5,10E ⁻³ /an |
| Rupture | 7,44E ⁻⁴ /an |

La **probabilité d'inflammation** est de **0,15**. (liquide, débit supérieur à 100 kg/s).

Aucune barrière ne permet de décote de la probabilité.

Tableau 68 : Les fréquences des phénomènes dangereux et gravité :

| Phénomènes dangereux | Type de Fuite | Fréquence | Abr | Classe | Seuil retenu pour l'estimation de la gravité | Gravité au seuil retenu | Niveau de gravité |
|----------------------|---------------|-------------------------|-----|--------|--|-------------------------|-------------------|
| Boule de feu | Fuite | 2,29E ⁻⁴ /an | R1 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 3,35E ⁻⁵ /an | R2 | E | SELS | 1 | Sérieux |
| Feu de torche | Fuite | 5,35E ⁻⁴ /an | R3 | D | SELS | 1 | Sérieux |
| | Rupture | 7,81E ⁻⁵ /an | R4 | E | SELS | - | - |
| Explosion | Fuite | 1,56E ⁻³ /an | R5 | C | SELS | 30 | Catastrophique |
| | Rupture | 2,27E ⁻⁴ /an | R6 | D | SELS | 60 | Catastrophique |
| Feu de nuage | Fuite | 2,34E ⁻³ /an | R7 | C | SELS | 30 | Catastrophique |
| | Rupture | 3,41E ⁻⁴ /an | R8 | D | SELS | 60 | Catastrophique |
| Feu de nappe | Fuite | 3,9E ⁻³ /an | R9 | C | SELS | 30 | Catastrophique |
| | Rupture | 5,69E ⁻⁴ /an | R10 | D | SELS | 50 | Catastrophique |

Tableau 69 : Placement dans la matrice de criticité

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------------|-----------|-------------|------------|-------|-------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | | | | | |
| 4.Catastrophique | | R6, R8, R10 | R5, R7, R9 | | |
| 3. Importante | | | | | |
| 2. Sérieuse | R2 | R1, R3 | | | |
| 1. Modérée | | | | | |

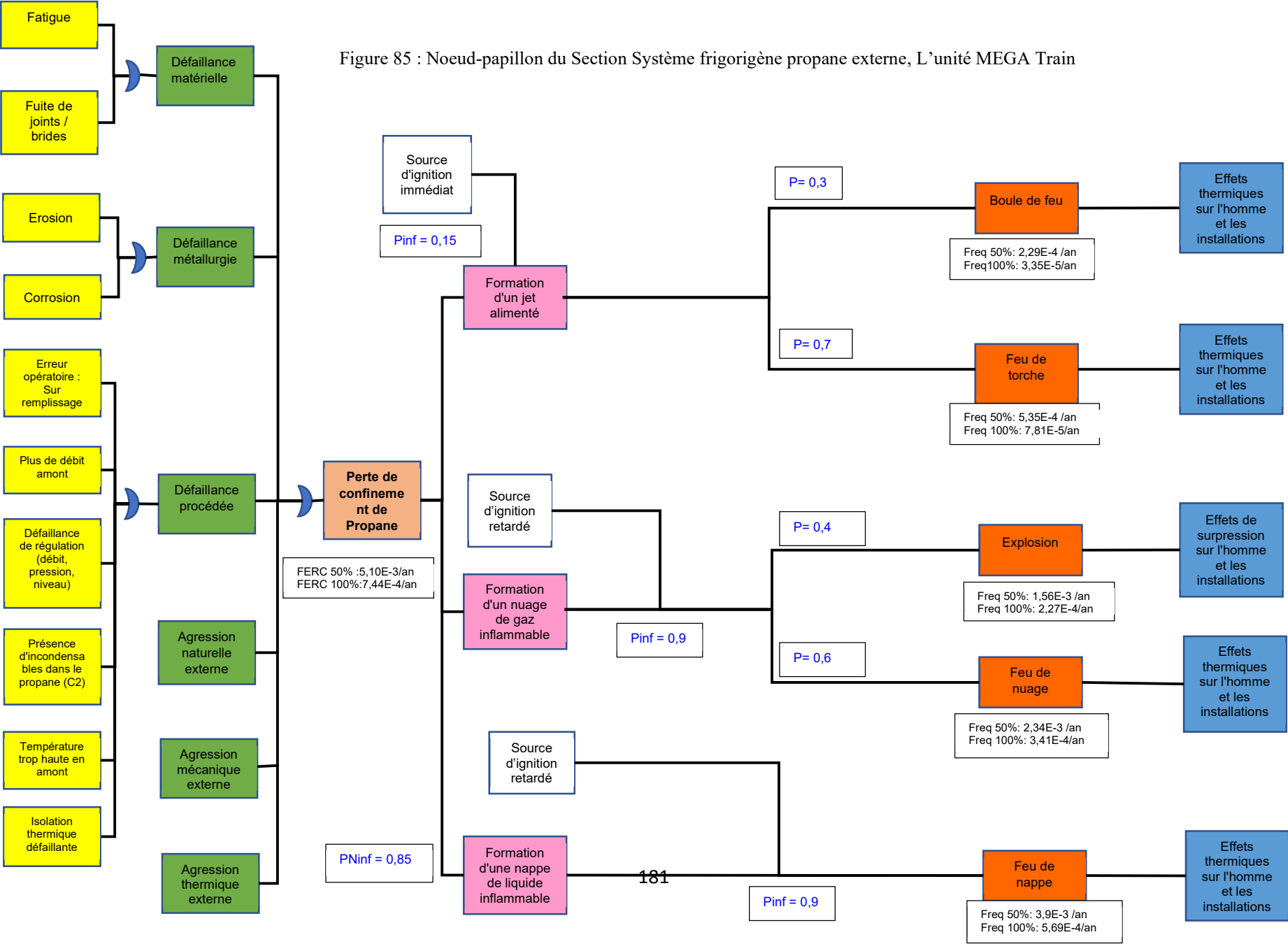


Tableau 70 : les résultats globaux des effets indésirables

| Les Sections/ MEGA Train | Fréquence de rupture | Distance d'effet Feu de torche (m) | | | | | Distance d'effet Explosion (m) | | | | | Distance d'effet Feu de nuage(m) | | Distance d'effet Feu de nappe (m) | | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|------|-----|------|-------------------------|--------------------------------|------|-----|------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-------------------------|
| | | LF | SELS | SEL | SEI | F | CE | SELS | SEL | SEI | F | LII | F | SELS | SEL | SEI | F |
| Liquéfaction | 6,68E ⁻⁴ /an | 75 | 98 | 104 | 1544 | 1E ⁻⁴ /an | 10 | 77 | 100 | 476 | 2,04E ⁻⁴ /an | 167 | 3,06E ⁻⁴ /an | 29 | 32 | 41 | 5,11E ⁻⁴ /an |
| | | | | | | | 900 | 963 | 984 | 1336 | | | | | | | |
| Fractionnement | 1,56E ⁻³ /an | 96 | 152 | 162 | 259 | 2,34E ⁻⁴ /an | 10 | 40 | 50 | 216 | 4,77E ⁻⁴ /an | 340 | 7,16E ⁻⁴ /an | | | | |
| | | | | | | | 160 | 259 | 292 | 843 | | | | | | | |
| Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène | 1,53E ⁻³ /an | 472 | 722 | 770 | 1195 | 2,29E ⁻⁴ /an | 10 | 75 | 96 | 462 | 4,68E ⁻⁴ /an | 267 | 7,02E ⁻⁴ /an | 189 | 205 | 311 | 1,17E ⁻³ /an |
| | | | | | | | 260 | 309 | 326 | 601 | | | | | | | |
| Système frigorigène propane externe | 7,44E ⁻⁴ /an | 286 | 445 | 476 | 749 | 7,81E ⁻⁵ /an | 10 | 61 | 79 | 365 | 2,27E ⁻⁴ /an | 567 | 3,41E ⁻⁴ /an | 206 | 234 | 417 | 5,69E ⁻⁴ /an |
| | | | | | | | 560 | 737 | 796 | 1778 | | | | | | | |

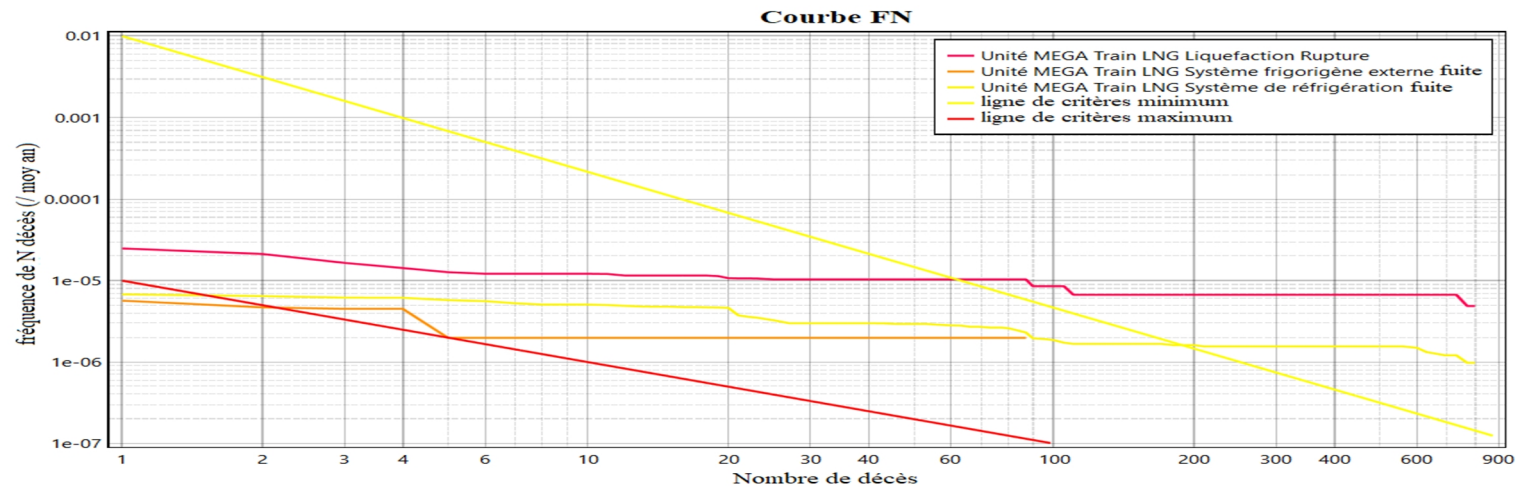


Figure 86 : courbes FN de de l'unité MEGA train.

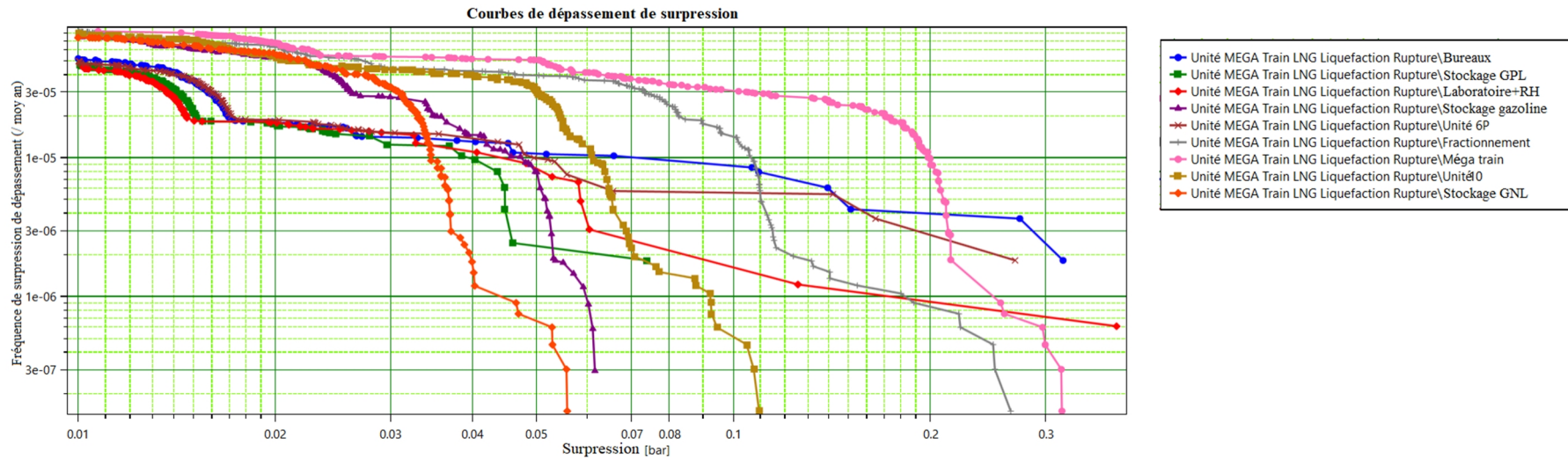


Figure 87 : courbes de dépassements de surpression de de l'unité MEGA train.

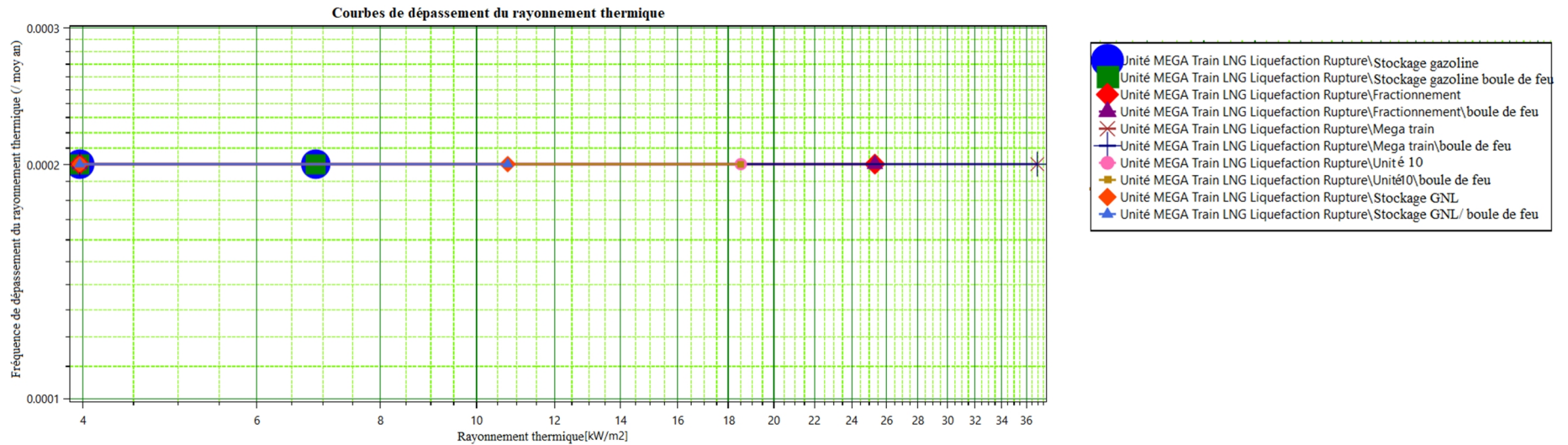


Figure 88 : courbes de dépassements thermiques de l'unité MEGA train.

5. Les résultats globaux de la matrice des risques de la zone industrielle GL1K Skikda

5.1. Matrice des risques globale

Tableau 71 : Distribution des phénomènes dangereuse dans une matrice de risque

| Gravité | Fréquence | | | | |
|-------------------|----------------------------|--|--------------------------------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | C1 | C3, C4, C5, C6, C7, E3, E5, E6, E7, E8, I2, I3, I4, I6, K4, K6, K8, L4, L6, L8, M4, M6, N4, N6, N8, Q4, Q6 | E4, I1, I5, N7, Q3, Q5, Q7, Q8 | | |
| 4. Catastrophique | B1, B2, D3, F3, F4, G4, L1 | A3, A4, A5, A6, D5, F5, F6, G6, H3, H5, K7, L3, L5, L7, R6, R8, R10 | N3, N5, R5, R7, R9 | | |
| 3. Importante | D4, D6, E1, K2 | G3, G7, G8, H4, H6, J5, J6, J7, J8, K3, K5, M3, P4, P6 | M5, N1, P3, P5, Q1 | | |
| 2. Sérieuse | E1, H1, J1, J2, K1, R2 | A1, F1, G1, G5, R1, R3 | P1 | | |
| 1. Modérée | J3 | | | | |

5.2. Cartographies

Les effets envisagés sur le complexe GL1K sont les effets thermiques et les effets de surpression.

Ce paragraphe a pour vocation de présenter une cartographie des phénomènes dangereux retenus dans l'estimation de la gravité des scénarios d'accident, par unité et par section fonctionnelle ; avec la légende définie ci-dessous :

Tableau 72 : seuil réglementaire

| Couleur du contour | Signification : limite de la zone des effets | Seuil réglementaire | | |
|--------------------|--|---|-----------------------------------|------------------|
| | | Rayonnement thermique kW/m ² | Cas particulier des feux de nuage | Surpression mbar |
| Rouge | Létaux significatifs | 37.5 kW/m ² | LIE | >200 |
| Jaune | Létaux | 12.5 kW/m ² | LIE | 150 |
| Vert | Irréversibles | 5 kW/m ² | 110% de la LIE | 70 |

5.3. Bilan du complexe GL1K

Dans le Tableau ci-après est reporté pour chaque section fonctionnelle de chaque unité étudiée le couple « probabilité /gravité » le plus pénalisant entre les cas de rupture et de Fuite :

Tableau 73 : Bilan globale du complexe GL1K.

| | |
|--------------|--|
| Inacceptable | <p>L'unité 5P / 6P</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL (explosion-Fuite + rupture) - Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL (feu de nappe-Fuite) <p>L'unité 10</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Circuit GNT / GNL (explosion-Fuite + rupture) - Section Circuit GNT / GNL (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Circuit GNT / GNL (feu de nappe-Fuite + rupture) <p>Bacs du Stockage du GNL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Stockage du GNL (feu de torche-Fuite) - Section Stockage du GNL (explosion-Fuite + rupture) - Section Stockage du GNL (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Stockage du GNL (feu de nappe-Fuite + rupture) <p>L'unité GPL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (explosion- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (feu de nuage- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (feu de nappe- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (explosion- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (feu de nuage- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (feu de nappe- rupture) <p>Les unités annexes & utilités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Stockage de gazoline (explosion- rupture) - Section Stockage de gazoline (feu de nuage- rupture) <p>L'unité MEGA Train</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Liquéfaction (explosion-Fuite + rupture) - Section Liquéfaction (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Liquéfaction (feu de nappe-Fuite + rupture) - Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène (explosion-Fuite + rupture) - Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène (feu de nappe-Fuite) - Section Système frigorigène propane externe (explosion-Fuite) - Section Système frigorigène propane externe (feu de nuage-Fuite) - Section Système frigorigène propane externe (feu de nappe- Fuite) |
| MMR | <p>L'unité 5P / 6P</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Liquéfaction - Circuit MCR (explosion- Fuite +rupture) - Section Liquéfaction - Circuit MCR (feu de nuage- Fuite +rupture) - Section Liquéfaction - Stockage et appoint MCR (explosion -rupture) - Section Liquéfaction - Stockage et appoint MCR (feu de nuage– rupture) - Section Liquéfaction - Circuit GNT / GNL (feu de torche – Fuite) - Section Fractionnement Déméthanisation (explosion – Fuite + rupture) - Section Fractionnement Déméthanisation (feu de nuage– Fuite + rupture) |

| | |
|-------------------|---|
| | <p>L'unité 10</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Circuit GNT / GNL (feu de torche – Fuite) - Section Circuit MCR (explosion- Fuite +rupture) - Section Circuit MCR (feu de nuage- Fuite +rupture) - Section Compression MCR (explosion-Fuite + rupture) - Section Compression MCR (feu de nuage-rupture) - Section Compression MCR (feu de nappe-Fuite + rupture) - Section Fractionnement Dééthanisation (explosion- Fuite +rupture) - Section Fractionnement Dééthanisation (feu de nuage- Fuite +rupture) <p>L'unité GPL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Séparation propane/butane (explosion- Fuite +rupture) - Section Séparation propane/butane (feu de nuage- Fuite +rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (BLEVE- rupture) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (explosion- Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (feu de nuage- Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (feu de nappe-Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (feu de torche – Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (explosion- Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (feu de nuage- Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle butane (feu de nappe-Fuite) <p>Les unités annexes & utilités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Stockage de gazoline (explosion- Fuite) - Section Stockage de gazoline (feu de nuage- Fuite) <p>L'unité MEGA Train</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Liquéfaction (feu de torche-Fuite) - Section Fractionnement (feu de torche-Fuite) - Section Fractionnement (explosion-Fuite + rupture) - Section Fractionnement (feu de nuage-Fuite + rupture) - Section Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène (feu de torche-Fuite) - Section Système frigorigène propane externe (explosion- rupture) - Section Système frigorigène propane externe (feu de nuage- rupture) - Section Système frigorigène propane externe (feu de nappe- rupture) |
| <p>Acceptable</p> | <p>L'unité 5P / 6P</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Liquéfaction - Circuit MCR (feu de torche-Fuite) - Section Fractionnement Déméthanisation (feu de torche – Fuite) <p>L'unité 10</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Circuit MCR (feu de torche – Fuite) - Section Compression MCR (feu de torche – Fuite) - Section Compression MCR (feu de nuage-Fuite) - Section Fractionnement Dééthanisation (feu de torche – Fuite) <p>L'unité GPL</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Séparation propane/butane (BLEVE- Fuite +rupture) - Section Séparation propane/butane (feu de torche – Fuite) - Section Stockage et réfrigération du cycle propane (BLEVE- Fuite) <p>L'unité MEGA Train</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section Système frigorigène propane externe (Boule de feu – Fuite + rupture) - Section Système frigorigène propane externe (feu de torche – Fuite) |

6. Discussion des résultats finaux

Cette section offre une synthèse générale des résultats obtenus pour dériver les conséquences inacceptable associées aux scénarios accidentels indésirables.

On a présenté d'une manière complète la méthodologie de travail avec une application réel sur une section dans l'unité 5P, mais ça n'ait pas suffisant pour comprendre les évènements indésirables possible dans la totalité de site GL1K et leurs conséquences sur la population environnante et sur l'installation.

Pour cela il est nécessaire à analyser complètement toutes les unités à risque présentes sur le complexe. Dans l'Annexe A on trouve le complément de ce travail qui contient l'application de HAZID pour l'identification des risques sur toutes les unités, on trouve aussi dans ce chapitre dans la section (4.) les tableaux des fréquences dérivées des nœuds papillon, les tableaux de gravité, la matrice des risques, les résultats des modélisations des scenarios et leurs effets, les courbes de dépassement de la surpression, les courbes de dépassement thermique et les courbes FN. Ces résultats sont finalement regroupés dans une matrice globale des risques du complexe industriel GL1K dans section (5. 3).

Les descriptions dans ce chapitre reposent sur les résultats finaux des différents types de danger modélisés dans, à savoir les explosions, feu de torche, feu de nappe, feu de nuage (incendies instantanés et explosion de nuage de vapeur) et boule de feu.

D'après les résultats du bilan global du complexe GL1K, nous constatons qu'il existe un certain nombre de risques liés à certaines activités dans certaines unités qui sont dangereuses et qui nécessitent une grande attention en matière de réduction des risques d'une manière ou d'une autre en diminuant la fréquence d'occurrence ou leurs effets (gravité) sur la population environnante ainsi que sur les installations, ce qui ne pourrait être fait qu'en utilisant des outils de prévention et de protection respectivement.

Recommandations

Risques sur site

Dans la mesure où les risques individuels sont considérés comme étant au-dessus du critère proposé de risque intolérable et que les risques sociétaux sont vers les limites supérieures de la région ALARP, on suggère d'étudier les hypothèses de la population sur site et leur distribution. Ceci doit porter particulièrement sur le nombre moyen de personnel affecté à un travail dans les principales zones d'exploitation de l'infrastructure.

Pour garantir que les risques soient conformes au principe ALARP, toutes les mesures pratiques de réduction du risque doivent être prises en compte. Des mesures additionnelles sont proposées ci-après. Ces mesures sont générales et visent à veiller à l'adoption des meilleures pratiques.

- Les mesures de prévention clé visent à minimiser la fréquence de fuite et le potentiel d'inflammation dans l'infrastructure en général. Les mesures prises pour minimiser les fréquences de fuite vont des détails de conception, tels que les chutes d'objets et les accès entretien, jusqu'aux calendriers de vérification en passant par les procédures d'exploitation. Chacun de ces éléments sera développé au fur et à mesure que la conception de l'infrastructure progresse. De la même manière, des contrôles spécifiques de l'inflammation doivent être finalisés tout en notant que les mesures relatives aux meilleures pratiques vis-à-vis du classement des zones dangereuses doivent être adoptées et que les sources d'inflammation doivent être minimisées dans toutes les zones de la manière la plus pratique possible.
- La détection des fuites et l'isolement sont des mesures de contrôle clés même si leur principale influence consistera à limiter le potentiel d'escalade. Plus la vitesse de l'isolement est élevée, meilleurs sont les avantages en termes de risques pour le personnel, même si l'influence ne sera pas substantielle dans la mesure où la majorité des dangers aura un impact immédiat sur le personnel.

En plus de ce qui précède, des mesures de protection des occupants des installations contre les charges d'explosion et d'incendie et de restriction du potentiel d'escalade en général seront des aspects clés pour réduire les risques au niveau raisonnable dans la pratique.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, cette (QRA) couvre uniquement les risques associés aux processus du GL1K Skikda. Par conséquent, les résultats en matière de risque obtenus présentés dans cette étude doivent être considérés comme complémentaires aux risques associés aux unités d'exploitation existantes. Il est vivement conseillé de réaliser une (QRA) complète des infrastructures de la zone pétrochimique de Skikda à l'avenir afin d'obtenir une représentation complète des risques d'exploitation en combinant les risques associés aux unités d'exploitation existantes à Skikda. Si les risques d'exploitation existants sont déjà connus, alors il faudra tenir compte du personnel supplémentaire qui sera sur le site dans la mesure où celui-ci n'aura peut-être pas été pris en compte dans une analyse du risque antérieure pour les unités d'exploitation existantes.

Risques hors site

Il est important que chacune des populations hors site identifiée soit reprise dans les procédures d'urgence du site. Les unités non intégrées au système d'alarme doivent être intégrée le plus possible à la formation et aux procédures d'alarmes pour garantir que les travailleurs seront en mesure de prendre les actions adéquates en cas de rejet majeur.

Les mesures de réduction du risque complémentaires adaptées au public sont couvertes principalement par les recommandations générales formulées au sujet des risques pour les travailleurs sur site ci-dessus.

Toutefois, comme l'indique une analyse du risque plus complète pour l'ensemble de la zone pétrochimique de Skikda, y compris toutes les unités d'exploitation existantes, est requise pour obtenir une meilleure représentation du risque total auquel la population est exposée.

Potentiel d'escalade

La meilleure pratique est un prérequis pour démontrer que les risques sont conformes au principe ALARP, quelles que soient les valeurs de risque effectives dérivées, sans oublier que les résultats au niveau du risque suggèrent que toutes les mesures pratiques de réduction du risque doivent être envisagées. Par conséquent, les aspects suivants doivent être pris en considération en plus des recommandations ci-dessus :

- Protection contre les explosions pour les installations occupés
- Protection contre les incendies et les explosions pour les réservoirs de stockage
- Mesures de protection contre le potentiel d'escalade des feux de nuage et feu de nappe

Des charges de calcul spécifiques sont recommandées, à moins d'avoir été déjà développées, pour les installations, les grandes structures porteuses et les réservoirs de stockage en tant que cibles d'escalade clés pour les explosions.

7. Conclusions

La présence d'accidents dans les usines de GL1K ne peut être niée, car il est possible d'avoir une chaîne d'événements indésirables qui peuvent dégénérer en accidents majeurs. Ces travaux ont montré l'application d'une approche quantitative de l'évaluation des risques à l'évaluation dynamique des risques de sécurité de l'unité 5P dans une usine GL1K de Skikda. Le calcul des fréquences a été réalisée en utilisant les résultats du nœud papillon qui est basé sur l'identification HAZID des phénomènes dangereux. L'objectif est de donner à chacun des scénarios probables une valeur numérique qui correspond à la fréquence d'occurrence du scénario indésirable. Certaines des causes et événements importants qui pourraient survenir

dans les industries du GNL ont été répertoriés dans l'évaluation des risques, bien que les opérations dans l'unité puissent entraîner de nombreux phénomènes indésirables qui pourraient avoir un impact important sur la zone environnante. Nous avons pu observer que les explosions (explosion de Boule de feu et de nuages) et les feux de nuage sont les conséquences les plus probables et les plus dangereuses du scénario, respectivement. Cependant, si l'on considère un terminal hypothétique, ainsi que la population environnante, et les conditions météorologiques, les risques individuels et sociétaux peuvent être considérés comme tolérables selon les critères de risque proposés. Mais il faut mettre en œuvre davantage de mesures de protection et de prévention pour protéger la population sur place contre certains risques qui dépassent les critères d'acceptation. L'une des preuves de l'absence de mesures de protection est l'accident survenu en 2005, qui a fait 27 morts et plus de blessés. Donc nous proposerions une optimisation de l'aménagement des structures qui pourraient être déplacées, comme les bureaux...etc., vers d'autres endroits afin de réduire la probabilité de dommages et de blessures pour la population intérieure tout en utilisant davantage de contrôle de distance sur les unités de l'usine pour protéger les travailleurs d'approché à proximité des sources de danger. L'adoption de mesures d'atténuation est essentielle pour maintenir l'installation à des niveaux de risque tolérables.

Conclusion

Générale

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse a pour objectif l'identification, l'évaluation et le contrôle des risques liés au complexe GL1K Skikda. En premier lieu, cette étude a porté, sur le recensement des risques engendrés par le complexe et de les présenter de façon synthétique sous une forme hiérarchisée permettant de repérer les risques majeurs. En d'autres termes de dresser un état des lieux complet des vulnérabilités. L'intégration des modèles permettant de mieux comprendre la physique des explosions des nuages de vapeur. Des modèles avancés ont été mis au point pour résoudre les équations fondamentales régissant aux explosions des espaces vapeur en s'appuyant sur les techniques de la dynamique numérique des fluides (CFD). Dans une analyse quantitative des risques (QRA) afin de surmonter certaines limites des approches empiriques et semi-empiriques, le modèle OREM propose des modèles d'explosion très simplifiés qui fournissent toujours les principaux résultats nécessaires à (QRA). Ce modèle se distingue également du modèle plus simple équivalent au TNT, incluant l'effet des obstacles et du confinement partiel. Il a été démontré que les influences de ces facteurs donnent des différences caractéristiques importantes entre les explosions d'explosifs solides et les sources de nuages de vapeur. L'utilisation de OREM indique que ces facteurs sont pris en compte dans une étude de danger et/ou une (QRA). Enfin, la réalisation d'une matrice de risque constitue un outil d'aide à la décision dans l'élaboration des plans d'action, pour les responsables de l'entreprise ou de l'organisation.

Nous avons porté notre premier effort de recherche sur la présentation d'un aperçu des concepts de sécurité et de risque et l'état de l'art sur l'analyse quantitative des risques et ses aspects méthodologiques.

Nous avons ensuite proposé un modèle analytique OREM basé sur le modèle multi-énergie qui fait partie d'un groupe de modèles utilisant des courbes de souffle pour prédire les conséquences des VCE. Les autres modèles de ce groupe comprennent le modèle équivalent TNT, le modèle Baker-Strehlow-Tang et le modèle d'évaluation des zones de congestion (CAM). Les courbes de souffle sont généralement élaborées sur la base de simulations CFD de cas idéalisés et fournissent une surpression latérale et une impulsion ou une durée de surpression positive en fonction de la distance de l'explosion. Afin de démontrer l'intérêt du modèle proposé, une expérimentation de modélisation à grande et moyenne échelle est réalisée pour le valider. En plus, une comparaison avec le modèle TNT et autres modèles équivalents (empiriques et physiques simplifiés) est discutée. En ce qui concerne la précision des prédictions, les résultats de cette simulation confirment la bonne compatibilité entre les expériences et les prédictions avec une marge minimale d'erreur qui semble acceptable à l'échelle industrielle.

Sur la base des résultats acquis, nous estimons que l'OREM peut être appliqué avec réussite aux études de danger des infrastructures classées comme outil permettant de déterminer les effets thermiques et de surpression liés aux phénomènes d'incendie et d'explosion.

Afin de choisir les bons modèles pour les simulations, le modèle (VULN) propose pour convertir les résultats de la modélisation des rayonnements et des explosions en probabilité de préoccupation. La vulnérabilité aux radiations est modélisée comme une méthode de recherche relativement simple. Pour les explosions, il contient un certain nombre de méthodes permettant d'atteindre différents objectifs. Chaque méthode est basée sur la littérature publiée, à commencer par l'approche du purple book 1. En principe, le modèle peut être utilisé conjointement avec n'importe quel modèle d'explosion et sa première application consiste à permettre l'utilisation des résultats des modèles multi-énergie et Baker-Strehlow-Tang dans un (QRA).

Puis l'utilisation du modèle MPACT calcule l'impact du rejet d'un produit chimique toxique ou inflammable sur la population. Il prend les résultats des calculs des conséquences des effets d'explosion et d'inflammation, ainsi que des données supplémentaires sur la direction du vent, les sources d'inflammation, les niveaux d'obstructions génératrices de surpression, la localisation et la fréquence des événements et les superpose à la population pour calculer le risque de décès dans la zone environnante. Les résultats sont présentés sous différentes formes, notamment les données F-N pour le risque sociétal, le risque individuel présenté sous forme de grille sur la zone de calcul.

En vue du large spectre des informations qu'elle offre, l'approche (QRA) proposée pourrait être un support méthodologique pour les études d'analyse des risques dans le secteur industriel en Algérie.

L'application des modèles analytiques et numériques proposés au niveau du complexe GLIK Skikda a montré leur utilité et leur validité dans l'estimation quantitative des conséquences en permettant, d'une part, de surmonter quelques limites des approches empiriques et semi-empiriques et, d'autre part, de bien caractériser les scénarios accidentels et leurs effets, dans le cas d'une étude réelle, en les incluant à une analyse de risque afin de déterminer les risques individuels et sociétaux et, par conséquent, de les comparer aux critères d'acceptabilité. Et, par conséquent, une meilleure prise de décision en matière de gestion des risques.

Perspectives

A la fin de cette thèse, les résultats obtenus de ce travail sont encourageants. Ils peuvent être considérés comme une première étape importante. Il serait intéressant dans les études futures d'exploiter, d'adopter et développer des approches innovantes capables de faire face à l'apparition de dangers potentiels, de minimiser leurs conséquences et de faciliter l'évacuation du site en cas d'apparition de ces dangers. L'une de ces approches consiste à optimiser l'aménagement du site industriel. En général, la création d'un plan capable de minimiser les risques résultant des risques naturels ou technologiques reste un défi scientifique. La méthodologie pour le développer consiste à :

Définir la fonction d'utilité qui permettra un aménagement optimisé du site avec un risque total minimum sur site. L'adaptation de l'algorithme d'évolution différentielle pour l'optimisation, utilisant le principe de la syntaxe spatiale. Par conséquent, comme le processus d'évacuation est pris en compte dans l'estimation du risque, l'exécution de l'algorithme Dijkstra pour trouver les chemins les plus sûrs (chemins à moindre risque) pour évacuer les sites de n'importe quelle position vers les points de rassemblement bien définie.

Au-delà de ces points, nous croyons que pour estimer la synergie des effets cumulés du phénomène dangereux, il est nécessaire d'intégrer plusieurs démarches dans une approche (QRA) global, ce qui signifie absolument plus de développement.

Références bibliographiques

- [1] R.E JORISSEN and P. J. M. STALLEN, *QUANTIFIED SOCIETAL RISK AND POLICY MAKING*, An International Series in Risk Analysis., vol. 12. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC.
- [2] M. Rausand, “Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications,” Jan. 2011, doi: 10.1002/9781118281116.
- [3] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE, and Flash Fire Hazards*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [4] A. Bouafia, M. Bougofa, M. Rouainia, and M. S. Medjram, “Correction to: Safety Risk Analysis and Accidents Modeling of a Major Gasoline Release in Petrochemical Plant,” *J Fail. Anal. and Preven.*, vol. 20, no. 2, pp. 614–614, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11668-020-00845-6.
- [5] “Loi algérienne n° 04-20 (article 2), relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.” <https://www.interieur.gov.dz/index.php/fr/le-ministere/le-minist%C3%A8re/textes-legislatifs-et-reglementaires/40-le-dispositif-legal-regissant-la-wilaya-et-la-commune/393-la-loi-n%C2%B0-04-20-du-25-d%C3%A9cembre-2004-relative-%C3%A0-la-pr%C3%A9vention-des-risques-majeurs-et-%C3%A0-la-gestion-des-catastrophes-dans-le-cadre-du-d%C3%A9veloppement-durable.html>. (accessed Nov. 03, 2020).
- [6] “La réglementation en matière de risque technologique | Ineris.” <https://www.ineris.fr/fr/risques/est-risque/politiques-environnementales-risques/reglementation-matiere-risque-technologique> (accessed Mar. 02, 2021).
- [7] Y. Y. Loy, G. P. Rangaiah, and S. Lakshminarayanan, “Surrogate modelling for enhancing consequence analysis based on computational fluid dynamics,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 48, pp. 173–185, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jlp.2017.04.027.
- [8] F. Khan, S. Rathnayaka, and S. Ahmed, “Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 98, pp. 116–147, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005.
- [9] F. I. Khan, P. R. Amyotte, and Md. T. Amin, “Advanced methods of risk assessment and management: An overview,” in *Methods in Chemical Process Safety*, vol. 4, F. I. Khan and P. R. Amyotte, Eds. Elsevier, 2020, pp. 1–34.
- [10] American Institute of Chemical Engineers and Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. New York: The Center, 2002.
- [11] SELLAMI, R. NAIT-SAID, K. CHETEHOUNA, C. IZARRA, and F. Zidani, “Quantitative consequence analysis using Sedov-Taylor blast wave model. Part II: Case study in an Algerian gas industry,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 2018, no. 116(5), pp. 771–779, 2018.
- [12] H. Den, *TNO: Guidelines for quantitative risk assessment (purple book)*. Committee for the Prevention of Disasters: Sdu Uitgevers, 1999.
- [13] A. Chakrabarty, S. Mannan, and T. Cagin, *Multiscale Modeling for Process Safety Applications - 1st Edition*. Elsevier, 2016.
- [14] V. Cozzani, G. Gubinelli, and E. Salzano, “Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 129, no. 1, pp. 1–21, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.08.012.
- [15] V. Cozzani and E. Salzano, “The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 107, no. 3, pp. 67–80, Mar. 2004, doi: 10.1016/j.jhazmat.2003.09.013.
- [16] Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi, “The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 141, no. 3, pp. 489–519, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.09.056.
- [17] W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, and R. A. Strehlow, Eds., “Explosion Evaluation Procedures and Design for Blast and Impact Resistance,” in *Fundamental Studies in Engineering*, vol. 5, Elsevier, 1983, pp. 606–660.

- [18] A. M. Birk, C. Davison, and M. Cunningham, “Blast overpressures from medium scale BLEVE tests,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, no. 3, pp. 194–206, May 2007, doi: 10.1016/j.jlp.2007.03.001.
- [19] R. Bubbico and M. Marchini, “Assessment of an explosive LPG release accident: A case study,” *Journal of Hazardous Materials*, p. 8, 2008.
- [20] J. Casal and J. M. Salla, “Using liquid superheating energy for a quick estimation of overpressure in BLEVEs and similar explosions,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 3, pp. 1321–1327, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.05.001.
- [21] B. Genova, M. Silvestrini, and F. J. Leon Trujillo, “Evaluation of the blast-wave overpressure and fragments initial velocity for a BLEVE event via empirical correlations derived by a simplified model of released energy,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 21, no. 1, pp. 110–117, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.jlp.2007.11.004.
- [22] D. J. Kielec and A. M. Birk, “Analysis of fire-induced ruptures of 400-L propane tanks,” 1997, doi: 10.1115/1.2842317.
- [23] I. A. Papazoglou and O. N. Aneziris, “Uncertainty quantification in the health consequences of the boiling liquid expanding vapour explosion phenomenon,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 67, no. 3, pp. 217–235, Jun. 1999, doi: 10.1016/S0304-3894(99)00041-2.
- [24] E. Planas-Cuchi, J. M. Salla, and J. Casal, “Calculating overpressure from BLEVE explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 17, no. 6, pp. 431–436, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jlp.2004.08.002.
- [25] R. W. Prugh, “Quantitative Evaluation of ‘Bleve’ Hazards:,” *Journal of Fire Protection Engineering*, Nov. 2016, doi: 10.1177/104239159100300102.
- [26] J. M. Salla, M. Demichela, and J. Casal, “BLEVE: A new approach to the superheat limit temperature,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, no. 6, pp. 690–700, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.jlp.2006.04.004.
- [27] R. A. Strehlow and W. E. Baker, “The characterization and evaluation of accidental explosions,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 2, no. 1, pp. 27–60, Jan. 1976, doi: 10.1016/0360-1285(76)90007-1.
- [28] M. J. Tang and Q. A. Baker, “Comparison of blast curves from vapor cloud explosions,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13, no. 3, pp. 433–438, May 2000, doi: 10.1016/S0950-4230(99)00040-6.
- [29] C. J. H. van den Bosch and R. A. P. M. Weterings, *Methods for the calculation of physical effect: due to releases of hazardous materials (liquids and gases) : yellow book*. The Hague: Director-General of Labour : Committee for the Prevention of Disasters, 2005.
- [30] D. Laboureur *et al.*, “A closer look at BLEVE overpressure,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 95, pp. 159–171, May 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.03.004.
- [31] D. Laboureur, F. Heymes, E. Lapebie, J. M. Buchlin, and P. Rambaud, “BLEVE overpressure: Multiscale comparison of blast wave modeling,” *Process Safety Progress*, vol. 33, no. 3, pp. 274–284, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/prs.11626>.
- [32] A. C. van den Berg, M. M. van der Voort, J. Weerheijm, and N. H. A. Versloot, “Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 17, no. 6, pp. 397–405, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jlp.2004.07.002.
- [33] C. Arnab, M. Sam, C. Tahir, “Multiscale Modeling for Process Safety Applications - Arnab Chakrabarty, Sam Mannan, Tahir Cagin - Google Books.” https://books.google.dz/books?hl=en&lr=&id=gV35AAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=A-XTIM3pN6&sig=j5ZHuK8RQcOmEk_DrEVwnGolk-Y&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Nov. 20, 2020).
- [34] “Arrêté du 29 septembre 2005 relatif à l’évaluation et à la prise en compte de la probabilité d’occurrence, de la cinétique, de l’intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation - Légifrance.” <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000245167/> (accessed Mar. 03, 2021).
- [35] Alain De Meyere, “Cahier n°97 - La politique française et la maîtrise du risque industriel.” Direction départementale de l’équipement de l’oise, Cellule Risques Eau et Environnement.

- [36] “Prévention et risques industriels. Qu’est-ce qu’un risque industriel ? - Démarches de prévention - INRS.” <https://www.inrs.fr/demarche/risques-industriels/definition-risque-industriel.html> (accessed Mar. 03, 2021).
- [37] British Standards Institution, *BS OHSAS 18001:2007: Occupational health and safety management systems; Requirements*. London: BSI, 2007.
- [38] F. I. Khan and S. A. Abbasi, “Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 11, no. 4, pp. 261–277, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0950-4230(97)00051-X.
- [39] “Politiques environnementales & risques | Ineris.” <https://www.ineris.fr/fr/risques/est-risque/politiques-environnementales-risques> (accessed Mar. 01, 2021).
- [40] G. L. L. Reniers, *Multi-Plant Safety and Security Management in the Chemical and Process Industries*. John Wiley & Sons, 2010.
- [41] *System Safety Program Requirements*. Washington DC USA: DEPARTMENT OF DEFENSE STANDARD PRACTICE, 2000.
- [42] C. Denis-Remis, “Approche de la maîtrise des risques par la formation des acteurs,” Doctorat en Sciences et Génie des Activités à Risque, École des Mines de Paris, 2007.
- [43] G. Antonioni, G. Spadoni, and V. Cozzani, “Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, no. 5, pp. 614–624, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jlp.2009.02.012.
- [44] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [45] Q. S. Joint Technical Committee QR/8, Standards Association of Australia, and Standards New Zealand, *ISO: Quality management and quality assurance, vocabulary*. Homebush, N.S.W.; Wellington, N.Z.: Standards Australia ; Standards New Zealand, 1994.
- [46] B. S. Institution, *Glossary of Terms Used in Quality Assurance (Including Reliability and Maintainability Terms)*. London: B S I Standards, 1979.
- [47] “Risk and emergency preparedness analysis. NOROK Stand Z-013.” 36. Norway S, 2010.
- [48] J. S. Arendt and D. K. Lorenzo, *Evaluating Process Safety in the Chemical Industry: A User’s Guide to Quantitative Risk Analysis*. John Wiley & Sons, 2010.
- [49] G. Miner, “Guidelines for Analyzing and Managing the Security vulnerabilities of Fixed Chemical Sites,” *Am Water Work Assoc*, vol. 94, p. 126, 2002.
- [50] “Prévention et risques industriels - Démarches de prévention.” INRS, [Online]. Available: <https://www.inrs.fr/demarche/risques-industriels/ce-qu-il-faut-retenir.html>.
- [51] M. René, *L’accident de l’usine chimique de Flixborough*, EDITIONS PRÉVENTIQUE. 2013.
- [52] *Lees’ Loss Prevention in the Process Industries*. Elsevier, 2005.
- [53] W. P. M. Mercx, A. C. van den Berg, and D. van leeuwen, “Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project: ‘GAMES.’” NL, 1998.
- [54] Sam Mannan, *Lee’s Loss Prevention in the Process Industries Hazard Identification, Assessment and Control*, Third edition., vol. Volume 1. .
- [55] S. Mannan, *Lees’ Loss Prevention in the Process Industries*, 4th Edition. Butterworth-Heinemann Elsevier, 2012.
- [56] *Disaster, Planning and Development: Managing Natural Hazards to Reduce Loss*. Washington, D.C.: Natural Hazards Project of the Department of Regional Development and Environment, Organization of American States, 1990.
- [57] J. S. Ballard, “Inverse Square Law,” in *Radiation Safety*, Open Oregon Educational Resources.
- [58] J. Cook, Z. Bahrami, and R. J. Whitehouse, “A comprehensive program for calculation of flame radiation levels,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 3, no. 1, pp. 150–155, Jan. 1990, doi: 10.1016/0950-4230(90)85039-C.
- [59] A. Johnson, H. Brightwell, and A. Carsley, *A model for predicting the thermal radiation hazard from large scale horizontally released natural gas jet fires*, vol. 72, Part B vols. Trans. IChemE, 1994.
- [60] “CCPS Guidelines Series 2000,” in *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, 2nd edition., John Wiley & Sons, Ltd, 2000, pp. 75–76.

- [61] E. Vanem, P. Antão, F. D. Castillo Comas, and R. Skjong, *Formal Safety Assessment of LNG tankers*. IMO—International Maritime Organization, 2007.
- [62] F. Kadri, E. Châtelet, and G. Chen, “Method for quantitative assessment of the domino effect in industrial sites,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 91, no. 6, pp. 452–462, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.psep.2012.10.010.
- [63] A. M. Shariff and D. Zaini, “Inherent risk assessment methodology in preliminary design stage: A case study for toxic release,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 4, pp. 605–613, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.jlp.2012.12.003.
- [64] N. Alileche, V. Cozzani, G. Reniers, and L. Estel, “Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: A review of approaches and regulations,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 143, pp. 74–84, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.res.2015.04.007.
- [65] M. Abunemeh, R. E. Meouche, I. Hijazi, A. Mebarki, and I. Sharour, “Hazards, vulnerability and Interactions at Construction Sites: spatial risk mapping,” *Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Special Issue Architectural informatics*, vol. 22, pp. 63–79, Jan. 2017.
- [66] M. Xu, I. Hijazi, A. Mebarki, R. E. Meouche, and M. Abune'meh, “Indoor guided evacuation: TIN for graph generation and crowd evacuation,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. sup1, pp. 47–56, May 2016, doi: 10.1080/19475705.2016.1181343.
- [67] A. Mebarki, S. Jerez, G. Prodhomme, and M. Reimeringer, “Natural hazards, vulnerability and structural resilience: tsunamis and industrial tanks,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. sup1, pp. 5–17, May 2016, doi: 10.1080/19475705.2016.1181458.
- [68] M. Boukri *et al.*, “Seismic risk and damage prediction: case of the buildings in Constantine city (Algeria),” *Bull Earthquake Eng*, vol. 12, no. 6, pp. 2683–2704, Dec. 2014, doi: 10.1007/s10518-014-9594-0.
- [69] M. Boukri, M. N. Farsi, A. Mebarki, and M. Belazougui, “Earthquake damage assessment: Theoretical framework and application to the Algerian building case,” in *5th International Conference on Safety and Security Engineering*, Rome, Italy, Sep. 2013, p. 1, Accessed: Mar. 05, 2021. [Online]. Available: <https://hal-upec-upem.archives-ouvertes.fr/hal-00833045>.
- [70] J. Baroth, G. Prod'Homme, J. L. Hanus, A. Mebarki, and L. Daudeville, “vulnerability of constructions under impacts and explosions,” in *Conference Lambda Mu*, Rouen, France, Oct. 2012, p., Accessed: Mar. 05, 2021. [Online]. Available: <https://hal-upec-upem.archives-ouvertes.fr/hal-00833067>.
- [71] I. TC/SC 56, *IEC 60300-3-9 Ed. 1.0 b:1995, Dependability management - Part 3: Application guide - Section 9: Risk analysis of technological systems*. Multiple. Distributed through American National Standards Institute, 1995.
- [72] E. De Rademaeker, G. Suter, H. J. Pasma, and B. Fabiano, “A review of the past, present and future of the European loss prevention and safety promotion in the process industries,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 4, pp. 280–291, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.psep.2014.03.007.
- [73] J. E. Vinnem, *Offshore Risk Assessment vol 2.: Principles, Modelling and Applications of (QRA) Studies (Springer Series in Reliability Engineering)*. Springer, 2014.
- [74] K. Collier, “The Loss of the Ocean Ranger, 15 February 1982,” In: *Newfoundl. Labrador Herit*, 2010. <https://www.heritage.nf.ca/articles/economy/ocean-ranger.php>.
- [75] M. Yang, F. Khan, and P. Amyotte, “Operational risk assessment: A case of the Bhopal disaster,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 97, pp. 70–79, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.psep.2015.06.001.
- [76] A. Labib and R. Champaneri, “The Bhopal disaster - Learning from failures and evaluating risk,” *Journal of Maintenance & Asset Management*, vol. 27, pp. 41–47, Jan. 2012.
- [77] “Fukushima Daiichi nuclear disaster - Wikipedia,” *Wikipedia contributors*, 2017. https://en.wikipedia.org/wiki/Fukushima_Daiichi_nuclear_disaster.
- [78] J. E. Skogdalen and J. E. Vinnem, “Quantitative risk analysis of oil and gas drilling, using Deepwater Horizon as case study,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 100, pp. 58–66, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.res.2011.12.002.
- [79] J. Arinas, J. Higueta, and O. Castrillon, *Deep Water: The Gulf Oil Disaster And The Future Of Offshore Drilling*. 2010.

- [80] J. W. G. Johnson, *MORT Safety Assurance Systems*. New York, NY, Marcel Dekker, Incorporated, 1980.
- [81] J. Rasmussen, "Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations," *Journal of Occupational Accidents*, vol. 4, no. 2, pp. 311–333, Sep. 1982, doi: 10.1016/0376-6349(82)90041-4.
- [82] J. Rasmussen and M. Lind, *A Model of Human Decision Making in Complex Systems and its Use for Design of System Control Strategies*. 1982, p. 276.
- [83] T. Kletz, "Piper alpha: latest chapter in a long story," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 4, no. 4, pp. 277–278, Jul. 1991, doi: 10.1016/0950-4230(91)85013-J.
- [84] H. Bouloiz, E. Garbolino, and M. Tkiouat, "Contribution of a systemic modeling approach applied to support risk analysis of a storage unit of chemical products in Morocco," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 2, pp. 312–322, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2009.12.001.
- [85] S. A. Adedigba, F. Khan, and M. Yang, "Process accident model considering dependency among contributory factors," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, pp. 633–647, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.05.004.
- [86] D. E. L. Houston, "New approaches to the safety problem," *Major Loss Prev Process Ind*, 1971.
- [87] F. I. Khan and S. A. Abbasi, "Reply to comments on 'Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences,'" *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, no. 1, p. 85, 1999, doi: 10.1016/S0950-4230(00)00016-4.
- [88] M. Coleman and H. M. Marks, "Qualitative and quantitative risk assessment," *Food Control*, vol. 10, pp. 289–297, Aug. 1999, doi: 10.1016/S0956-7135(99)00052-3.
- [89] [IEC 61882], *IEC 61882:2001 - Hazard and operability studies (HAZOP studies). Application guide*. Int Electrotech Comm, 2001.
- [90] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA From Theory to Execution, Second Edition*, 2nd edition. ASQ Quality Press, 2003.
- [91] [IEC 60812], *IEC 60812:2006 Analysis techniques for system reliability Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*. Int Electrotech Comm, 2006.
- [92] A. Card, J. Ward, and P. Clarkson, "Beyond FMEA: the structured what-if technique (SWIFT)," *Journal of healthcare risk management : the journal of the American Society for Healthcare Risk Management*, vol. 31, pp. 23–9, Jan. 2012, doi: 10.1002/jhrm.20101.
- [93] [IEC 61025], *IEC 61025 (2006) Fault tree analysis*. Int Electrotech Comm, 2006.
- [94] [IEC 62502], *IEC 62502 (2010) Analysis techniques for dependability {Event tree analysis (ETA)}*. Int Electrotech Comm, 2010.
- [95] R. Ferdous, F. Khan, R. Sadiq, P. Amyotte, and B. Veitch, "Handling data uncertainties in event tree analysis," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 87, no. 5, pp. 283–292, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.psep.2009.07.003.
- [96] E.-S. Hong, I.-M. Lee, H.-S. Shin, S.-W. Nam, and J.-S. Kong, "Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique: Application to the design of shield TBM," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 269–277, May 2009, doi: 10.1016/j.tust.2008.09.004.
- [97] H. Den, *TNO: Methods for the calculation of physical effects (yellow book)*, 3rd edition. Committee for the Prevention of Disasters: The Hague, 2005.
- [98] "CCPS Guidelines Series 1999," in *Guidelines for consequence analysis of chemical releases*, John Wiley & Sons, Ltd, 1999.
- [99] "CCPS Guidelines Series 1995," in *Understanding atmospheric dispersion of accidental releases*, New York: John Wiley & Sons, Ltd, 1995.
- [100] SINTEF, *OREDA - Offshore Reliability Data Handbook 2002*. Høvik, Norway: Der Norske Veritas (DNV), 2002.
- [101] A. L. J. Laurent, *Sécurité des procédés chimiques : Connaissances de base et méthodes d'analyse des risques*, 2e édition. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 2011.
- [102] A. Villemeur, *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Eyrolles, 1988.
- [103] "CCPS Guidelines Series 2001," in *Layer of protection analysis : simplified process risk assessment*, John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [104] *Explosion Hazards in the Process Industries*. Elsevier, 2016.

- [105] L. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. Elsevier, 1959.
- [106] G. I. Taylor, “The formation of a blast wave by a very intense explosion I. Theoretical discussion,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 201, no. 1065, pp. 159–174, Mar. 1950, doi: 10.1098/rspa.1950.0049.
- [107] DNV, *PHAST Tutorial Manual*. London: DNV Software, 2016.
- [108] U.S. EPA, *ALOHA User’s Manual*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- [109] G. V. Shoen, Ye. A. Bondar, G. P. Oblapenko, and E. V. Kustova, “Development and testing of a numerical simulation method for thermally nonequilibrium dissociating flows in ANSYS Fluent,” *Thermophys. Aeromech.*, vol. 23, no. 2, pp. 151–163, Mar. 2016, doi: 10.1134/S0869864316020013.
- [110] E. Vyazmina and S. Jallais, “Validation and recommendations for FLACS CFD and engineering approaches to model hydrogen vented explosions: Effects of concentration, obstruction vent area and ignition position,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 33, pp. 15101–15109, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.189.
- [111] O. R. Hansen and D. M. Johnson, “Improved far-field blast predictions from fast deflagrations, DDTs and detonations of vapour clouds using FLACS CFD,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 35, pp. 293–306, May 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2014.11.005.
- [112] E. Planas, J. Arnaldos, B. Silveti, A. Vallée, and J. Casal, “A Risk Severity Index for industrial plants and sites,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, no. 3, pp. 242–250, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.015.
- [113] L. Gooijer, N. Cornil, and C. L. Lenoble, “An international comparison of four quantitative risk assessment approaches—A benchmark study based on a fictitious LPG plant,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 90, no. 2, pp. 101–107, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.psep.2011.05.002.
- [114] Z. Török, N. Ajtai, A.-T. Turcu, and A. Ozunu, “Comparative consequence analysis of the BLEVE phenomena in the context on Land Use Planning; Case study: The Feyzin accident,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 89, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.psep.2010.08.003.
- [115] INERIS, “Omega 5 - Le BLEVE, phénoménologie et modélisation des effets thermiques.” Institut national de l’environnement industriel et des risques, 2002.
- [116] J. Casal, *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*, 2nd Edition. Elsevier, 2018.
- [117] D. Crowl and J. Louvar, *Crowl: Chemical Process Safety _c3*, 3rd ed. edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.
- [118] “CCPS Guidelines Series 2009,” in *Guidelines for developing quantitative safety risk criteria*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [119] É. Zimmermann, “De l’usage de la cartographie dans l’appréhension des risques technologiques majeurs / How cartography can help in understanding major technological hazards,” *Géocarrefour*, vol. 71, no. 1, pp. 11–16, 1996, doi: 10.3406/geoca.1996.4316.
- [120] G. Britain, *Canvey: An investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock area*. London: H.M. Stationery Off, 1978.
- [121] R. P. Authority, *Risk Analysis of Six Potentially Hazardous Industrial Objects in the Rijnmond Area: A Pilot Study*, 1982nd edition. Dordrecht, Holland ; Boston : Hingham, MA: Springer, 1982.
- [122] A. Falek, E. Skramstad, and M. Berg, “Use of (QRA) for decision support in the design of an offshore oil production installation.,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 71, no. 1, pp. 179–192, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0304-3894(99)00078-3.
- [123] D. Hendershot, J. Sussman, G. Winkler, and G. Dill, “Implementing inherently safer design in an existing plant,” *Process Safety Progress*, vol. 25, pp. 52–57, Mar. 2006, doi: 10.1002/prs.10117.
- [124] S. Apeland and T. Aven, “Risk based maintenance optimization: foundational issues,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 67, no. 3, pp. 285–292, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0951-8320(99)00068-X.
- [125] N. S. Arunraj and J. Maiti, “A methodology for overall consequence modeling in chemical industry,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 169, no. 1, pp. 556–574, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.133.

- [126] F. I. Khan and M. M. Haddara, “Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, no. 6, pp. 561–573, Nov. 2003, doi: 10.1016/j.jlp.2003.08.011.
- [127] D. Egidi, F. P. Foraboschi, G. Spadoni, and A. Amendola, “The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 49, no. 1, pp. 75–89, Jan. 1995, doi: 10.1016/0951-8320(95)00026-X.
- [128] G. Spadoni, S. Contini, and G. Uguccioni, “The New Version of ARIPAR and the Benefits Given in Assessing and Managing Major Risks in Industrialised Areas,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 81, no. 1, pp. 19–30, Jan. 2003, doi: 10.1205/095758203762851958.
- [129] G. Spadoni, D. Egidi, and S. Contini, “Through ARIPAR-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 71, no. 1, pp. 423–437, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0304-3894(99)00091-6.
- [130] G. Antonioni, G. Landucci, A. Necci, D. Gheorghiu, and V. Cozzani, “Quantitative assessment of risk due to NaTech scenarios caused by floods,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 142, pp. 334–345, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ress.2015.05.020.
- [131] V. Cozzani and E. Salzano, “Quantitative Methods for Natech Risk Assessment,” in *Natech Risk Assessment and Management*, E. Krausmann, A. M. Cruz, and E. Salzano, Eds. Elsevier, 2017, pp. 143–156.
- [132] G. Landucci, F. Argenti, V. Cozzani, and G. Reniers, “Assessment of attack likelihood to support security risk assessment studies for chemical facilities,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 110, pp. 102–114, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.psep.2017.06.019.
- [133] G. L. L. Reniers and A. Audenaert, “Preparing for major terrorist attacks against chemical clusters: Intelligently planning protection measures w.r.t. domino effects,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 6, pp. 583–589, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.psep.2013.04.002.
- [134] F. Goerlandt, N. Khakzad, and G. Reniers, “Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review,” *Safety Science*, vol. 99, pp. 127–139, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.08.023.
- [135] H. J. Pasman, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, “Risk assessment: What is it worth? Shall we just do away with it, or can it do a better job?,” *Safety Science*, vol. 99, pp. 140–155, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2017.01.011.
- [136] V. Villa, N. Paltrinieri, F. Khan, and V. Cozzani, “Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry,” *Safety Science*, vol. 89, pp. 77–93, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ssci.2016.06.002.
- [137] M. Greenberg, C. Haas, L. Cox, K. Lowrie, K. McComas, and W. North, “Ten Most Important Accomplishments in Risk Analysis, 1980-2010,” *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, vol. 32, pp. 771–81, May 2012, doi: 10.1111/j.1539-6924.2012.01817.x.
- [138] G. Apostolakis, “How Useful Is Quantitative Risk Assessment?,” *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, vol. 24, pp. 515–20, Jul. 2004, doi: 10.1111/j.0272-4332.2004.00455.x.
- [139] HSE, “Buncefield: Why did it happen?” Competent Authority for the Control of Major Accident Hazards (COMAH)., 2011.
- [140] G. B. H. and S. Executive, *GAME: Development of Guidance for the Application of the Multi-energy Method*. Sudbury: Health and Safety Executive, 1998.
- [141] L. Kleiweg, P. O. Box, and A. Rijswijk, “Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project: ‘GAMES,’” p. 158.
- [142] P. Mancarella, “MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models,” *Energy*, vol. 65, pp. 1–17, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
- [143] J. B. M. M. Eggen, “*GAME: development of guidance for the application of the Multi-Energy Method*.” GAME, 1995.
- [144] R. Montmayeul, “L’ACCIDENT DE L’USINE CHIMIQUE DE FLIXBOROUGH,” p. 20.
- [145] A. MirallesSchleder and M. Ramos Martins, *Comparative Evaluation of the Cloud Dispersion of a Liquefied Natural Gas Leakage Using the UDM and a CFD Model*, vol. 7. 2013.

- [146] F. D. Alonso, E. G. Ferradás, J. F. S. Pérez, A. M. Aznar, J. R. Gimeno, and J. M. Alonso, “Characteristic overpressure–impulse–distance curves for vapour cloud explosions using the TNO Multi-Energy model,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 137, no. 2, pp. 734–741, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.005.
- [147] A. C. van den Berg and A. L. Mos, *Research to Improve Guidance on Separation Distance for the Multi-energy Method (RIGOS)*. HSE Books, 2005.
- [148] The Hague, TNO, “Methods for the calculation of physical effects, (The Yellow Book), 3rd Ed. Sdu Uitgevers, 1997.
- [149] H. Witlox and A. Holt, *UDM Theory Manual*. DNV, 2004.
- [150] TNO, *Methods for the determination of possible damage*. Voorburg, 1989.
- [151] *Methods for the Determination of Possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials*. 1992.
- [152] R. M. Jeffries, S. J. Hunt, and L. Gloud, *Derivation of Fatality Probability Functions for Occupants of Buildings Subject to Blast Loads*. 1997.
- [153] K. Galbraith, *Review of Blast Injury Data and Models*. 1998.
- [154] *CIA Guidance for the location and design of occupied building on chemical manufacturing sites*. Building Standards Taskforce of the Chemical Industries Association (CIA), 1998.
- [155] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and Bleves*”. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- [156] API, *Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Buildings*, 2nd Ed. 2003.
- [157] N. W. et al Hurst, *Development and Application of a Risk Assessment Tool (RISKAT) in the Health and Safety Executive*. Bootle (UK), 1989.
- [158] “Deciding Whether to Use (QRA),” in *Evaluating Process Safety in the Chemical Industry*, John Wiley & Sons, Ltd, 2000, pp. 11–24.
- [159] D. R. E. Worthington and Y. Xu, “MDE Theory Document - OREM,” *DNV*, vol. Technical documentation, 2010.
- [160] G. M. H. Laheij, G. J. Post, and B. J. M. Ale, “Standard methods for land-use planning to determine the effects on societal risk,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 71, pp. 269–282, 2000.
- [161] I. L. Hirst and D. A. Carter, “A Worst Case Methodology for Obtaining a Rough but Rapid Indication of the Societal Risk from a Major Accident Hazard Installation,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. A92, pp. 223–237, 2002.
- [162] P. HAASTRUP and K. RASMUSSEN, “A study of f-N curves for accidents involving highly flammable gases and some toxic gases,” *Process saf. environ. prot.*, vol. 72, no. 4, pp. 205–210, 1994.
- [163] I. L. Hirst and D. A. Carter, “A Worst Case Methodology for Risk Assessment of Major Accident Installations,” *Process Safety Progress*, vol. 19, no. 2, p. 78, 2000.
- [164] D. A. Carter, I. L. Hirst, T. E. Maddison, and S. R. Porter, “Appropriate Risk Assessment Methods for Major Accident Establishments,” *Trans IChemE*, vol. 81, no. Part B, 2003.
- [165] D. Okrent, “Industrial Risks,” *Proc R Soc London*, vol. A376, pp. 133–149, 1981.
- [166] S. L. Scofield, “A Framework for Offshore Risk Criteria,” *Safety and Reliability Soc.J*, vol. 13, no. 2, 1993.
- [167] E. Vanem, P. Antão, F. D. C. d. Comas, R. Skjong “Formal Safety Assessment of LNG tankers,” 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structure. https://www.researchgate.net/publication/281273707_Formal_Safety_Assessment_of_LNG_tankers (accessed Dec. 10, 2020).
- [168] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, and D. Gaston, “Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, no. 4, pp. 291–303, Jul. 2002, doi: 10.1016/S0950-4230(02)00008-6.
- [169] V. Sage, P. Hazewinkel, M. Khamphasith, B. Young, N. Burke, and E. F. May, “High-pressure cryogenic distillation data for improved LNG production,” *Separation and Purification Technology*, vol. 229, p. 115804, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.seppur.2019.115804.

- [170] M. Bougofa, A. Bouafia, and A. Bellaouar, “Availability Assessment of Complex Systems under Parameter Uncertainty using Dynamic Evidential Networks,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 16, no. 4, p. 510, Apr. 2020, doi: 10.23940/ijpe.20.04.p2.510519.
- [171] Digno Sanchez, “Skikda Equipment List Report Run Time – All (« Rapport d’exécution sur la liste d’équipement à Skikda –tout »).” Fichier Excel reçu par DNV dans un message électronique, avril 2008.
- [172] Process Leak Frequencies, “Fréquences des fuites de circulation.” British Petroleum, technical document. 2002.
- [173] E. Planas, J. Arnaldos, R. M. Darbra, M. Muñoz, E. Pastor, and J. A. Vilchez, “Historical evolution of process safety and major-accident hazards prevention in Spain. Contribution of the pioneer Joaquim Casal,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 28, pp. 109–117, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2013.04.005.
- [174] DNV, “The HCR Database – Its Potential for use at Above Ground Gas Facilities, Report for RIVM.” DET NORSKE VERITAS ltd, UK, Oct. 2010, [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/DNV-%20The%20HCRD%20database%20LKQW5-7.pdf>.
- [175] N. Khakzad, F. Khan, and P. Amyotte, “Dynamic risk analysis using bow-tie approach,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 104, pp. 36–44, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.ress.2012.04.003.
- [176] DNV / JIP, “Consequences of LNG Marine Incidents,” presented at the Conférence CCPS, Orlando, 2004.
- [177] Director-general for social affairs and employment (Pays-Bas) and Committee for the prevention of the disasters, *Guidelines for quantitative risk assessment: purple book : CPR 18E*. Den Haag: Sdu Uitgevers, 1999.
- [178] Q. B. Nguyen, A. Mebarki, F. Mercier, R. Ami Saada, and M. Reimeringer, “The domino effect and integrated probabilistic approaches for risk analysis,” in *Eight International Conference on Computational Structures Technology*, Las Palmas, Spain, Sep. 2006, pp. 27–34, Accessed: Dec. 10, 2020. [Online]. Available: <https://hal-upec-upem.archives-ouvertes.fr/hal-00719771>.
- [179] M. C. Embarek and E. A. Hadjadj, “Study of Methodologies for Risk Assessment in Operational System Safety,” *J Fail. Anal. and Preven.*, vol. 10, no. 6, pp. 540–544, Dec. 2010, doi: 10.1007/s11668-010-9397-9.
- [180] TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, *Guidelines for quantitative risk analysis (Purple Book)*. Ministry of VROM, 2005.
- [181] T. Baron, “Reactions in turbulent free jets – the turbulent diffusion flame,” *Chem. Eng. Prog.*, 1954.
- [182] J. Cook and J. Woodward, “A new integrated model for pool spreading, evaporation, and solution on land and in water,” in *International Conference on Safety, Health and LP in the Oil, Chemical and Process Industries*. Singapore, pp. 15–19, 1993.
- [183] M. Moonis, A. J. Wilday, and M. J. Wardman, “Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 88, no. 2, pp. 97–108, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.psep.2009.11.006.
- [184] G. A. Chamberlain, “Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares,” *Chem. Eng. Res. Des.; (United Kingdom)*, vol. 65:4, Jul. 1987.
- [185] I. Sellami, B. Manescau, K. Chetehouna, C. de Izarra, R. Nait-Said, and F. Zidani, “BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 54, pp. 69–84, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.02.010.
- [186] “Bilan thermique et matière », KBR, Doc. N° PR-00-R10-064, Rév. 2.,” UK Health and Safety Executive, Sep. 17, 2007.
- [187] B. Mohammed, B. Abderraouf, and B. Ahmed, “An Integrated Quantitative Bayesian Network in Risk Management for Complex Systems,” *Int J Performability Eng*, vol. 16, no. 3, pp. 354–366, 2020, doi: 10.23940/ijpe.20.03.p4.354366.
- [188] DNV – Det Norske Veritas, “DNV Failure Frequency Guidance.” DNV, Norway, 2013.

- [189] J. D. Marx and K. M. Werts, “The application of pressure–impulse curves in a blast exceedance analysis,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 3, pp. 478–482, May 2013, doi: 10.1016/j.jlp.2012.07.011.
- [190] M. R. Martins, M. A. Pestana, G. F. M. Souza, and A. M. Schleder, “Quantitative risk analysis of loading and offloading liquefied natural gas (LNG) on a floating storage and regasification unit (FSRU),” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 43, pp. 629–653, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.jlp.2016.08.001.
- [191] J. D. Denti, M. Amorós-Martí, N. Prophet, and G. Gorski, “A risk-based approach for predicting domino effects due to fires combining exceedance curves with dynamic thermal stress analysis,” *Process Safety Progress*, vol. 37, no. 2, pp. 176–185, 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/prs.11937>.

Annexe A

**Identification des risques au niveau de GL1K
Skikda**

1. Unité méga train

Tableau 1 : ensemble des cause et conséquences possible dans l'unité méga train (les plus létaux).

| Causes | Conséquences | Scenario indésirable/PhD |
|---|--|--|
| Nœud : 1. conditionnement de l'alimentation | | |
| Route à proximité de la zone (véhicules à moteur diesel uniquement dans la zone d'exploitation). | Source d'inflammation à l'intérieur de l'unité et aux alentours de celle-ci - réchauffeurs à brûleur, zones de soudage | |
| Gazoduc | Rejet potentiel entraînant une inflammation | Explosion, Feu de nappe |
| Coalesceurs 01-MD03 (2 x 50%) – pas d'accumulation majeure de liquide | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Huile chaude - 220C | Rejet potentiel entraînant une inflammation | Explosion, Feu de nappe |
| CO2 concentration de 0.21% (max 0.5%) | Rejet potentiel entraînant une dispersion toxique | Explosion, Feu de nappe |
| Perte de compresseur | Réduction de 20% de la production de l'usine, mais aucune interruption du débit | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Les conditions de démarrage peuvent provoquer des inconvénients | Indicent de rejet potentiel | |
| Perte d'air sur le compresseur (perte de l'air vers l'actionneur) | Vannes de commande en position de sécurité | |
| En fonction de la conception, des plateformes (à 3 m) seront peut-être requise pour accéder aux filtres | Chute potentielle d'un point surélevé | |
| Camions présents dans la zone uniquement durant les entretiens (remplacement de filtres, livraison d'isotank) | Un camion au ralenti est une source d'inflammation Déversement potentiel d'hydrocarbure inflammable | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Route passant sous le gazoduc dans la section sud | Impact potentiel d'un véhicule entraînant une perforation | |
| Grue aérienne à la turbine risque de chute d'objet | Risque de rupture de canalisation en service ou de rupture de ligne aérienne de service public | |
| Connexion avec la ligne existante | Risque de perforation | |
| Piquage à vif dans les conduites d'alimentation pour les trains existants | Risque de perforation et inflammation | |
| Nœud : 2. Solvant | | |
| Solvant – Amdea (concentration diluée ininflammable) | Dégâts environnementaux provoqués par liquide non biodégradable | |
| Déversement de solvant | Contact personnel avec le solvant ; le solvant est corrosif pour la peau | |
| Pompes ; défaillance de l'étanchéité de la pompe | Risque de perforation | |
| Nœud : 3. Déméthanisation | | |
| Fourneau à huile chaud (distance de 60 m) | Inflammation de vapeurs parasite | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Hydrocarbure liquide 07-MD01 dans la tour du déméthaniseur | Perforation en bas de la tour | |
| Refroidisseur d'alimentation 07-MC20, inventaire d'hydrocarbure liquide Condenseur 07-MC16, le propane liquide utilisé en tant que réfrigérant s'évapore sur la coquille ; mélange de méthane partiellement condensé | Perte de propane au niveau du refroidisseur | |

| | | |
|--|---|--|
| Ballon de reflux 07-MD10, inventaire d'hydrocarbure liquide | | |
| Rebouilleur 07-MC01, inventaire d'hydrocarbure liquide et pétrole lourd côté tube | Rejet inflammable puis risque de nuage de vapeur provoqué par la proximité de la surface chaude | |
| Démarrage, mise à température inadéquate du rebouilleur | Pression de vapeur élevée dans le déméthaniseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, |
| Route d'accès sous la nappe de tubes | Impact potentiel d'un véhicule entraînant une perforation | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Soulèvements à l'aide d'une grue pour l'entretien de l'échangeur | Dégât provoqué par une chute d'objet ou un mouvement | |
| Nœud : 4. Dé-éthanisation | | |
| 07-MD02 Hydrocarbure liquide dans la tour (25 bar) | Perforation en bas de la tour | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Condenseur 07-MC03, le propane liquide utilisé en tant que réfrigérant s'évapore sur la coquille ; mélange d'éthane partiellement condensé | Surpression dans le refroidisseur | |
| Ballon de reflux 07-MD03, inventaire d'hydrocarbure liquide | Perte de propane au niveau du ballon | |
| Rebouilleur 07-MC02, inventaire d'hydrocarbure liquide et pétrole lourd côté tube | Perte de propane au niveau du rebouilleur | |
| Réchauffeur d'éthane 07-MC14, inventaire de vapeur | Perte de propane au niveau du réchauffeur | |
| Refroidisseur de réinjection d'éthane 07-MC21 | Perte de propane au niveau du refroidisseur | |
| Démarrage, mise à température inadéquate du rebouilleur | Pression de vapeur élevée dans le dééthaniseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, |
| Corrosion sous l'isolation sur la tour | Perte d'intégrité de la cuve et perte du confinement | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Nœud : 5. Dépropanisation | | |
| Fourneau à huile chaud (distance de 45 m) | Inflammation de vapeurs parasite | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, |
| 07-MD04 Hydrocarbure liquide dans la tour (13 bar) | Perforation en bas de la tour | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Rebouilleur 07-MC04, inventaire d'hydrocarbure liquide et pétrole lourd côté tube | Surpression provoquée par pétrole lourd côté tube | |
| Condenseur de dépropaniseur 07-MC05 (refroidisseur à air induit) | Perte de propane au niveau du condenseur | |
| Ballon de reflux 07-MD05, inventaire d'hydrocarbure liquide | Perte de confinement d'hydrocarbure lourd | |
| Refroidisseur de produit de propane 07-MC15 | Surpression dans le refroidisseur | |
| Démarrage, mise à température inadéquate du rebouilleur | Pression de vapeur élevée dans le dépropaniseur | |
| Perte d'air instrument | Vannes de commande en position de sécurité | |
| Nœud : 6. Débutanisation | | |
| 07-MD06 Hydrocarbure liquide dans la tour (haut 40C, 4 bar ; bas 101C) | Perte de confinement - feu de nappe | |

| | | |
|---|---|--|
| Rebouilleur 07-MC06, inventaire d'hydrocarbure liquide et pétrole lourd côté tube (pression du pétrole lourd supérieure à celle du gaz) | Rupture de colonne admettant l'entrée du pétrole lourd dans la colonne de débutaniseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Condenseur de débutaniseur 07-MC07 (refroidisseur à air induit) | Perte de propane au niveau du condenseur | |
| Ballon de reflux 07-MD07, inventaire d'hydrocarbure liquide | Perte de confinement d'hydrocarbure lourd | |
| Refroidisseur de produit de butane 07-MC12 | Surpression dans le refroidisseur | |
| Rejet du joint de la pompe | Fuite entre joints | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Démarrage, mise à température inadéquate du rebouilleur | Pression de vapeur élevée dans le dépropaniseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, |
| Nœud : 7. Réinjection de GPL | | |
| Refroidisseur de réinjection de butane 07-MC09 | Perte de GPL au niveau du refroidisseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Ballon de réinjection de GPL 07-MD08 | Perte de GPL au niveau du ballon | |
| Différence de pression entre la canalisation de déméthaniseur à 35 bar et le ballon de réinjection de GPL à 18 bar | Surpression du ballon de GPL | |
| Nœud : 8. Désisopentanisat | | |
| 07-MD11 Hydrocarbure liquide dans la tour (haut 51C, 2 bar ; bas 71C) | Feu de nappe | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Rebouilleur 07-MC24, inventaire d'hydrocarbure liquide et pétrole lourd côté tube (pression du pétrole lourd supérieure à celle du gaz) | Rupture de conduite admettant l'entrée du pétrole lourd dans la colonne de désisopentaniseur | |
| Condenseur de désisopentaniseur 07-MC23 (refroidisseur à air induit) | Perte de pentane au niveau du condenseur | |
| Ballon de reflux 07-MD12, inventaire d'hydrocarbure liquide | Perte de confinement d'hydrocarbure lourd | |
| Cristalliseur HPPR de désisopentaniseur 07-MC25 | Rupture de conduite dans le système de réfrigération de propane (dans l'accumulateur) ; accumulation d'isopentane dans le cristalliseur | |
| Cristalliseur LPPR de désisopentaniseur 07-MC26 | Rupture de conduite dans le système de réfrigération de propane (dans l'accumulateur) ; accumulation d'isopentane dans le cristalliseur | |
| Refroidisseur de produit d'essence 07-MC13 | Perte de confinement de l'essence dans le refroidisseur | |
| Démarrage, mise à température inadéquate du rebouilleur | Pression de vapeur élevée dans le désisopentaniseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Soulèvement simultané des soupapes de décharge en cas de panne électrique | Risque de surpression du réseau-torche | |
| Panne électrique sur les refroidisseurs d'air | Augmentation de la température et de la pression dans le ballon de condenseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Perte d'air instrument | Vannes de commande en position de sécurité | |
| Corrosion sous l'isolation | Perte d'intégrité de la cuve et perte du confinement | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Nœud : 9. Enlèvement du gaz acide | | |
| Turbines au gaz sur la parcelle (à plus de 70 m) | Inflammation de gaz parasite | Explosion, Feu de nuage |
| Défaillance de la pompe entraînant l'arrêt de l'écoulement du solvant | CO2 dans le gaz de tête | |
| Bas niveau dans la tour | Risque d'échappement de gaz | |
| Nœud : 10. Séchage du gaz et enlèvement du mercure | | |
| Pré refroidisseur du sécheur 13-MC01 | Petit inventaire de propane | |

| | | |
|---|---|--|
| Séparateur d'entrée du sécheur 13-MD01 | Rejet potentiel entraînant une inflammation | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, |
| Sécheurs à tamis moléculaires A/B/C 13-MD02C (3 x 100%) | | |
| Ballon de détente brusque d'eau de sécheur 13-MD09 | | |
| Séparateur de gaz de régénération 13-MD03 | | |
| Absorbeur de mercure 14- MD01 | | |
| NOTE - le ballon 16-MD06 est proche des sécheurs à tamis | | |
| Pétrole lourd pour 13-MC02 | | |
| Absorbeur de mercure 14-MD01 ; accumulation de mercure | Risque d'empoisonnement en cas de manipulation prolongée | |
| La pression dans les tamis moléculaires varie entre 30 et 60 bar sur un cycle de 36 heures | Risque de dégâts à l'équipement en raison de la pression cyclique | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Nœud : 11. Liquéfaction - laveur, colonne et compresseur | | |
| Turbines au gaz sur la parcelle | Risque de température élevée dans le gaz combustible | |
| Réchauffeur électrique 15-ML02 | | |
| Refroidisseurs de propane (15-MC01 / 02 / 03) | Perte de confinement | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Colonne de lavage 15-MD01 | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Ballon de reflux de colonne de lavage 15-MD02 | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Echangeur de chaleur cryogénique principal 15-MC05 | Rejet de vapeur | |
| Ballon de détente brusque de gaz riche en hélium 15-MD03 (8% hélium) | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| GNL vers le stockage via 15-MJ03 | Potential pressure surge at pump suction | |
| Impact sur les tubes entraînant un rejet de GNL | Perte de confinement - produit fini | |
| Nœud : 12. Réfrigération mixte | | |
| 16 trains de cristalliseur (16- MC04, 16-MC05,16-MC06 et 16-MC07) | Rejet potentiel entraînant une inflammation | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| 20 trains de cristalliseur (20-MC04, 20-MC05,20-MC06 et 20- MC07) | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Compresseurs LP/MP/HP MR (16-MJ01, 16-MJ02, 16-MJ03) | Vibrations entraînant une rupture de tube et une perte du confinement sous pression | |
| Ballon d'aspiration et refroidisseurs d'air (16-MD01, 16-MC01, 16-MC02 et 16-MC03) | Perte du refroidissement intermédiaire entraîne une pression de vapeur élevée dans les refroidisseurs | |
| Commandes de ligne coupées pour les circuits de lubrification et de gaz combustible | Perte de contrôle du système de commande de lubrification du compresseur/gaz combustible vers turbine du cadre 7 | |
| Chute de pression à l'aspiration/rejet du compresseur | Augmentation de la vitesse du compresseur et risque de dégât | |
| Défaillance du ventilateur du refroidisseur intermédiaire de réfrigération ou panne électrique partielle | Surcharge de température sur les refroidisseurs de propane des bancs 16 et 20 | |
| Erreur de l'opérateur pouvant ouvrir la vanne de gavage | Perte de refroidissement en raison du déséquilibre du système provoqué par de l'éthane/méthane ou de l'azote complémentaire | |
| Lors de l'arrêt (arrêt partiel) peut avoir de grands inventaires ; une erreur pourrait provoquer un rejet (exemple : ouverture de la mauvaise conduite) | Risque de feu de nappe en raison du rejet du réfrigérant à classer | |
| Véhicules dans l'usine durant l'arrêt | Source d'inflammation et risque d'explosion avec incendie | |
| Nappe de tube aérienne élevée | Potential d'un véhicule entraînant une perforation | |

| | | |
|---|--|--|
| Connexion lors du démarrage de l'unité | Risque de perte du confinement durant la période d'exposition de la connexion | |
| Autour des turbines de compresseurs, dans les unités existantes, antécédent de brûlure du plastique sur le câblage électrique | Câble à nu pouvant provoquer un court-circuit électrique ou des arcs | |
| Contamination de la colonne d'azote par des hydrocarbures | Purge contient des hydrocarbures, risque d'explosion dans la cuve purgée | |
| Nœud : 13. Réfrigération de propane et réfrigération de propane externe | | |
| Réfrigérant mixte (mélange inflammable de méthane, d'éthane et de propane) | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| 15/16 trains de cristalliseur (16-MC04, 16-MC05, 16-MC06, 16-MC07, 15-MC01, 15-MC02, 15-MC03), propane / réfrigérant mixte | | |
| 20 trains de cristalliseur (20-MC04, 20-MC05, 20-MC06, 20-MC07), propane / éthane / méthane / réfrigérant mixte | | |
| Compresseurs (16-MJ04, 20-MJ01) | Vibrations entraînant une rupture de tube et une perte du confinement sous pression | |
| Perte de puissance dans les refroidisseurs d'air (16-MC09, 16-MC11), | Perte du refroidissement intermédiaire entraîne une pression de vapeur élevée dans les refroidisseurs | |
| Perte de puissance/de refroidissement dans les refroidisseurs d'air recyclé, 20-MC03 | Perte du refroidissement entraîne une pression de vapeur élevée dans les refroidisseurs de recyclage | |
| 20-MD01/02/03/04, inventaire de vapeur, (en général pas de liquide) | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Variation de pression dans l'accumulateur 16-MD06, inventaire le plus grand (estimation de 15 m L x 4m D) ; partiellement rempli | Perte d'intégrité de la cuve et risque de perte de confinement et de feu de nappe | |
| Accumulateur 20-MD05 | Perte d'intégrité de la cuve et risque de perte de confinement et de feu de nappe | |
| Compresseur en augmentation pour une durée prolongée | Turbine haute température/compresseur prend feu | |
| Commandes de ligne coupées pour les circuits de lubrification et de gaz combustible | Perte de contrôle du système de commande de lubrification du compresseur/gaz combustible | |
| Chute de pression à l'aspiration/rejet du compresseur | Augmentation de la vitesse du compresseur et risque de dégât | |
| Défaillance du ventilateur du refroidisseur intermédiaire de réfrigération ou panne électrique partielle | Surcharge de température sur les refroidisseurs de propane des bancs 16 et 20 | |
| Lors de l'arrêt (arrêt partiel) peut avoir de grands inventaires ; une erreur pourrait provoquer un rejet (exemple : ouverture de la mauvaise conduite) | Risque de feu de nappe en raison du rejet du réfrigérant à classer | |
| Accès restreint des véhicules à l'unité ; Véhicules dans l'usine durant l'arrêt | Source d'inflammation et risque d'explosion avec incendie Impact potentiel d'un véhicule entraînant une perforation | |
| Connexion lors du démarrage de l'unité | Risque de perte du confinement durant la période d'exposition de la connexion | |
| Nœud : 14. Circuit de pétrole lourd et fractionnement | | |
| Rupture de tube dans le fourneau | Le pétrole lourd s'enflamme et donne un incendie fuyant | |
| Unité 18 - pétrole lourd à une température de 180C | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Unité 58 - pétrole lourd à une température de 220C | | |
| Défaillance de la pompe 18-MJ-01A | 1. Surchauffe du pétrole lourd dans les tubes de récupération des déchets | |

| | | |
|---|--|--|
| | 2. Risque de rupture de tube et d'incendie | |
| Température de pétrole élevée | Maxima de température dans les rebouilleurs de solvant | |
| Fuite au niveau des échangeurs de chaleur | Courant d'exploitation dans le circuit de pétrole lourd (18 ou 58) | |
| Défaillance de la pompe 58- MJ01A | 1. Faible débit de pétrole dans le fourneau au gaz 2. Risque de rupture de tube | |
| Ouverture accidentelle de la soupape vers le stockage de pétrole lourd avec pétrole chaud (soupape et circuit conçus pour le refroidissement) | Pétrole lourd vers stockage et risque de dégât au réservoir | |
| Nœud : 15. Production d'électricité | | |
| 5 turbines à gaz combustible, 4 en ligne | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| 3 Turbines diesel (génératrices de secours) | | |
| Nœud : 16. Stockage du GPL et gaz d'évaporation | | |
| Réservoir de stockage GNL 71-MF01, inventaire de 150 000 m ³ | Perte de confinement | |
| 71-MD01, petit inventaire de GNL en bas | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Compresseurs d'évaporats 71-MC01 A/B/C (1 x 100%) | Vibrations entraînant une rupture de tube et une perte du confinement sous pression | |
| Fuite au niveau des entrées du compresseur à -160C | Risque de rupture fragile et perte de confinement | |
| Conduite de recirculation | Perte de confinement | |
| Réservoir de stockage de propane, 76-MF01, 40 000 tonnes | Perte de confinement | |
| Réservoir de stockage de butane, 76-MF02, 40,000 tonnes | | |
| Sphère d'essence (matériel C5/C6, 76-MD03, capacité de 3 000 m ³ (pression atmosphérique) | | |
| Pas d'inspections internes | La corrosion non détectée entraîne une perte du confinement | |
| Connexions de butane depuis les unités 5, 6 et 10 | Risque de perte du confinement durant la période d'exposition de la connexion | |
| Connexions de propane depuis les unités 5, 6 et 10 | | |
| Comburent thermique, 65-MB07, (CO ₂ , eau, faibles niveaux d'hydrocarbures) | Proximité des conduites de carburant dans la nappe de tube - source de chaleur potentielle | |
| Séparateur de torche chaude 65-MD01 | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Séparateur de torche froide | Rejet potentiel entraînant une inflammation | |
| Alimentation continue de gaz combustible à la veilleuse de la torche | | |

2. Unité 5P / 6P et 10

Tableau 2 : ensemble des cause et conséquences possible dans l'unité 5P, 6P et 10 (les plus létaux).

| Cause | Conséquences | Evènement indésirable/PhD |
|--|---|--|
| Décarbonatation - Régénération MEA | | |
| Défaillance de la régulation de niveau LV5101 de la tour T101 (vanne restée bloquée ouverte) | Mauvaise régénération Eclatement du D116 ou des filtres ou des échangeurs E102 A/B | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Défaillance de la régulation de pression PV5118 du D116 (vanne restée bloquée fermée) | Mauvaise régénération Eclatement du D116 ou des filtres ou des échangeurs E102 A/B | |

| | | |
|---|---|--|
| Fuite/rupture de tube des échangeurs E102 A/B | Contamination de la MEA pauvre avec de la MEA riche, mauvaise décarbonation | |
| Pression haute amont | Perturbation de la régénération Eclatement de la T102 ou du D101 | |
| Défaillance de la vanne de régulation de pression PV5102 du D101 (vanne restée bloquée fermée) | Perturbation de la régénération (pas d'extrait de CO2) Eclatement de la T102 ou du D101 | |
| Défaillance de la vanne PCV5105 (vanne restée bloquée fermée) | Eclatement du bac TK101 | |
| Défaillance de la vanne PCV 5104 (vanne restée bloquée ouverte) | Eclatement du bac TK101 | |
| Défaillance de la vanne de régulation de débit FV5103 (vanne restée bloquée fermée) | Endommagement du moteur électrique de la pompe, surcharge du moteur, incendie | |
| Erreur opératoire : Vanne laissée ouverte entraînant un excès d'azote dans le fut d'amine | Eclatement du fut d'amine située sur E114 | |
| Décarbonatation - Séparateur D103 | | |
| Section 51-02a - Plus de (GN) | Eclatement des tubes des condenseurs E106 A/B Eclatement des condenseurs E106 A/B ou du ballon séparateur D103 | |
| Mauvais traitement de l'eau de mer de réfrigération (présence de moules, d'algues...), bouchage des tubes | Rupture des tubes Passage du GN dans le circuit d'eau de mer via le canal de rejet Le passage du gaz dans le canal de rejet peut être déclencheur de flammes (possible en cas d'arrêt, eau stagnante) | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Température haute amont | Mauvaise condensation, envoi de gaz chaud vers les sécheurs, saturation des sécheurs et formation de bouchon dans les boîtes cryogéniques | |
| Défaillance de la régulation de niveau LV5102A ou LV5102 B (vanne restée bloquée ouverte) | Envoi de GN vers le ballon D116 (ballon de flash d'amine), montée en pression dans le D116, éclatement du D116 Envoi de GN vers le ballon D117 (ballon séparateur eau/gazoline), montée en pression dans le D117, éclatement du D117 | |
| Déshydratation - Sécheurs | | |
| Fermeture intempestive d'une vanne en sortie du sécheur en service | Eclatement du sécheur D104 | |
| Erreur opératoire : Vanne de purge laissée ouverte | Fuite de GN | |
| Plus de pression amont | Eclatement du ballon D102 Endommagement du compresseur Ejection d'une pièce mécanique | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Mauvaise ou perte condensation au niveau de l'aéroréfrigérant E107 | Température haute, endommagement du compresseur, éjection d'une pièce mécanique | |
| Plus de débit | Endommagement du compresseur, fuite de GN | |
| Température haute Défaillance de la vanne de régulation de débit FV5211 (vanne restée bloquée fermée) | Endommagement du compresseur, éjection d'une pièce mécanique | |
| Démercurisation - Démercuriseur | | |
| Plus de pression aspiration | Endommagement du compresseur | |
| Fermeture ou engorgement des vannes Joule Thomson | Eclatement du compresseur | |
| Montée en pression au refoulement du compresseur | Endommagement du compresseur, fuite sur garnitures du compresseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Refroidissement excessif du MCR au niveau des échangeurs cryogéniques E202 A-F | Montée en niveau dans les D201 A/B, envoi de liquide à l'aspiration du compresseur Endommagement du compresseur | |
| Circuit MCR – Condenseurs* | | |
| Plus de pression dans le ballon D202 | Eclatement de la capacité | |

| | | |
|---|--|--|
| Perte de la condensation au niveau des échangeurs E201 A-F | Perturbation de la production Cavitation des pompes P202 A/B | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, BLEVE |
| Manques de HC lourds dans la composition de la boucle MCR | Fuite sur garniture, éjection d'une pièce mécanique | |
| Erreur opératoire : Vanne de purge liquide laissée ouverte | | |
| Moins de / pas de débit ballons D201 A/B d'aspiration du compresseur C201 | Perturbation de la production Cavitation de la pompe P211 | |
| Erreur opératoire : Vanne de purge liquide laissée ouverte | Fuite sur garniture, éjection d'une pièce mécanique | |
| Stockage et appoint MCR* | | |
| Plus de pression de gaz de couverture (défaillance de la vanne PCV5903) | Cavitation de la pompe P210 Fuite de garniture, éjection d'une pièce mécanique | Explosion, Feu de nuage, Feu de nappe, BLEVE |
| Moins de pression de gaz de couverture (défaillance de la vanne PCV5903) | | |
| Erreur opératoire : Vanne de purge laissée ouverte | Fuite de propane | |
| Plus de pression amont du Ballon D208 | Eclatement de la capacité | |
| Défaillance de la régulation de pression du circuit d'appoint (vanne de régulation PV5312 restée bloquée fermée) | | |
| Erreur opératoire : Passage de gaz chaud (gaz de régénération) vers le D208 lors d'une phase d'appoint | | |
| Bouchage du filtre en sortie du D208 | | |
| Température haute amont (défaillance de l'échange thermique au niveau des échangeurs E109 A et B) | Augmentation de la pression - Contraintes thermiques => Fuite de gaz au niveau des joints... | |
| Circuit GNL / GNT - Echangeurs cryogéniques* | | |
| Saturation du tamis moléculaire du ballon D219 et 230 épurateurs de GNT d'appoint | Perturbation de la liquéfaction Bouchage des noyaux MCR 1 ^{ère} passe, éclatement des noyaux | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| Choc thermique et mauvaise exploitation de circuit LPR | - Fissuration inter passe - Fuite de gaz à l'extérieur | |
| Erreur opératoire : Non-respect de la procédure de démarrage | Fuite de GNL et/ou MCR au niveau des brides de sortie des noyaux des échangeurs cryogéniques | |
| Envoi de GNL "chaud" depuis les échangeurs cryogéniques E202 A-H | Eclatement de la capacité Ballon de flash HP D206 A | |
| Défaillance de la régulation de pression dans le D206 A (vannes de régulation PV5406 A et B restées bloquées fermées) | | |
| Bouchage de l'échangeur E203 | | |
| Défaillance de la régulation de pression sur circuit d'alimentation du D206 A (vanne PV5407 restée bloquée ouverte) | | |
| Défaillance de la régulation de niveau dans le ballon D206 A (vanne de régulation LV5408 restée bloquée fermée) | Engorgement de la capacité Envoi de GNL vers le circuit de gaz combustible HP Rupture du circuit de gaz combustible HP | |
| Arrêt du compresseur de gaz combustible C202 | Mauvaise qualité GNL, perte de production Eclatement de la capacité | |
| Défaillance de la régulation de pression dans le ballon D206 B | Eclatement de la capacité | |
| Bouchage de l'échangeur E203 | | |
| Arrêt des pompes P208 A/B | Engorgement de la capacité | |
| Défaillance de la régulation de niveau dans le ballon D206 B (vanne de régulation LV5409 restée bloquée fermée) | Envoi de GNL liquide vers le circuit de gaz combustible BP Rupture du circuit | |
| Circuit gaz combustible | | |
| Défaillance de la régulation de température du gaz combustible BP en sortie de l'échangeur | Température haute à l'aspiration du compresseur, et en conséquence, au refoulement Endommagement du compresseur | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |

| | | |
|--|---|--|
| E203 (vanne de régulation TV5431 restée bloquée ouverte) | | |
| Mauvaise décarbonatation en amont | Perturbation des paramètres de fonctionnement du E203 - Bouchage des noyaux, éclatement des noyaux - Bouchage au niveau du filtre d'aspiration du compresseur, déformation du filtre | |
| Défaillance de la régulation de température du gaz combustible HP en sortie de l'échangeur E203 (vanne de régulation TV5431 restée bloquée fermée) | Rupture/fuite de joint sur le circuit de gaz combustible HP (circuit ne pouvant pas supporter des températures cryogéniques) | |
| Mauvais conditionnement échangeur E203 | - Fuite de gaz et/ou de liquide au niveau des brides de la boîte contenant l'échangeur - Perturbation des paramètres de fonctionnement du E203, - Sous refroidissement des produits propane et butane, suivie par la fragilisation de la conduite sortie butane (acier carbone type 204A et N204A) et encrassement des passes des circuits propane et butane - Mauvais transfert de chaleur par la suite entre le (C3 et C4) et le (gaz combustible HP/gaz combustible BP) et envoi de produits "chauds" vers les stockages de GPL | |
| Refoulement fermé Compresseur C202 | | |
| Problème sur l'échangeur de gaz combustible E203 | Eclatement du compresseur | |
| Défaillance de la régulation de température (vanne de régulation TV5431 restée bloquée ouverte) | Echauffement du compresseur, température de refoulement haute => contraintes thermiques Envoi de gaz chaud dans le ballon de mélange de gaz combustible D115 | |
| Déméthaniseur T201 | | |
| Plus de pression amont Rebouilleur E204 | Perturbation de la déméthanisation, bouchage de la cryogénie en 2ème passe (par envoi de HC lourds) | |
| Rebouillage excessif dû à la défaillance de la régulation de température de fond de colonne (vanne de régulation TV5402 restée bloquée ouverte) | Eclatement de la capacité | |
| Bouchage de la cryogénie en 2ème passe) | Perturbation de la déméthanisation Eclatement de la capacité | |
| Rebouillage insuffisant dû à la défaillance de la régulation de température de fond de colonne (vanne de régulation TV5402 restée bloquée fermée) | | |
| Défaillance de la régulation de niveau dans le ballon D228 (vanne de régulation LV5401 restée bloquée ouverte) | Perturbation de la déméthanisation Eclatement des tubes de l'échangeur E204 | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Défaillance de la régulation de température sur le circuit d'alimentation de la colonne depuis les échangeurs cryogéniques E202 A-H (vanne de régulation TV5401 restée bloquée fermée) | | |
| Fuite/rupture de tube sur E204 | Entraînement d'une coupe C2+ dans le circuit de vapeur, risque d'explosion au niveau du dégazeur | |
| Mauvais conditionnement de la colonne / Non-respect de l'ouverture progressive de la vanne HV5418 A (vers circuit torche) / Mauvais serrage des trous d'homme | Refroidissement brusque entraînant des fuites de produit au niveau de joints, des brides... | |
| Fractionnement -Dééthaniseur T202* | | |
| Rebouillage excessif dû à la défaillance de la régulation de température de fond de colonne | Perturbation de la dééthanisation et de la section fractionnement | |

| | | | |
|--|---|---|--|
| (vanne de régulation TV5403 restée bloquée ouverte) | Éclatement de la capacité | | |
| Défaut de reflux dû à la défaillance de la régulation de débit de reflux vers la colonne (vanne de régulation FV5403 A restée bloquée fermée) | | | |
| Défaut de reflux dû à l'arrêt des pompes De reflux P203 A/B | | | |
| Perte de la condensation au niveau du E209 (vanne de régulation de débit FV5428 sur circuit de méthane restée bloquée fermée) | | | |
| Défaillance de la régulation de pression dans la colonne (vanne de régulation PV5401 restée bloquée fermée) | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche | | |
| Niveau bas dans l'ensemble T201 - D228 | | | |
| Perte de la condensation au niveau du E209 (vanne de régulation de débit FV5428 sur circuit de méthane restée bloquée fermée) | | Perturbation de la dééthanisation et de la section fractionnement Cavitation des pompes de reflux Fuite sur garniture, éjection d'une pièce mécanique | |
| Défaillance de la régulation de débit de reflux vers la colonne (vanne de régulation FV5403 A restée bloquée ouverte) | | | |
| Défaillance de la régulation de niveau dans le ballon de reflux (vanne de régulation LV5403 restée bloquée ouverte) | | | |
| Rebouillage insuffisant | | | |
| Fuite/rupture de tube sur E209 | | Passage de méthane dans le circuit d'éthane, montée en pression dans le dééthaniseur T202, éclatement de la capacité | |
| Débutaniseur T203* | | | |
| Rebouillage excessif dû à la défaillance de la régulation de température de fond de colonne (vanne de régulation TV5404 restée bloquée ouverte) | | Perturbation de la débutanisation Éclatement de la capacité | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |
| Défaut de reflux dû à la défaillance de la régulation de débit de reflux vers la colonne T203 (vanne de régulation FV5406 restée bloquée fermée) | | | |
| Défaut de reflux dû à l'arrêt des pompes de reflux P204 A/B | | | |
| Perte de la condensation au niveau du E205 | | | |
| Défaillance de la régulation de pression dans la colonne (vanne de régulation PV5403 A ou B restée bloquée fermée) | Perturbation de la débutanisation Cavitation des pompes de reflux Fuite sur garniture, éjection d'une pièce mécanique | | |
| Perte de la condensation au niveau du E205 | | | |
| Défaillance de la régulation de débit de reflux vers la colonne T203 (vanne de régulation FV5406 restée bloquée ouverte) | | | |
| Défaillance de la régulation de niveau dans le ballon de reflux (vanne de régulation FV5441 A, FV5441 B ou FV5443 restée bloquée ouverte) | | | |
| Rebouillage insuffisant | | | |

Remarque : Il en est de même pour l'unité 6P et 10.

3. Unité stockage GNL

Tableau 3 : ensemble des cause et conséquences possible dans l'unité de stockage GNL (les plus létaux).

| Causes | Conséquences | PhD |
|--------|---|--------------------------|
| | Perte de confinement sur la section « Stockage du GNL » | Explosion, Feu de nuage, |

| | | |
|--|---|--|
| | Perte de confinement sur la section « Expéditions du GNL » | Feu de nappe |
| | Perte de confinement sur la section « Purge des bras de chargement de GNL » | |
| | Perte de confinement sur la section « Retour vapeur » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |

4. Unité GPL

Tableau 4 : ensemble des cause et conséquences possible dans l'unité GPL (les plus létaux).

| Causes | Conséquences | PhD |
|--------|---|---|
| | Perte de confinement sur la section « Séparation propane/butane » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe, BLEVE |
| | Perte de confinement sur la section « Stockage et réfrigération du cycle propane » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe, BLEVE |
| | Perte de confinement sur la section « Stockage et réfrigération du cycle butane » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe, BLEVE |
| | Perte de confinement sur la section « Expéditions GPL » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe |
| | Perte de confinement sur la section « Poste de chargement de camions-citernes / Réservoir de butane » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, Feu de nappe, BLEVE |
| | Perte de confinement sur la section « Production d'isobutane » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche, BLEVE |
| | Perte de confinement sur la section « Pomperie NAFTAL » | Explosion, Feu de nuage, Feu de torche |

Tableau 5 : les Source d'inflammation connus et exemples.

| N | Source d'inflammation | Exemple |
|----|---|---|
| 1 | Les surfaces chaudes | Le corps (casing) d'un appareil électrique |
| 2 | Flammes et gaz chauds | Soudage à l'arc, gaz d'échappement |
| 3 | Les étincelles mécaniques | Découpage, meulage |
| 4 | Les équipements électriques | Étincelles électriques dans les interrupteurs |
| 5 | La protection cathodique | Courants fugitifs, court-circuit à la terre |
| 6 | L'électricité statique | Décharge d'une brosse, décharge d'un morceau métallique |
| 7 | La foudre | |
| 8 | Les ondes électromagnétiques (haute fréquence ; de 10^4 à 3.10^{12} Hz) | Téléphone portable |
| 9 | Les ondes électromagnétiques (optique ; de 3.10^{11} à 3.10^{15} Hz) | Laser |
| 10 | Les radiations ionisantes | Rayons X, Rayons UV |
| 11 | Les ultrasons | Les tests ultrason |
| 12 | Compression adiabatique | Chaleur de compression |
| 13 | Réactions chimiques | Réaction exothermique |

5. Scénarios de déversement de procédé

Tableau 6 : représentation des unités est leurs composants critiques par rapport à chaque section.

| L'unité | Les Sections | Les composants |
|--------------------------------|--|---|
| Méga train | Liquéfaction | Stripper d'azote (15-MD04) Fuit de l'expandeur (15-MJ02) |
| | Fractionnement | Tambour de réinjection GPL (07-MD01) |
| | Système de réfrigération propane et mélange de frigorigène | Séparateur HP MR (16-MD08) |
| | Système frigorigène propane externe | -Tambour aspirant (20-MD02) -Tambour aspirant HP (16-MD04) |
| Unité 5P et 6P | Liquéfaction circuit MCR | Ballon D202 |
| | Liquéfaction stockage et appoint MCR | Ballon D208 |
| | Liquéfaction circuit GNT /GNL | Ballon D206A |
| | Fractionnement Deethanisation | Colonne T202 |
| | Fractionnement Débutanisations | Colonne T203 |
| Unité 10 | Liquéfaction circuit MCR | Ballon 13B01 |
| | Liquéfaction compression MCR | Compresseur MCR |
| | Liquéfaction circuit GNT /GNL | Ballon 13B13 |
| | Fractionnement | Ballon 14B01 |
| | Interconnexion hélium | Ballon 13B20 |
| Unité GPL | Séparation propane/butane | Colonne T111 |
| | Stockage et réfrigération propane | Ballon V311 Bac de stockage TK 311 |
| | Stockage et réfrigération butane | Bac de stockage TK 411 |
| | Expédition GPL | Ballon V511 |
| | Production d'isobutane -d'isobutanisation | Ballon V803 |
| Stockage GNL/Propane/Butane | GNL | Cuve de stockage GNL (71-MJ03) |
| | | Compresseur BOG (71-MF02) |
| | | Pompe de retour GNL (71-MJ06) |
| | Propane | Cuve de stockage propane (76-MF01) |
| | Butane | Cuve de stockage butane (76-MF02) |
| Unités annexes & utilités | Essence | Back de stockage 59-TK-158 Sphere de stockage |

Quantification des risques

1. Quantification de la fréquence

Le niveau de probabilité des phénomènes dangereux est déterminé selon l'échelle quantitative suivante :

Tableau 7 : l'échelle quantitative.

| Echelle | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
|------------------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| Quantitative (par unité et par an) | $F < 10^{-5}$ | $10^{-4} > F > 10^{-5}$ | $10^{-3} > F > 10^{-4}$ | $10^{-2} > F > 10^{-3}$ | $F > 10^{-2}$ |

2. Principes d'évaluation de la gravité :

De manière générale, l'objectif de la détermination de la gravité (par la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées) est d'aboutir à une évaluation du niveau de risque présenté par l'installation et en aucun cas de prévoir « qui » seront les victimes en cas d'accident.

L'évaluation du niveau de gravité nécessite l'agrégation du nombre de personnes impactées en interne et en externe. **En réalisant une synthèse de la réglementation française (arrêté du 29 septembre 2005) et la norme EN1473 (GNL), l'impact sur l'externe est majoré d'un facteur 10x.** Cette « surévaluation » des personnes extérieures est justifiée par l'absence de culture du risque, la non-connaissance des signaux d'alertes et des bonnes pratiques en matière de sécurité pour notamment se mettre à l'abri. Cette méthode représente un compromis entre la grille "SEVESO" de la réglementation française et les exigences de la réglementation algérienne. Le nombre de personnes impactées (P) se calcule de la manière suivante : **$P = PI + 10 PE$** . Par exemple, si le seuil des effets létaux significatifs touche 5 personnes en interne et 5 en externe, le nombre P à prendre en compte sera de 55, soit un niveau de gravité « catastrophique ».

Tableau 8 : Les niveau de gravité.

| Niveau de gravité | Zone délimitée par le seuil des effets létaux significatifs (SELS) | Zone délimitée par le seuil des effets létaux (SEL) | Zone délimitée par le seuil des effets irréversibles sur la vie humaine (SEI) |
|-------------------|--|---|---|
| 5. Désastreux | Plus de 100 personnes exposées | Plus de 1000 personnes exposées | Plus de 10 000 personnes exposées |
| 4.Catastrophique | Entre 10 et 100 personnes exposées | Entre 100 et 1000 personnes exposées | Entre 1 000 et 1 0000 personnes exposées |

| | | | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 3. Important | Entre 1 et 10 personnes exposées | Entre 10 et 100 personnes exposées | Entre 100 et 1 000 personnes exposées |
| 2. Sérieux | Au plus 1 personne exposée | Au plus 10 personnes exposées | Entre 10 et 100 personnes exposées |
| 1. Modéré | Aucune personne exposée | Au plus 1 personne exposée | Moins de 10 personnes exposées |

3. Hiérarchisation des risques – Positionnement de risque dans la matrice

La criticité est évaluée selon la matrice suivante :

Tableau 9 : matrice de risque.

| Gravité | Fréquence | | | | |
|--------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 (E) | 2 (D) | 3 (C) | 4 (B) | 5 (A) |
| 5. Désastreuse | MMR | NON | NON | NON | NON |
| 4. Catastrophique | MMR | MMR | NON | NON | NON |
| 3. Importante | MMR | MMR | MMR | NON | NON |
| 2. Sérieuse | | | MMR | MMR | NON |
| 1. Modérée | | | | | MMR |

Cette matrice d'acceptabilité des risques s'appuie sur la grille de criticité de la réglementation française (circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents) qui définit trois niveaux de risques :

- **Zone en rouge « NON »** : zone de risque élevé → accidents « inacceptables »
- **Zone en jaune « MMR »** : zone de Mesures de Maîtrise des Risques. Cette zone doit faire l'objet d'une démarche d'amélioration continue en vue d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, 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 zone ALARP.
- **Zone en vert** : zone de risque inférieur → accidents « acceptables », le risque est maîtrisé.

Annexe B

Travaux de recherche publiés

Bouafia A et al 2020

<https://doi.org/10.1007/s11668-020-00826-9>