

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Frères Mentouri Constantine1
Faculté des Sciences de la Technologie
Département Génie des Transports



N° de série:03/D3C/2021
N° d'ordre:01/Tr/2021



Thèse

Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3ème CYCLE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Hygiène et Sécurité Industrielle

Présentée par :

Hellas Mohamed Seddik

Thème

Contribution à l'application des techniques de l'intelligence artificielle à l'analyse quantitative des risques industriels : étude de cas

Soutenue le 06/01/2021

Devant le Jury :

Président :	Pr. KHOLAI Omar	Université Frères Mentouri Constantine1
Encadrant :	Pr. CHAIB Rachid	Université Frères Mentouri Constantine1
Examinateur :	Pr. BENRETEM Abdelouaheb	Université Badji Mokhtar Annaba
Examinateur :	Pr. HEROUS Lazhar	Université Badji Mokhtar Annaba
Examinateur :	Dr (MCA). BOUYAYA Linda	Université Frères Mentouri Constantine1

Dédicace

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

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

À tous ceux qui me sont cher(e)s . . .

À mes enseignant(e)s . . .

- Mohamed Seddik -



Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de l'équipe de laboratoire ingénierie des transports et environnement université de Constantine 1.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et toute ma gratitude à Monsieur **CHAIB Rachid**, Professeur au département génie de transport Constantine1, qui m'a fourni une aide inestimable et sans lui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. J'espère qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude la plus distinguée.

Je tiens également à remercier Monsieur **KHOLLAI Omar**, Professeur à l'université de Frères Mentouri Constantine 1, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Je présente mes vifs remerciements aux membres du jury de soutenance de cette thèse de doctorat, à savoir :

Monsieur **BENRETEM Abdelouhab**, Professeur à université de Badji Mokhtar, Annaba, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Monsieur **HEROUS Lazha**, Professeur à l'université de Badji Mokhtar, Annaba d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Madame **Bouyaya Linda**, Docteur (MCA) à l'université Frères Mentouri Constantine1 d'évaluer ce travail.

Je voudrais, en particulier, exprimer ma reconnaissance au professeur **Zoulai Sabrina**, diplômée de L'école Normale Supérieure de Bouzareah, pour son aide, son soutien et ses encouragements continus.

Il me reste à remercier toutes les personnes m'ayant - directement ou indirectement, scientifiquement et/ou moralement - aidé et encouragé pendant la réalisation de cette thèse.

Contribution à l'application des techniques de l'intelligence artificielle à l'analyse quantitative des risques industriels : étude de cas

Résumé--Actuellement, le monde industriel est devenu plus sensible à la maîtrise des accidents majeurs à cause des conséquences graves et même catastrophiques matérielles, humaines et environnementales. Pour cela des efforts considérables sont fournis en matière de gestion des risques afin de prévenir ces accidents. Or, comme notre économie nationale est basée sur l'industrie des hydrocarbures à niveau de risques très élevés, où sont traités, stockés et transportés de grandes quantités de liquides et de produits gazeux inflammables, explosifs et toxiques, etc., la menace d'un accident est toujours imminente, voire aucun espace est à l'abri des catastrophes liées aux installations complexes industrielles pétroliers et gazières. A titre d'exemple, on peut citer l'explosion catastrophique du complexe de liquéfaction de Skikda en janvier 2004 qui a fait en plus de dégâts matériel très important, 27 morts et 73 blessés sans compter la psychose installée dans les habitants et les riverains. Afin de maîtriser ces phénomènes, plusieurs techniques et modèles mathématiques de prédiction des risques ont été développés. Parmi ces méthodes, nous retrouvons l'analyse quantitative des risques (QRA) ; cette dernière est une approche rigoureuse et se révèle indispensable pour une bonne estimation et gestion des risques industriels. Elle consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels, à estimer leurs fréquences et à analyser leurs conséquences. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et, par conséquent, d'étudier et de mettre en œuvre des mesures efficaces qui répondent adéquatement à cette estimation. Dans certains cas, les données peuvent être disponibles et connues avec précision en se référant au retour d'expérience. Cependant, ces données ne sont pas toujours adaptées pour l'analyse d'événements rares et souvent complexes tels que, les accidents majeurs pour lesquels les données statistiques ne sont pas satisfaisantes. Les banques de données et les jugements d'experts sont une autre source fournissant des données utilisées par les méthodes d'analyse des risques, mais qui sont aussi entachées d'incertitude et d'imprécision. Approche floue peut offrir un cadre très adéquat pour la représentation et le traitement de ces aspects incertains et/ou imprécis

Mots-clés : Mots clés: Incertitude, Réduction des risques, Techniques floues et possibilité, Contours de la mort, QRA flou.

Contribution to the application of artificial intelligence techniques in quantitative risk analysis: case study

Abstract---Today, the industrial world has become more sensitive to the control of major accidents because of the serious and even catastrophic material, human and environmental consequences. For this, considerable efforts are made in terms of risk management in order to prevent these accidents. However, as our national economy is based on the very high risk hydrocarbon industry, where large quantities of flammable, explosive and toxic liquids and gaseous products, etc., are processed, stored and transported, the threat of an accident is always imminent, even no space is safe from disasters associated with complex oil and gas industrial installations. As an example, we can cite the catastrophic explosion of the Skikda liquefaction complex in January 2004, which in addition caused very significant material damage, 27 deaths and 73 injuries, not to mention the psychosis installed in the inhabitants and residents.

In order to control these phenomena, several techniques and mathematical models of risk prediction have been developed. Among these methods, we find quantitative risk analysis (QRA); the latter is a rigorous approach and is essential for a good estimation and management of industrial risks. It mainly consists of identifying potential accident scenarios, estimating their frequencies and analyzing their consequences. The purpose is to estimate individual and societal risks and, therefore, to study and implement effective measures that adequately respond to this estimate. In some cases, the data may be available and known with precision by referring to experience feedback. However, these data are not always suitable for the analysis of rare and often complex events such as major accidents for which the statistical data are not satisfactory. Databases and expert judgments are another source that provides data used by risk analysis methods, but which is also fraught with uncertainty and imprecision. Fuzzy approach can offer a very adequate framework for the representation and treatment of these uncertain and / or imprecise aspects.

Keywords: Uncertainty, Risk reduction, Fuzzy techniques and possibility, Death contours, Fuzzy QRA.

المساهمة في تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في التحليل الكمي للمخاطر الصناعية: دراسة حالة

ملخص- أصبح العالم الصناعي اليوم أكثر حساسية للسيطرة على الحوادث الكبرى بسبب العواقب الخطيرة بل وحتى الكارثية (المادية والبشرية والبيئية). ولهذا السبب، تبذل جهود كبيرة في مجال إدارة المخاطر لمنع هذه الحوادث. ولكون اقتصادنا الوطني يستند إلى صناعة الهيدروكربون شديدة الخطورة، حيث يتم معالجة كميات كبيرة من السوائل والغازات القابلة للاشتعال والمتفجرة والسامة وتخزينها ونقلها، وما إلى ذلك، فإن خطر وقوع حادث دائم ما يكون موجود ، فلا يوجد مجال محمي من الكوارث المرتبطة بمرافق النفط والغاز . ومن الأمثلة على ذلك الانفجار المأساوي الذي وقع في مجمع سكيكدة لتكرير النفط في يناير/كانون الثاني 2004، والذي تسبب بأضرار مادية وفي مقتل 27 شخصاً وإصابة 73 آخرين، ناهيك عن الجانب النفسي للقاطنين والمقيمين. ولتحكم في هذه الظواهر الخطرة، تم تطوير العديد من التقنيات والنماذج الرياضية للتنبؤ بالمخاطر. وتشمل هذه الأساليب تحليل الكمي للمخاطر الذي يعتبر نهج صارم، وهو أمر ضروري لتقدير المخاطر الصناعية وإدارتها بشكل جيد. وهو يتضمن أساساً تحديد سيناريوهات الحوادث المحتملة، وتقدير مدى تكرارها وتحليل نتائجها. والهدف من ذلك هو تقدير المخاطر الفردية والمجمعية، وبالتالي دراسة وتنفيذ تدابير فعالة تعالج هذا التقدير على نحو ملائم. في بعض الحالات، قد تكون البيانات متوفرة ومعروفة بدقة بالرجوع إلى تجربة الخبراء. غير أن هذه البيانات لا تكون مناسبة دائماً لتحليل الأحداث النادرة والمعقدة في كثير من الأحيان مثل الحوادث الكبرى التي لا تكون البيانات الإحصائية كافية لها. إن بنوك البيانات والأحكام التي يصدرها الخبراء تشكل مصدراً آخر للبيانات المستخدمة في أساليب تحليل المخاطر، ولكنها أيضاً يغلب عليها عدم اليقين وعدم الدقة. وقد يوفر النهج الغامض إطاراً كافياً جداً لتمثيل ومعالجة هذه الجوانب غير المؤكدة و/أو غير الدقيقة.

كلمات دلالية عدم اليقين ، تقليل المخاطر ، نظرية التهج الغامضة و لامكانية ، ملامح الموت ، QRA الضبابي.

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumés	iii
Table des matières	vi
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Nomenclature et acronymes	xii
Introduction générale	1
Problématique	2
Objectifs de la thèse	4
Structure de la thèse	5
1 État de l'art et importance l'hygiène et sécurité dans les sites industriels	6
1.1 Introduction	7
1.2 Cadre conceptuel des risques industriels	8
1.3 Définition et typologie du risque industriel	8
1.3.1 Du danger au risque	8
1.3.2 Qu'est-ce qu'un risque industriel ?	10
1.4 Typologie de risque industriel	11
1.5 Les accidents industriels survenus dans le monde	12
1.6 Les installations industrielles à haut risque en Algérie	15
1.7 Le retour d'expérience des accidents industriels du secteur pétrolier et leurs sur la santé et l'environnement en Algérie	19
1.8 Importance de l'hygiène et la sécurité industrielle	21
1.9 Conclusion	21
2 Evaluation quantitative de l'effet thermique et surpression	23
2.1 Introduction	24
2.2 Concepts et définitions	24
2.3 Le BLEVE	26
2.3.1 Processus de réalisation du BLEVE	26
2.3.2 Modalisation l'effet de BLEVE	27
2.3.3 Calcul du flux rayonne reçu par la cible	28
2.3.3.1 Facteur de transmissivite atmospherique	28
2.3.3.2 Le pouvoir émissif boule de feu (Fireball)	29
2.3.3.3 Facteur de forme	30
2.4 Explosion	31
2.4.1 Description du phénomène	31
2.4.2 Accélération des flammes et effets de pression	32
2.4.3 Les Causes d'un VCE	33
2.4.4 Modélisation des effets de surpression	34
2.4.4.1 Méthode Basée Sur L'équivalence TNT(Trinitrotoluène)	34
2.4.4.2 La Méthode Multi-Energie	35
2.4.4.3 Strehlow-Baker	40
2.4.5 Exemples Application	43
2.5 Conclusion	46
3 Analyse Quantitative du Risque (QRA)	47
3.1 Introduction	48
3.2 Objectifs de l'analyse quantitative des risques	48
3.3 Méthodologie d'analyse quantitative des risque	49
3.4 Collecte des informations pertinentes	51
3.5 Identification des scénarios d'accidents	51
3.6 Analyse de fréquence	54
3.6.1 Arbre de défaillance (AdD)	54
3.6.2 Arbre d'événement (AdE)	54
3.6.3 Combinaison de l'analyse de défaillance et d'arbre d'événements	57

3.7 Analyse des conséquences	57
3.7.1 Analyse de probit	58
3.7.2 Abaque pour déterminer la probabilité de mort ou de bris de verre à l'effet de surpression par deux méthodes : TNT et TNO Multi-Energy	62
3.7.3 Seuils de vulnérabilité	68
3.8 Estimation du risque individuel et sociétal	71
3.8.1 Risque individuel.....	71
3.8.2 Risque sociétal	74
3.9 Critères d'acceptabilité du risque	76
3.9.1 Critère de Farmer	76
3.9.2 La méthode ALARP	77
3.10 Réduction de risque	79
3.11 Application de QRA classique dans le site de Constantine	80
3.11.1 Collecte d'informations pertinentes	80
3.11.2 Identification du scénario de danger.....	81
3.11.3 Estimation de la fréquence des événements déclencheurs et développement des AdEs	81
3.11.4 Analyse des conséquences	83
3.11.5 Estimation du risque individuel.....	86
3.11.6 Estimation du risque sociétale	87
3.12 Limiter de la méthode QRA	87
3.13 Conclusion	88
<hr/>	
4 Approche floue d'Analyse Quantitative de Risque (QRA)	90
4.1 Introduction	91
4.2 Concept d'incertitude	91
4.3 Modèles de traitement de l'incertitude	91
4.3.1 Théorie des probabilités	91
4.3.1.1 Définition et propriétés	92
4.3.1.2 Limitations de la théorie des probabilités	92
4.3.2 La théorie des ensembles flous.....	93
4.3.2.1 Variable linguistique	93
4.3.2.2 Propriétés d'un ensemble flou.....	94
4.3.2.3 Fonctions d'appartenance.....	95
4.3.2.4 Opérations sur les ensembles flous	97
4.3.2.5 Notion d α -coupe	99
4.3.2.6 Opérations arithmétiques sur les nombres flous	100
4.4 Applications de la théorie des ensembles flous à l'analyse des risques	100
4.4.1 Analyse de modes de défaillances et leurs effets floue	100
4.4.2 Arbre de défaillances (AdD) floue	100
4.4.3 Analyse des couches de protection (LOPA) floue	101
4.4.4 Graphe de risque étalonné floue.....	101
4.4.5 La Grille de criticité floue	103
4.5 Analyse quantitative de risque floue	104
4.5.1 Evaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents	106
4.5.2 Evaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents	107
4.5.3 Risque individuel et sociétal floue	108
4.5.3.1 Risque individuel floue	108
4.5.3.2 Risque sociétal floue	109
4.6 Exemple application la méthode LOPA floue dans four rebouilleur	109
4.7 Conclusion	119
<hr/>	
5 Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel	120
5.1. Introduction	121
5.2. Collecte des informations pertinentes	121
5.2.1 Situation géographique.....	121

Table des matières

5.2.2 Données Météorologiques	123
5.2.3 Données techniques sur le processus ou le système analysé	124
5.2.4 Données physico-chimiques des produits	126
5.3. Identification des scénarios d'accidents	127
5.4. Analyse des fréquences floues.....	129
5.5. Analyse des conséquences et leurs effets floues.....	132
5.5.1 Modélisation des effets de boule de feu floue	134
5.5.2 Modélisation des effets de surpression floue.....	137
5.6. Estimation de risque individuel floue	139
5.7. Evaluation de risque.....	139
5.8. Conclusion	140
Conclusion générale et perspectives	141
Références bibliographiques.....	145
Travaux de recherche publiés	151

Figure 1.1 : Définition du risque	10
Figure 1.2 : Répartition des installations industrielles dangereuses selon la wilaya et la nature du risque industriel en Algérie	16
Figure 1.3 : Répartition des accidents industriels au sein des activités et filiales de la Sonatrach.....	19
<hr/>	
Figure 2.1 : Processus de réalisation du BLEVE	27
Figure 2.2 : Représentation schématique de la boule de feu	30
Figure 2.3 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion Accidentelle de gaz.....	31
Figure 2.4 : Mécanismes d'accélération d'une flamme par les instabilités de flamme et la turbulence.....	33
Figure 2.5 : La surpression en fonction de la distance réduite (TNT).....	35
Figure 2.6 : Arbre de décision pour le choix d'un indice Multi-Energie.....	38
Figure 2.7 : La surpression en fonction de la distance réduite (TNO)	40
Figure 2.8 : La surpression en fonction de la distance réduite (BST)	42
Figure 2.9 : Conception de sphère de LPG	44
Figure 2.10 : La surpression par deux méthodes TNT et TNO	45
<hr/>	
Figure 3.1 : Principales étapes d'une analyse quantitative des risques	50
Figure 3.2 : HAZOP	53
Figure 3.3 : Exemple d'une structure d'arbre de défaillance.....	54
Figure 3.4 : Schéma d'un arbre d'évènement.....	55
Figure 3.5 : Combinaison de AdD/AdE	57
Figure 3.6 : Relation entre la variable probit et le pourcentage d'atteinte.....	61
Figure 3.7 : Une nouvelle façon de déterminer la probabilité de décès dû à l'effet d'une surpression	62
Figure 3.8 : Abaque d'une explosion obtenue à partir de la relation surpression - probabilité de mort –probabilité de mort ou dommages matériels et distance réduite.....	64
Figure 3.9 : Abaque général de la probabilité de décès et des dommages matériels par la méthode TNO	65
Figure 3.10 : Abaque général de la probabilité de décès et des dommages matériels par la méthode TNT	65
Figure 3.11 : Probabilité de mort ou de dommage matériel par effet de surpression	66
Figure 3.12 : Les contours de probabilité de mortalité et dommages matériels par méthode TNT et TNO	68
Figure 3.13 : Procédure de calcul des contours de risque individuel	73
Figure 3.14 : Courbe et contour risque individuel	74
Figure 3.15 : Procédure de calcul la courbe de risque sociétal F-N	74
Figure 3.16 : Exemple d'une courbe F-N	75
Figure 3.17 : Diagrammes probabilité-conséquence	76
Figure 3.18 : Principe ALARP	79
Figure 3.19 : Réduction de risque	80
Figure 3.20 : Sphères de stockage GPL	81
Figure 3.21 : Arbre des événements liés aux sphères (Bu 1, 2).....	82
Figure 3.22 : Arbre des événements liés aux sphères (Pro 1, 2).....	82
Figure 3.23 : Arbre d'événements lié à la sphère (Pro 3)	82
Figure 3.24 : Courbe et contour de probabilité de létalité ou de blessure due aux effets thermiques de Fireball.....	83
Figure 3.25 : Contour et courbe des différentes zones d'endommagement de Fireball par les effets thermiques	84
Figure 3.26 : Contour de mortalité par VCE	85
Figure 3.27 : Contour d'endommagement par VCE	85
Figure 3.28 : Courbe et contour de risque individuel totale	86
Figure 3.29 : Le risque sociétal survient le jour	87
Figure 3.30 : Le risque sociétal survient la nuit	87
<hr/>	
Figure 4.1 : Exemple d'une variable linguistique avec trois termes linguistique.....	94

Liste des figures

Figure 4.2 : Présentation de quelques fonctions d'appartenance	96
Figure4.3 : Le complément.....	97
Figure4.4 : L'intersection	98
Figure4.5 : Union	98
Figure 4.6 : Description d'un ensemble flou triangulaire par ses –coupes	99
Figure 4.7 : Graphe de hiérarchisation du risque.....	102
Figure 4.8 : Surface floue et matrice de risque classique	104
Figure 4.9 : Ensemble classique et ensemble flou	105
Figure 4.10 : Analyse quantitative de risque flou	106
Figure 4.11 : LOPA floue	109
Figure 4.12 : Four Rebouilleur H-101.....	110
Figure 4.13 : Schéma de canalisation et d'instrumentation du Four rebouilleur H-101	111
Figure 4.14 : Fréquences des évènements initiateurs floue.....	114
Figure 4.15 : PFD floue.....	115
Figure 4.16 : Les scénarios d'accidents flous	116
Figure 4.17 : Les fréquences de chaque scénario en terme floue.....	117
Figure 4.18 : Réduction du risque par l'utilisation d'une fonction de sécurité faiblement sollicitée	118
Figure 4.19 : Mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction.....	118
<hr/>	
Figure 5.1 : Emplacements sur le champ d'In Amenas	122
Figure 5.2 : Le CPF	123
Figure 5.3 : les bacs de stockage GPL	125
Figure 5.4 : Bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A	126
Figure5.5 : Paramètres flous de QRA	130
Figure 5.6 : Arbre d'événement de scénario d'accident (1).....	130
Figure 5.7 : Arbre d'événement de scénario d'accident (2).....	131
Figure 5.8 : Fréquence floue des conséquences des scénarios d'accident	131
Figure 5.9 : Distance floue de probabilité du brûleur 100% par l'effet thermique.....	136
Figure 5.10 : contour de distance floue de probabilité de brûleur 100% par l'effet thermique	136
Figure 5.11 : Distance floue de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE.....	137
Figure 5.12 : Contour floue de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE.....	138
Figure 5.13 : Courbes et contours de risque individuel flou totale	139

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 2003-2014.....	13
Tableau 1.2 : Répartition des installations industrielles dangereuses selon la wilaya et la nature du risque en 2006.....	16
Tableau 1.3 : Les accidents industriels survenus au sein des activités et filiales de la Sonatrach en 2008.....	18
Tableau 2.1 : l indice de violence et leur surpression maximale	37
Tableau 2.2 : Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Kinsella., 1993).....	39
Tableau 2.3 : correspondance entre les conditions d'explosion et les vitesses de flamme (exprimées en Nombre de Mach) ou surpressions aériennes maximum selon (Baker et al., 1996).....	42
Tableau 2.4 : Caractéristiques des sphères GPL	44
Tableau 3.1 : HAZOP	53
Tableau 3.2 : Les évènements initiateurs /Fréquences des conséquences.....	56
Tableau 3.3 : La probabilité de défaillance recommandée	57
Tableau 3.4 : Corrélations probit pour différents types d'exposition.....	61
Tableau 3.5 : Relation entre la variable probit et le pourcentage.....	61
Tableau 3.6 : La probabilité de décès ou de dommage matériel selon la méthode TNT	67
Tableau 3.7 : La probabilité de décès et dommage matériel selon la méthode TNO	67
Tableau 3.8 : les seuils d'effets thermiques sur les structures	69
Tableau 3.9 : Les seuils d'effets thermiques sur l'homme.....	69
Tableau 3.10 : les seuils d'effets de surpression sur les structures	70
Tableau 3.11 : les seuils d'effets de surpression sur l'homme.....	71
Tableau 3.12 : Les deux limites de la région ALARP	78
Tableau 3.13 : Limite haute, morts/ an (une seule limite est définie)	78
Tableau 3.14 : Données météorologiques de Constantine	81
Tableau 3.15 : Probabilité d'inflammation / Fréquence des événements initiateurs	82
Tableau 3.16 : Les fréquences des conséquences des scénarios d'accident	83
Tableau 3.17 : Effet thermique sur les biens, les personnes et leur rayon de chaque sphère	84
Tableau 3.18 : Effet de la surpression sur les biens, les personnes et leur rayon de chaque sphère	86
Tableau 4.1 : Feuille de présentation HAZOP	113
Tableau 4.2 : Fréquences des évènements initiateurs floues.....	114
Tableau 4.3 : PFD floue.....	115
Tableau 4.4 : Le SILs selon le mode de fonctionnement des fonctions ou systèmes de sécurité	118
Tableau 4.5 : Mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction	119
Tableau 5.1 : Données Météorologiques d'In Amenas	124
Tableau 5.2 : Caractéristiques du Bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A/B/C/D	126
Tableau 5.3 : Caractéristique physico-chimiques de propane.....	127
Tableau 5.4 : Application la Méthode HAZOP : Cas du paramètre de pression.....	128
Tableau 5.5 : Probabilité de défaillance de la barrière et probabilité d'allumage.....	129
Tableau 5.6 : Niveaux α des intervalles des fréquences floues	132
Tableau 5.7 : Les différentes équations probit et leurs doses en termes flou	133
Tableau 5.8 : Intensité thermique floue reçue par la personne.....	135
Tableau 5.9 : α -crite de distance floue de probabilité de brûleur 100% par l'effet thermique (Fireball).....	137
Tableau 5.10 : α -niveau de distance floue de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE	138
Tableau 5.11 : α -niveau de risque individuel flou totale	139

Lettres romaines

I	Flux reçu par la cible.....	(kW/m ²)
E	Pouvoir émissif de la flamme	(kw/m ²)
F _{view}	Facteur de forme	(-)
τ _a	Facteur de transmissivité atmosphérique	(-)
f _s	Faction de chaleur émise par radiation.....	(-)
R̄	La distance réduite pour TNO Multi-Energy	(-)
Z	La distance réduite pour TNT	(m/kg ^{1/3})
N _i	Le nombre de décès suite au scénario d'accidents 'i'	(-)
P _{xy}	Le nombre de personnes exposées au danger à l'endroit (x, y)	(-)
P _{Fi}	Laprobabilité que le scénario d'accidents 'i' entraîne un décès à l'endroit (x, y).....	(-)
X(H ₂ O)	Coefficients d'absorption de la vapeur d'eau	(-)
X(CO ₂)	Coefficients d'absorption du dioxyde de carbone.	(-)
r _b	Rayon de boule de feu	(m)
d	Distance de la cible à la source	(m)
H _b	Hauteur de boule de feu	(m)
RH	Taux d'humidité relative de l'air	(%)
t _b	Durée de boule de feu	(s)
M	Masse d'hydrocarbure	(Kg)
M _{TNT}	Masse de TNT	(Kg)
P _{Sat}	Pression d'éclatement (saturates burst pressure).	(N/m ²)
P ₀	La pression atmosphérique en Pascal (P ₀ = 101000 Pa)	(Pa)
R	La distance entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en	(m)
E _x	L'énergie de combustion dans le mélange air-carburant	(J)
ΔH _C	La chaleur de combustion	(J / kg)
IR _{x, y}	Le risque individuel total à l'endroit géographique (x, y),	(y ⁻¹)
IR _{x, y, i}	Le risque individuel à l'endroit géographique suite à un scénario d'accident 'i'	(y ⁻¹)
f _{C, i}	La fréquence d'occurrence du scénario d'accident 'i'	(y ⁻¹)
F _N	La fréquence de tous les scénarios d'accidents avec N ou plus de morts	(y ⁻¹)

Acronymes

AdD	Arbre de défaillance
AdE	Arbre d'événement
ARH	Autorité de Régulation des Hydrocarbures
ALARP	As Low as Reasonably Practicable
API	American Petroleum Institute
AMDE	Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets
BIT	Bureau International du Travail

BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
BT	Strehlow-Baker
BR	Blockage Ratio
BWP	Breakage of Window Panes
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CPF	Central Processing Facility
CSTF	centre de stockage et de transfert facile
DNV	Det Norske Veritas
ER	Eardrum Rupture
EUC	Equipment Under Control
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HAZOP	Hazard and Operability
HSE	Health and Safety Executive
INERIS	L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
IA	l'intelligence artificielle
IE	Initiating Event
IPL	Independent Protection Layers
IR	Individual Risk
QRA	Quantitative Risk Analysis
LIE	Limite Inférieure d'Explosivité
LES	Limite Supérieure d'Explosivité
LOPA	Layers Of Protection Analysis
ORED	Offshore onshore Reliability Data
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PV	Pressure Valve
PSV	Pressure Safety Valve
PIC	Pressure Indicator Controller
PFH	Probabilité de défaillance dangereuse par heure
PHAST	Process Hazard Analysis Software Tool
PFDD	Probabilité de défaillance à la demande
PSC	Production Sharing Contract
RRF	Facteur de Réduction de Risque
SR	Societal Risk
SIL	Safety Integrity Level
SDV	Shut Down Valve
TNT	Trinitrotoluène
TRC	Transport par Canalisations
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
VCE	Vapor Cloud Explosion

Introduction Générale

Sommaire

Problématique	2
Objectifs de la thèse	4
Structure de la thèse	5

1. Problématique

Confrontés à des dangers multiples, les industriels ont tout intérêt à recenser l'ensemble des situations qui peuvent mettre en péril leur organisation. Ainsi, à des proportions différentes, la société humaine est toute exposée à une multitude de risques, résultat« d'interactions complexes entre la société et l'environnement». La survenue de différentes catastrophes met bien en évidence la complexité de ces interactions et l'ampleur des conséquences qui peuvent en découler. Certains risques sont susceptibles d'engendrer des conséquences graves sur la société, les biens et les personnes, d'autres peuvent engendrer des dépenses grandioses inutilement. Les conséquences humaines, financières et juridiques engendrées de ces dysfonctionnements sont majeures pour la société, les entreprises et leur personnel. Ces conséquences se traduisent par la perte des journées de travail, estimés entre 3 et 4% du produit intérieur brut (PIB). Par conséquent, la prévention des risques professionnels constitue un enjeu crucial et concerne toutes les entreprises, quelle que soit leur taille et leur activité. De ce fait, nous disons que la nécessité de réduire les risques et d'offrir un environnement de travail sûr constitue un principe fondamental de la gestion des entreprises. Or, comme le risque est une notion dynamique d'éventualité, son évaluation devrait être effectuée pour toute activité, tâche, processus, etc. avant que l'activité ne commence. C'est le premier principe de précaution et la première démarche de prévention.

Ainsi, toutes activités sur un site industriel génèrent des risques qui se retrouvent sous le vocable de « risques industriels ». Ces derniers sont la conséquence du fonctionnement habituel de l'entreprise qu'il ne faut pas sous-estimer : leur gestion s'impose pour toute entreprise. En conséquence, toute entreprise quel que soit sa taille et son secteur d'activité doit respecter ses obligations en matière de santé et de sécurité au travail. Elle doit travailler en toute transparence dans le cadre de la réglementation et de son nécessaire respect, les procédures de normalisation et de certification peuvent aussi concourir à la fiabilité des systèmes de veille et de contrôle.

Parmi ces accidents, ceux qui ont été les plus importants par le nombre de victimes et les dégâts causés sont appelés majeurs, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société et sont souvent restés dans la mémoire de l'humanité, plusieurs générations, voire plusieurs siècles après. On les appelle également catastrophes, par suite de la gravité de leurs conséquences sur les hommes et l'environnement.

Ces accidents à caractère catastrophique sont :

- Soit un phénomène naturel défini comme un risque naturel, il implique l'exposition des populations humaines et de leurs infrastructures à un événement catastrophique d'origine naturelle. Avalanche, feu de forêt, inondation, mouvements de terrain, cyclone, tempête, séisme et éruption volcanique. Un risque naturel est donc la rencontre entre un aléa d'origine naturelle et des enjeux humains, économiques ou environnementaux.

- Soit encore des événements provoqués directement ou indirectement par les hommes, appelés technologiques défini comme risque anthropique ; il se caractérise par un accident lié à une activité humaine (exemples : site industriel, canalisations de transport de matières dangereuses...) et pouvant entraîner des conséquences graves pour le personnel, les populations, les biens, l'environnement ou le milieu naturel. Ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, rupture de barrage ...

Parmi ces accidents majeurs, un grand nombre est d'origine industrielle et a pour siège, les usines et les ateliers de fabrication et de stockage. Certains accidents majeurs apparaissent lors du transport de matières dangereuses mais, comme les transports de produits font partie intégrante des processus industriels, ils seront traités comme des accidents industriels majeurs.

Désormais, les sociétés pétrolières et gazières génèrent des niveaux de risques élevés car elles traitent et stockent de grandes quantités de liquides et de produits gazeux inflammables, explosifs et toxiques. En fait, aucun pays n'est à l'abri des catastrophes liées aux installations industrielles de complexes pétroliers et gaziers où plusieurs expériences tragiques ont causé d'importantes pertes humaines, matérielles et environnementales. Par conséquent, l'importance d'un suivi rigoureux des procédures de gestion et du strict respect des mesures de sécurité industrielle sont nécessaires pour assurer non seulement la fiabilité des installations elles-mêmes mais aussi pour protéger les ressources humaines. Localement, l'explosion catastrophique du complexe de liquéfaction de Skikda en janvier 2004 a fait 27 morts et 73 blessés et a révélé de nombreuses faiblesses dans la prévention des risques dans nos entreprises nationales.

Afin de maîtriser ces phénomènes, plusieurs techniques et modèles mathématiques de prédiction des risques ont été développés. Parmi ces méthodes, nous retrouvons l'analyse quantitative des risques (QRA). Cette dernière est une approche rigoureuse et se révèle indispensable pour une bonne estimation et gestion des risques industriels. Elle consiste

principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels, à estimer leurs fréquences et à analyser leurs conséquences. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et, par conséquent, d'étudier et de mettre en œuvre des mesures efficaces qui répondent adéquatement à cette estimation (Hellas et Chaib., 2018d).

Désormais, l'approche QRA constitue un outil efficace d'analyse des risques et d'évaluation des scénarios d'accidents industriels. Cependant, son efficacité dépend de la disponibilité, des données de qualité et des informations subjectives collectées lors de sa mise en œuvre, souvent non représentatives (faible retour d'expérience), et même si ces données sont disponibles, elles doivent être adaptées à l'équipement ou au système étudié et à son fonctionnement, conditions pour pouvoir les utiliser (CCPS., 2000 ; Simon *et al.*, 2007). À cela, s'ajoute le problème de l'imperfection des informations (incertitude et imprécision) qui les ternit.

Et si ces données sont fournies par des jugements d'experts et des banques de données spécialisées, une subjectivité et une incertitude inévitables dans l'évaluation des différents paramètres des scénarios d'accident subsistent, car il semble illusoire d'envisager une précision absolue des données quel que soit leur type (valeur unique ou intervalle large) et cachez le problème en ne considérant que la valeur moyenne géométrique ou arithmétique par exemple.

Ainsi, le QRA et les autres outils analytiques classiques sont basés sur des modèles mathématiques issus de la logique binaire : les états de défaillance et de fonctionnement des composants sont distingués avec précision, les taux de défaillance sont précis et par conséquent, une seule valeur d'estimation du risque est obtenue. Cette valeur est souvent assez prudente car elle est basée sur le principe du « cas défavorable ». Cependant, la variabilité des taux de défaillance et des paramètres physiques et environnementaux, ainsi que les différentes hypothèses concernant les modèles mathématiques utilisés, sont souvent incertaines et subjectives. Ainsi, dans un QRA, chaque étape, qu'elle soit qualitative (identification des scénarios d'accidents potentiels) ou quantitative (estimation des probabilités et des conséquences), est une source potentielle d'incertitude. Cela sera identifié. Le présent travail vise à apporter des éléments de réponse à la problématique des incertitudes inhérente à un QRA conventionnel, en utilisant des outils issus de la théorie des ensembles flous et de celle des possibilités.

2. Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse étant de contribuer à la résolution de certains aspects problématiques de l'évaluation et de la réduction des risques inhérents aux systèmes industriels en présence d'informations incomplètes et/ou incertaines. Des modèles issus des techniques floues et possibilistes sont proposés.

Dans ce contexte, nous avons développé une nouvelle approche QRA floue basée sur la logique floue pour analyser, évaluer et réduire les risques majeurs inhérents à l'industrie pétrolière. Ces modèles prennent en compte la fréquence des conséquences, la gravité des conséquences et le niveau de risque individuel et sociétal. Les résultats des modèles flous sont très encourageants, les valeurs de risque sont plus précises que celles indiquées par les QRA classiques.

3. Structure de la thèse

Le présent manuscrit de thèse comporte cinq chapitres :

- ❖ **Le premier chapitre** a pour objectif de décrire l'état de l'art et l'importance de l'hygiène et la sécurité industrielle dans une entreprise.
- ❖ **Le deuxième chapitre** est consacré aux concepts et définitions fondamentaux liés aux incendies et explosions. Pour ensuite, expliquer comment l'explosion et l'incendie se produisent ainsi que l'approche analytique de modélisation de l'effet thermique et de surpression.
- ❖ **Le troisième chapitre** a pour objectif de présenter un état de l'art sur l'analyse quantitative des risques. Dans un premier temps, nous commençons d'abord par présenter les objectifs d'une étude QRA, puis discuter le déroulement de l'approche quantitative en décrivant ses différentes étapes tout en exposant ses avantages et ses limites.
- ❖ **Le quatrième chapitre** est consacré aux théories de représentation et de traitement des données incertaines et/ou imprécises, à savoir : la théorie des probabilités, la théorie des ensembles flous et des possibilités. Nous terminons le chapitre par la présentation de quelques approches d'application de la théorie des ensembles flous à l'analyse et à l'évaluation des risques.
- ❖ **Le cinquième chapitre** présentera la mise en œuvre de l'approche "QRA floue" avec une comparaison avec les résultats de QRA conventionnelle.
- ❖ Enfin la thèse est couronnée une conclusion générale décrivant les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives envisagées.

État de l'art et importance de l'hygiène et de la sécurité dans les sites industriels

Sommaire

1 État de l'art et importance l'hygiène et sécurité dans les sites industriels	6
1.1 Introduction	7
1.2 Cadre conceptuel des risques industriels	8
1.3 Définition et typologie du risque industriel	8
1.3.1 Du danger au risque	8
1.3.2 Qu'est-ce qu'un risque industriel ?	10
1.4 Typologie de risque industriel	11
1.5 Les accidents industriels survenus dans le monde	12
1.6 Les installations industrielles à haut risque en Algérie	15
1.7 Le retour d'expérience des accidents industriels du secteur pétrolier et leurs sur la santé et l'environnement en Algérie	19
1.8 Importance de l'hygiène et la sécurité industrielle	21
1.9 Conclusion	21

1.1 Introduction

Tous le temps les personnes ont été en permanence confrontées aux risques et dangers, qu'ils soient naturels ou technologiques, légers ou graves, qui les ont profondément marqués. Parmi ces accidents, ceux qui n'ont pas été les plus importants par le nombre et sont souvent restés dans leur mémoire sur plusieurs générations, voire plusieurs siècles. Par conséquent, les concepts de danger et de risque sont difficiles à cerner car ce sont des variables qui s'imbriquent étroitement.

À l'origine de tout événement, même mineur, il existe un risque ou danger qui sous certaines conditions peut conduire un accident grave. Les risques majeurs sont à l'origine des accidents majeurs, parmi ces derniers, un grand nombre est d'origine industrielle qui a pour siège les usines, les ateliers de fabrication et les aires de stockage des différents produits chimiques tel que 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 chimique et le risque de pollution.

L'analyse, la prévention et la maîtrise des risques industriels est nécessaire afin de limiter l'ampleur de leurs l'impact. Concernant l'analyse, pendant longtemps elle a été une histoire d'étude et de quantification puis d'entretien et de réparation. Quant à la prévention, elle fait appel à des mesures techniques et administratives qui, en réalité, se complètent par une importante législation tant nationale qu'internationale. À cet effet, de nombreuses règles de sécurité sont rendues obligatoires afin de réduire la probabilité des accidents importants et de limiter l'ampleur des dégâts occasionnés.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps donner quelques concepts et définitions liés à la gestion des risques tout en présentant un ensemble d'événements accidentels survenus entre 2003 et 2014. Une brève description de chaque accident est présentée avec quelques détails sur les dommages humains et matériels causés. L'objectif principal de ce chapitre est de dévoiler l'importance à l'intégration de l'hygiène et de la sécurité industrielle dans les sites industriels.

1.2 Cadre conceptuel des risques industriels

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 de risques.

Les substances dangereuses utilisées par ces industries, ainsi que les processus de fabrication, de manipulation ou de transport de ces produits génèrent de phénomènes dangereux. Parmi ces substances, on trouve les hydrocarbures. Ces derniers sont constitués de carbone et d'hydrogène. Ces matières sont inflammables et elles présentent des risques pour la santé, les biens et l'environnement.

Désormais, gérer une entreprise au quotidien exige un effort de veille permanente et globale incluant les aspects juridiques, économiques, concurrentiels, industriels (en fonction de la taille et de l'activité). Il y a autant de risques que vous êtes tenu de maîtriser, prévoir et gérer afin de garantir la pérennité de votre entreprise. Donc, l'entreprise doit connaître, identifier, évaluer, voire cartographier ces risques pour les maîtriser tout en inculquant l'utilisation de processus, les méthodes et les outils de gestion des risques, voire son adaptation dynamique et maîtrisée en fonction des changements de circonstances. C'est pourquoi, dans cette partie de thèse sera traité les différents aspects des risques industriels, définitions et caractéristiques, les différentes formes et scénarios des accidents industriels.

1.3 Définition et typologie du risque industriel

Sont présentés les définitions du danger et du risque, ainsi que la relation entre les deux :

1.3.1 Du danger au risque : Danger et risque, deux concepts très complexes et très liés, mais il faut les distinguer. À cet effet, Hale et Glendon et Villemeur s'accordent à caractériser le danger comme : « *un événement ou une situation susceptible d'entraîner des conséquences négatives ou dommages à l'homme et/ou à l'environnement.* » [Denis-Remis., 2007].

Vérot propose également la définition du danger comme : « une propriété intrinsèque à une substance, à un système et qui peut conduire à un dommage ».

Pour Périlhon Pierre [Périlhon, P., 2007], « *le danger est tout phénomène, situation ou événement potentiel, déclenché par un ou plusieurs événements initiateurs, susceptible de menacer une ou plusieurs des quatre cibles, ces cibles sont les individus, les populations, les*

écosystèmes et les matériels ». L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), quant à elle, définit le danger comme : « *propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement* » [INERIS., 2003].

C'est vrai qu'il est difficile de définir avec exactitude le danger, mais nous pouvons déduire, d'après les définitions précédentes, que la majorité de la communauté scientifique s'accorde sur le fait que le danger est le phénomène indésirable, causé par différents événements qu'on appelle les événements initiateurs, tel qu'une substance, un outil, une organisation, une position, etc. et qui a des impacts négatifs sur les personnes, l'environnement et les matériels qu'on appelle les (cibles). Quand au risque, nous pouvons le définir dans un premier lieu comme l'image du danger : « la mesure du danger et de ses effets sur la santé et l'environnement ».

Depuis quelques années, les acteurs en charge de la gestion des risques considèrent le risque comme la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Tout d'abord, pour comprendre le concept de la vulnérabilité Ollierou R. et Quantinet B. proposent la définition suivante : « *la vulnérabilité traduit, dans le langage commun, une faiblesse, une déficience, un manque, une grande sensibilité spécifique à partir desquels l'intégrité d'un être, d'un lieu, se trouve menacée d'être détruite, diminuée, altérée. On peut aussi définir la vulnérabilité comme un état de moindre résistance aux nuisances et aux agressions.* » [Ollierou and Quantinet., 2004]. Quant à l'aléa, il décrit le danger qui menace les éléments vulnérables.

Enfin, le risque c'est la fonction qui relie les deux éléments aléa et vulnérabilité ces derniers sont nécessaires pour la définition d'un risque comme il est expliqué par Pierre P. sur le **Figure1.1**. En effet Périlhon P. dit clairement : « *si l'on a défini le danger comme une potentialité, on peut définir le risque comme la mesure du danger par deux paramètres : la probabilité P ou la fréquence F de l'enchaînement des événements qui le constituent et la gravité G de l'impact du danger sur une cible* » [Périlhon, P., 2007].

Le risque n'existe pas si les deux composantes ne sont pas en coprésence, par conséquent, une explosion se produisant dans le désert en absence des personnes, ne générera pas de risque ; à l'inverse, le risque sera plus fort si une ville d'habitants est située au voisinage d'un site industriel.

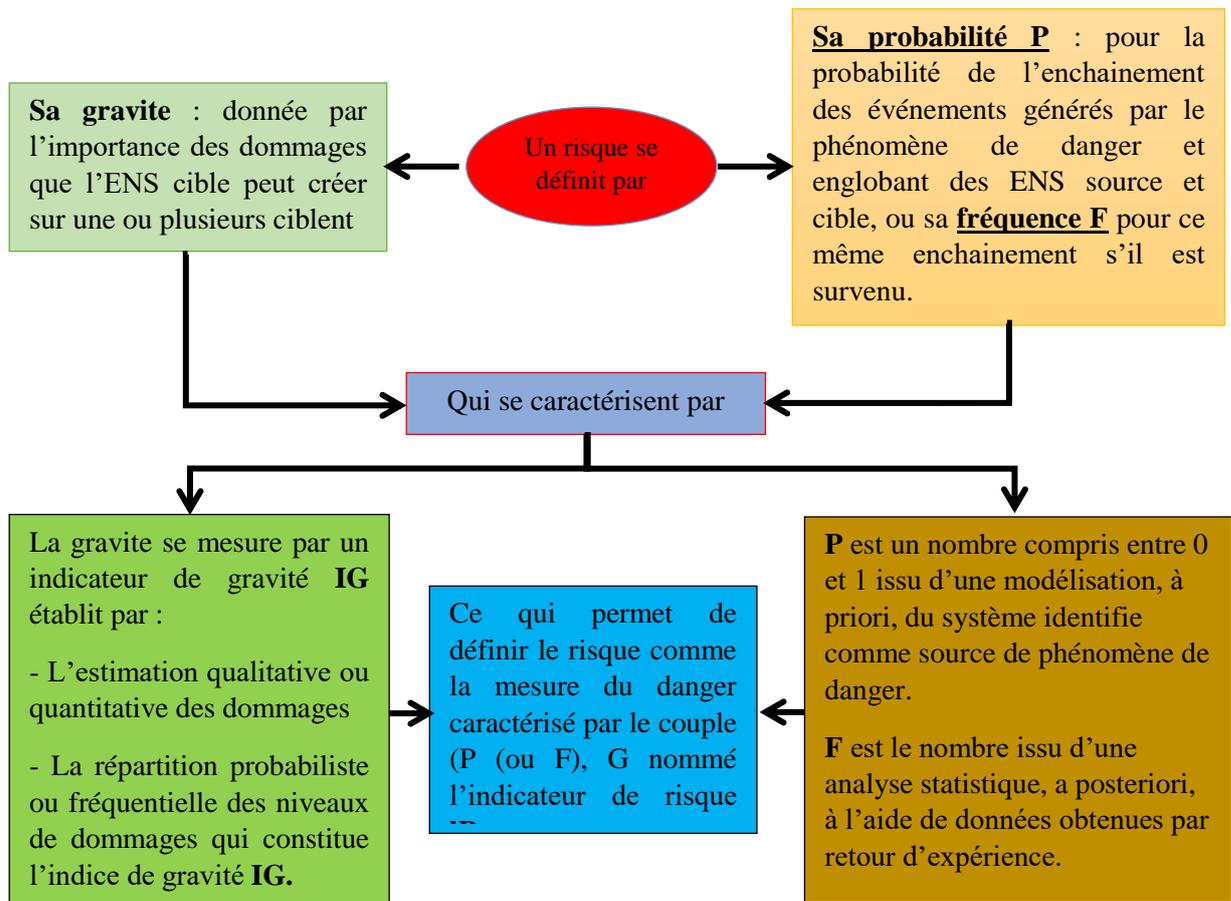


Figure 1.1 : Définition du risque [Périllon, P., 2007]

La **Figure 1.1** nous montre clairement que le risque est défini par deux variables : la probabilité (P) de survenance d'un événement dangereux et la gravité (G) de l'impact de ce dernier. La première variable est issue d'une modélisation d'un système de données sur les sources du phénomène du danger. Cependant, la deuxième variable est issue de l'estimation quantitative ou qualitative des dommages.

1.3.2 Qu'est-ce qu'un risque industriel ? Pour le bureau international du travail (BIT) à Genève « *l'expression d'accident majeur (industriel) désigne un événement inattendu et soudain, y compris en particulier une émission, un incendie ou une explosion de caractère majeur, dû à un développement anormal dans le déroulement d'une activité industrielle, entraînant un danger grave, immédiat ou différé, pour les travailleurs, la population ou l'environnement à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation et mettant en jeu un ou plusieurs produits dangereux* ».

La directive de Seveso II (*C'est une directive créée suite à un accident industriel dans le but de réglementer les établissements à risque. Elle définit également le risque industriel comme étant : « un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion d'importance majeure résultant du développement incontrôlé survenus au cours de l'exploitation d'un établissement couvert par la présente directive, entraînant pour la santé humaine, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et/ou pour l'environnement, un danger grave, immédiat ou différé et faisant intervenir une ou plusieurs substances dangereuses»*).

D'après les définitions précédentes du risque et danger nous pouvons déduire que le risque industriel est un événement accidentel se produisant sur un site industriel et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les riverains, les biens et l'environnement. Le risque industriel est liée essentiellement à un danger causé par une substance (butane, propane, chlore...), par un système technique (mise sous pression d'un gaz...), par une disposition (élévation d'une charge, ...) ou par un organisme (microbes, ...etc.), de nature à entraîner un dommage sur un élément vulnérable (personnes par exemple).

1.4 Typologie de risque industriel

Le risque industriel est l'événement dangereux qui peut se manifester sous quatre formes qui sont :

❖ **Le risque d'incendie** : Un incendie résulte de l'inflammation d'une substance à l'intérieur de son confinement (feu de réservoir d'hydrocarbures) ou à la suite d'une perte de confinement (feu de nappe) provoqué par des matières solides combustibles ou des liquides inflammables au contact d'autres produits, d'une flamme ou d'un point chaud. Un incendie est une réaction chimique (combustion) complexe qui dégage de la chaleur et des flammes déclare lorsque trois facteurs sont réunis : un combustible, un comburant et une source de chaleur [Dupontet *al.*, 1993].

❖ **Le risque d'explosion** : Une explosion résulte de l'inflammation d'un mélange explosif, d'une réaction chimique violente, d'une combustion violente (d'un gaz ou d'un nuage de poussières), d'une décompression brutale d'un gaz sous pression (éclatement d'une bouteille d'air comprimé par exemple). Il peut survenir lors de la libération brutale de vapeurs ou de gaz inflammables mélangés avec de l'air et au contact d'une source d'inflammation. L'onde

de choc formée, entraîne une surpression pouvant entraîner des lésions internes au niveau des poumons et des tympans ainsi que des traumatismes [Dupont *et al.*, 1993].

❖ **Le risque toxique** : Le risque toxique est dû généralement à une perte de confinement (la rupture d'une canalisation, le déchirement d'un réservoir) d'un produit toxique gazeux à température et pression ambiantes par exemple (l'ammoniac) ou d'un produit toxique volatil (l'acide chlorhydrique) qui peuvent laisser s'échapper un nuage toxique qui va se propager dans l'air en se diluer. Il peut aussi être formé à la suite de la réaction entre des matières incompatibles dans un procédé découlant d'une perte de contrôle ou de l'introduction accidentelle d'une matière indésirable dans un procédé. Ce risque est le plus dangereux pour les populations. L'inhalation de ce gaz peut provoquer des problèmes de santé plus ou moins graves, du simple picotement des yeux ou de la gorge à l'asphyxie ou l'œdème pulmonaire.

❖ **Le risque de pollution** : La pollution est généralement due à un déversement d'un produit dangereux liquide, solide ou gazeux causé par une perte de confinement. Les caractéristiques d'un déversement (rayon d'impact, dangerosité, densité, etc.) sont fonction notamment de la nature du produit, des conditions de la perte de confinement (quantité perdue, point de la fuite, entourage et voisinage, etc.) et des caractéristiques du sol et des eaux [Kaid Tlilane., 2007] En effet, les caractéristiques du produit déversé ainsi que le cheminement potentiel du déversement sont des informations importantes pour établir les impacts appréhendés sur le milieu touché. La présence d'un cours d'eau, d'un plan d'eau ou d'un réseau d'égouts à proximité de la fuite doit être considérée, puisqu'elle peut favoriser le déplacement du produit déversé et augmenter son impact. Il faut noter qu'un déversement peut être à l'origine : d'un nuage toxique si le produit est toxique et volatil, d'un incendie ou d'une explosion si le produit est inflammable. Ce type de risque est très dangereux car il peut être une cause principale et un événement qui va déclencher les autres risques que nous avons définis précédemment. Ce déversement peut entraîner notamment la contamination du sol, de l'air ou de l'eau, la destruction de la faune, de la flore, d'habitats terrestres et aquatiques, du milieu naturel ainsi que la perturbation d'activités humaines.

1.5 Les accidents industriels survenus dans le monde

Les grands accidents industriels ont entraîné la prise de conscience des risques industriels. Ci-après, un retour sur les plus grands accidents qui ont marqué l'humanité ces derniers douze ans.

Date d'accident	Type d'accident	Domage d'accident
27 juillet 2003, Karachi(Pakistan)	Naufrage du Tasman Spirit,	40 000 tonnes de pétrole brut se déversent dans la mer
30 juillet 2004, Ghislenghien (Belgique)	Explosion d'un important gazoduc	24 morts et 132 blessés
11 décembre 2005, Catastrophe de Buncefield (Angleterre)	Incendie dans un terminal pétrolier	Un des plus graves incendies d'Europe qui dura deux jours,43 personnes blessées
25 Octobre 2008, Kazan (Russie)	Une explosion dans une usine de poudre	4 morts et 5 blessés. Un tiers du bâtiment a été détruit
20 Avril 2010, golfe du Mexique	La plateforme pétrolière Deepwater Horizon coule dans le golfe du Mexique au large de la Louisiane	Marées noires très graves. Onze travailleurs y perdent la vie.
11 mars 2011, centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (Japon)	Accident nucléaire	
4 mars 2012, Brazzaville (République du Congo)	Explosion	La mort de 282 personnes. L'accident a fait plus de 2 300blessés et détruit des milliers d'habitations.
17 Avril 2013, West (Texas)	Explosion	La mort de 14 personnes et plus de 200 autres blessées.
22 Novembre 2013, Qingdao en Chine	Explosion d'un oléoduc	47 personnes tuées, principalement des ouvriers qui tentaient de colmater une fuite.
13 Mai 2014, Manisa, en Turquie	Explosion	La mort de plus de 282employés

Tableau 1.1 : Recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 2003-2014

Le raffinage du pétrole se fait dans des grandes installations industrielles totalement intégrées qui gèrent de gros volumes de matières premières et de produits. Ces installations sont également de gros consommateurs d'énergie et d'eau, soumis aux conditions industrielles les plus dangereuses. Ainsi l'industrie du raffinage se retrouve sujette à plusieurs types d'accidents majeurs tels que les explosions, les incendies, les émissions de matières dangereuses, etc. pointés au cours de la dernière décennie. Cette multiplication des accidents industriels, dont l'ampleur s'est considérablement accrue, ravage des sites industriels entiers et entraîne un nombre important de décès et de blessures et à cela s'ajoutent de lourdes pertes financières et environnementales.

Dans le monde, l'importance de ces catastrophes liées au domaine du raffinage du pétrole a notamment été marquée par plusieurs accidents tels que :

- L'accident à la raffinerie de Feyzin, France, le 4 janvier 1966 : cette catastrophe a fait 18 morts, dont 11 pompiers et 77 blessés. Au-delà de la raffinerie, les dégâts matériels incluent des toitures endommagées jusqu'à 2,2 km, et des vitres brisées à plus de 8 km ;
- L'explosion de gaz dans la raffinerie de la Mède, s'est produite le 09 novembre 1992, dans la raffinerie du mède qui était en marche normale. L'explosion ressentie jusqu'à 30 km est suivie de plusieurs autres. Un bilan très lourd est à déplorer : 6 morts et 37 blessés dont 1 grave parmi le personnel et 2 blessés parmi les pompiers. Le site est dévasté sur 2 ha et des vitres sont brisées à l'extérieur dans un rayon de 1 000 m (bris ponctuellement constatés à 8 km) ;
- L'accident de Shenxian, Shandong Province, Chine, le 08 juillet 2002, un déversement continu d'ammoniac a causé la mort de 13 personnes et 11 blessés ;
- L'accident de la raffinerie de Tupras, Turquie, le 28 juillet 2002, cette explosion a ravagé 9 réservoirs de GPL et 5000 personnes ont été évacuées ;
- L'accident de la raffinerie de Hokkaido, Japon, le 26 septembre 2003, l'accident a détruit 29 bacs qui ont subi des dommages de structure ;
- L'accident de la raffinerie de Gao Qiao, Chongqing, chine, le 23 décembre 2003, l'éclatement avec continuation de relâchement de produit ; il a causé la mort de 243 personnes et plus de 4000 blessées ;
- L'explosion de la raffinerie BP Texas, USA, le 23 mars 2005, cet accident a entraîné la mort de 15 personnes et 100 blessés ;

- L'explosion dans la raffinerie de Donges, le dimanche 16 mars 2008, suite à une fuite de canalisation, qui est due à une corrosion, provoque un déversement estimé à plus de 400 tonnes de fioul lourd (IFO 380) au cours du chargement d'un navire à la raffinerie de Donges (Loire-Atlantique) ;
- L'explosion de grande ampleur à la raffinerie d'Amuay, Venezuela, le 25 août 2012, cette explosion a ravagé tout le site industriel et a tué 48 personnes, dont la moitié sont des militaires de la garde nationale chargés de la sécurité du site, et a blessé 151 autres (Geoff, Earth Wars, 2012). L'explosion est due à une fuite de gaz (Lemonde.fr, 2012) qui a provoqué une explosion dans 9 réservoirs, le feu se propageant ensuite à trois autres réservoirs. En plus de la raffinerie, plus de 1600 logements ont été endommagés à la suite de l'onde de choc causée par l'explosion (Parraga et Urribarri, 2012)
- L'explosion meurtrière dans une raffinerie Total à Anvers, Belgique, le 19 novembre 2013, qui a fait deux morts. L'accident a été causé par l'explosion d'une conduite de vapeur d'eau d'une unité de production d'essence.

1.6 Les installations industrielles à haut risque en Algérie

Pas moins de 3876 installations industrielles à haut risque ont été recensées en Algérie en 2006. Ces installations sont localisées au milieu du tissu urbain et sur les 1,7% de la superficie totale de l'Algérie où réside la grande majorité de la population.

Nous avons répertorié dans le **Tableau I.2**, les installations dangereuses dans quelques wilayas d'Algérie réparties selon la nature du risque qu'elles présentent :

Wilaya	RISQUE			Total
	Risque d'explosion	Risque toxique	Risque d'incendie	
Chlef	1	1	0	2
Batna	2	2	1	5
Béjaia	1	1	0	2
Blida	2	2	1	5
Telemcene	2	2	1	5
Tizi Ouzou	1	1	0	2
Alger	8	7	2	17
Jijel	1	1	0	2

Skikda	7	7	2	16
Annaba	5	5	3	13
BBA	0	0	1	1
Moustaganem	1	0	1	2
Mascara	1	1	1	3
Oran	12	12	3	27
Total	44	42	16	102

Tableau 1.2 : Répartition des installations industrielles dangereuses selon la wilaya et la nature du risque en 2006

Nous comptons, d'après le **Tableau 1.2**, 102 installations dangereuses dans 14 wilaya, 44 parmi ces installations présentent un risque d'explosion, 42 un risque toxique et 16 installations présentent un risque d'incendie. Nous constatons aussi qu'Oran, Alger, Skikda et Annaba sont les wilayas qui comptent plus d'installations dangereuses. Elles comprennent respectivement 27, 17, 16 et 13 installations dangereuses.

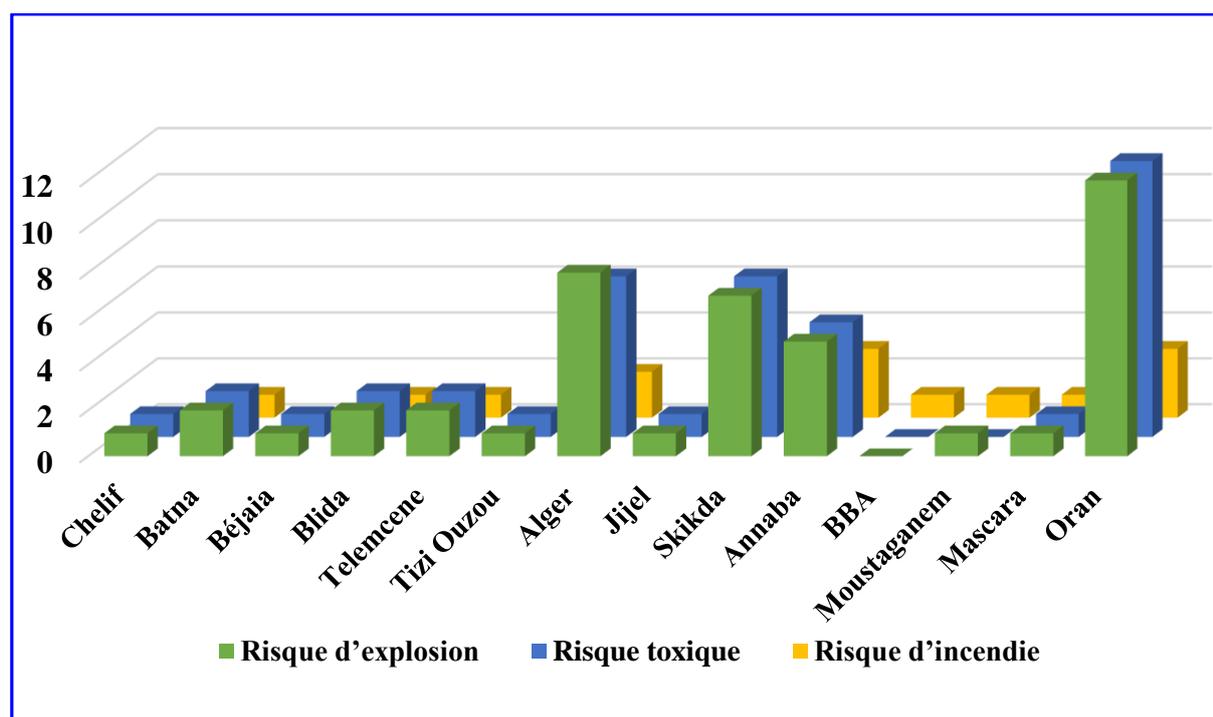


Figure 1.2 : Répartition des installations industrielles dangereuses selon la wilaya et la nature du risque industriel en Algérie

Nous remarquons aussi que les installations qui présentent le risque toxique et le risque d'explosion sont plus élevées que celles qui présentent le risque d'incendie. Nous pouvons expliquer ça par la nature et la densité des activités exercés dans chaque wilaya et par la

dynamique et la diversité en matière de l'industrie pétrolière et pétrochimique. En effet, l'activité pétrolière et gazière en Algérie avec les raffineries de pétrole, dépôts de stockage de gaz naturel, centres enfûter de butane et propane présente 80% des risques majeurs (incendies, explosions et risques toxiques).

En matière de répartition géographique, les concentrations les plus élevées de ces installations dangereuses sont localisées dans les grandes agglomérations du Centre (Alger, Bejaia), de l'Ouest (Arzew) et de l'Est (Annaba et Skikda) et une autre grande partie dans le sud (Hassi Messaoud). Si nous étudierons les trois villes Alger, Arzew et Skikda à titre d'exemple, nous comprendrons que ces zones industrielles sont de véritables poudrières et tout incident même mineur peut avoir un effet dévastateur et enflammer ainsi la région sur des dizaines de kilomètres, car elles sont localisées en plein cœur des zones urbaines.

- Concernant Alger : le niveau élevé de dangerosité de cette ville revient à la raffinerie de Baraki et au gazoduc qui alimentent la capitale en énergie. Désormais, ils constituent une menace réelle pour la population algéroise.
- La région d'Arzew : est une zone industrielle pétrochimique qui s'étend sur une superficie de 2800 hectares. Elle compte deux ports pétroliers spécialisés en chargement des hydrocarbures (le pétrole brut, le condensat, le G.P.L et les produits raffinés), une plateforme industrielle qui comprend 05 complexes de liquéfaction, une raffinerie, un complexe de production de méthanol et résines, un complexe d'ammoniac et un réseau de pipe provenant des champs pétrolifères de Hassi Messaoud et Hassi Rmel.
- Skikda : reste l'une des wilayas les plus exposées aux différents risques. 60% des risques majeurs répertoriés au niveau national sont présents dans cette wilaya, puisque la région renferme des installations de stockage, de raffinage et de transport du pétrole et du gaz naturel, des industries chimiques (chlore), installations de production du mercure, de l'électricité, du ciment, des gaz industriels et beaucoup d'autres installations.

Le recensement des différents accidents et incidents effectué par l'autorité de régulation des hydrocarbures (ARH) pour le compte de la Sonatrach en 2008 (**Tableau I.3**) dévoile le niveau de dangerosité de ces installations.

Filiales ou activités	Nombre des accidents	Filiales ou activités	Nombre des accidents
AMONT	240	ENAC	42
TRC	100	NAFTEC	28
AVAL	15	ENIP	2
COM	0	EGZIK	12
DG+ASL	4	EGZIA	1
ENGTP	14	SOMIK	3
ENSP	21	HELIOS	2
ENTP	33	NAFTAL	294
ENAFOR	29	STH	5
ENAGEO	15	EPROC	20
ENGCB	32	NAFTOGAZ	1
TOTAL		913	

Tableau 1.3 : Les accidents industriels survenus au sein des activités et filiales de la Sonatrach en 2008

Nous constatons d'après le **Tableau 1.3** et le **Figure 1.3** que les filiales et activités de la SONATRACH ont généré 913 accidents. L'amont pétrolier et TRC (Transport par canalisations) sont les deux activités qui génèrent plus d'accidents avec respectivement 35 et 85 accidents, ce qui présente 20.44% du total des accidents.

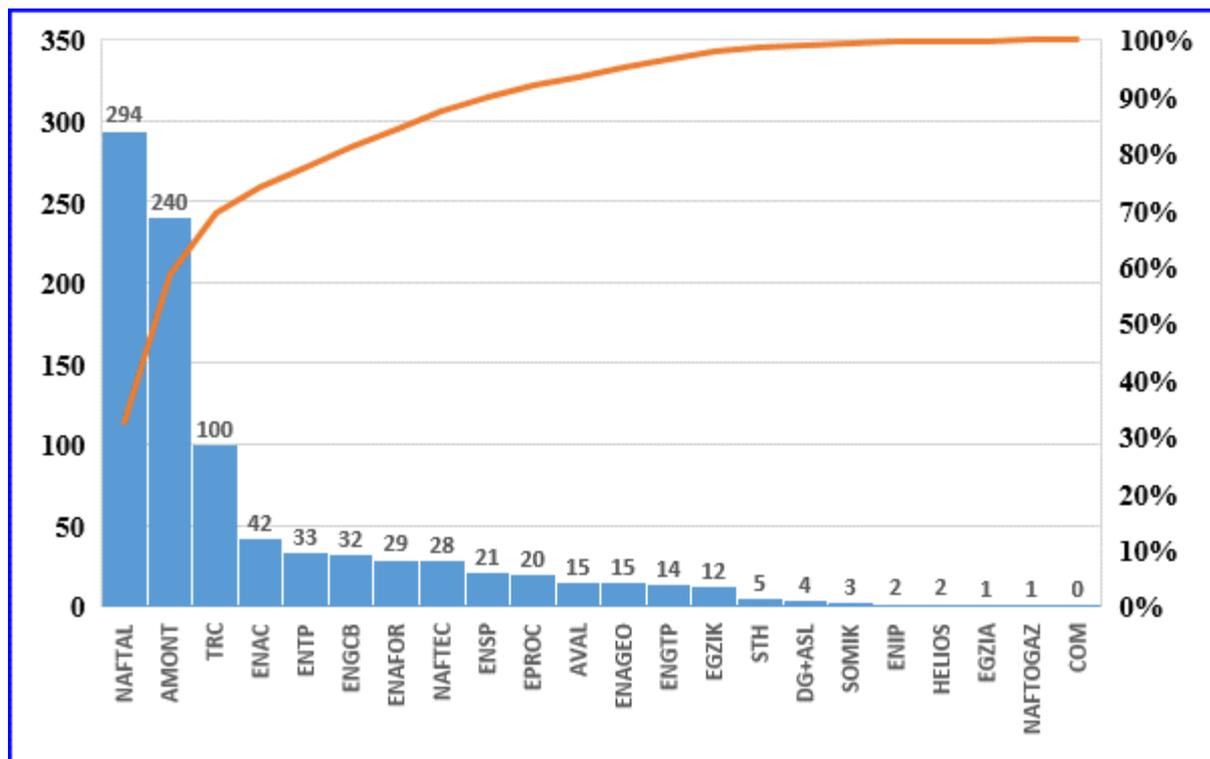


Figure 1.3 : Répartition des accidents industriels au sein des activités et filiales de la Sonatrach

NAFTAL (société nationale de distribution et de commercialisations des produits pétroliers et dérivés) est la filiale qui a généré plus d'accidents industriels en 2008, avec 294 accidents ce qui représente 36,62% du total des accidents survenus en cette année. Suivie des autres entreprises ENAC, ENTP, ENAFOR, NAFTEC, ENGCB, ENSP qui ont engendré respectivement 42, 33, 32, 29, 28, 21 accidents. Les risques que peuvent engendrer les activités et installations pétrolières sont l'explosion, l'incendie, l'intoxication et la pollution massive. L'ampleur de l'impact de ces risques dépend essentiellement de la nature des hydrocarbures (gaz naturel, pétrole, produits raffinés et diverses substances chimiques), de ces caractéristiques (explosif, inflammable, toxique, nocif, etc.) et de la localisation de l'installation (nombre d'installations avoisinantes, nombre de constructions, nombre d'habitants, etc.).

1.7 Le retour d'expérience des accidents industriels du secteur pétrolier et leurs sur la santé et l'environnement en Algérie

L'Algérie a connu ces dernières années une série d'événements douloureux touchant la majorité des villes et qui ont révélé l'étendue de la problématique des risques liés au secteur des hydrocarbures.

Sont présentés quelques accidents selon leur enchainement chronologique :

- Explosion d'un gazoduc le 3 mars 1998 à Skikda : une explosion du gazoduc a fait 07 morts et 44 blessés, 10 maisons aux alentours de l'explosion ont été détruites et 50 autres endommagées.
- Explosion du complexe pétrochimique GNL1K zone industrielle de Skikda 19 janvier 2004 : Trois unités de liquéfaction sur les six que comporte le Complexe ont été fortement endommagées et soumises à un feu intense, 23 décès ont été déplorés et 74 blessés ont été évacués vers l'hôpital de Skikda.
- Une explosion suivie d'un incendie a eu lieu au niveau du bac S106 du terminal arrivée RTE Skikda, le 4 octobre 2005 : un simple feu à provoquer ce que nous appelons le phénomène de "boilover", dont l'effet provoquera l'incendie du 2^{ème} bac. Cette défaillance coûtera la vie à deux agents.
- L'accident du puits Nezla 19 survenu le 15 septembre 2006 à la plate-forme du forage à Gassi Touil (Hassi Messaoud) : L'incendie s'est produit suite à une éruption incontrôlée de gaz. L'explosion a provoqué une éruption du puits dégageant une flamme de 15 à 20m de hauteur. Le périmètre de sécurité du puits est de 1600 m à la ronde, des flammes spectaculaires persistent après plus de 72 heures du sinistre. L'éruption a été maîtrisée le 08 novembre 2006. L'incendie a causé : 09 victimes qui font partie des foreurs de l'ENTP dont deux sont portés disparus, 78 personnes ont été blessées et Perte de l'appareil de forage d'un coût de 4 millions de dollars.
- Deux éclatements suivis d'incendies sur le gazoduc GZ3, le 11 et 18 aout 2008 : ont eu lieu au niveau de la commune de Zemmoura/Relizane. Ces deux éclatements ont occasionné des blessures et des dommages matériels aux populations riveraines. Le premier a causé 40 blessés et un arrachement de pipe sur une longueur de 50m. Le deuxième pour cause de corrosion a causé 14 blessés et l'arrachement d'une manchette de pipe d'environ 10 m.

Aujourd'hui, les accidents industriels issus du secteur pétrolier qui ont pour effet d'accroître les conséquences humaines et économiques, est une réalité confirmée en Algérie. Ces drames vont renforcer la prise de conscience face aux risques industriels et ils vont pousser les pouvoirs publics à agir pour maîtriser le phénomène de l'urbanisation autour des zones à risques majeurs. De plus, ils vont conduire les autorités à réviser le cadre législatif de la gestion des risques.

1.8 Importance de l'hygiène et la sécurité industrielle

Pour rappel « L'hygiène industrielle », c'est : une science et un art voué à la reconnaissance, à l'évaluation et au contrôle, dans le milieu de travail, des facteurs ou contraintes de l'environnement susceptibles de provoquer chez le travailleur une maladie industrielle, d'altérer sa santé et son bien-être physique ou de créer chez lui un état significatif d'inconfort ou d'inefficacité". En d'autres mots, l'hygiène Industrielle vise à identifier tous les agresseurs présents dans un milieu de travail. En identifiant ainsi les dangers, elle facilite leur élimination à la source, jouant un rôle préventif essentiel. Elle est une précaution prise face au danger que présentent certaines substances comme les gaz toxiques ou les produits chimiques.

Ainsi, pour que les dangers en milieu du travail soient éliminés à temps et à la source ou les atténués à un niveau acceptable pour éviter les événements indésirables, voire éviter les conséquences dramatiques (pertes humaines, pertes matérielles, pertes environnementales), les employés et les employeurs doivent comprendre la nature de ces dangers et apprendre ce qui peut être fait à leur sujet.

De ce fait, l'hygiène industrielle a pour objectifs d'identifier les principaux agents agresseurs présents dans un milieu de travail spécifique et mettre en œuvre des méthodes ou des moyens pour prévenir les effets nocifs des agents agresseurs. Ainsi, arriver à :

1. Identifier la présence d'agents agresseurs dans un milieu de travail ;
2. Identifier et reconnaître les agresseurs chimiques, physiques, mécaniques... en relation avec le milieu de travail ;
3. Identifier des méthodes ou des moyens pour prévenir les effets nocifs de ces agresseurs ;
4. Classifier les agents agresseurs selon leur type pour les traiter par ordre de priorité.

1.9 Conclusion

L'industrie pétrolière est source d'accidents grandioses si les agents agresseurs ne sont pas maîtrisés, voire transformé en risque industriel. Ce dernier est un événement dangereux qui peut menacer la santé des personnes, l'environnement et l'économie nationale surtout le risque d'incendie et le risque d'explosion. L'ampleur de ces effets dépend essentiellement de la nature de l'accident, les caractéristiques des produits en exploitation, les conditions d'exploitation, de la perte du confinement, la distance par rapport aux personnes, des conditions météorologiques, etc.

À la lumière des développements qui précèdent, il ressort nettement qu'en Algérie, l'intérêt que peut susciter la maîtrise des risques générés par le secteur des hydrocarbures est justifié non seulement par le souci d'assurer un niveau élevé de protection de l'environnement, mais également par le besoin de rechercher une meilleure méthode pour quantifier et modéliser ces phénomènes dangereux. D'où l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2

Evaluation quantitative de l'effet thermique et de surpression

Sommaire

2 Evaluation quantitative de l'effet thermique et surpression	23
2.1 Introduction	24
2.2 Concepts et définitions	24
2.3 Le BLEVE	26
2.3.1 Processus de réalisation du BLEVE	26
2.3.2 Modalisation l'effet de BLEVE	27
2.3.3 Calcul du flux rayonne reçu par la cible	28
2.3.3.1 Facteur de transmissivite atmospherique	28
2.3.3.2 Le pouvoir émissif boule de feu (Fireball)	29
2.3.3.3 Facteur de forme	30
2.4 Explosion	31
2.4.1 Description du phénomène	31
2.4.2 Accélération des flammes et effets de pression	32
2.4.3 Les Causes d'un VCE	33
2.4.4 Modélisation des effets de surpression	34
2.4.4.1 Méthode Basée Sur L'équivalence TNT(Trinitrotoluène)	34
2.4.4.2 La Méthode Multi-Energie	35
2.4.4.3 Strehlow-Baker	40
2.4.5 Exemples Application	43
2.5 Conclusion	46

2.1 Introduction

Lors des dernières décennies, un nombre important de recherches ont été consacrées aux feux libres et/ou confinés. Ces études ont permis de faire évoluer les modélisations et d'obtenir des outils d'analyse de sûreté performants. Malgré cela, les incendies et les explosions restent toujours synonymes de causes majeures de dégâts matériels et de pertes de vies humaines. Pour cela, dans ce chapitre, nous donnerons quelques concepts et définitions liés aux incendies et explosions. Ensuite, nous allons expliquer comment l'explosion et l'incendie se produisent ainsi que les méthodes de modélisation de ces dernières.

2.2 Concepts et définitions

Ici nous présentons un certain nombre de concepts et définitions pour faciliter la compréhension de ce présent travail, à savoir :

- **Allumage spontané, auto-inflammation** : Allumage résultant d'une élévation de température sans l'apport d'une source extérieure d'allumage.
- **Brûler** : Etre en état de combustion.
- **Chaleur de combustion ou potentiel calorifique** : Energie thermique dégagée par la combustion d'une unité de masse d'une substance donnée. Elle est exprimée en joules par kilogrammes (J/kg).
- **Chaleur spécifique** : La chaleur spécifique ou bien chaleur massique d'échauffement d'un corps correspond à la quantité d'énergie absorbée par 1 kg de ce corps pour que sa température s'élève de 1 K. Cette grandeur s'exprime généralement en J/(kg.K).
- **Combustible** : Susceptible de brûler. Objet pouvant brûler.
- **Combustion** : Réaction exothermique d'une substance avec un comburant. La combustion émet généralement des effluents accompagnés de flammes et/ou d'incandescence.
- **Conduction** : Mode de transmission de la chaleur à travers un corps solide en contact avec une source chaude. Le transport de chaleur s'effectue de proche en proche sans aucun transfert de matière.
- **Convection** : La convection est le mode de transport de chaleur par le mouvement d'un fluide. Dans le cas de feux de nappe, la chaleur est transportée par le mouvement de l'air autour de la flamme, dont l'écoulement est perturbé par la présence même de l'incendie.

- **Facteur de vue / de forme** : Le facteur de vue ou de forme traduit l'angle solide sous lequel la cible perçoit la source de rayonnement.
- **Feu** : Combustion autoentretenu dont l'extension dans le temps et l'espace est contrôlée. Lorsque cette extension ne peut être contrôlée, il convient alors de parler d'incendie.
- **Flamme** : Zone de combustion en phase gazeuse généralement avec émission de lumière.
- **Flux thermique radiatif** : Quantité de chaleur transférée par rayonnement thermique, par unité de temps. Elle s'exprime en kW.
- **Incendie** : Combustion autoentretenu qui se développe sans contrôle dans le temps et dans l'espace.
- **Inflammable** : Capable de brûler avec flamme, dans des conditions spécifiées.
- **Point de flamme (ou température d'inflammation)** : Température minimale à laquelle un matériau soumis à une petite flamme normalisée présentée à sa surface dans des conditions spécifiées, prend feu et continue à brûler pendant un temps spécifié.
- **Point d'éclair** : Température minimale à laquelle doit être porté un matériau, un produit pour que les vapeurs émises s'allument momentanément en présence d'une flamme, dans des conditions spécifiées.
- **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)** : Chaleur de combustion d'une substance lorsque la combustion est complète et que l'eau produite reste à l'état de vapeur dans des conditions spécifiées.
- **Pouvoir émissif (surfactive)** : Puissance thermique rayonnée par la flamme par unité de surface. Elle est exprimée en kilowatts par m² (kW/m²).
- **Rayonnement thermique** : Transfert d'énergie par ondes électromagnétiques
- **Réaction au feu** : Comportement d'un matériau qui, par sa propre décomposition, alimente un feu auquel il est exposé, dans des conditions spécifiées.
- **Température d'auto-inflammation ou d'allumage spontané** : Température minimale à laquelle l'allumage est obtenu dans des conditions d'essai spécifiées, sans source d'allumage piloté.
- **Tension de vapeur** : Pression développée par les vapeurs d'un produit en espace clos ; elle correspond à l'aptitude d'un liquide à émettre des vapeurs.
- **Vitesse massique de combustion** : Masse du matériau brûlé perdue par unité de temps, dans des conditions spécifiées. Elle est exprimée en kilogrammes par seconde (kg/s).

2.3 Le BLEVE

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) ou explosion de vapeur en expansion par ébullition d'un liquide est le scénario d'accident majeur le plus redouté pour les réservoirs de gaz liquéfiés. Les causes principales identifiées d'un BLEVE sont multiples. On distingue notamment :

- Fuite sur une tuyauterie ;
- Rupture de tuyauterie ;
- Sur-remplissage ;
- Accident maritime ;
- Erreur humaine ;
- Erreur de conception,
- matériau non adapté.

Le BLEVE peut être défini comme la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.

A titre d'exemple, le cas de stockage de GPL dans les sphères sous pression est un accident très redouté surtout lorsqu'il s'agit d'un gaz liquéfié. En effet, dans ce cas-là, il peut s'accompagner d'une boule de feu produisant une chaleur extrême.

2.3.1 Processus de réalisation du BLEVE : Ce phénomène d'éclatement des réservoirs peut se réaliser en plusieurs phases successives ou simultanées comme représentées par la **Figure 2.1** [INERIS DRA-006., 2002].

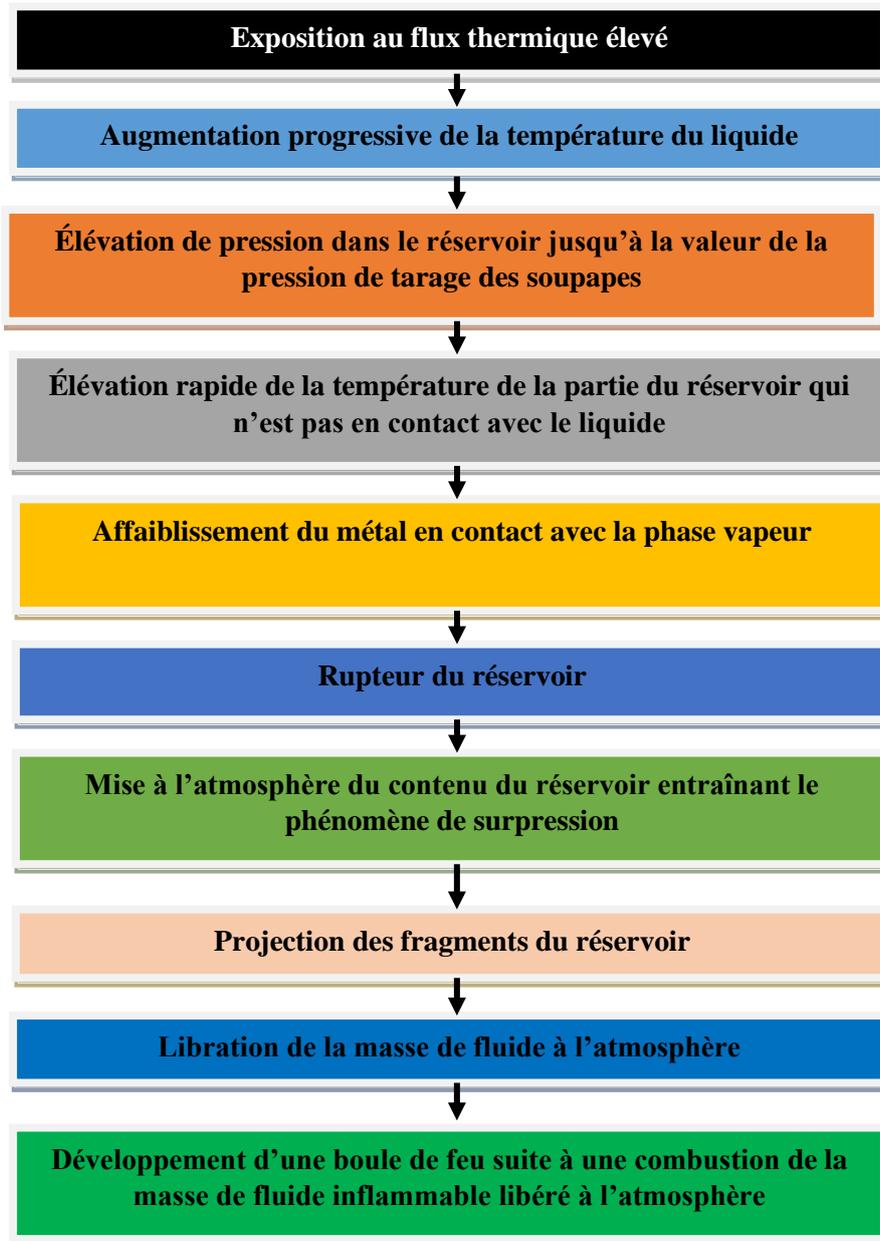


Figure 2.1 : Processus de réalisation du BLEVE [INERIS DRA006., 2002]

2.3.2 Modalisation de l'effet de BLEVE : Les modèles à flamme solide supposent que la flamme a une forme solide qui ne dégage de la chaleur que de sa surface. Les modèles prennent en compte la forme de la flamme et calculent le flux thermique en fonction de la puissance émissive de la surface, du facteur de forme et de la transmissivité atmosphérique. Ces modèles sont adoptés et implémentés dans la modélisation de la boule de feu (Fireball), jet enflammé (jet fire) et feu de nappe (pool fire) de façon simple à appliquer, facile à programmer et produisent des résultats relativement satisfaisants.

2.3.3 Calcul du flux rayonne reçu par la cible : Dans le modèle de la flamme solide, la cible est supposée exposée au rayonnement d'une flamme de géométrie constante et de pouvoir émissif homogène. Le flux qu'elle reçoit est alors déterminé grâce à la formule:

$$I = E \times F_{view} \times \tau_a \quad (2.1)$$

Avec :

- I : Flux reçu par la cible (kW/m²) ;
- F_{view} : Facteur de forme (-) ;
- τ_a : Facteur de transmissivité atmosphérique (-) ;
- E : Pouvoir émissif de la flamme (kw/m²).

2.3.3.1 Facteur de transmissivité atmosphérique : Le facteur de transmissivité atmosphérique traduit le fait que les radiations émises sont en partie absorbées par l'air présent entre la surface radiante et la cible. Ce facteur de transmissivité vaut (1 – le facteur d'absorption). Quant au facteur d'absorption, sa valeur dépend des propriétés absorbantes des particules de l'air en relation au spectre d'émission du feu. A une température donnée, cette atténuation est fonction de la distance de la cible à la flamme et de l'humidité relative de l'air. Etant donné que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone sont les principaux composants absorbants pour la longueur d'onde correspondant à la radiation, l'approximation suivante peut être réalisée :

$$\tau_a = 1 - \alpha(eau) - \alpha(CO_2) \quad (2.2)$$

Les facteurs d'absorption α dépendent de la pression de vapeur saturante, de la longueur de la radiation, et des températures de radiation et ambiante. La pression de vapeur saturante du dioxyde de carbone est fixe, alors que celle de l'eau dépend de la température et de l'humidité de l'air.

Dans la littérature, différentes corrélations existent pour déterminer ce facteur de transmittivité. Elles tiennent compte de la distance et de l'humidité (relative ou absolue).

❖ **La corrélation de brzustowski et sommer :** Elle donne le meilleur compromis entre précision et complexité ([API., 1973](#)).

$$\tau_a = 0,79 \times (100 / d)^{1/16} \times (30,5 / RH)^{1/16} \quad (2.3)$$

Où

- d : Distance de la cible à la source (m) ;

RH : Taux d'humidité relative de l'air (%).

❖ **La corrélation de lannoy** : Elle est donnée par la relation suivante (LANNROY., 1984) :

$$\tau_a = 0,33 + 0,67 \times \exp(-0,0002 \times w \times d) \quad (2.4)$$

Où w : Humidité absolue de l'atmosphère ambiante (g/kg d'air sec)

❖ **la corrélation de bagster** : Elle est donnée par la relation suivante (BAGSTER., 1989) :

$$\begin{cases} \tau_a = 2,02 \times (P_w \times d)^{-0,09} \\ P_w = 99,89 \times RH \times \exp\left(21,66 - \frac{5431,3}{T_a}\right) \end{cases} \quad (2.5)$$

Où

Ta: Température ambiante (K) ;

P_w : Pression partielle d'eau dans l'air (Pa).

❖ **Corrélation de wayne** : Elle est donnée par la relation suivante (Wayne., 1991):

$$\begin{cases} \tau_a = 1 - 0,01171 \times (\log_{10} X(H_2O)) - 0,02368 \times (\log_{10} X(H_2O))^2 \\ \quad - 0,03188 \times (\log_{10} X(CO_2)) + 0,001164 \times (\log_{10} X(CO_2))^2 \\ X(H_2O) = \frac{(2,165 \times P_w \times x)}{T_a} \\ X(CO_2) = \frac{273 \times x}{T_a} \end{cases} \quad (2.6)$$

Où

X(H₂O) : Coefficients d'absorption de la vapeur d'eau (-);

X(CO₂) : Coefficients d'absorption du dioxyde de carbone (-).

2.3.3.2 Le pouvoir émissif boule de feu (fireball) : L'émissivité de la boule de feu est calculée à l'aide de l'équation suivante (Roberts., 1981) :

$$E = \frac{f_s \times M \times \Delta H_c}{4\pi \times t_b \times r_b^2} \quad (2.7)$$

Avec : r_b, H_b, t_b et f_s doivent être calculés à partir des expressions empiriques suivantes (Crossthwaite et al., 1988):

$$\left\{ \begin{array}{l} r_b = \left\{ \begin{array}{l} 2.9 \times M^{0.333} \text{ pour HSE} \\ 3.24 \times M^{0.325} \text{ pour TNO} \end{array} \right\} \\ t_b = \left\{ \begin{array}{l} 0.45M^{0.333} \quad M < 37000 \\ 2.59M^{0.167} \quad M \geq 37000 \quad \text{pour HSE} \\ 0.852M^{0.26} \quad \text{pour TNO} \end{array} \right\} \\ H_b = \left\{ \begin{array}{l} r_b \text{ pour HSE} \\ 2r_b \text{ pour TNO} \end{array} \right\} \\ f_s = 0.27 \left(\frac{P_{Sat}}{10^6} \right)^{0.32} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Où :

- r_b : Rayon de boule de feu (m);
- H_b : Hauteur de boule de feu (m);
- t_b : Durée de boule de feu (s);
- f_s : Fraction de chaleur émise par radiation (-) ;
- M : Masse d'hydrocarbure(Kg) ;
- ΔH_c : Pouvoir calorifique du produit (J / kg);
- P_{Sat} : Pression d'éclatement (saturates burst pressure) (N/m²).

2.3.3.3 Facteur de forme $F_{view}(-)$: Le facteur de forme est calculé à l'aide des équations suivantes, [Figure 2.2 \(Van Den Bosh and Weterings., 1997\)](#) :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{view} = \left(\frac{R}{X} \right)^2 \\ X = \sqrt{(H_b^2 + x^2)} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Où x est la distance mesurée au niveau de terre entre le centre de la boule et le récepteur(m)



Figure 2.2 : Représentation schématique de la boule de feu

2.4 Explosion

2.4.1 Description du phénomène : Les explosions accidentelles constituent un des événements les plus redoutés dès lors qu'est considérée la sécurité des activités associées aux gaz inflammables. Ils peuvent être simplement définis par une explosion d'un nuage gazeux à l'air libre produisant des effets de surpression. Leur origine est le rejet de masses importantes de gaz inflammable (en phase gazeuse ou liquide) à partir des capacités de stockage, procédés ou tuyauterie. Différentes caractéristiques sont nécessaires pour que l'explosion génère des effets de surpressions. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes suivantes, **Figure 2.3** :

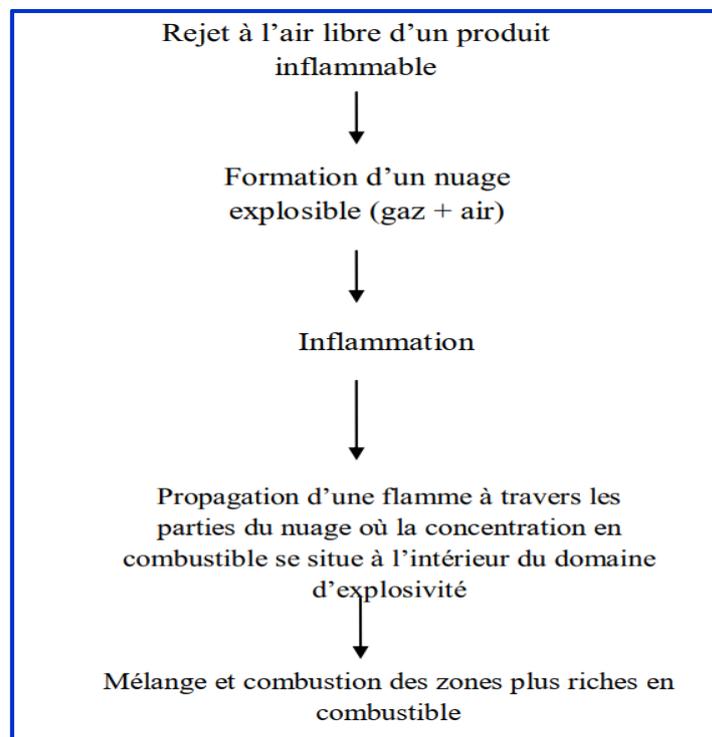


Figure 2.3 : Principales étapes de déroulement d'une explosion accidentelle de gaz

- Premièrement : le gaz rejeté doit être inflammable et sous des conditions convenables (température, pression) ;
- Deuxièmement : formation d'un nuage de taille suffisante avant l'inflammation (l'inflammation immédiate donne l'incendie, boule de feu, flammes mais pas de surpressions). Dans la majorité des accidents précédents concernant l'VCE, l'inflammation se produit après 1 à 5 minutes du début de la fuite ;
- Troisièmement : la présence d'une quantité suffisante du mélange (gaz-air) entre les limites d'inflammabilité du gaz concerné ;
- Quatrièmement : inflammation du mélange ;

- Cinquièmement : la vitesse de propagation des flammes à travers le nuage détermine le mode de l'explosion.

2.4.2 Accélération des flammes et effets de pression : Lors d'une déflagration, plusieurs régimes de combustion des gaz sont susceptibles d'être observés successivement au cours du temps. La situation expérimentale suivante permet d'expliquer les mécanismes de production des effets de pression. Il s'agit bien sûr d'un exemple, les configurations industrielles peuvent être beaucoup plus complexes, mais les mécanismes physiques mis en jeu sont les mêmes.

- On considère un volume inflammable de forme hémisphérique, initialement au repos, dans lequel sont disposés des obstacles. Une source d'inflammation est placée au sol, au centre de l'hémisphère (**Figure 2.4 A**) ;
- Juste après l'inflammation, le régime de combustion des gaz est généralement laminaire et un front de flamme se développe sphériquement autour du point d'allumage (**Figure 2.4 B**). Ce front de flamme est lisse et caractérisé par une épaisseur relativement faible (de l'ordre de 0,1 mm) de sorte qu'il peut être assimilé à une interface réactive transformant le mélange gazeux inflammable (gaz frais) en gaz brûlés ;
- Si bien qu'il s'ensuit une brusque expansion volumique. Capable de mettre en mouvement les gaz frais, situés en aval, devant les flammes. Ces dernières agissent comme un piston sur les gaz réactifs et provoquent leur écoulement (**Figure 2.4 C** et **Figure 2.4 D**) ;
- Tant que le régime de combustion est laminaire, la vitesse relative du front de flamme par rapport au gaz frais, appelée vitesse fondamentale de combustion est de l'ordre de 0,5 m/s pour des mélanges propane-air ou butane-air. La vitesse absolue (dans un repère fixe) du front de flamme correspond dans ce cas au rapport d'expansion des gaz multiplié par la vitesse fondamentale de combustion et est donc de l'ordre de quelques m/s ;
- Un front de flamme laminaire est très sensible aux perturbations de son environnement : variation de la vitesse des gaz, interaction avec des ondes de pression, variation locale de la concentration du mélange... Rapidement, la flamme prend une structure plissée et instable (**Figure 2.4 C**), ce qui a pour effet d'accroître la surface de flamme, donc la consommation des gaz frais, la production de gaz brûlés et la vitesse du front de flamme ;
- Le frottement du fluide sur des parois ou son interaction avec des obstacles induit de la turbulence dans l'écoulement, ce qui accentue encore ce phénomène (**Figure 2.4 D**) ;
- En retour, cette accélération augmente la vitesse d'écoulement des gaz frais et le niveau de turbulence de l'écoulement ;

- Ainsi, par ce mécanisme auto-entretenu, la flamme s'accélère d'elle-même : il s'agit du régime de déflagration ;
- La présence d'un confinement partiel (mur, auvent, etc...) peut accentuer la montée en pression en bloquant l'expansion volumique des gaz dans une ou plusieurs directions.

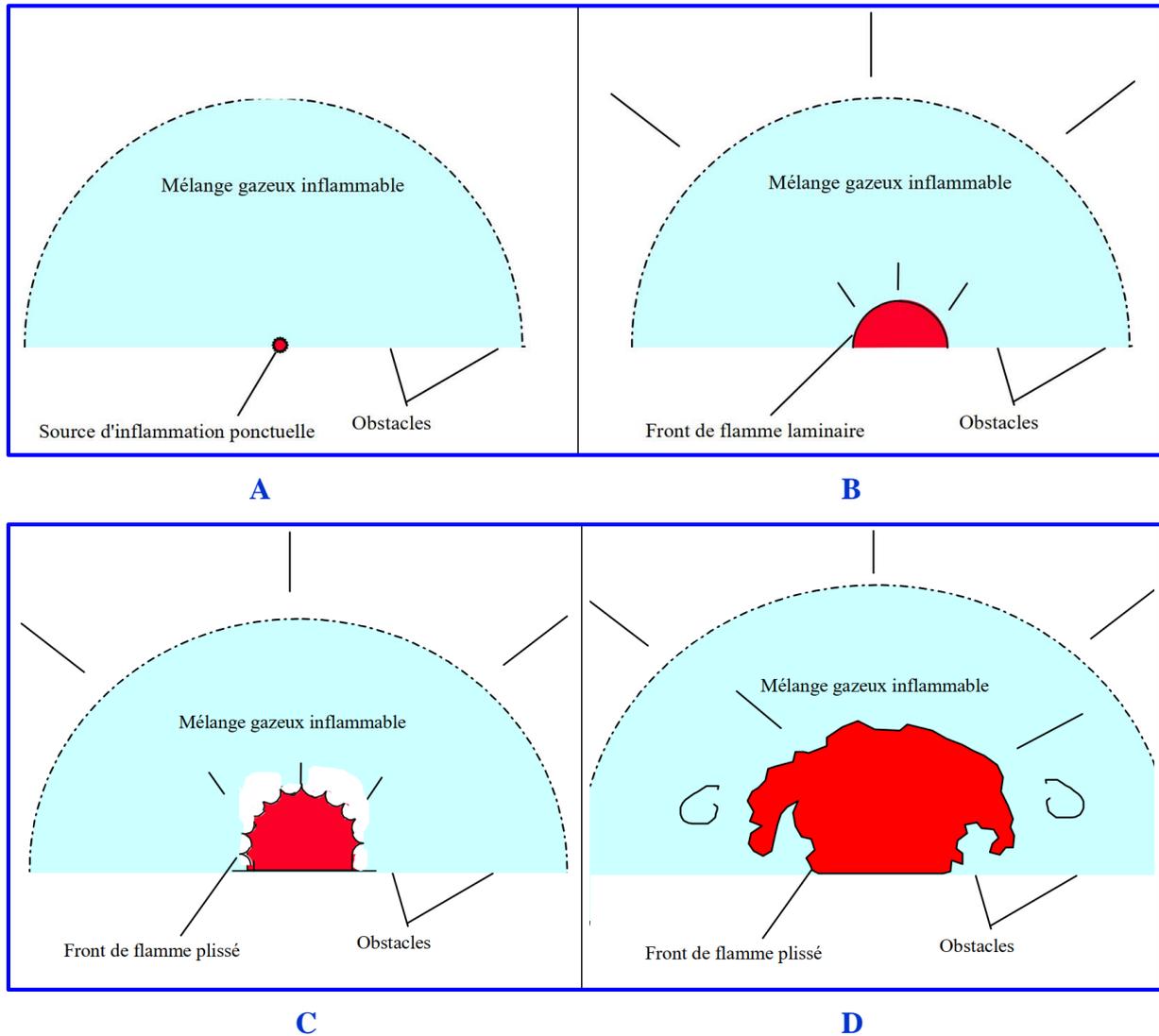


Figure 2.4 : Mécanismes d'accélération d'une flamme par les instabilités de flamme et de la turbulence

2.4.3 Les causes d'un VCE : Pour obtenir un VCE, il faut que les deux conditions se réalisent simultanément, à savoir :

- Un nuage de gaz inflammable ;
- Une source d'inflammation.

Tous les scénarios de rupture de canalisation ou de fuite d'un GPL peuvent engendrer un VCE. La fuite peut être un liquide ou un gazeuse, mais à conditions qu'il est de fuite équivalentes (pression, température, section de fuite), représentée par une fuite en phase liquide produit des nuages inflammables toujours beaucoup plus grands qu'une fuite en phase gazeuse, car le débit rejeté est beaucoup plus élevé (pour les GPL dans des conditions ambiantes, 1 litre de phase liquide engendre de l'ordre de 250 litres de phase gazeuse).

2.4.4 Modélisation des effets de surpression : Il existe plusieurs méthodes de calcul des effets de surpression. Parmi les plus couramment utilisées on trouve :

- L'équivalent TNT ;
- La méthode TNO Multi-énergie ;
- Strehlow-Baker.

2.4.4.1 Méthode basée sur l'équivalence TNT (Trinitrotoluène) : Ces méthodes sont incontestablement les premières utilisées de par le monde pour prévoir les conséquences de tout type d'explosion accidentelle. Elles reposent sur l'hypothèse selon laquelle, il doit être possible de reproduire le champ de surpression qui est engendré par une explosion donnée (de gaz, d'un explosif condensé, ...) en faisant exploser du TNT. Ainsi, l'équivalent TNT d'un mélange gazeux explosible correspond à la masse de TNT qui en explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un kg du mélange explosible considéré. On trouve dans la littérature, essentiellement d'origine militaire, des descriptions de nombreuses observations concernant principalement les effets de la détonation du TNT sur les individus ou installations.

- 1^{ère} étape : estimer la masse de TNT (M_{TNT}) ;
- 2^{ème} étape : à l'aide d'abaque, rechercher la valeur de la surpression en fonction de la distance de la source de danger à un point d'impact donné (**Figure 2.5**).

La méthode est basée sur le diagramme empirique de Brasie & Simpson, **Figure 2.5 [CPR., 1997]** et la surpression P_s (bar) est déterminée en fonction d'une distance réduite (scaled distance) Z ($\frac{m}{kg^{1/3}}$), définie par **l'équation (2.10)** :

$$Z = \frac{X}{M_{TNT}^{1/3}} \quad (2.10)$$

Où : M_{TNT} est la masse de TNT et calculé comme suit :

$$M_{TNT} = \frac{f \times \Delta H_C \times M}{\Delta H_{TNT}} \quad (2.11)$$

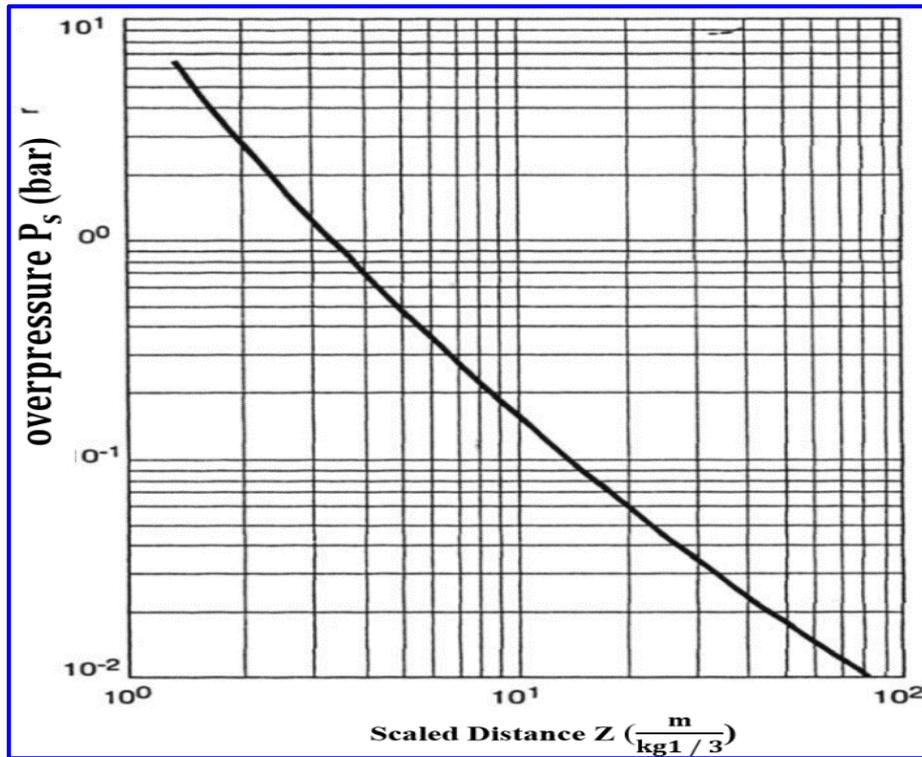


Figure 2.5 : Lasurpression en fonction de la distance réduite (TNT)[CPR., 1997]

À partir de la **Figure 2.5** pour chaque distance réduite, on peut trouver une surpression correspondante. Cette dernière peut être aussi calculée en utilisant la relation empirique **2.12** de **Kinney & Graham (1985)** pour les explosifs forts :

$$P_s = \frac{808 \times \left(1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right)}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \times \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}\right)} \quad (2.12)$$

2.4.4.2 La méthode TNOMulti-Energie : La méthode TNT Multi-Energie a été proposée par le TNO [**Van den berg., 1985**] suite aux importantes campagnes d'essais menées dans les années 1970 et 1980 et aux développements des théories des déflagrations gazeuses hémisphériques. La méthode Multi-Energie repose sur les hypothèses suivantes :

- La flamme se propage à une vitesse constante qui doit être prise comme le maximum possible pour l'installation considérée ;
- La vitesse maximum de propagation de la flamme est déterminée de manière empirique en fonction de la réactivité du nuage, de sa géométrie et du taux d'encombrement.

L'application de la méthode Multi-Energie repose ainsi sur deux étapes fondamentales :

- La caractérisation des zones d'accélération de flamme dans le nuage explosif ;

- La détermination de la vitesse de flamme dans chacune des zones c'est-à-dire qualifier la violence de l'explosion.

Pour cela, il convient de tenir compte des nombreux paramètres qui ont une influence sur la vitesse de propagation des flammes. Parmi lesquels on peut citer :

- La densité d'obstacles ;
- Le degré de confinement ;
- La forme et les dimensions du nuage inflammable ;
- La réactivité du combustible ;
- L'énergie et la position de la source d'inflammation ;
- La turbulence du mélange réactif avant allumage.

La méthode est conduite en quatre étapes pour évaluer le niveau de pression atteint en fonction du niveau de confinement ou d'obstruction du mélange inflammable, à savoir :

1) Etape1 : Calcul de l'énergie d'explosion : L'énergie de combustion est l'énergie dégagée par la réaction de combustion d'un gaz par le dioxygène de l'air. Le calcul de cette énergie est uniquement valable dans le cas d'un VCE (Vapour Cloud Explosion). Le VCE représente l'inflammation (au contact d'une source de chaleur suffisante) d'un nuage de vapeur inflammable dont la partie comprise entre la LIE et la LSE va être le siège d'une combustion.

L'énergie de combustion est donnée par la formule suivante :

$$E_x = M \times \Delta H_C \quad (2.13)$$

Où :

- E_x : L'énergie de combustion dans le mélange air-carburant en (J) ;
- M : Masse de produit mise en jeu dans l'explosion en (kg) ;
- ΔH_C : Energie de combustion en (J / kg).

La formation et la dispersion d'un nuage inflammable (suffisamment volatil) peut générer un VCE dont les étapes sont les suivantes :

- Rejet dans l'atmosphère d'un gaz ou d'un liquide inflammable volatil, avec ou sans émission d'aérosols ;
- Évaporation de la nappe du liquide formé, dans le cadre d'un rejet de liquide ;
- Formation d'un nuage inflammable entre l'air et le gaz ;

- Dispersion du nuage air-gaz compris entre la LIE et la LSE qui s'enflamme en présence d'une source d'ignition /inflammation:
- Propagation du front de flamme dans le nuage inflammable provoquant une onde de pression aérienne.

2) Etape2 : Choix du degré de sévérité : S'agissant de l'utilisation de la méthode Multi-Energie, déterminer la ou les surpressions maximales revient à choisir un « indice de violence » pertinent parmi les 10 proposés. Pour mémoire la correspondance entre les indices compris entre 1 et 10 et les niveaux de surpression maximum est rappelée dans le **Tableau 2.1**.

Indice de violence (-)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Surpression maximale (bar)	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10

Tableau 2.1 :l indice de violence et leur surpression maximale

Au cours du temps, différentes recommandations ont été proposées pour les choix d'indice mais les recommandations les plus largement employées sont probablement celles proposées :

- Initialement par l'auteur de la méthode (**Van den berg., 1984**) ;
- Ensuite par Kinsella (**Kinsella., 1993**) ;
- Puis dans (**TNO., 1997**).

Ces différentes recommandations, qui constituent autant de voies possibles pour l'application de la méthode Multi-Energie, sont respectivement présentées et discutées ci-après.

❖ **Selon Van den bergdès 1984 :** Van den berga proposé de choisir les indices de la méthode Multi-Energie en utilisant l'arbre de décision reproduit en **Figure 2.6**.

En complément des informations reportées sur la figure précédente, les précisions suivantes sont à retenir. Tout d'abord, la réactivité du combustible peut être qualifiée au moyen de la vitesse de combustion laminaire et il peut être admis que ce combustible est fortement réactif dès lors que la vitesse de combustion susmentionnée est supérieure à 1 m/s ; si cette vitesse est inférieure le combustible n'est plus à considérer comme fortement réactif.

Ensuite, un confinement partiel est à considérer dès lors que le mode de propagation imposé aux flammes par la géométrie des installations est axial ou radial. Toutefois, il est admis dans ([Van den berg, 1984](#)) que certaines installations comme des unités de production des industries chimiques ou pétrolières sont telles que le confinement partiel est à considérer même s'il n'apparaît pas directement axial ou radial.

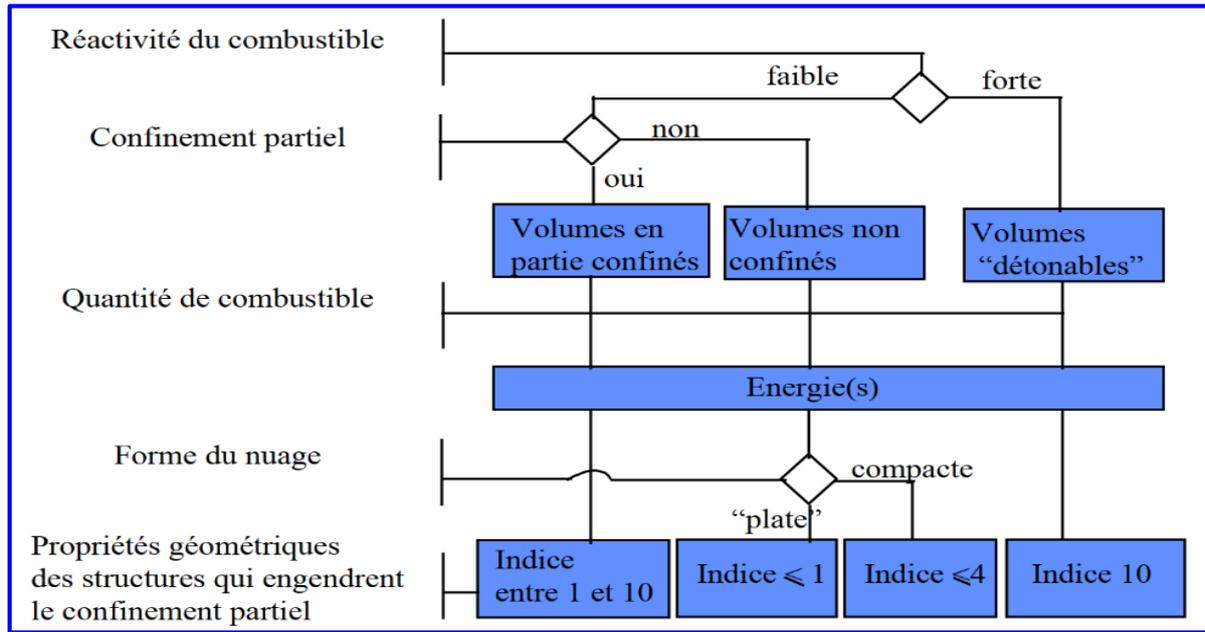


Figure 2.6 : L'arbre de décision pour le choix d'un indice Multi-Energie

Enfin, les nuages « plats » sont ceux observés lorsque les conditions de rejet (masse volumique du combustible rejeté, conditions de mélange, ...) sont telles que le nuage inflammable est caractérisé par un ratio largeur/hauteur très supérieur à l'unité. A l'opposé, les nuages dit « compacts » sont ceux d'aspects sphériques ou hémisphériques qui permettent une longueur de parcours de flamme identique qu'elle soit la direction considérée à partir d'un point central d'inflammation.

❖ *Selon (Kinsella, 1993)* : En se basant sur l'analyse des accidents dits « majeurs » passés, Kinsella a proposé de choisir les indices de violence d'explosion en considérant :

- l'énergie d'inflammation ;
- Le degré d'encombrement dû aux obstacles solides ;
- Et le degré de confinement.

Ces recommandations sont traduites dans le [Tableau 2.2](#) reporté en page suivante :

Energie d'inflammation		Le degré d'encombrement			Le degré de confinement		Indice
faible	forte	forte	faible	Inexistant	Existant	Inexistant	
	X	X			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
	X		X		X		5-7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X		X	4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

Tableau 2.2 : Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Kinsella., 1993)

❖ *Selon (TNO.,1997)*: Dans sa dernière édition du « Yellow Book », le TNO (*TNO., 1997*) propose de choisir les indices de la méthode Multi-Energie sur la base des recommandations suivantes:

- Retenir l'indice 10 pour tous les volumes correspondant à des zones encombrées d'obstacles ;
- Retenir l'indice 1 pour tous les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque les conditions d'accident sont telles que le nuage inflammable susceptible d'envahir ces zones peut être considéré au repos sur le plan dynamique (nuage formé suite à l'évaporation d'un liquide combustible par exemple) ;
- Retenir l'indice 3 pour tous les volumes ne correspondant pas à des zones encombrées et lorsque les conditions d'accident sont telles que le nuage inflammable susceptible d'envahir ces zones est caractérisé par une agitation turbulente importante (nuage formé consécutivement à un rejet de gaz combustible initialement sous plusieurs bars de pression par exemple).

3) Etape3 : Détermination de la distance réduite : Elle est exprimée par la formule (2.14) :

$$\bar{R} = R \times \left(\frac{E_X}{P_0}\right)^{-1/3} \quad (2.14)$$

Où :

- \bar{R}_{est} : la distance mise à l'échelle pour TNO Multi-Energy (-) ;
- P_0 : la pression atmosphérique en Pascal ($P_0 = 101000$ Pa) ;et
- R : la distance entre le centre du nuage et le seuil de surpression défini en (m).

4) Etape4 : Détermination la surpression réduite : Elle est exprimée par la formule (2.15) :

$$\bar{P} = \frac{P_S}{P_0} \quad (2.15)$$

La quantification de l'onde de surpression est ensuite déterminée par l'utilisation des courbes d'abaque de la méthode multi-énergie [Van den berg., 1985],Figure 2.7 :

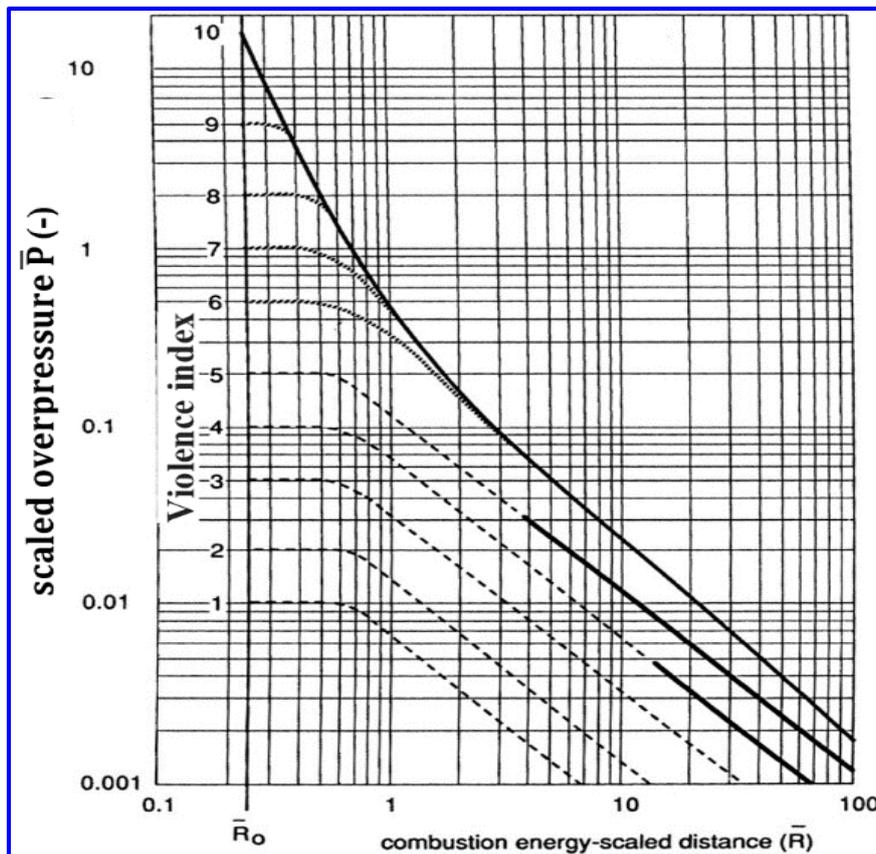


Figure 2.7 : La surpression reduite en fonction de la distance reduite(TNO) [CPR., 1997 ; Van den berg., 1985]

2.4.4.3 Strehlow-Baker : Selon (Baker *et al.*, 1996) une estimation de la vitesse de propagation des flammes peut être obtenue en considérant :

- La réactivité du combustible mis en jeu ;
- La densité d'obstacles ;

- Le degré de confinement.

Suivant à cela une partie des recommandations généralement admises, Baker et al. Proposent 3 classes de combustibles :

- Les combustibles très réactifs, à savoir l'hydrogène, l'acétylène et les oxydes d'éthylène ou de propylène ;
- Les combustibles faiblement réactifs que sont les seuls méthane et monoxyde de carbone,
- Les combustibles de réactivité moyenne qui correspondent à tous les autres gaz combustibles que ceux susmentionnés.

La densité d'obstacles est ensuite définie à partir des variables :

- BR pour « Blockage Ratio », qui représente l'aire occupée par les solides sur l'aire totale offerte aux gaz dans les différentes directions de propagation des flammes ;
- P pour « pitch » qui correspond à la distance entre 2 rangées successives d'obstacles.

De façon analogue à ce qui est présenté plus haut pour la réactivité, 3 classes de densité d'obstacles sont aussi considérées :

- Une densité d'obstacles faible lorsque BR est inférieur à 10 % et que le lieu d'explosion ne comporte qu'une à deux rangées d'obstacles ;
- Une densité forte lorsque BR est supérieur à 40 % et qu'il existe au moins 3 rangées d'obstacles ;
- Et une densité moyenne dans tous les autres cas.

Puis, pour un cas donné, lorsque les classes de réactivité, de densité d'obstacles et le degré de confinement sont déterminés, la vitesse de flamme ou la surpression maximale sont obtenues en se référant au **Tableau 2.3** reporté ci-après.

Degrés de confinement 1D, soit un mode de propagation axial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		Forte		Moyenne		Faible	
		(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)
Réactivité	Forte	5,2	>1000	5,2	>1000	5,2	>1000
	Moyenne	2,265	800	1,765	400	1,029	200
	Faible	2,265	800	1,029	200	0,294	40
Degrés de confinement 2D, soit un mode de propagation radial des flammes							
		Forte		Moyenne		Faible	
		(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)

Réactivité	Forte	1,765	400	1,029	200	0,588	100
	Moyenne	1,235	300	0,662	120	0,118	7
	Faible	0,662	120	0,471	70	0,079	4
Degrés de confinement 3D, soit un mode de propagation sphérique des flammes							
		Forte		Moyenne		Faible	
		(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)	(Mach)	(KPa)
Réactivité	Forte	0,588	100	0,153	15	0,071	4
	Moyenne	0,206	20	0,1	7	0,037	1
	Faible	0,147	15	0,1	7	0,037	1

Tableau 2.3 : Correspondance entre les conditions d'explosion et les vitesses de flamme (exprimées en nombre de Mach) ou surpressions aériennes maximum selon (Baker *et al.*, 1996)

$$\text{Mach} = \frac{v_f}{c} \quad (2.16)$$

Où :

- v_f : vitesse de flamme (m/s).;
- c : vitesse de son (m/s).

Après avoir déterminé la vitesse de la flamme (exprimée en nombre de Mach), l'onde de surpression peut être mesurée à l'aide de l'abaque de Strehlow-Baker, **Figure 2.8** :

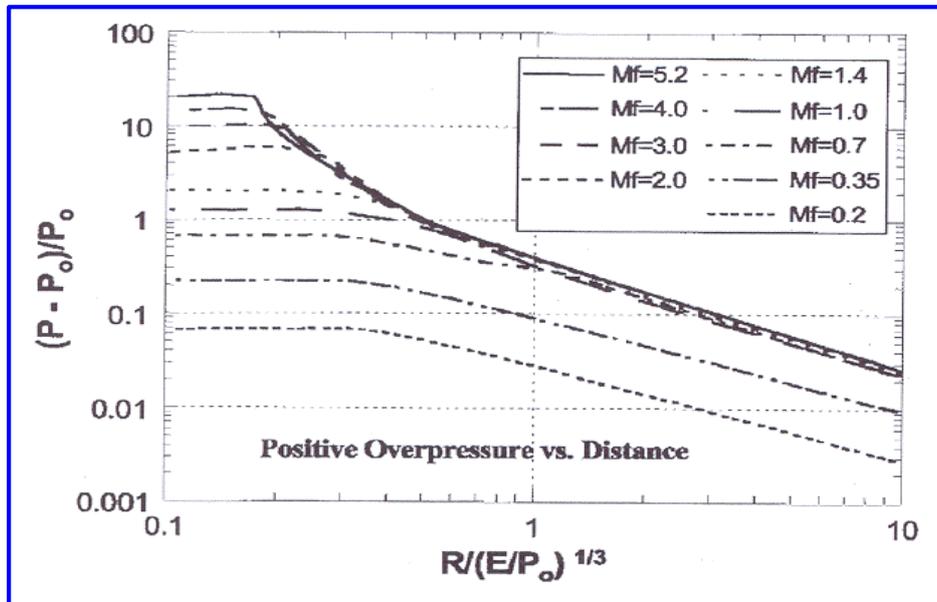


Figure 2.8 : La surpression reduite en fonction de la distance reduite (Strehlow-Baker)

[Tang, 1999]

L'évaluation des effets de surpression suite à une explosion est réalisée au moyen de méthodes énergétiques. Il existe trois grandes méthodes : la méthode de l'équivalent TNT, la méthode Baker-Strehlow et la méthode Multi-énergie. Ces méthodes ont une base commune. Il s'agit de définir l'énergie de combustion impliquée dans l'explosion et de déterminer les distances d'effets de surpression au moyen d'abaque de décroissance de pression en fonction de la distance. La première méthode de ce type est la méthode de l'équivalent TNT. Bien que couramment utilisée dans l'évaluation de effets d'explosion post accident, cette méthode surestime fortement la surpression dans le champ proche si bien que des méthodes alternatives ont été imaginées. Ces méthodes ont toutes les deux la même philosophie. Le nuage inflammable est découpé en zones pour lesquelles on cherche à évaluer le potentiel de violence. Il existe de nombreuses règles permettant de qualifier le potentiel de violence de l'explosion de la zone considérée. Cependant, ces critères restent souvent flous. Il apparaît souvent difficile de prendre en compte l'encombrement réel d'un site industriel. Les arbres décisionnels peuvent conduire à une sous-estimation des niveaux de pression réel dans le nuage et nécessite l'intervention d'un expert du domaine. Toutefois, la méthode Multi-Energie est préférée par l'INERIS en raison de la qualité des courbes de décroissance des ondes de surpression dans l'environnement

2.4.5 Exemples application : Dans ce travail, nous nous intéressons au complexe industriel des hydrocarbures. Ce dernier est situé en ville de Laghouat en Algérie, où l'on trouve le plus grand champ de gaz naturel du continent africain. Il est déclaré comme zone à haut risque par le décret exécutif n ° 05/476. Ce complexe comprend plusieurs modules de traitement d'hydrocarbures avec un centre de stockage et de transfert facile (CSTF). Ce dernier est considéré comme une source de danger critique, car il a une capacité totale de stockage de 285 000 m³ de condensat et 78 000 m³ de GPL (gaz de pétrole liquéfié). Le site de stockage et de transfert de GPL comprend les installations suivantes :

- 12 sphères d'une capacité mesurée de 6500 m³ (7170 m³ Max) portant chacune une capacité totale de stockage de 78000 m³ ;
- 6 pompes de surpression P001 A / B / C / D / E / F : Débit 165 m³ / h à P = 15 à 18 bar chacune, dont 3 pompes ont une deuxième fonction de transfert de GPL entre les sphères ;
- 3 pompes P002 A / B / C : Débit 350 m³ / h à P = 25 à 34 bar chacune, transport GPL vers la ligne 24 " avec un débit de 350 m³ / h chacune ;
- 5 unités de turbocompresseur avec 12 réfrigérants GPL.

- Cette étude utilise l'une des 12 sphères comme échantillon d'étude (**Figure 2.9**) et (**Tableau 2.4**).

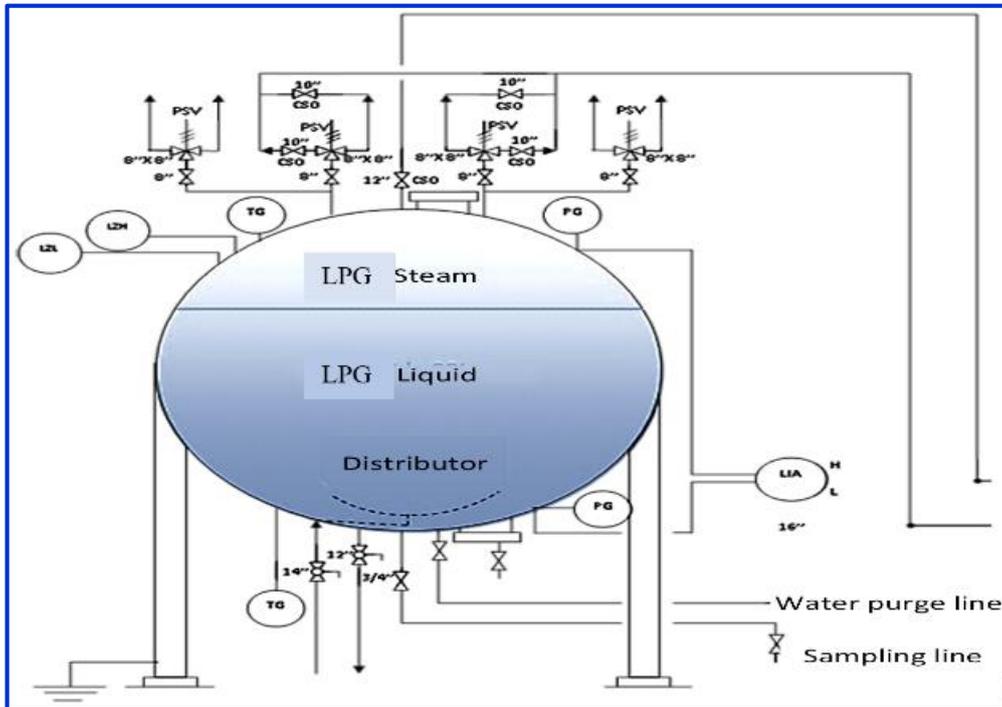


Figure 2.9 : Conception de sphère de GPL

Caractéristiques	Valeurs
Substance	GPL
La température Service (°C)	20
La température de calcul (°C)	17 à 93,3
La pression de service (bar)	5.34
La pression de test (bar)	9.6
Volume total (m ³)	7170
Densité (kg/m ³)	536

Tableau 2.4 : Caractéristiques des sphères GPL

Premièrement, la masse équivalente TNT doit être calculée M_{TNT} (kg) à partir de **l'équation (2.11)** :

$$M_{TNT} = \frac{f \times \Delta H_C \times M_G}{\Delta H_{TNT}} = \frac{0.1 \times 4.60122 \times 10^7 \left(\frac{J}{Kg} \right) \times 87203 (Kg)}{4.42 \times 10^6 \left(\frac{J}{Kg} \right)} = 90780 (Kg)$$

La fraction d'énergie libérée sous forme d'onde de choc n'étant pas connue, on suppose arbitrairement que $f = 0,1$ (valeurs comprises entre 0,01 et 0,1).

L'indice 10 de la méthode multi-énergies est une situation croissante. Cependant, cet indice permet de considérer le phénomène d'éclatement et de propagation des ondes de choc. Par conséquent, les distances suivantes sont calculées à partir de l'énergie d'explosion (équation 2.13) égale à :

$$E_X = M_G \times \Delta H_C = 4.60122 \times 10^7 \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg}} \right) \times 87203 (\text{Kg}) = 4.0124 \times 10^{12} (\text{J})$$

Après avoir calculé E_X et M_{TNT} , la distance réduite peut être déterminée à partir des équations 2.10 et 2.14. Avec les hypothèses précédentes, l'utilisation des abaques (Figures 2.5 et 2.7) permet de déterminer la surpression en fonction de la distance et par rapport aux résultats obtenus à l'aide du logiciel « EFFECTS », Figure 2.10 :

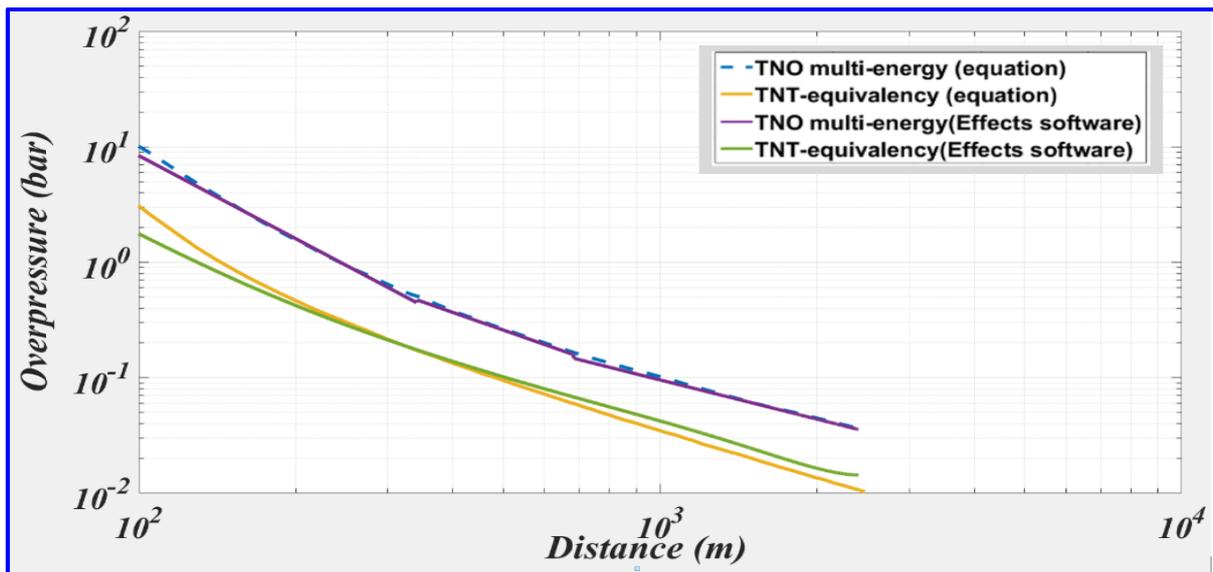


Figure 2.10 : La surpression par deux méthodes TNT et TNO [Hellas *et al.*, 2020a]

Discussion des résultats :

Les valeurs obtenues par les abaques de TNT et TNO [Brasie and Simpson., 1968 ; CPR., 1997] sont en très bon accord avec celles obtenues par le logiciel EFFECTS. Les différences ne sont observées que sur de très petites distances où l'augmentation de pression est assez forte. Les valeurs caractéristiques de surpression en fonction de la distance pour la méthode TNO sont supérieures à celles obtenues par la méthode Equivalent TNT.

D'une manière générale, on peut observer que si la méthode TNT peut rapidement apporter une réponse dans le calcul de la surpression en fonction de la distance, les valeurs obtenues par la méthode TNO sont plus proches des conditions réelles.

La méthode TNT calcule la surpression d'une explosion sans tenir compte de la configuration de l'espace où se déroule l'explosion. En plus de cela, une explosion au milieu d'une zone pleine d'équipement, ou dans un espace clos, présentera une puissance différente d'une équivalente dans un espace ouvert.

Le paramètre (f) dans la plupart des cas est inconnu et influence grandement la prédiction. De plus, la méthode ne calcule pas l'évolution dans le temps de l'explosion. Les courbes de surpression en fonction de la distance obtenue par la méthode multi-énergies, ainsi que celle obtenue par la méthode équivalent TNT, sont tracées. Les points suivants sont notés :

- Les valeurs obtenues par la méthode Multi-Energie sont supérieures à celles obtenues par la méthode équivalent TNT ;
- Les valeurs produites par la méthode multi-énergies sont plus proches des valeurs réelles observées en fonction des dommages résultant de l'explosion.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques modèles analytiques qui nous permettent d'estimer l'effet de la surpression et thermique utilisés dans l'étude du danger (analyse des conséquences). De ce fait, nous aurons donc besoin d'une approche globale, en l'occurrence l'analyse quantitative des risques, d'où l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Analyse Quantitative du Risque (QRA)

Sommaire

3 Analyse Quantitative du Risque (QRA)	47
3.1 Introduction	48
3.2 Objectifs de l'analyse quantitative des risques	48
3.3 Méthodologie d'analyse quantitative des risque	49
3.4 Collecte des informations pertinentes	51
3.5 Identification des scénarios d'accidents	51
3.6 Analyse de fréquence	54
3.6.1 Arbre de défaillance (AdD)	54
3.6.2 Arbre d'événement (AdE).....	54
3.6.3 Combinaison de l'analyse de défaillance et d'arbre d'événements	57
3.7 Analyse des conséquences	57
3.7.1 Analyse de probit	58
3.7.2 Abaque pour déterminer la probabilité de mort ou de bris de verre à l'effet de surpression par deux méthodes : TNT et TNO Multi-Energy	62
3.7.3 Seuils de vulnérabilité	68
3.8 Estimation du risque individuel et sociétal	71
3.8.1 Risque individuel	71
3.8.2 Risque sociétal	74
3.9 Critères d'acceptabilité du risque	76
3.9.1 Critère de Farmer	76
3.9.2 La méthode ALARP	77
3.10 Réduction de risque	79
3.11 Application de QRA classique dans le site de Constantine	80
3.11.1 Collecte d'informations pertinentes.....	80
3.11.2 Identification du scénario de danger	81
3.11.3 Estimation de la fréquence des événements déclencheurs et développement des AdEs .	81
3.11.4 Analyse des conséquences	83
3.11.5 Estimation du risque individuel	86
3.11.6 Estimation du risque sociétale	87
3.12 Limiter de la méthode QRA	87
3.13 Conclusion	88

3.1 Introduction

L'Analyse Quantitative du Risque, en anglais Quantitative Risk Analysis (QRA) est une méthode dont l'objectif est d'évaluer la probabilité de dommages causés par un accident potentiel. Cette méthode, initialement développée dans le domaine des transports et dans le nucléaire a été progressivement adapté à l'industrie des procédés, notamment dans les pays du nord de l'Europe. La particularité des méthodes de QRA réside dans la façon d'exprimer et de représenter les résultats de l'analyse de risques. On calcule généralement d'une part la probabilité qu'un individu, à un emplacement donné, meure des effets de l'accident, quantifié de risque individuel. D'autre part, la fraction de la population susceptible de mourir des effets de l'accident et la fréquence associée, quantifié du risque sociétal. Le QRA ne prend donc souvent en compte que les effets létaux sur les personnes. Ces résultats sont généralement représentés sous forme de courbe fréquence/gravité (ou courbe F/N) pour le risque sociétal ou de courbes iso-risque pour le risque individuel.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les objectifs et le déroulement de l'analyse quantitative des risques (QRA) en décrivant ses étapes. Nous exposons ensuite un aperçu sur ses différents avantages et ses limites.

3.2 Objectifs de l'analyse quantitative des risques

- Identifier les différentes sources de dangers potentiels et nuisance générés par l'établissement classé ;
- Réduire les risques à la source : une meilleure connaissance des risques permet d'apporter des modifications au procédé à l'étude (diminution de la quantité de matières dangereuses, modification de l'implantation des équipements, etc.) ;
- Informer les autorités publiques : la connaissance des risques permet aux autorités responsables de juger de l'acceptabilité environnementale du projet et/ ou du procédé à l'étude en considérant la sécurité et les mesures de gestion proposées ;
- Informer le public : la participation du public est une dimension essentielle de la procédure d'étude de dangers et d'impacts environnementaux aussi, l'analyse de risque est un outil d'information publique qui doit être facilement accessible ;
- Planifier les mesures d'urgence en tenant compte des risques majeurs : le maître d'ouvrage doit, en concertation avec les autorités publiques, développer des plans d'intervention pour les accidents aux conséquences majeures afin de préparer adéquatement les intervenants ;

- Déterminer l'acceptabilité du risque ;
- Identification des éléments qui contribuent le plus au risque et des points d'amélioration du design ;
- Procurer des informations relatives à l'aménagement du territoire.

Le but final d'une analyse quantitative des risques est de répondre aux questions suivantes :

- Que peut-il mal passer au niveau du risque qui conduirait à un état accidentel ?
- Quelle est la probabilité de survenance des dégâts ?
- Quelles sont les conséquences lorsqu'un événement indésirable se produit ?
- Le risque est-il acceptable et le cas échéant quelles sont les mesures nécessaires pour atteindre un niveau de risque acceptable ?

3.3 Méthodologie d'analyse quantitative des risques

La gestion des risques appliquée à l'industrie pétrolière est basée sur une analyse quantitative des risques afin de déterminer les mesures de sécurité préventive et protectrice des accidents catastrophiques. Dans ce chapitre, on présente une série d'étapes qui caractérisent la méthodologie d'analyse quantitative des risques, **Figure 3.1** et détaillées dans les sous-sections suivantes [[Hellas et al ., 2018](#)] :

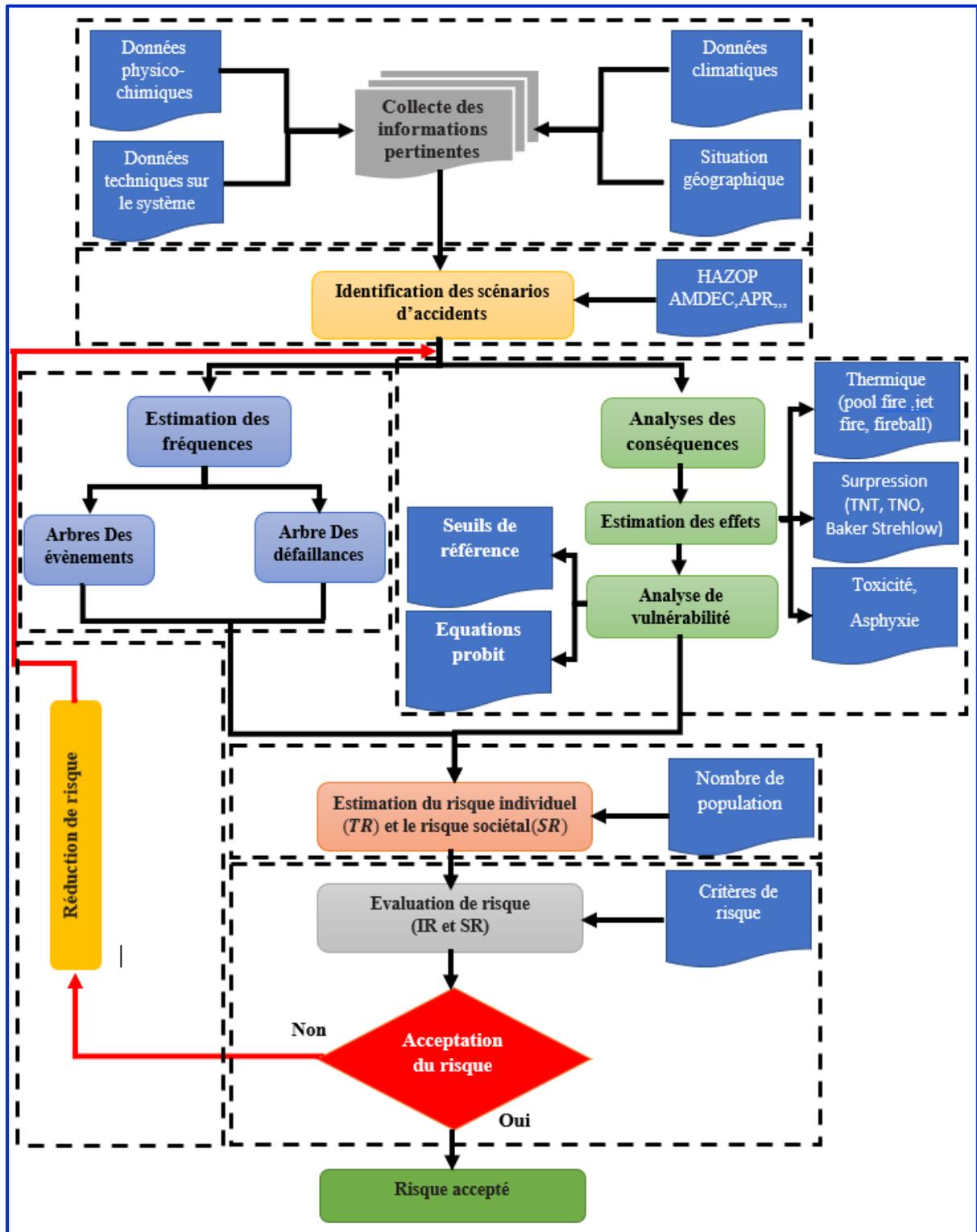


Figure 3.1 : Principales étapes d'une analyse quantitative des risques

3.4 Collecte des informations pertinentes

La première étape à suivre est bien entendu, de rassembler les données pertinentes qui seront utilisées pendant l'analyse. Il s'agit d'une phase extrêmement importante et le fait de s'assurer qu'elle est effectuée correctement peut vous faire gagner beaucoup de temps et éviter des approximations grossières. Les données critiques à collecter sont les suivantes :

- La situation géographique ;
- Les données climatiques (température moyenne, humidité, roses des vents et de la stabilité atmosphérique) ;
- Données physiques et chimiques des produits d'hydrocarbures prises en compte (la densité, le poids moléculaire, la pression de vapeur, la conductivité thermique et l'énergie de combustion, etc. ...) ;
- Les données techniques du système analysé.

3.5 Identification des scénarios d'accidents

Une fois que les informations pertinentes sont acquises, se révèle indispensable d'identifier les différents scénarios de dangers envisagés (par exemple : rupture ou fuite d'un réservoir, explosion de séparateur, ... etc.). Généralement sur un site d'hydrocarbures en fait appel à la méthode HAZOP (Hazard and Operability), qui se réalise à partir de P&ID d'unité. L'HAZOP ou l'Analyse de Perturbations largement utilisée dans l'industrie pétrochimique et chimique est une analyse systématique et formalisée d'identification des risques et des problèmes d'opérabilité d'installations ou de procédés. L'identification systématique et la détermination des causes et des conséquences des perturbations susceptibles de survenir au cours de l'exploitation des installations permettent de fait une analyse de l'intégrité opérationnelle du système étudié.

Une perturbation correspond à une déviation par rapport aux intentions du concepteur susceptible de survenir aussi bien en opération normale ou en exploitation dite de routine des installations qu'en phase de démarrage, de mise à l'arrêt, d'entretien, etc.

L'essentiel de l'étude HAZOP réside dans les sessions de réflexion au cours desquelles une équipe multidisciplinaire examine systématiquement les différents composants d'un projet selon une procédure structurée et suscitant la créativité. Les sessions de réflexion sont conduites par un team leader qui veille à leur bon déroulement.

Le caractère structuré et créatif de la méthode est réalisé en examinant systématiquement les lignes et éléments de l'installation. Pour chaque ligne et éléments

examinés, les intentions du concepteur sont rappelées et les causes et conséquences d'écarts à ces intentions sont recherchées par application de mots-guide bien définis.

Lors des sessions HAZOP (**Tableau 3.1**), les 10 étapes suivantes sont passées en revue :

- 1) Dans un premier temps, choisir une maille. Elle englobe généralement un équipement et ses connexions, l'ensemble réalisant une fonction dans le procédé identifiée au cours de la déception fonctionnelle ;
- 2) Choisir un paramètre de fonctionnement ;
- 3) Retenir un mot-clé et générer une dérive ;
- 4) Vérifier que la dérive est crédible. Si oui, passer au point 5. Sinon revenir au point 3 ;
- 5) Identifier les causes et les conséquences potentielles de cette dérive ;
- 6) Examiner les moyens visant à détecter cette dérive ainsi que ceux prévus pour en prévenir l'occurrence ou en limiter les effets ;
- 7) Proposer, le cas échéant, des recommandations et améliorations ;
- 8) Retenir un nouveau mot-clé pour le même paramètre et reprendre l'analyse au point 4;
- 9) Lorsque tous les mots-clés ont été considérés, retenir un nouveau paramètre et reprendre l'analyse au point 2 ;
- 10) Lorsque toutes les phases de fonctionnement ont été envisagées, retenir une nouvelle ligne et reprendre l'analyse au point 1.



Figure 3.2 : Déroulement de la méthode HAZOP

Unité/Opération : Ligne/Équipement							
Paramètre :HAZOP							
Mot-clef	Divination	Causes	Conséquences	Détection	Sécurité existante	Proposition d'amélioration	Observation

Tableau 3.1 : Présentation des paramètres de l'HAZOP

3.6 ANALYSE DE FREQUENCE

3.6.1 Arbre de défaillance (AdD) : L'analyse par arbre de défaillance est une méthode du type déductif. En effet, il s'agit, à partir d'un événement redouté défini a priori, de déterminer les enchaînements d'évènements ou combinaisons d'évènements pouvant finalement conduire à cet événement. Cette analyse permet de remonter de causes en cause jusqu'aux évènements de base susceptibles d'être à l'origine de l'évènement redouté. Quelle que soit la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances est fondée sur les principes suivants :

- Ces évènements sont indépendants ;
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible ;
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être évaluées.

Les liens entre les différents évènements sont réalisés grâce à des opérateurs logiques, (et, ou, k-sur-n ...). Cette méthode utilise une représentation graphique qui permet de présenter les résultats dans une structure arborescente généralement développée et surtout pour les structures compliquées par un algorithme du diagramme de décision binaire, **Figure3.3**.

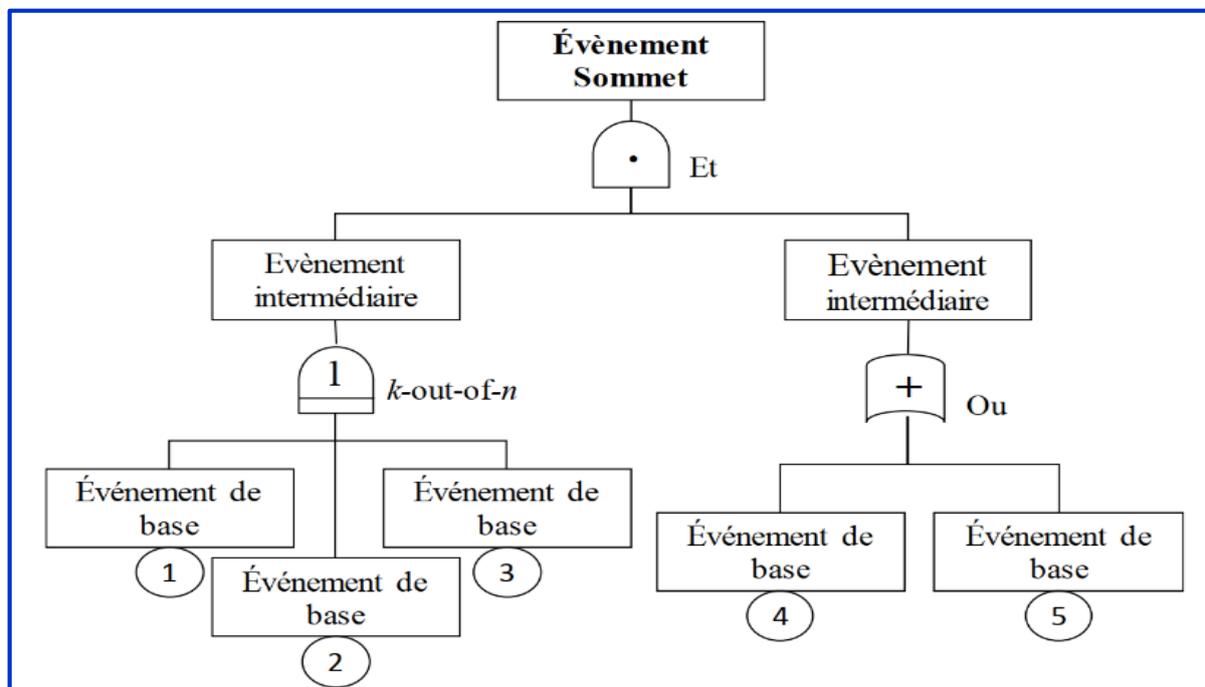


Figure 3.3 : Exemple d'une structure d'arbre de défaillance

3.6.2 Arbre d'évènement (AdE) : L'arbre d'évènements illustre graphiquement les conséquences potentielles d'un accident qui résulte d'un événement initiateur (une

défaillance spécifique d'un équipement ou une erreur humaine). Une analyse par arbre d'événements (AdE), **Figure 3.4**, prend en compte la réaction des systèmes de sécurité et des opérateurs à l'événement initiateur lors de l'évaluation des conséquences potentielles de l'accident. Les résultats de l'AdE sont des séquences accidentelles ; c'est-à-dire un ensemble de défaillance ou d'erreurs qui conduisent à l'accident. Ces résultats décrivent les conséquences potentielles en termes de séquence d'événements (succès ou défaillance des fonctions de sécurité) qui font suite à un événement initiateur.

Une analyse par arbre d'événements est bien adaptée pour étudier des procédés complexes qui ont plusieurs barrières de protection ou procédures d'urgence en place pour réagir à un événement initiateur spécifique.

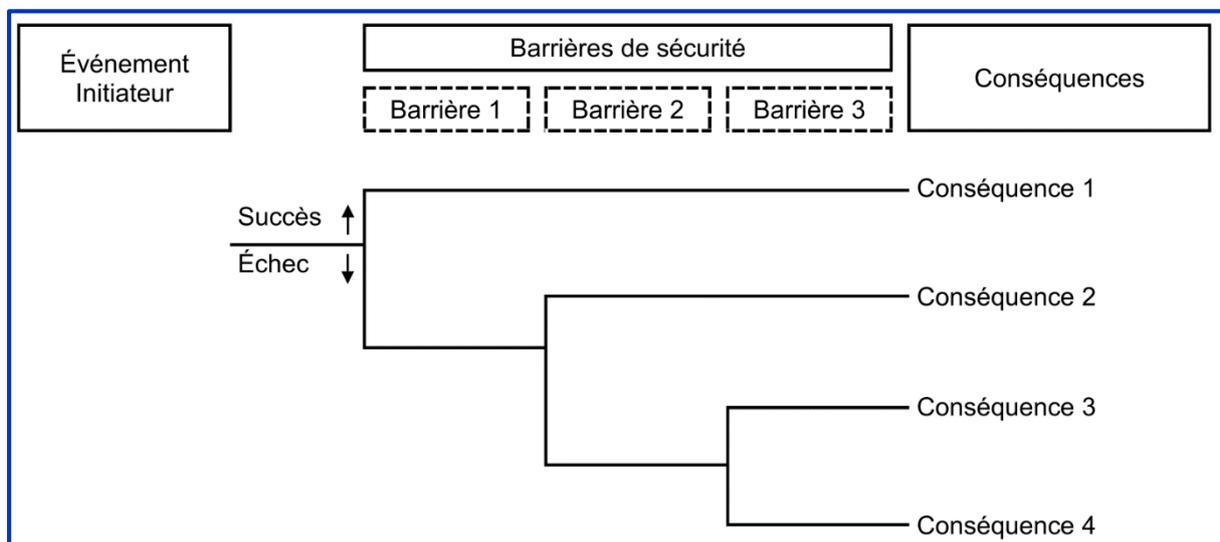


Figure 3.4 : Schéma d'un arbre d'événement

Ce schéma présente la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur par celles des barrières de sécurité existantes et pouvant empêcher le scénario d'accident. Les étapes de la méthode sont :

- Définition de l'élément initiateur ;
- Identification des barrières de sécurité et leurs fonctions ;
- Construction de l'arbre ;
- Traitement de l'arbre.

L'AdE sert le support pour LOPA. Ainsi, pour aider à la mise en œuvre de la méthode AdE, le **CCPS (2001)** propose des valeurs de probabilité de défaillance pour différents types de barrières de sécurité. Ces valeurs sont reprises dans le **Tableau 3.2**.

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

Tableau 3.2 : Les évènements initiateurs /Fréquences des conséquences

Barrière de sécurité	Intervalle issu de la littérature	Valeur proposée par LOPA
Digue	10^{-3} à 10^{-2}	10^{-2}
Système de drainage	10^3 à 10^2	10^{-2}
Ignifuge (Fireproofing)	10^{-3} à 10^{-2}	10^{-2}
Arrêt Flamme et détonation	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}
Système de contrôle(BPCS)	10^{-2} à 10^{-1}	10^{-1}
Cuvette de rétention	10^{-3} à 10^{-2}	10^{-2}

Mur résistant à la surpression	10^{-3} à 10^{-2}	10^{-3}
Action humaine	10^{-4} à 1	10^{-1}

Tableau 3.3 : La probabilité de défaillance recommandée

Cette étape constitue la synthèse des étapes précédentes. La procédure générale de calcul de la fréquence de la conséquence réduite est de combiner la fréquence de l'événement initiateur et les PFD des IPLs et la probabilité d'ignition en utilisant l'équation suivante :

$$f_{ci} = f_{E,i} \times \prod_{j=1}^j PFD_i^j \times \prod_{k=1}^k (1 - PFD_i^k) \times \prod_{n=1}^n P_{di}^n \times \prod_{m=1}^m (1 - P_{di}^m) \quad (3.1)$$

3.6.3 Combinaison de l'analyse de défaillance et d'arbre d'événements : Le squelette de la QRA se fonde sur la combinaison de plusieurs méthodes dans ces différentes étapes, (Figure 3.5).

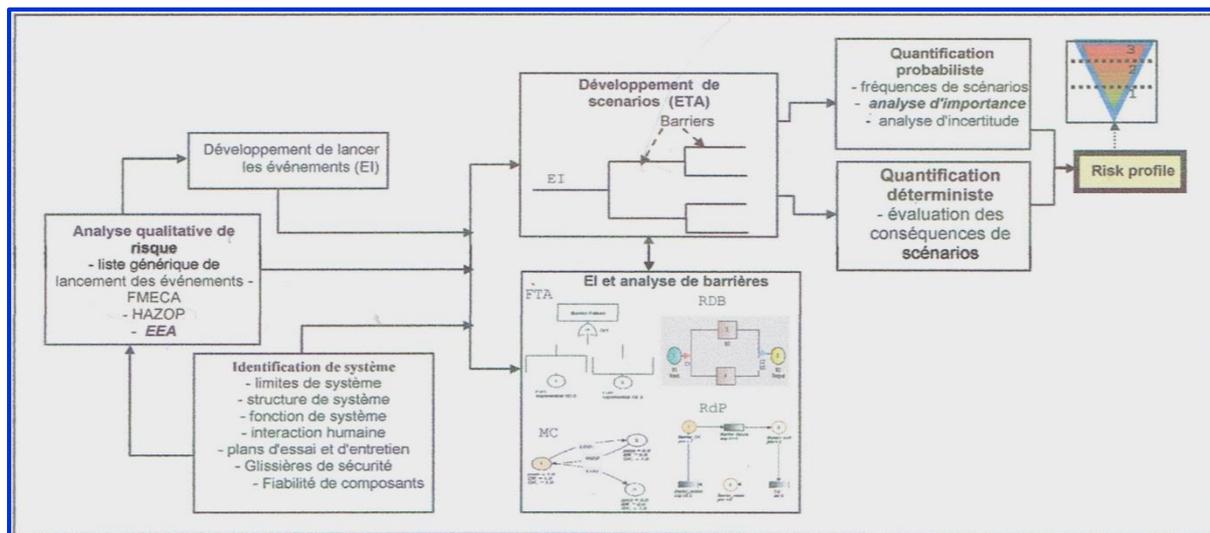


Figure 3.5 : Combinaison de l'Add/AdE

3.7 Analyse des conséquences

Une fois que les arbres des évènements sont établis, les conséquences doivent être déterminées en estimation leurs effets sur les individus, les installations et l'environnement. Cette étape permet de connaître les zones à l'intérieur desquelles la sécurité des populations environnement sont retenus pour la planification d'urgence.

Les conséquences d'un scénario d'accident se définissent à la l'aide de deux notions :

- ❖ Les caractéristiques d'accident ;
- ❖ Son impact.

Les caractéristiques sont déterminées à partir de la modélisation de l'accident et établies en modélisant de ces caractéristiques sur les éléments du milieu environnant. Par exemple, lors d'un incendie (événement accidents), la radiation thermique, (caractéristique) entraîne des brûlures (impacte) aux individus exposés [Théberge., 2000].

3.7.1 Analyse de probit : La fonction qui établit le lien entre l'ampleur d'une conséquence et le degré de dommage qu'elle cause (c.-à-d. relation dose-réponse), est requise pour évaluer les conséquences d'un accident. La méthode la plus fréquemment appliquée est l'analyse de probit, qui met en relation la variable probit et la probabilité d'atteinte de cibles par un effet nocif.

Par définition, la variable probit Y est une mesure du pourcentage d'une population soumise à une dose donnée d'un effet (V), qui peut subir un degré de dommage donné. Cette variable obéit à une distribution normale et se caractérise par une valeur moyenne de 5 et un écart type égal à 1. La relation entre la variable probit (Y) et la probabilité d'atteinte (P_F) peut être définie de la manière suivante [Casal., 2017 ; CCPS., 2000] :

$$P_{Fi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{V^2}{2}\right) \cdot dV \quad (3.2)$$

Si le pourcentage de la population ayant connu une réponse donnée n'est pas tracé en fonction de la dose de l'effet nocif, mais plutôt en fonction de son logarithme, l'équation (3.2) peut être transformée pour donner l'expression (3.3), qui est souvent utilisée pour estimer la valeur de la variable probit Y [Casal., 2017 ; Mannan., 2012] :

$$Y = A + B \ln V \quad (3.3)$$

Où : A et B sont des constantes déterminées expérimentalement à partir des informations sur les accidents. 'V' est une mesure de dose de l'effet nocif, qui peut être un paramètre unique (par exemple, la suppression d'explosion) ou une combinaison de différents paramètres (par exemple, une combinaison de relation thermique et de temps en cas d'incendie).

L'équation probit des effets létaux ou des dommages matériels prend les formes suivantes selon les effets :

- Pour les produits toxiques : $Y = A + B \ln (C^n \times t)$. Où 'C' est la concentration (ppm) et 't' est le temps d'exposition (min) ;

- Pour les effets thermiques : $Y = A + B \ln(Q^{4/3} \times t)$. Où 'Q' est le flux reçu (W / m^2) et 't' est le ou les temps d'exposition(S) ;
- Pour la surpression : $Y = A + B \ln(S)$. Où 'S' est la surpression (Pa).

Sont présentés diverses équations probit pour différents types d'exposition, **Tableau3.4**.

Affects	Dose	Fonction de probit
Effet thermique (TNO.,1989)		
1 ^{ère} degré de brûlure	$Q = (t \times I^{4/3})$	$Y = - 39.83 + 03.02 \times \ln(Q)$
2 ^{ème} degré de brûlure		$Y = - 43.14 + 03.02 \times \ln(Q)$
brûlure au troisième degré		$Y = - 36.38 + 02.56 \times \ln(Q)$
Effet de surpression (Hirsch.,1968 ;Bowen et al.,1968 ;Baker et al.,1983)		
Rupture du tympan	$S = P_s$	$Y = - 12.60 + 01.52 \times \ln(S)$
	$S = \frac{4.2}{P_{bar}} + \frac{1.3}{i_{bar}}$	
Domages aux poumons	$P_{bar} = \frac{P_s}{P_a}$, $i_{bar} = \frac{i}{m^{1/3} \times \sqrt{P_a}}$	$Y = + 05.00 - 05.750 \times \ln(S)$
Whole-Body Displacement Impact	$S = \frac{7.38 \times 10^3}{P_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{P_s \times i_s}$	$Y = + 05.00 - 02.440 \times \ln(S)$
Impact sur la tête	$S = \frac{2,43 \times 10^3}{P_s} + \frac{4 \times 10^8}{P_s \times i_s}$	$Y = + 05.00 - 08.490 \times \ln(S)$
Effondrement d'un bâtiment	$S = \left(\frac{40000}{P_s}\right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i_s}\right)^{11.3}$	$Y = + 05.00 - 00.22 \times \ln(S)$
Domages structurels majeurs	$S = \left(\frac{17500}{P_s}\right)^{8.4} + \left(\frac{290}{i_s}\right)^{9.3}$	$Y = + 05.00 - 00.26 \times \ln(S)$
Domages mineurs	$S = \left(\frac{4600}{P_s}\right)^{3.9} + \left(\frac{110}{i_s}\right)^{5.0}$	$Y = + 05.00 - 00.26 \times \ln(S)$
Rupture des vitres	$S = P_s$	$Y = - 16.58 + 02.53 \times \ln(S)$
Effet toxique		
1,2-Propylene oxide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = - 15.68 + 01.69 \times \ln(T)$

Acrolein	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -03.21 + 01.00 \times \ln(T)$
Acrylamide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -17.08 + 01.67 \times \ln(T)$
Acrylonitrile	$T = (C^{1.3} \times t)$	$Y = -07.52 + 01.00 \times \ln(T)$
Ammonia	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -16.21 + 1.00 \times \ln(T)$
Benzene	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -109.8 + 5.30 \times \ln(T)$
Benzyl chloride	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -10.277 + 1.67 \times \ln(T)$
Carbon disulfide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -16.575 + 1.678 \times \ln(T)$
Carbon monoxide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -07.21 + 1.00 \times \ln(T)$
Chlorine	$T = (C^{2.75} \times t)$	$Y = -04.81 + 0.500 \times \ln(T)$
Ethylene oxide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -06.15 + 1.00 \times \ln(T)$
Hydrazine	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -13.45 + 1.67 \times \ln(T)$
Hydrogen chloride	$T = (C^{1.18} \times t)$	$Y = -15.69 + 1.69 \times \ln(T)$
Hydrogen cyanide	$T = (C^{1.85} \times t)$	$Y = -05.80 + 1.08 \times \ln(T)$
Hydrogen fluoride	$T = (C^{1.5} \times t)$	$Y = -08.62 + 1.00 \times \ln(T)$
Hydrogen peroxide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -16.39 + 1.67 \times \ln(T)$
Hydrogen sulfide	$T = (C^{4.55} \times t)$	$Y = -08.53 + 0.44 \times \ln(T)$
Methanol	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -23.61 + 1.93 \times \ln(T)$
Methyl bromide	$T = (C^{1.1} \times t)$	$Y = -5.740 + 1.00 \times \ln(T)$
Methyl isocyanate	$T = (C^{0.7} \times t)$	$Y = -00.57 + 1.00 \times \ln(T)$
Nitric oxide	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -150.83 + 15.43 \times \ln(T)$
Nitrogen dioxide	$T = (C^{3.7} \times t)$	$Y = -16.05 + 1.00 \times \ln(T)$
Phenol	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -13.460 + 1.67 \times \ln(T)$
Phosgene	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -07.69 + 2.00 \times \ln(T)$
Sulphur dioxide	$T = (C^{2.4} \times t)$	$Y = -16.75 + 1.00 \times \ln(T)$
Toluene	$T = (C^{2.5} \times t)$	$Y = -6.794 + 0.408 \times \ln(T)$
Vinyl chloride	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -22.502 + 1.674 \times \ln(T)$
Allyl alcohol	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -09.86 + 1.00 \times \ln(T)$
Arsine	$T = (C^{1.24} \times t)$	$Y = -08.77 + 1.61 \times \ln(T)$
Bromine	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -08.53 + 1.00 \times \ln(T)$
Ethyleneimine	$T = (C^{1.13} \times t)$	$Y = -10.35 + 1.77 \times \ln(T)$
Fluorine	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -19.09 + 1.694 \times \ln(T)$
Formaldehyde	$T = (C^1 \times t)$	$Y = -54.57 + 6.619 \times \ln(T)$

Phosphine	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -06.03 + 1.00 \times \ln(T)$
Tetraethyl lead	$T = (C^2 \times t)$	$Y = -04.52 + 1.00 \times \ln(T)$
Methylmercaptaan	$T = (C^{0.98} \times t)$	$Y = -16.33 + 2.05 \times \ln(T)$

Tableau 3.4 : Corrélation probit pour différents types d'exposition

La variable probit doit être converti en un pourcentage (probabilité de blessure /mort). Ceci peut être fait en utilisant des données du **Tableau 3.5 et Figure3.6**.

%	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Tableau 3.5 : Relation entre la variable probit et le pourcentage

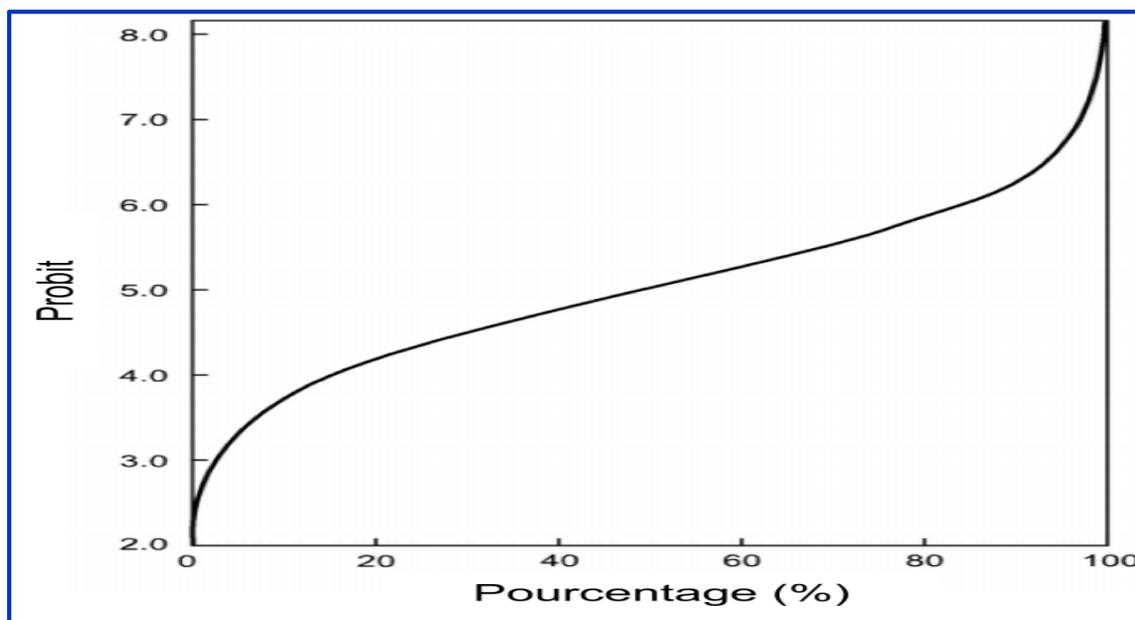


Figure3.6 : Relation entre la variable probit et le pourcentage d'atteinte (Mannan., 2012)

Une autre expression qui établit le lien entre la variable probit et la probabilité d'atteinte des cibles par un effet nocif donné est exprimée par [CCPS., 2000] :

$$P_{Fi} = 50 \times \left[1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \times \operatorname{erf} \left(\frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.4)$$

3.7.2 Abaque pour déterminer la probabilité de mort ou de bris de verre à l'effet de surpression par deux méthodes : TNT et TNO Multi-Energy : Généralement, pour déterminer la probabilité de fatalité de l'effet de surpression on fait appel aux deux méthodes TNT et TNO multi-énergie. Cependant avec les inconvénients enregistrés dans l'application de ces méthodes entre autres l'incertitude des résultats et les difficultés de leur utilisation, un abaque a été proposé pour déterminer la probabilité de fatalité de l'effet de surpression et qui donne les mêmes résultats [Hellas *et al.*, 2020a]. Cet abaque a été déterminé en faisant appel aux deux méthodes citées ci-dessous connues dans la littérature à savoir, **Figure3.7**.

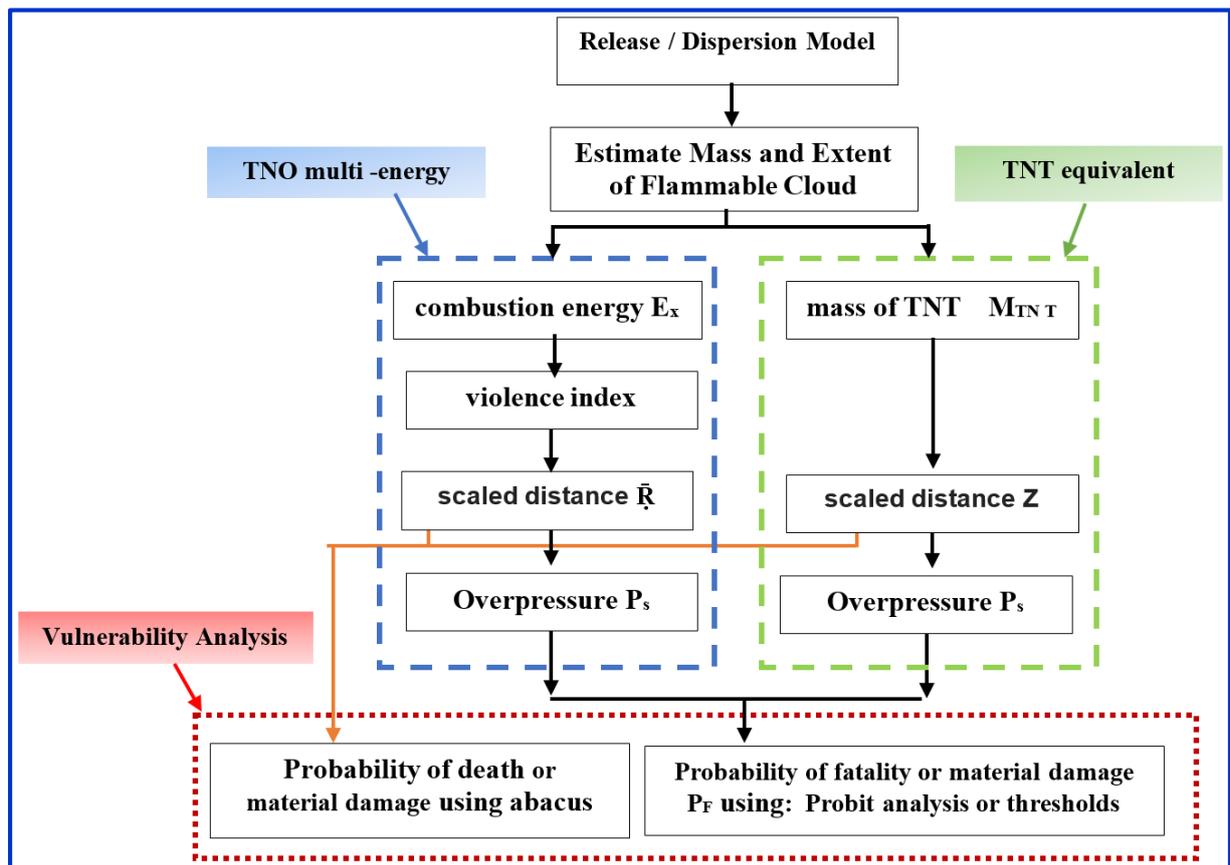
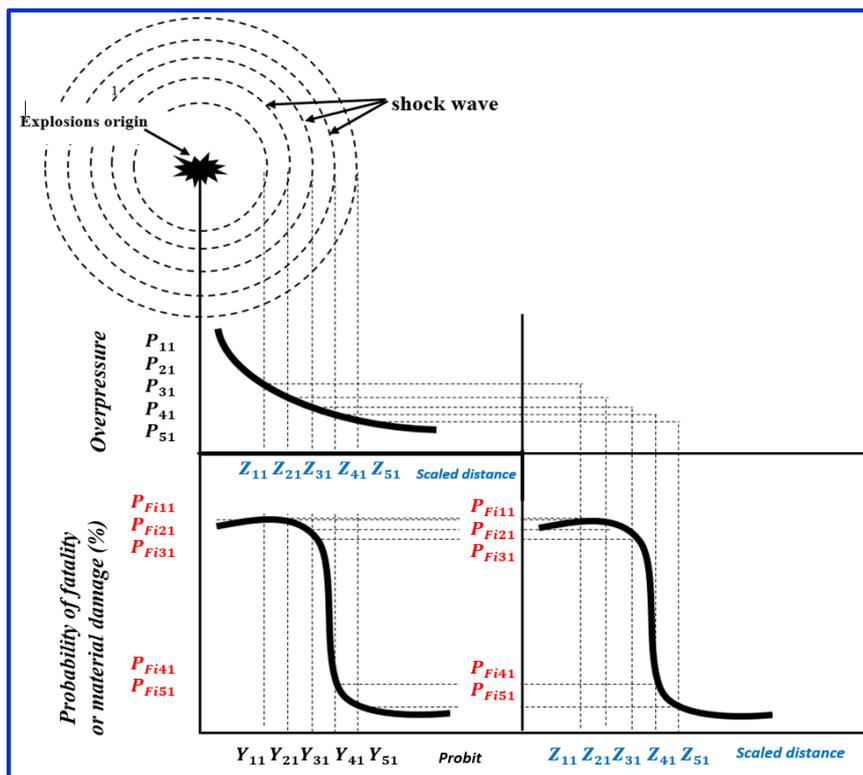


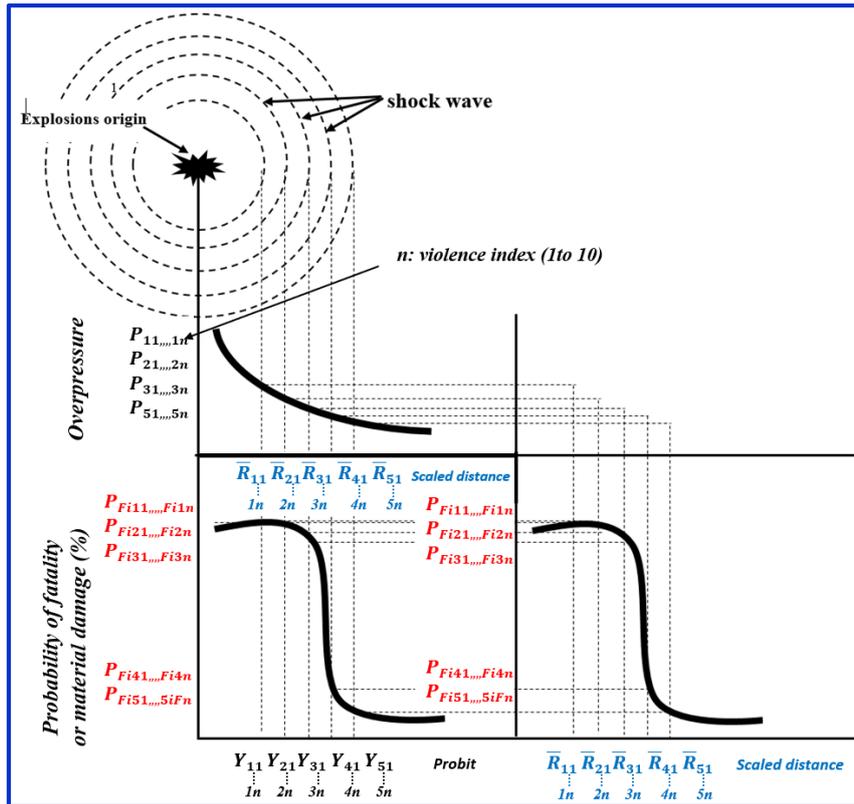
Figure 3.7 : Une nouvelle façon de déterminer la probabilité de décès dû à l'effet d'une surpression [Hellas *et al.*, 2020a]

Pour chaque explosion, il est possible d'obtenir la relation surpression (P_s) - probit (Y_1, Y_2, \dots, Y_n) - probabilité de décès ou de dommages matériels ($P_{F2}, P_{F3}, \dots, P_{Fn}$) et la distance

réduite \bar{R} pour TNO et Z pour TNT appelée ici « abaques ». La **Figure 3.8** montre, sous forme graphique, la courbe caractéristique établie à partir des profils d'onde de choc sur les surpressions – **distance réduite**- probabilité de décès ou de dommages matériels (tirés respectivement des **Figures 2.5 et 2.7** du chapitre 2 et de l'**Equation 3.4** et le **Tableau 3.4**). Les distances au centre d'explosion (\bar{R} et Z) peuvent également être incluses pour afficher toutes les informations dans le même diagramme, **Figures 3.9 et 3.10**.

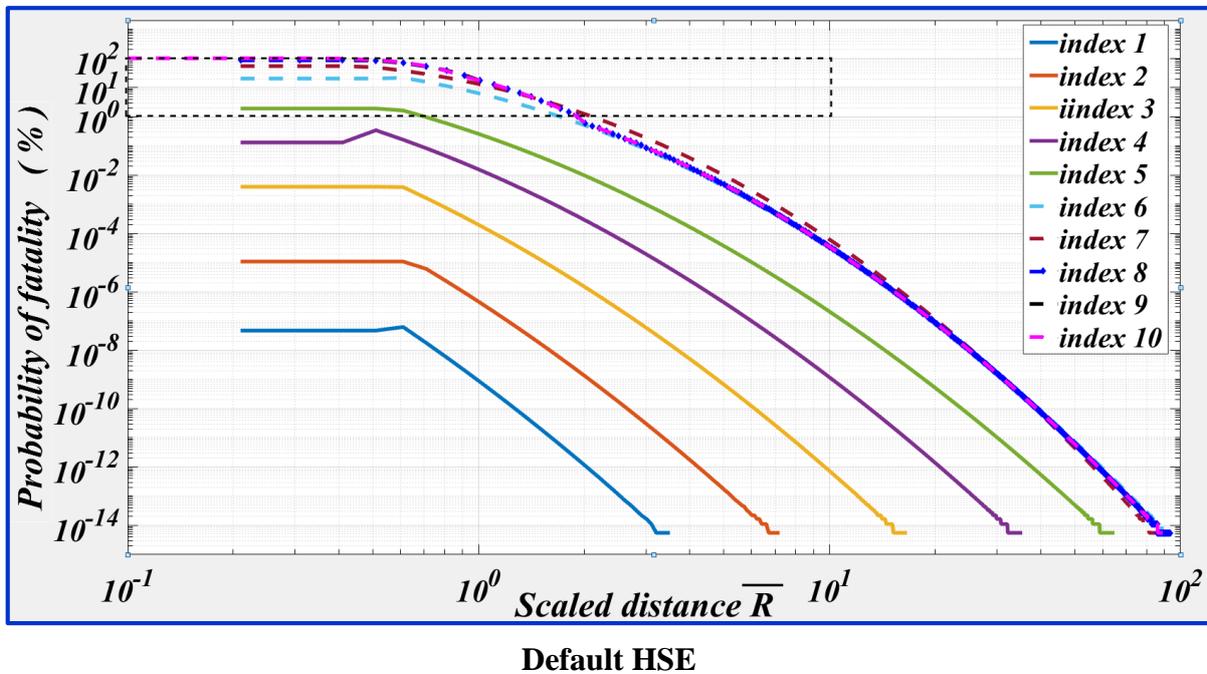


TNT

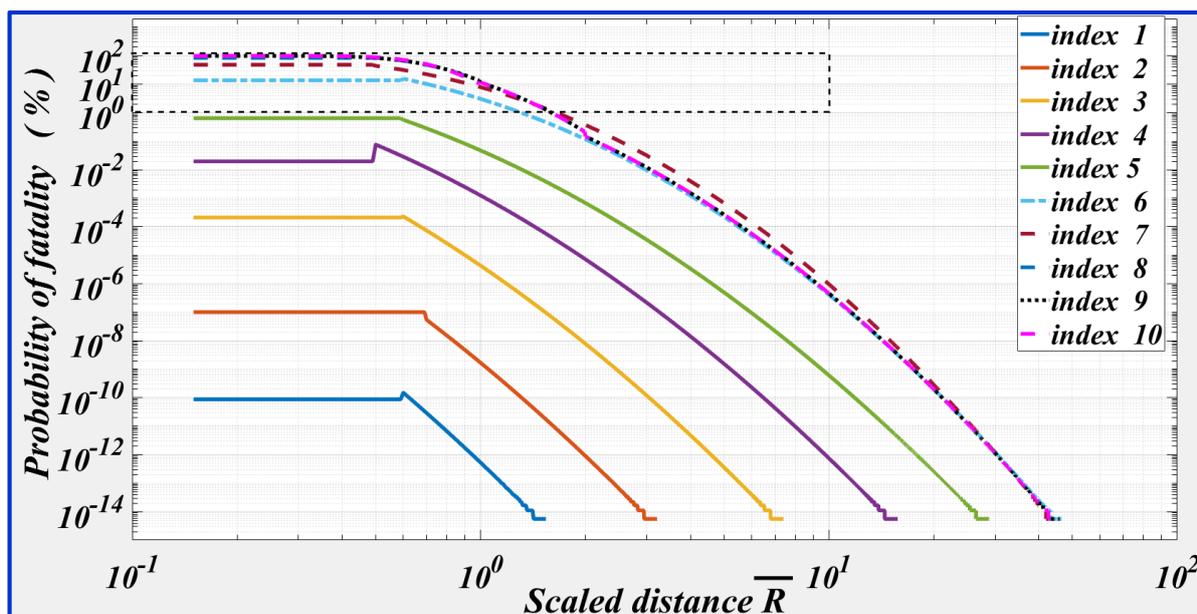


TNO

Figure 3.8 : Abaque d'une explosion obtenue à partir de la relation surpression - probabilité de mort - probabilité de mort ou dommages matériels et distance réduite



Default HSE



Rupture du tympan

Figure. 3.9 : Abaque général de la probabilité de décès et des dommages matériels par la méthode TNO [Hellas *et al.*, 2020a]

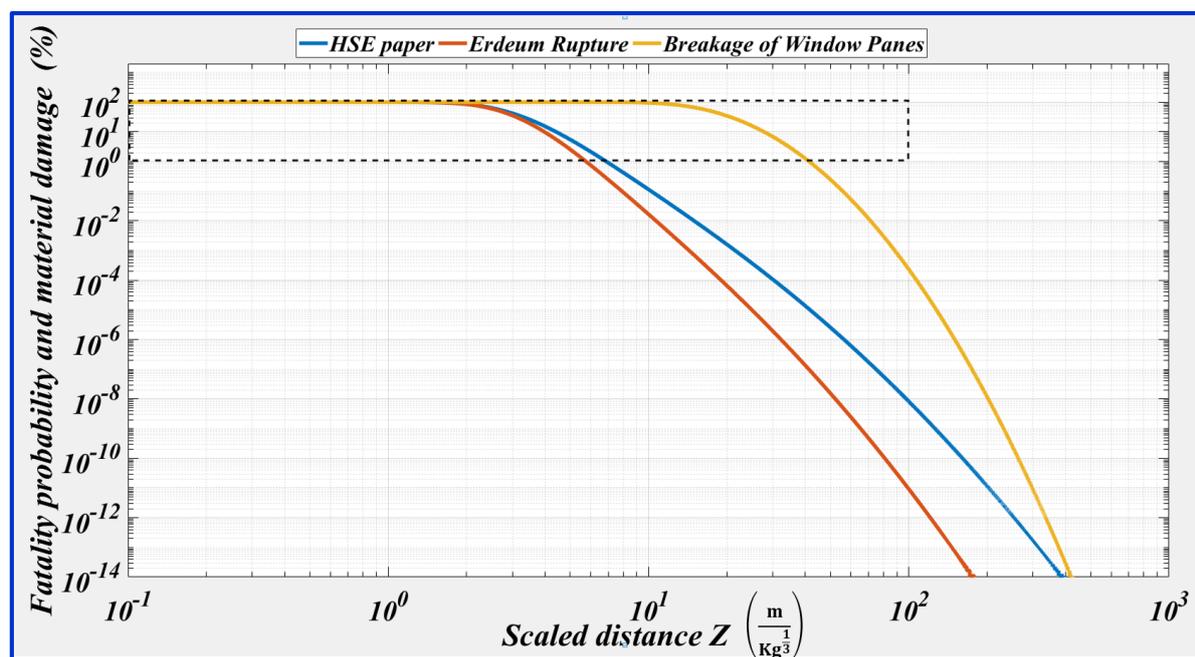
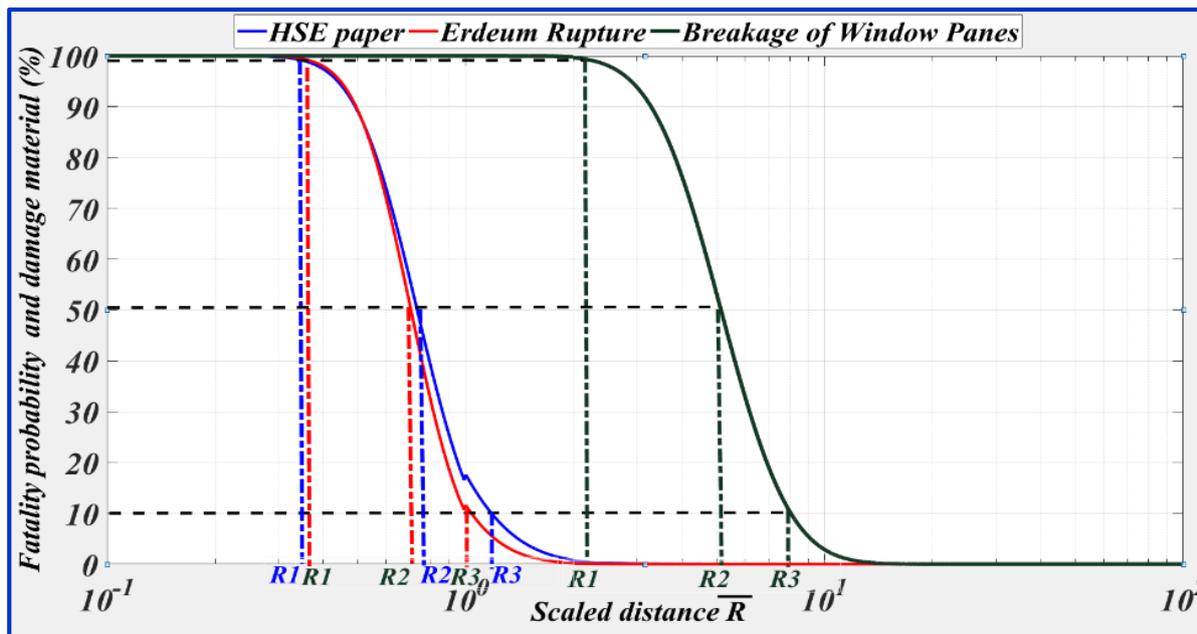


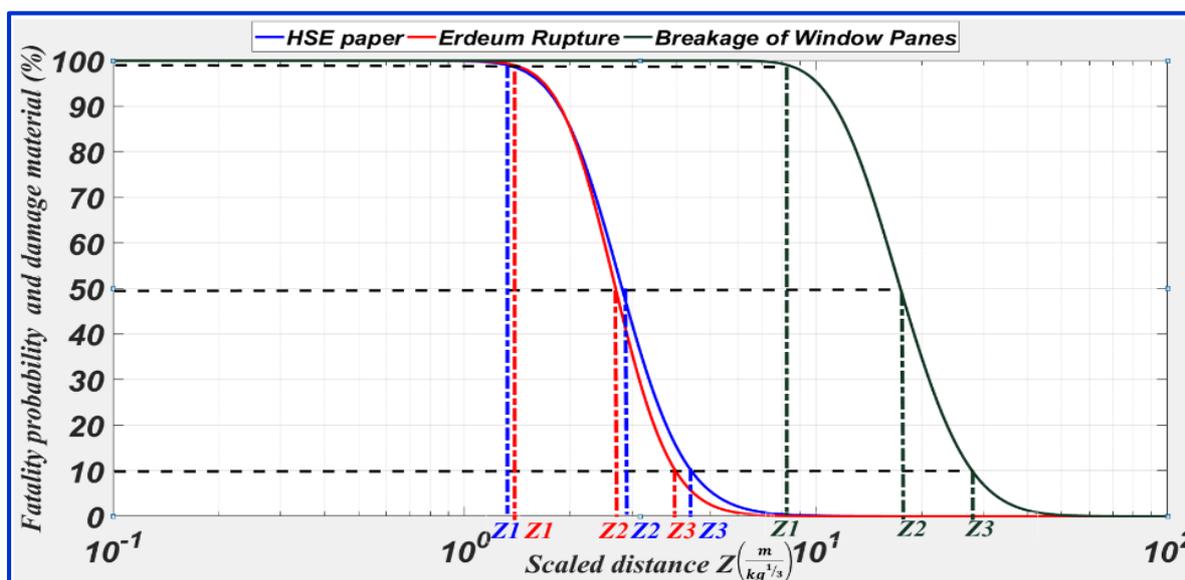
Figure 3.10 : Abaque général de la probabilité de décès et des dommages matériels par la méthode TNT [Hellas *et al.*, 2020a]

Nouveaux abaques de létalité et le dommage appliqués dans le site réel : On utilise des informations précédentes dans l'exemple d'application des abaques (TNT et TNO) de suppression de chapitre 2. Les parties agrandies sélectionnées par des carrés en pointillés sur

les **Figures 3.9** et **3.10** montrent respectivement la probabilité de décès : HSE, rupture de tympan (Eardrum Rupture-ER) et d'endommagement : rupture de fenêtre (Breakage of Window Panes- BWP). Celles-ci sont représentées par la distance réduite (\bar{R} pour TNO et Z pour TNT), **Figure 3.11** et les **Tableaux 3.6** et **3.7**. Ainsi, en utilisant cette nouvelle méthodologie, la simulation des explosions est plus simple et plus rapide.



TNO (Violence index 10)



TNT

Figure 3.11 : Probabilité de mort ou de dommage matériel par effet de surpression

[Hellas et al., 2020a]

TNT

Probabilité de décès	10			50			99		
ou de dommage (%)	ER	HSE	BWP	ER	HSE	BWP	ER	HSE	BWP
Z (m/kg ^{1/3})	Z_1	Z_1	Z_1	Z_2	Z_2	Z_2	Z_3	Z_3	Z_3
	3.96	4.4	27.8	2.68	2.8	17.4	1.37	1.3	8.3
Distance x (m)	177.9	197.74	1249.4	120	125	782	61.5	58.4	373

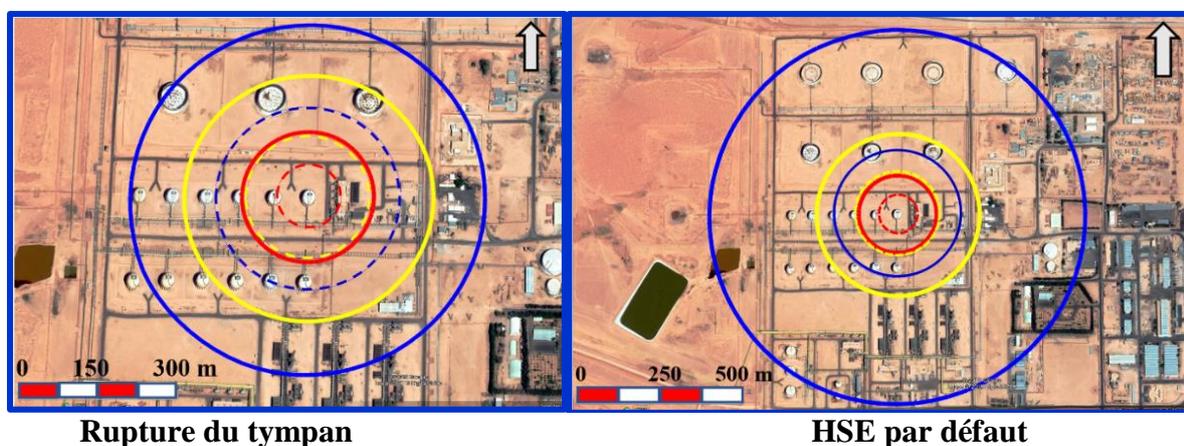
Tableau 3.6 : La probabilité de décès ou de dommage matériel selon la méthode TNT

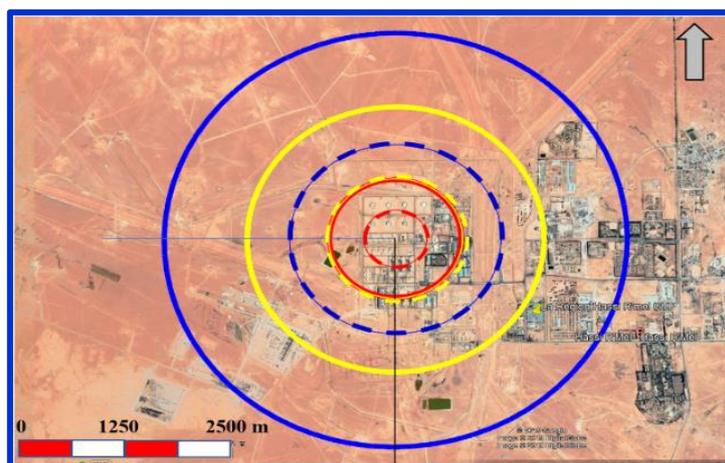
TNO									
Probabilité de décès	10			50			99		
ou de dommage (%)	ER	HSE	BWP	ER	HSE	BWP	ER	HSE	BWP
\bar{R} (-)	\bar{R}_1	\bar{R}_1	\bar{R}_1	\bar{R}_2	\bar{R}_2	\bar{R}_2	\bar{R}_3	\bar{R}_3	\bar{R}_3
	1	7	2.28	0.7	0.73	5.14	0.37	0.35	8.02
Distance R (m)	341	580	2736.5	238.8	249	1753.8	126.2	119.4	777.9

Tableau 3.7 : La probabilité de décès et dommage matériel selon la méthode TNO

[Hellas *et al.*, 2020a]

La **Figure 3.12** et les **Tableaux 3.6** et **3.7** montrent clairement les différentes zones de létalité (rupture du tympan ou papier HSE) ou de dommage matériel (casse des vitres) sous l'effet de la surpression par deux méthodes : TNT et TNO Multi-Energy.





Rupture des vitres



Figure 3.12 : Les contours de probabilité de mortalité et dommages matériels par méthode TNT et TNO [Hellas *et al.*, 2020a]

2.7.3 Seuils de vulnérabilité : Dans la littérature, divers seuils d'effets thermiques et surpression sur les structures et sur les hommes sont référencés. Ces valeurs sont présentées dans les **Tableaux (3.8 à 3.11)** ci-après :

❖ **Effets thermiques sur les structures**

Seuils thermiques relatifs à la résistance des structures

Dégâts constatés	Flux radiatif (en kW/m²)	Principales références
Bris de vitres	5	
Propagation de feu improbable, sans mesure de protection particulière	< 8	
La peinture cloque	8	
Apparition d'un risque d'inflammation pour les matériaux combustibles (tels que le bois) en présence d'une source d'ignition	10	
Propagation de feu improbable sans mesure de refroidissement suffisante	< 12	
Flux limite de tenue des structures pour une exposition prolongée, hors structure béton	16	[API RP521., 1990]
Auto-inflammation de bois	35	
Tenue du béton pendant plusieurs heures	20	
Propagation du feu à des réservoirs de stockage d'hydrocarbures, même	< 36	

refroidis		
Auto-inflammation des matériaux plastiques thermodurcissables	84	
Ruine du béton en quelques dizaines de minutes	200	
<hr/>		
Inflammation des surfaces exposées au flux radiatif et ainsi rupture ou destruction des éléments de structures selon les cas suivants :		
— Bois	15	
— Matières synthétiques Rupture.	15	
Ou destruction des éléments de structures en :		
— Verre	4	
— Acier.	100	BOOK, TNO
<hr/>		
Décoloration importante d'une certaine surface de matériau exposé au flux radiatif, écaillage des peintures et / ou déformations significatives des éléments de structure :		Green (1989)
— Bois	2	
— Matières synthétiques	2	
— Acier	25	

Tableau 3.8 : Les seuils d'effets thermiques sur les structures

❖ **Effets thermiques sur l'homme**

Seuils des d'effets thermiques pour l'homme			
	Types d'effets constatés	Seuil	Référence
Durée du phénomène > 2 minutes Flux radiatifs exprimés en kW / m ²	Létaux	5	Baker et al., 1983
	Irréversibles	3	
Durée du phénomène < 2 minutes Doses thermiques exprimées en [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Létaux (100 %)	6000-7000	Hymes (1983)
	Brûlures du 3ème degré superficiel	2600	
	Létaux (50 %)	2200 -2000	Hymes (1983)
	Brûlures du 2nd degré sévères	1200	Hancock (1997)
	Létaux (1 %)	1000	Hymes (1983)
	Irréversibles	600	Baker et al. (1983)
	Brûlures du 2nd degré superficielles	700	
	Brûlures du 1er degré	200	
	Seuil de douleur	85	

Tableau3.9 : Les seuils d'effets thermiques sur l'homme

❖ **Effets de surpression sur les structures**

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures		
Dégâts constatés	Surpression (en mbar)	Référence
Bris de vitres :		
— Valeurs type de bris de vitres	10	
— Destruction des vitres ≥ 10 %, limite de petits dommages	20 25	
— Destruction de 50 % des vitres	50	
— Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	70	Lannoy (1984)
— Destruction totale des vitres, détérioration partielle des maisons		et
<hr/>		
Dégâts légers aux structures	30	Lees (1996)
Détérioration et destruction des cadres de fenêtre selon leur nature	100	
Effondrement partiel des murs et tuiles des maisons	140	
Limite inférieure des dégâts graves aux structures	160	
Destruction à 50 % des maisons en briques	170	
Destruction des bâtiments légers en charpente métallique, rupture des réservoirs de stockage	250	
Destruction de poteaux	350	
Retournement des wagons de chemin de fer, destruction totale des maisons	500	
Destruction des murs en béton armé, destruction totale probable des bâtiments, dommages graves aux machines situées dans les bâtiments industriels	700	
<hr/>		
Destruction totale des structures	830	BOOK, TNO
Dégâts conséquents des structures	350	Green (1989)
Dégâts modérés des structures	170	
Dégâts légers des structures	35	

Tableau3.10 : Les seuils d'effets de surpression sur les structures

❖ Effets de surpression sur l'homme

Seuils de surpression relatifs à la résistance des structures

Types d'effets constatés	Surpression (mbar)	Référence
Létaux (par effets directs : hémorragies pulmonaires)	1000	TNO, 1989
	700correspondants potentiellement à 99 % de létalité	TM5-1300 US Department of the Army, 1990
	200correspondants potentiellement à 1 % de létalité	Gobert, M. (1982)
Létaux (Par effets indirects)	140	Baker, 1983Lees, 1996
Irréversibles	50	
	20Effets indirects par bris de vitres	Lees, 1996
Détérioration des tympons	340	
	300Correspondant potentiellement à 1 % de létalité	TNO, 1989

Tableau 3.11 : Les seuils d'effets de surpression sur l'homme**3.8 Estimation du risque individuel et sociétal**

Dans une analyse quantitative des risques, après avoir évalué les probabilités d'occurrence des événements redoutés et leurs conséquences, on mesure le risque à l'aide deux métriques de représentation que sont le risque individuel et risque sociétal.

3.8.1 Risque individuel : Le risque individuel total à un endroit géographique donné peut s'exprimer comme suit (CCPS., 2009) :

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{i=n} IR_{x,y,i} \quad (3.5)$$

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' ;

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 :

$$IR_{x,y,i} = f_{c,i} \times P_{F,i} \quad (3.6)$$

Où

$f_{c,i}$ est la fréquence d'occurrence du scénario d'accident 'i' ;

$P_{F,i}$ est la probabilité que ce scénario d'accident entraîne un décès à l'endroit (x, y).

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

$$f_{c,i} = f_{Ei} \times Pr_{seq,i} \quad (3.7)$$

Le calcul des contours du risque individuel s'effectue généralement selon les étapes suivantes (**Figure 3.13**) :

- Définir un maillage de points qui servira à calculer le risque individuel ;
- Établir les coordonnées (x, y) du point d'origine du scénario d'accident (i) ;
- Établir la fréquence de l'événement initiateur f_{Ei} pour ce scénario d'accident ;
- Établir les données climatiques : la probabilité relative à la direction du vent pour chaque secteur (Pr_{DV}). $Pr_{DV} = 1$ Pour les scénarios d'accident générant un rayonnement thermique (Fireball) et surpression (VCE) ;
- Évaluer la probabilité globale de la séquence d'événements conduisant au scénario d'accidents 'i' (Pr_{seq}) ;
- Déterminer la zone couverte par des effets létaux et les probabilités de décès (P_{Fi}) pour chaque direction du vent pour chaque point de maillage ;
- Estimer la contribution au risque individuel, **Figure 3.14**, ($\Delta IR_{Ei,seq,DV,F}$) pour le scénario d'accident retenu en incluant la fréquence de l'événement initiateur, la probabilité de la séquence d'événements conduisant au scénario d'accidents, la probabilité de la direction du vent et la probabilité de décès à un point donné du maillage :

$$\Delta IR_{Ei,seq,DV,F} = f_{Ei} \times Pr_{seq} \times Pr_{DV} \times Pr_F \quad (3.8)$$

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

$$IR = \sum_{Ei} \sum_{seq} \sum_{DV} \sum_F \Delta IR_{Ei,seq,DV,F} \quad (3.9)$$

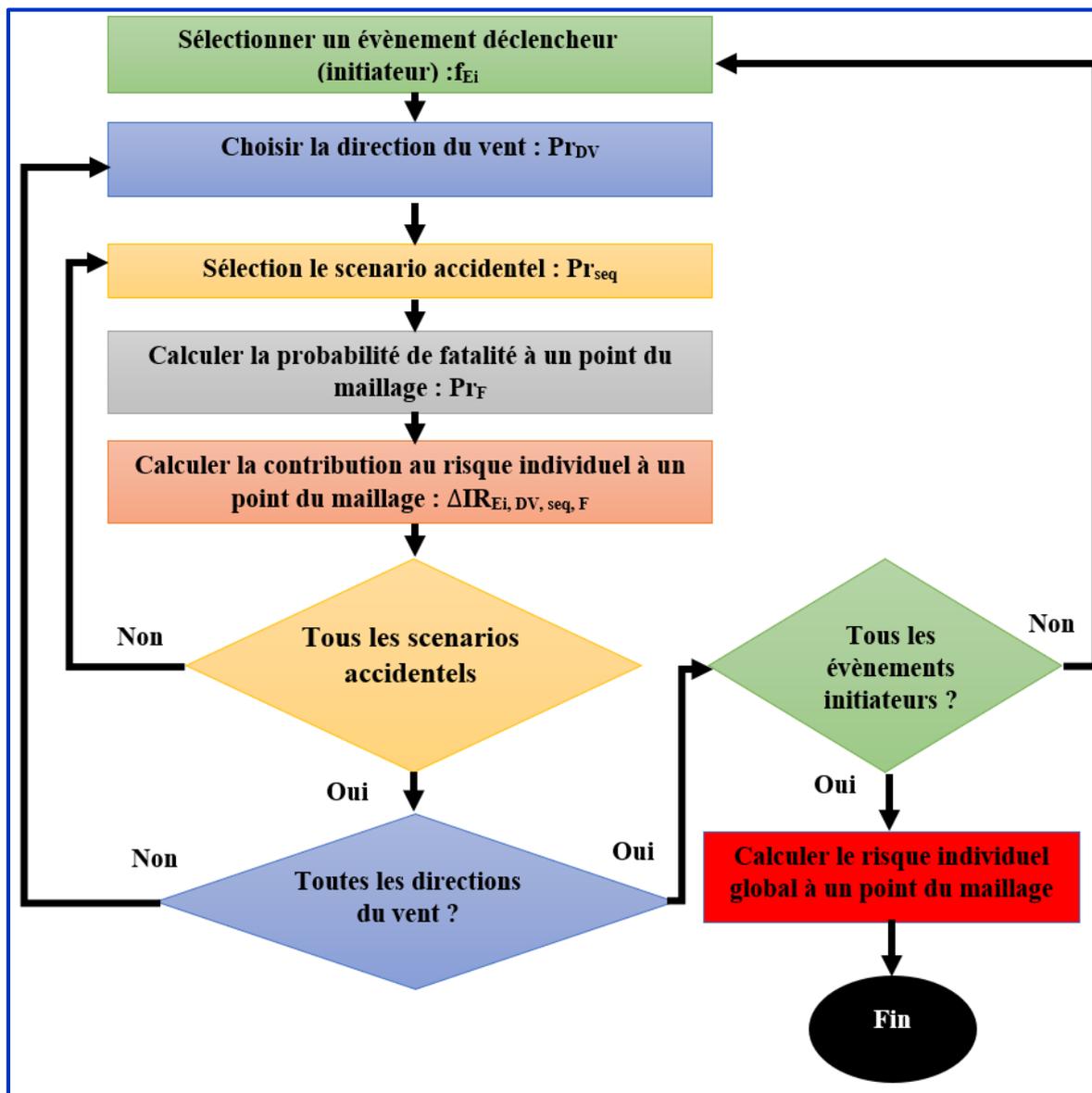


Figure3.13 : Procédure de calcul des contours de risque individuel

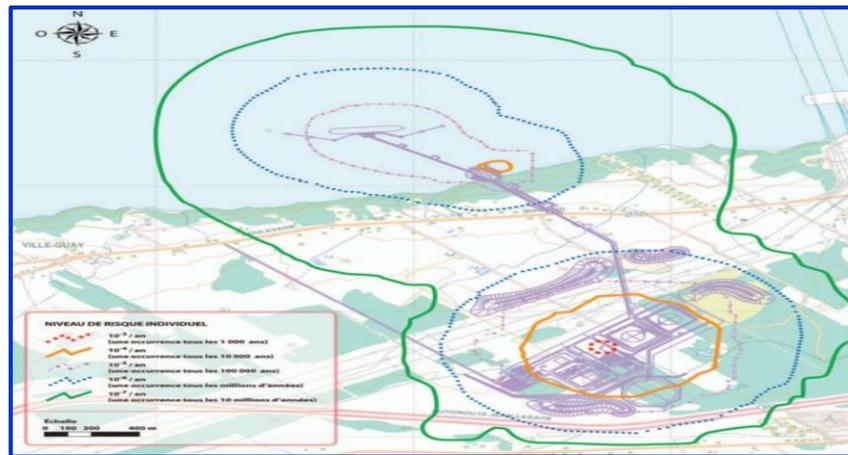


Figure 3.14 : Contour de risque individuel

3.8.2 Risque sociétal : Le risque sociétal est couramment représenté à l'aide de courbes dites F-N comme le montre les Figures 3.15 et 3.16. Ces courbes sont obtenues en traçant la fréquence commutative des scénarios d'accidents F_N qui causent N plus de morts par an en fonction de N.

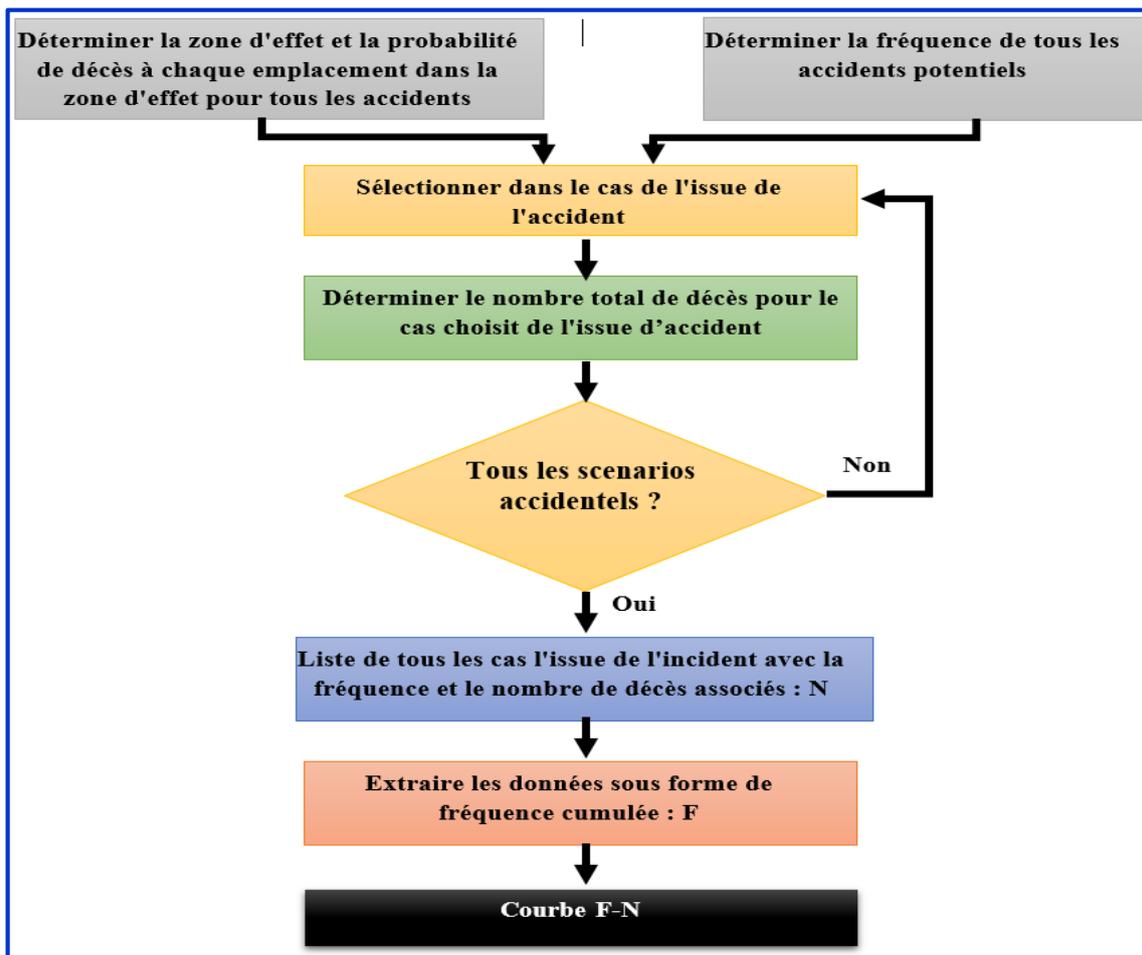


Figure 3.15 : Procédure de calcul la courbe de risque sociétal F-N

Afin de calculer une courbe F-N, il est important que les fréquences et le nombre soient combinés correctement. Le nombre de N de morts de chaque scénario d'accidents est calculé par (CCPS., 2009)

$$N_i = \sum_{xy} P_{xy} \times P_{Fi} \quad (3.10)$$

Où

P_{xy} est le nombre de personnes exposées au danger à l'endroit (x, y) ; et

P_{Fi} 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 :

$$F_N = \sum_i f_{C,i} \quad (3.11)$$

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 (y^{-1}) ;

$f_{C,i}$ est la fréquence du scénario d'accidents i (y^{-1}) ;

N_i est le nombre de décès suite au scénario d'accidents ' i '.

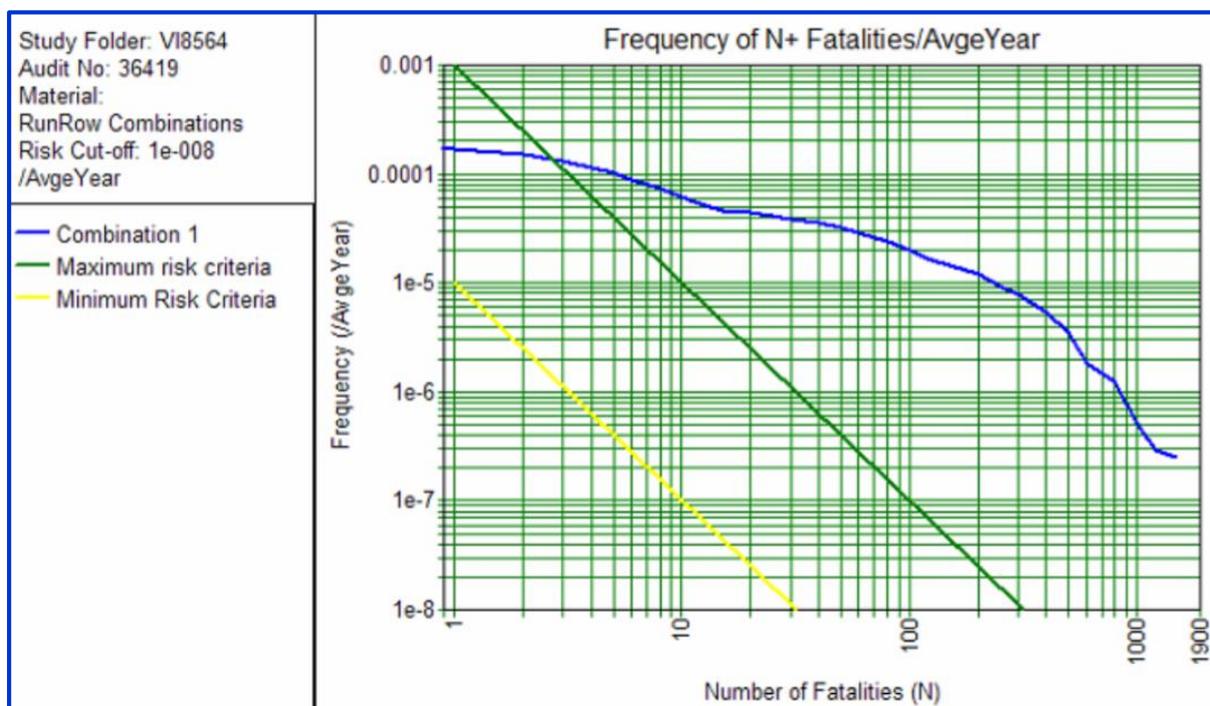


Figure 3.16 : Exemple d'une courbe F-N

3.9 Critères d'acceptabilité du risque

3.9.1 Critère de Farmer : Lors du même symposium de l'AIEA, Farmer présente un texte (Farmer.,1967), Figure 3.17, appelé à devenir célèbre, intitulé «Siting Criteria, A New Approach», où il développe une nouvelle méthode d'évaluation de la sûreté d'un réacteur. Il ne se contente pas de l'influence d'un paramètre, la distance, mais tente une approche globale de la sûreté. Pour cela, il s'appuie sur l'analyse des probabilités de défaillance des divers systèmes qui pourraient mener à un accident.

L'approche probabiliste proposée par Farmer consiste à mesurer le risque, c'est à dire à évaluer à la fois la probabilité d'occurrence d'un incident et ses conséquences. Pour chaque événement initiateur on doit rechercher les voies qui pourraient mener à un accident et calculer à la fois les probabilités de défaillances des matériels successifs qui y conduiraient, mais aussi les conséquences ultimes, en termes de rejet d'iode 131, l'isotope radioactif le plus dangereux pour la santé. On peut alors placer ces points sur un graphique avec en ordonnées les probabilités sous la forme de l'intervalle de temps moyen entre deux événements (en années de fonctionnement de réacteur), et en abscisses les quantités de rejets d'iode correspondantes. À partir de ce graphique probabilités-conséquences, Farmer propose un critère de sûreté sous la forme d'une ligne définissant une limite maximale aux probabilités d'occurrence de chaque rejet : plus les conséquences d'une défaillance sont importantes, plus sa probabilité doit être faible. Il définit ainsi une zone de risque élevé et une zone de faible risque.

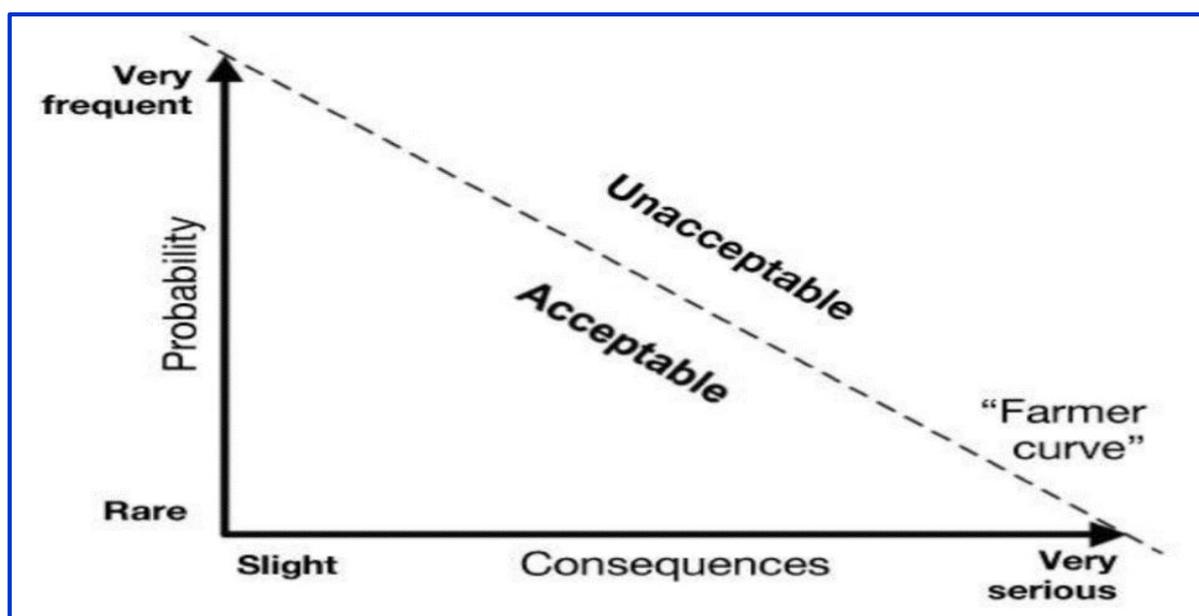


Figure3.17 : Diagrammes probabilité-conséquence [Farmer., 1967]

3.9.2 La méthode ALARP (As Low as Reasonably Practicable) : Le principe ALARP suppose qu'il existe un niveau de risque tolérable et que tout risque doit se situer au moins sous ce niveau. Le terme "reasonably practicable" signifie qu'un risque considéré de bas niveau peut être transféré vers une zone où le risque devient négligeable. Un effort infini pourrait réduire le risque à un niveau infiniment petit, mais cet effort serait infiniment coûteux. C'est pourquoi la méthode ALARP suppose qu'il existe un niveau de risque tel que cela ne vaut plus la peine et l'effort financier de le réduire encore. Ceci signifie que toutes les mesures de prévention – protection doivent être prises jusqu'à ce qu'une réduction de risque ne puisse être entreprise sans une augmentation significative des investissements ou des dépenses. En d'autres termes, la dépense serait disproportionnée par rapport au gain de sécurité – sûreté réalisé.

Le guide ALARP a été développé par le Health and Safety Executive (HSE) au Royaume Uni, dans le cadre du management des risques et de la prise de décision. Il est apparu la première fois en 1988 à propos du risque tolérable dans les centrales nucléaires. ALARP est devenu le cadre standard des critères de risque acceptable et s'est développé dans tous les secteurs industriels. Le modèle conceptuel est donné sur la [Figure 3.18](#).

Dans la région "risque inacceptable", il convient de réduire le risque et de se déplacer vers la région ALARP (entre les deux lignes horizontales).

Dans cette région ALARP, il est recommandé de faire tous les efforts possibles pour réduire le risque. Le niveau d'arrêt de ces efforts fait l'objet d'une analyse, d'une discussion et d'un compromis.

Les critères ALARP sont représentés par les deux lignes horizontales de la [Figure 3.18](#). La ligne du risque acceptable et la ligne du risque négligeable. Un risque acceptable n'est donc pas une seule valeur probabiliste. Un risque acceptable doit identifier les valeurs de risque correspondant aux deux lignes, estimer l'étendue du risque étudié et comparer cette valeur estimée aux deux valeurs des deux lignes horizontales, déterminer dans quelle région va se situer le risque estimé. Ensuite les décideurs décident en fonction des résultats obtenus. Le niveau du risque détermine la décision. Cette dernière va donc dépendre des incertitudes de l'analyse, des conséquences prévisibles, de la durée de vie cible, des coûts de sûreté et du prix de la vie humaine.

De nombreux pays pratiquent cette méthode. Quelques pays ont défini les niveaux « risque acceptable » (ligne supérieure) et « risque négligeable » (ligne inférieure) des deux lignes (voir **Tableau 3.12** et **3.13**), utilisables à la fois en conception et pour des installations existantes.

En conception, la ligne “risque acceptable” est à 10^{-4} par an tandis que la ligne « risque négligeable » se situe à 10^{-6} par an. Pour les installations existantes, ces deux lignes sont respectivement à 10^{-4} et 10^{-5} par an. De façon générale, il y a un facteur multiplicatif de 10 ou 100 entre les deux valeurs.

Valeur limite haute, morts / an		
10^{-3}	Royaume Uni	Travailleurs
10^{-4}	Royaume Uni	public
10^{-5}	Hongrie	Pas de distinction : public – travailleurs

Valeur limite basse, morts / an		
10^{-6}	Royaume Uni Hongrie	Pas de distinction : public – travailleurs

Tableau 3.12 : Les deux limites de la région ALARP

10^{-5}	Pays-Bas Tschéquie	Situations existantes Installations existantes
10^{-6}	Pays-Bas Tschéquie	S’applique pour les nouveaux permis : installations fixes, transport de matières dangereuses, pipelines Limite pour les nouvelles installations

Tableau 3.13 : Limite haute, morts/ an (une seule limite est définie)

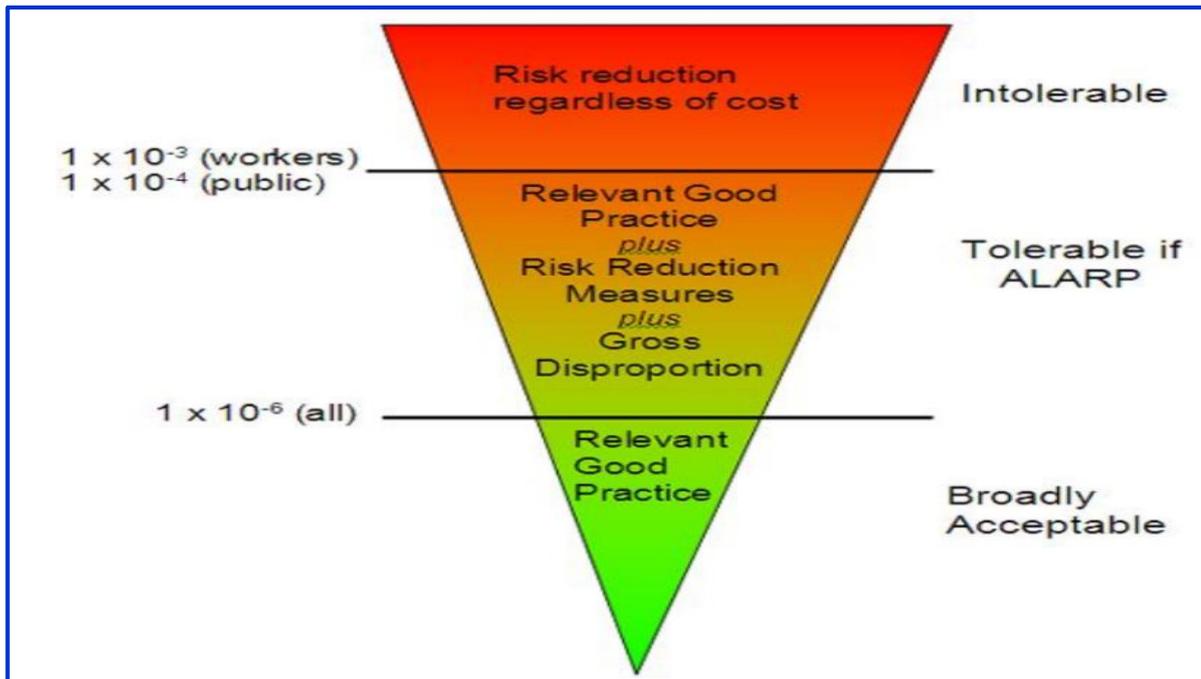


Figure 3.18 : Principe ALARP [HSE., 1992]

3.10 Réduction de risque

La réduction du risque (ou maîtrise du risque) désigne l'ensemble des actions ou dispositions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier **Figure 3.19**. De telles mesures doivent être envisagées dès lors que le risque considéré est jugé inacceptable. De manière très générale, les mesures de maîtrise du risque concernent :

- La prévention, c'est-à-dire réduire la probabilité d'occurrence de la situation de danger à l'origine du dommage ;
- La protection, visant à limiter la gravité du dommage considéré.

Les mesures de réduction du risque doivent être envisagées et mises en œuvre tant que le risque est jugé inacceptable.

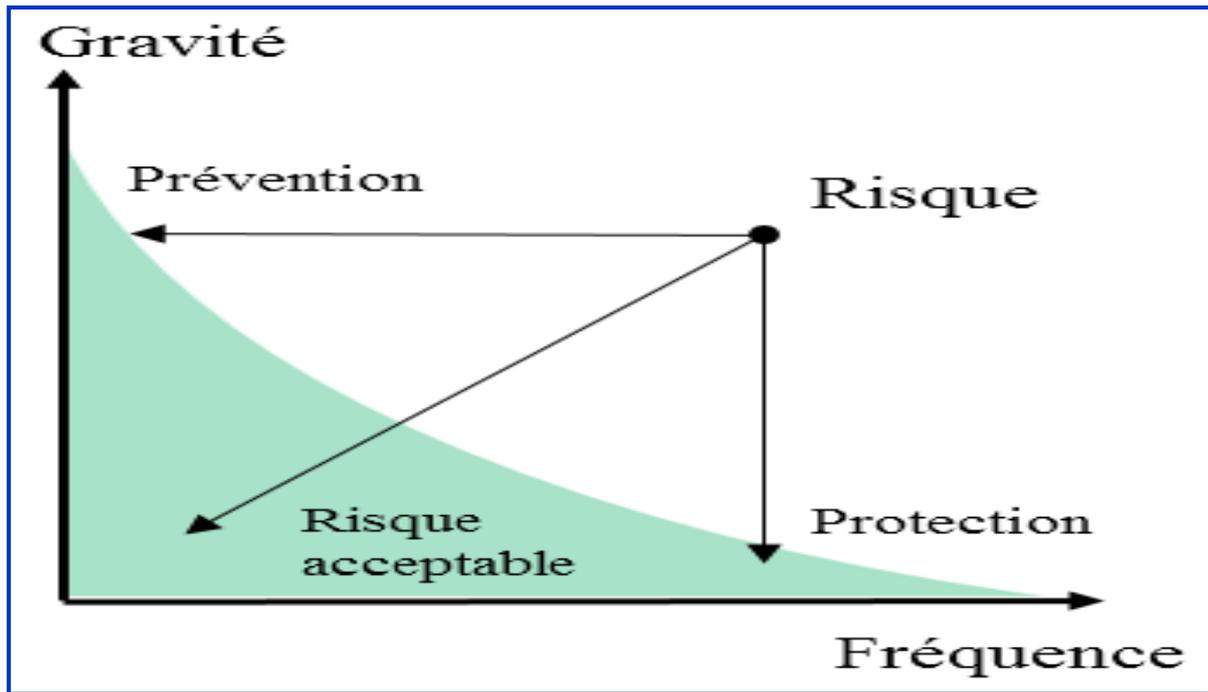


Figure 3.19 : Réduction de risque[HSE., 1992]

3.11 Application de QRA classique dans le site de Constantine

3.11.1 Collecte d'informations pertinentes

A) Données du site : Constantine est située dans l'est de l'Algérie, à environ 245 km de la frontière Algéro-tunisienne, 431 km d'Alger à l'ouest, 89 km de Skikda au nord et 235 km de Biskra au sud. Le projet consiste en la construction d'un réservoir de stockage de GPL en vrac, du type aérien (butane et propane), et l'installation d'un camion-citerne GPL centre Khroub.

B) Données techniques sur le processus ou le système analysé : El Khroub possède cinq sphères de stockage (**Figure 3.20**) :

- Deux sphères de butane d'une capacité unitaire de 2 845 m³ (Bu1 et Bu2) ;
- Deux sphères de propane d'une capacité de 2000 m³ (Pro1 et Pro2) ;
- Une sphère de propane d'une capacité de 1100 tonnes (Pro3).



Figure 3.20 : Sphères de stockage GPL (Hellas et al., 2018b)

C) Données météorologiques : Les paramètres météorologiques et environnementaux supplémentaires qui ont été utilisés dans les analyses sont présentés dans le **Tableau 3.14 :**

Les facteurs	Conditions
Température moyenne du site	25 °C
Humidité moyenne du site	60%
Vitesse du vent	5 m/s
Direction de vent	Nord-Ouest

Tableau 3.14 : Données météorologiques de Constantine

3.11.2 Identification du scénario de danger : L'analyse qualitative réalisée précédemment par la technique d'analyse préliminaire des dangers, a permis d'identifier les dangers majeurs ou les risques potentiels associés aux installations, à leurs exploitations et à leurs environnements.

Les événements indésirables sont des ruptures catastrophiques pouvant donner lieu à divers scénarios accidentels finaux, en fonction de divers facteurs et circonstances, notamment le type et l'état physique des matières émises, la présence de sources d'inflammation, les équipements de sécurité d'intervention, etc.

3.11.3 Estimation de la fréquence des événements déclencheurs et développement des AdEs : Les fréquences des événements initiateurs sont extraites des données de l'entreprise. Au contraire, les probabilités d'inflammation sont tirées de la littérature [CCPS., 2001 ; BS IEC 61511–1, 2003], (**Tableau 3.15**). Les scénarios d'accident sont illustrés aux **Figures 3.21, 3.22 et 3.23**.

Événement initiateur	Fréquence [$year^{-1}$]
Rupture catastrophique de Bu 1 et 2	5.00 E-04
Rupture catastrophique de Pro 1 et 2	6.27 E-04
Rupture catastrophique de Pro 3	3.30 E-04
Ignition	Probabilité [%]
Immediate ignition	7.00 E-01
Delayed ignition	9.00 E-01

Tableau 3.15 : Probabilité d'inflammation / Fréquence des événements initiateurs

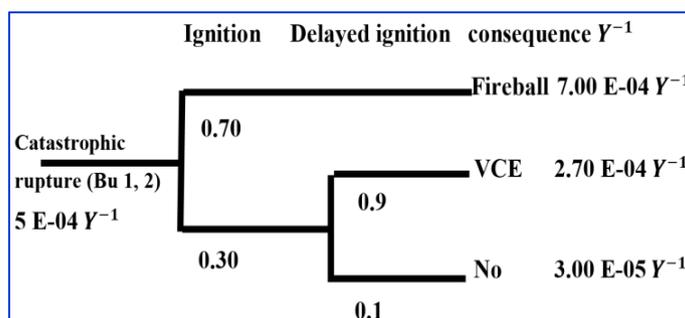


Figure 3.21 : Arbre des événements liés aux sphères (Bu 1, 2)

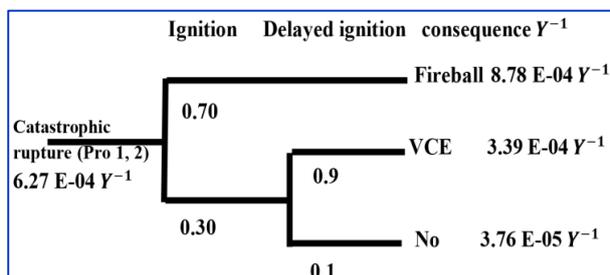


Figure 3.22 : Arbre des événements liés aux sphères (Pro 1, 2)

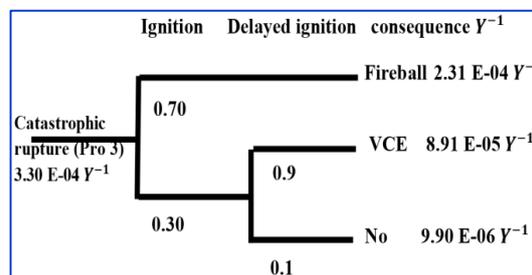


Figure 3.23 : Arbre d'événements lié à la sphère (Pro 3)

Les fréquences des conséquences des scénarios d'accident 1, 2 et 3 sont calculées en multipliant la probabilité des mêmes événements de trajectoire. Pour les scénarios d'accident ayant les mêmes conséquences, leur fréquence totale est estimée en additionnant les fréquences de chaque scénario. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le **Tableau 3.16**.

Conséquences	Total frequency of consequences [Y^{-1}]	Parentage [%]
Fireball	1.81 E-03	70%

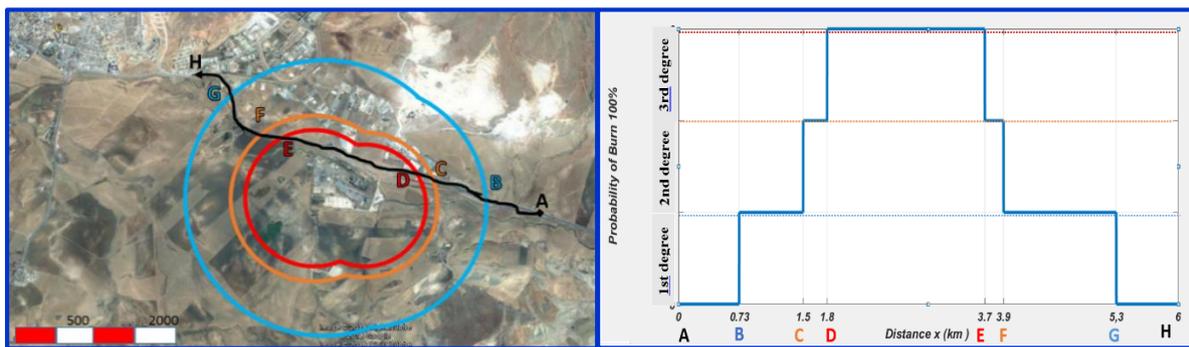
VCE	6.98 E-04	27%
Dispersion	7.75 E-05	3%
Totale	2.5855 E-03	100%

Tableau 3.16 : Les fréquences des conséquences des scénarios d'accident

Il ressort clairement de ces résultats que la fréquence d'occurrence des événements les plus redoutés est celle relative au phénomène Fireball 70% comparé VCE 27% et 3% pour la dispersion.

3.11.4 Analyse des conséquences

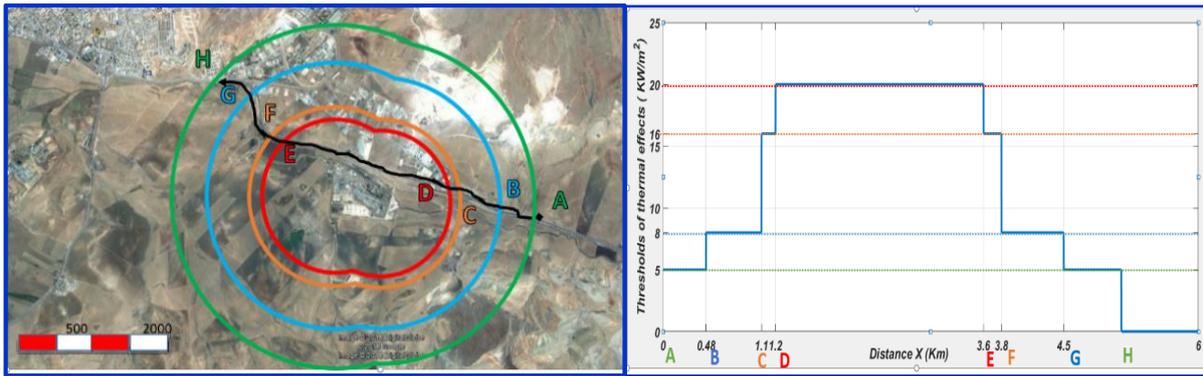
A) **Fireball** : Pour déterminer le rayonnement thermique reçu par la personne. En utilisant les équations de **Tableau3.4, les équations (3.4)** et les **équations (2.6) à (2.9)** du chapitre (2), et avec l'aide du programme Matlab, nous déterminons les effets thermiques de Fireball qui peuvent se produire au niveau des sphères. Les résultants des calculs sont présentés à la **Figure 3.24**.



Probabilité de brûlure 100%: ○ 1^{er} degré ○ 2^{eme} degré ○ 3^e me degré

Figure 3.24 : Courbe et contour de probabilité de létalité ou de blessure due aux effets thermiques de la boule de feu

La **Figure 3.25** montre les différentes zones d'endommagement de la boule de feu par effets thermiques, pour la liaison routière entre les régions A à H.



Seuils d'effets thermiques : 05 kW/m² 08 kW/m² 16 kW/m² 20 kW/m²

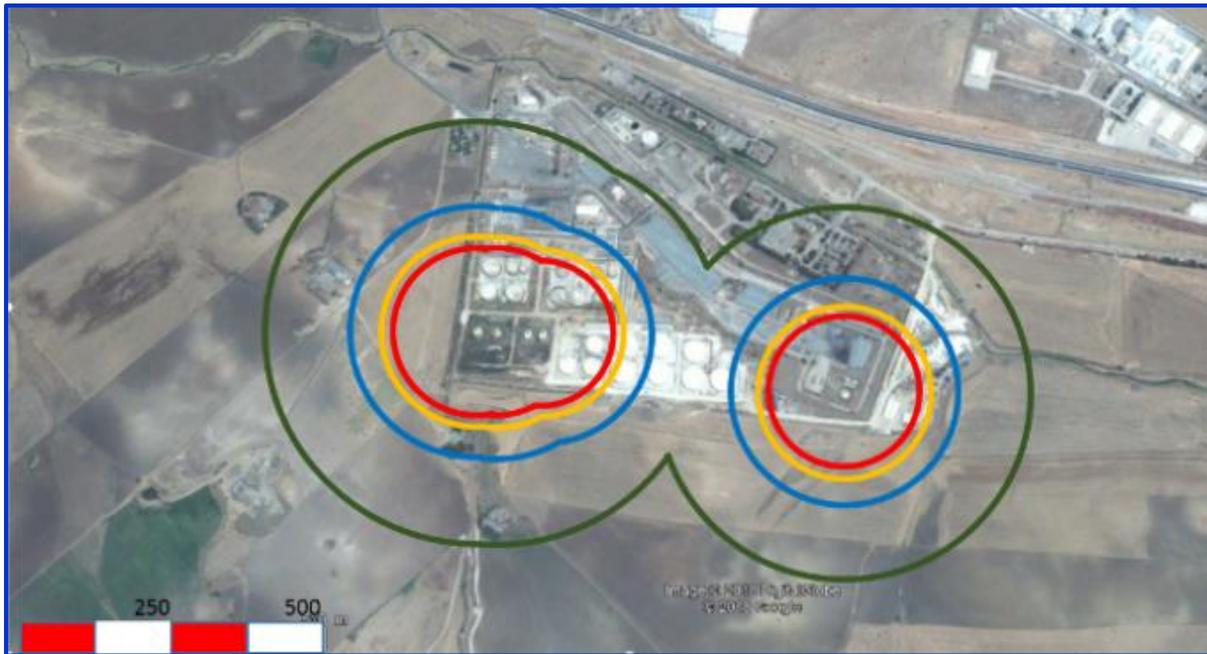
Figure 3.25 : Contour et courbe des différentes zones d'endommagement de boule de feu par les effets thermiques

Le **Tableau 3.17** montre l'effet thermique sur le bien ou les personnes et leur rayon de chaque sphère.

Les sphères		Sphères Bu 1, 2	Sphères Pro 1, 2	Sphère Pro 5
Probabilité de brûler 100% de leur rayon [m]	1er degré	1654 m	1397 m	1461 m
	2e degré	997 m	828 m	872 m
	3e degré	822 m	680 m	722 m
Seuils des effets thermiques et leur rayon [m]	05 kW/m ²	2119 m	1794 m	1991 m
	08 kW/m ²	1644 m	1401 m	1549 m
	16 kW/m ²	1103 m	944 m	1038 m
	20 kW/m ²	947 m	796 m	902 m

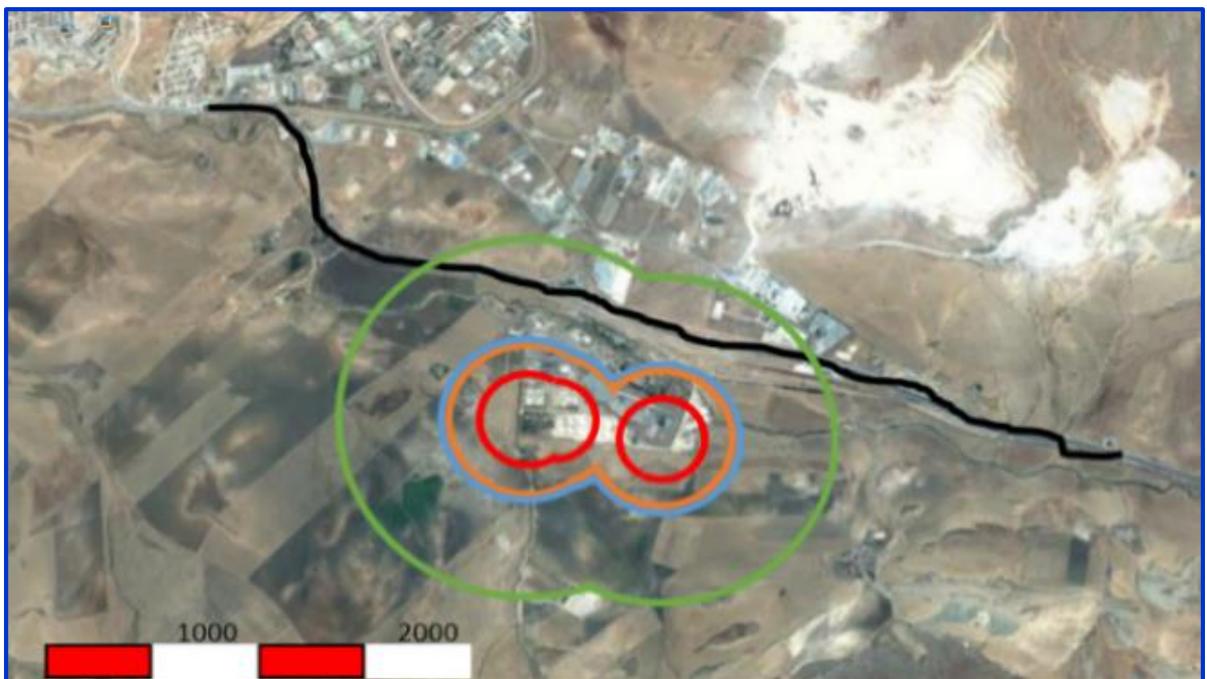
Tableau 3.17 : Effet thermique sur les biens, les personnes et leur rayon de chaque sphère

B) VCE (Vapor Cloud Explosion) : Les effets de suppression ont été modélisés par la méthode multi-énergies, L'indice de la violence choisie est de l'ordre de 10. Nous utilisons l'équation (3.4) et **Tableau 3.4** pour déterminer les effets de la surpression sur les biens et les personnes qui peuvent survenir dans les sphères. Les résultats des calculs sont présentés aux **Figures 3.26** et **3.27** :



Probabilité de décès 100% : ○ Dommages pulmonaires ○ Rupture du tympan
○ Impact de la tête ○ Déplacement du corps entier

Figure 3.26 : Contour de mortalité par VCE



Probabilité de dommage 100% ○ Effondrement du bâtiment ○ Dommages majeurs
○ Dommages mineurs ○ Rupture de fenêtres

Figure 3.27 : Contour d'endommagement par VCE

La **Figure 3.26** montre clairement la probabilité de décès par effets d'une surpression sur les organes les plus sensibles, à savoir la tête, le déplacement du corps entier, le tympan et le poumon. Il est indiqué que le programme PHAST Risk ne calcule pas la probabilité de mortalité par effet de surpression.

Le **Tableau 3.18** ci-dessous montre l'effet de la surpression sur les biens, les personnes et leur rayon de chaque sphère.

Les sphères		Sphère Bu 1, 2	Sphère Pro 1, 2	Sphère Pro 5
Probabilité de	Dommages pulmonaires	123 m	107 m	111 m
décès 100% et	Rupture du tympan	140 m	123 m	127 m
leur rayon [m]	Déplacement du corps entier	185 m	160 m	167 m
	Impact de la tête	311 m	262 m	274 m
Probabilité de	Effondrement du bâtiment	217 m	189 m	197 m
dommage 100%	Dommages majeurs	357 m	312 m	323 m
sur les biens et	Dommages mineurs	386 m	337 m	350 m
leur rayon [m]	Rupture de fenêtres	860 m	752 m	780 m

Tableau 3.18 : Effet de la surpression sur les biens, les personnes et leur rayon de chaque sphère

3.11.5 Estimation du risque individuel : À l'aide d'**équation(3.5)**, nous estimons le risque individuel totale dans les sphères de stockage, le risque individuel totale est représenté graphiquement par la **Figure 3.28**.

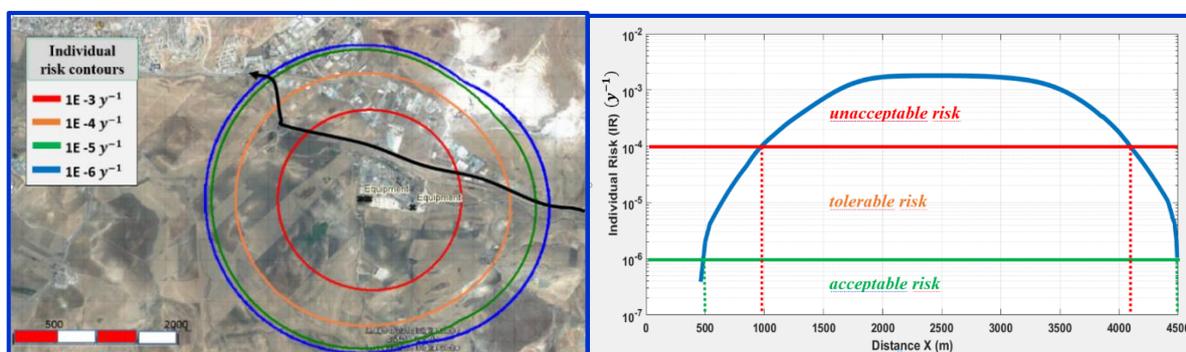


Figure 3.28 : Courbe et contour de risque individuel totale

Sur la base des critères de risque individuels HSE du Royaume-Uni [HSE., 1992], la **Figure 3.28** montre clairement que le risque individuel auquel les opérateurs sont exposés :

- $IR < 10^{-6}$ Le risque acceptable qui correspond à la région sous la ligne verte ;
- $10^{-6} < IR < 10^{-4}$ Le risque tolérable correspondant à la zone comprise entre les lignes verte et rouge ;
- $IR > 10^{-4}$ Le risque inacceptable correspond à la zone située au-dessus de la ligne rouge.

3.11.6 Estimation du risque sociétal : À partir des **équations (3.10) et (3.11)**, il est possible de calculer le risque sociétal pour chaque conséquence de la VCE et de la boule de feu qui se produisent la nuit et pendant la journée, ou le dommage total sur la population. **Figures 3.29** et **3.30** basées sur les critères de risque sociétal Health and Safety Executive [HSE., 1992], Royaume-Uni. Les lignes séparent trois catégories de risque, « acceptable », « ALARP » et « inacceptable ». La région ALARP de la courbe indique une zone où d'autres mesures de réduction des risques doivent être envisagées (si cela est raisonnablement possible).

À travers les deux figures on déduit ce qui suit :

- SR de VCE (jour et nuit) se situe entre les lignes verte et rouge, ce qui signifie que les risques sociaux sont tolérables ;
- SR de Fireball est entre deux zones : tolérable si le nombre de morts : $N < 55$ et $N > 325$ jours, $N < 55$ et $N > 165$ nuit, et inacceptable si : $55 \leq N \leq 325$ jours et $55 \leq N \leq 165$ nuit ;

Par conséquent, le scénario de Fireball doit être considéré comme le plus grave par rapport au VCE ;

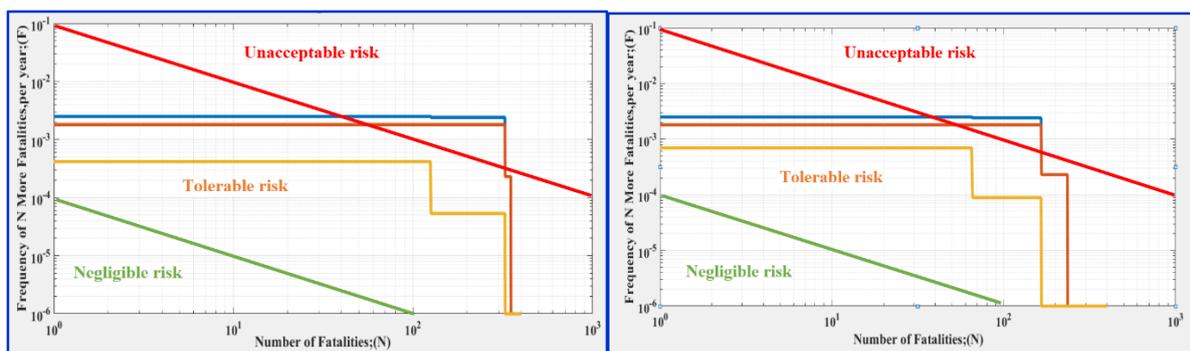


Figure 3.29 : Le risque sociétal survient le jour

Figure 3.30 : Le risque sociétal survient la nuit

Risque sociétal correspondant : totale; ■ Fireball; ■ VCE ■

3.12 Limiter de la méthode QRA

Bien que la méthode QRA soit efficace, son application est très coûteuse en termes de temps et d'effort, ce qui exige des spécialistes compétents. En effet, il existe plusieurs aspects

qui ne sont pas bien pris en charge par la QRA, ce qui ouvre la voie à d'autres améliorations. Plusieurs auteurs ont souligné les limites de la QRA qui se résument dans les points suivants (CCPS, 2000 ; Pasman et al., 2017 ; TNO, 1999 ; Villa et al., 2016) :

- L'objectivité et l'efficacité des résultats de la QRA dépendent de la disponibilité des données, alors qu'en réalité on ne peut pas s'en passer des jugements d'experts et des bases de données, notamment pour les nouveaux projets.
- Le risque individuel ou sociétal est généralement présenté sous la forme d'une valeur unique. Toutefois, les résultats de la QRA sont calculés à l'aide de divers modèles ayant une précision limitée et, par conséquent, les résultats du calcul de la QRA comportent des incertitudes qui leurs sont associées. En effet, dans une QRA, chaque étape qu'elle soit qualitative ou bien quantitative est une source potentielle d'incertitudes.

On distinguera d'ailleurs quatre types d'incertitudes :

- **Les 'incertitudes liées aux paramètres d'entrée d'une QRA** : leur source potentielle étant l'imprécision voire l'indisponibilité des données sur les différents paramètres, soit par manque d'informations et ou par méconnaissance. Ce type d'incertitude est inhérent à toutes les étapes d'une QRA ;
- **Incertainces du modèle** : c'est ce qu'on appelle aussi incertainces structurelles, elles résultent généralement des hypothèses et simplifications faites lors de la traduction du phénomène ou processus physique réel en modèle physique ;
- **Incertaince stochastique ou incertaince ontologique** : Appelée aussi variabilité d'incertaince, c'est l'incertaince due à la variabilité inhérente, par exemple la variabilité des facteurs climatiques [Refsgaard et al., 2007] ;
- **Incertainces liées aux valeurs des seuils d'effets** qui peuvent être rattachées aux sources d'incertaince des données d'entrée.

3.13 Conclusion

Dans le cadre de ce présent chapitre, nous avons essayé de mieux situer les démarches et méthodes d'analyse des risques. Nous avons d'abord clarifié les techniques de raisonnement de l'analyse prévisionnelle des risques où on a présenté la différence entre les méthodes inductive/ déductive, qualitative/ quantitative. Ensuite, on a présenté l'analyse des conséquences par différents types d'étude (probit/ seuils) tout en remarquant les avantages et les limites des méthodes d'analyse choisies pour le développement de notre travail de

recherche. Il s'avère que la disponibilité de données statistiquement fiables pose problème et qu'un modèle novateur de représentation et de traitement de données imparfait s'impose, d'où l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre **4**

**Approche floue d'Analyse
Quantitative de Risque
(QRA)**

Sommaire

4 Approche floue d'Analyse Quantitative de Risque (QRA)	90
4.1 Introduction	91
4.2 Concept d'incertitude	91
4.3 Modèles de traitement de l'incertitude	91
4.3.1 Théorie des probabilités	91
4.3.1.1 Définition et propriétés	92
4.3.1.2 Limitations de la théorie des probabilités	92
4.3.2 La théorie des ensembles flous.....	93
4.3.2.1 Variable linguistique	93
4.3.2.2 Propriétés d'un ensemble flou.....	94
4.3.2.3 Fonctions d'appartenance.....	95
4.3.2.4 Opérations sur les ensembles flous	97
4.3.2.5 Notion d α -coupe	99
4.3.2.6 Opérations arithmétiques sur les nombres flous	100
4.4 Applications de la théorie des ensembles flous à l'analyse des risques	100
4.4.1 Analyse de modes de défaillances et leurs effets floue	100
4.4.2 Arbre de défaillances (AdD) floue	100
4.4.3 Analyse des couches de protection (LOPA) floue	101
4.4.4 Graphe de risque étalonné floue	101
4.4.5 La Grille de criticité floue	103
4.5 Analyse quantitative de risque floue	104
4.5.1 Evaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents	106
4.5.2 Evaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents	107
4.5.3 Risque individuel et sociétal floue	108
4.5.3.1 Risque individuel floue	108
4.5.3.2 Risque sociétal floue	109
4.6 Exemple application la méthode LOPA floue dans four rebouilleur	109
4.7 Conclusion	119

4.1 Introduction

L'évaluation quantitative des risques (QRA), appelée aussi l'évaluation probabiliste des risques, consiste à identifier tous les scénarios possibles pouvant conduire à des événements indésirables, à évaluer la gravité des conséquences et à calculer les probabilités d'occurrence par rapport aux critères d'acceptabilité établis au préalable.

Cependant, les analystes de risques sont confrontés un problème crucial, qui est de la crédibilité et l'utilisation des résultats obtenus. En effet, il s'agit de savoir comment traiter les incertitudes liées aux différentes étapes du processus d'évaluation des risques [Kumamoto., 2007] et comment les prendre en considération à des fins de prise de décision qui sont la finalité du processus de gestion des risques.

Ce chapitre a pour objectif l'analyse et le traitement de l'incertitude. Pour atteindre cet objectif, nous rappelons dans une première partie, une définition de l'incertitude sera donnée ainsi qu'une présentation des principaux types et méthodes de l'incertitude. Pour ensuite donner quelques applications de la théorie des ensembles flous à l'analyse des risques. Enfin, nous présentons une approche quantitative de risque floue qui prend en compte des données incertaines et/ou imprécises. Une des représentations possibilistes des données par intervalles floue est proposée. Ainsi, la démarche proposée fera l'objet d'une application dans le chapitre suivant sur un système industriel là où on va surmonter les problèmes cités ci-dessus.

4.2 Concept d'incertitude

Malgré l'implication de l'incertitude dans tous les domaines de l'ingénierie, il n'existe pas une appréhension commune de ce concept [ICS., 2011], à savoir :

- Zadeh [ICS., 2011] définit l'incertitude comme une propriété de l'information.
- Bouchon-Meunier [Bowles and Peláez., 1995] en Intelligence Artificielle, définit l'incertitude comme un doute sur la validité d'une information provenant d'une fiabilité relative de l'intermédiaire d'observation.

4.3 Modèles de traitement de l'incertitude

4.3.1 Théorie des probabilités : La théorie des probabilités se considère comme le plus ancien formalisme permettant de traiter les incertitudes dans les connaissances imparfaites. Elle repose donc sur des fondements mathématiques et une expérience solide.

Pour plus de compréhension du problème, nous présenterons quelques définitions et propriétés, avantages et limites du modèle probabiliste dans le domaine de l'analyse des risques.

4.3.1.1 Définition et propriétés : Considérons une expérience dont l'ensemble fondamental est Ω . On définit sur l'ensemble des événements une fonction qui à chaque événement associe un poids, appelé probabilité, compris entre 0 et 1. Plus le poids est proche de 0 moins l'événement risque de se réaliser, plus le poids est proche de 1 plus l'événement se réalisera souvent.

D'autre définition : Une probabilité (ou mesure de probabilité) P sur Ω est une application sur l'ensemble des événements tel que :

(i) $P(\Omega) = 1$ (4.1)

(ii) *Pour tout événement A,* $0 \leq P(A) \leq 1$ (4.2)

(iii) Pour toute suite A_1, A_2, \dots d'événements disjoints (i.e., pour tout $i \neq j, A_i \cap A_j = \emptyset$), on a :

$$P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad (4.3)$$

Une probabilité est une mesure dans le sens où plus un événement est grand plus sa probabilité est importante.

Propriétés : On a alors :

(i) $P(\emptyset) = 0$ (4.4)

(ii) Si A et B sont deux événements disjoints alors $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$. De même, si A_1, A_2, \dots, A_n est une suite finie d'événements disjoints, on a

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (4.5)$$

(iii) *Pour tout événement A,* $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ (4.6)

(iv) *Si $A \subset B$, alors $P(A) \leq P(B)$ et $P(B - A) = P(B) - P(B \cap A)$.* (4.7)

4.3.1.2 Limitations de la théorie des probabilités : La théorie des probabilités constitue un outil efficace pour le traitement des incertitudes aléatoires dans les cas où nous disposons d'une bonne connaissance des événements et de leurs événements contraires. Elle

ne peut cependant pas traiter les imprécisions qui ont une autre forme d'imperfection des connaissances [Gouriveau., 2003 ; Baudrit., 2005]. Nous allons introduire la notion de sous-ensembles flous dans la section suivante qui permet de traiter l'aspect imprécis et vague des connaissances imparfaites.

4.3.2 La théorie des ensembles flous : Au départ, la théorie de la logique floue s'affirmait comme une technique opérationnelle. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies au début des années 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université Berkeley de Californie [Zadeh L., 1965]. Cette technique associe les notions de « sous-ensembles flous » et de « théorie des possibilités ». En 1970, c'était la première application de la logique floue dans les systèmes experts d'aide à la décision en médecine, puis en 1975 Mamdani a réalisé une régulation floue d'une chaudière à vapeur. Les Japonais [Kiszka *et al.*, 1985], en 1985 étaient les premiers à avoir utilisé la logique floue dans les produits grand public « Fuzzy Logic Inside ».

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique. Elle a été introduite par Lotfi Zadeh en 1965, qui a montré que cette théorie est un cas particulier de la théorie des sous-ensembles classiques où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires ($\{0,1\}$) [Kiszka *et al.*, 1985].

La notion d'ensemble flou a pour but de permettre l'idée d'une appartenance partielle d'un élément à un ensemble ou à une classe, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe [BABUŠKA., 2001]. Cette notion permet l'utilisation de catégories de données aux limites mal définies, de situations intermédiaires entre le tout et le rien, le passage progressif d'une propriété à une autre, etc.

Soit l'ensemble U des valeurs de la variable x , appelé l'univers du discours ; un sous-ensemble A de U et une fonction $\mu_A(x)$ comprise entre 0 et 1. Cette fonction $\mu_A(x)$ quantifie le degré avec lequel chaque élément x de U appartient à A .

4.3.2.1 Variable linguistique : Une variable linguistique est une variable dont les valeurs associées sont linguistiques plutôt que numérique. La variable linguistique est caractérisée par un ensemble décrit par [Witold., 1998 ; BABUŠKA., 2001]:

$\{x, T(x), U, G, M\}$, avec :

X nom de la variable de base.

- T(x) ensembles des valeurs linguistiques que peut prendre x.
- U l'univers du discours associé avec la variable de base.
- G la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x.
- M la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique (ensemble flou dans U).

Exemple (1) : Prenons comme exemple la variable linguistique température, **Figure 4.1** où :

- Univers du discours U gamme de température de 0°C à 70°C ;
- Variante linguistique x la température ;
- Valeurs linguistiques T(x) « Faible » « Moyenne » « Elevée » ;
- Règle syntaxique G Si 20 < T < 40 alors température moyenne.

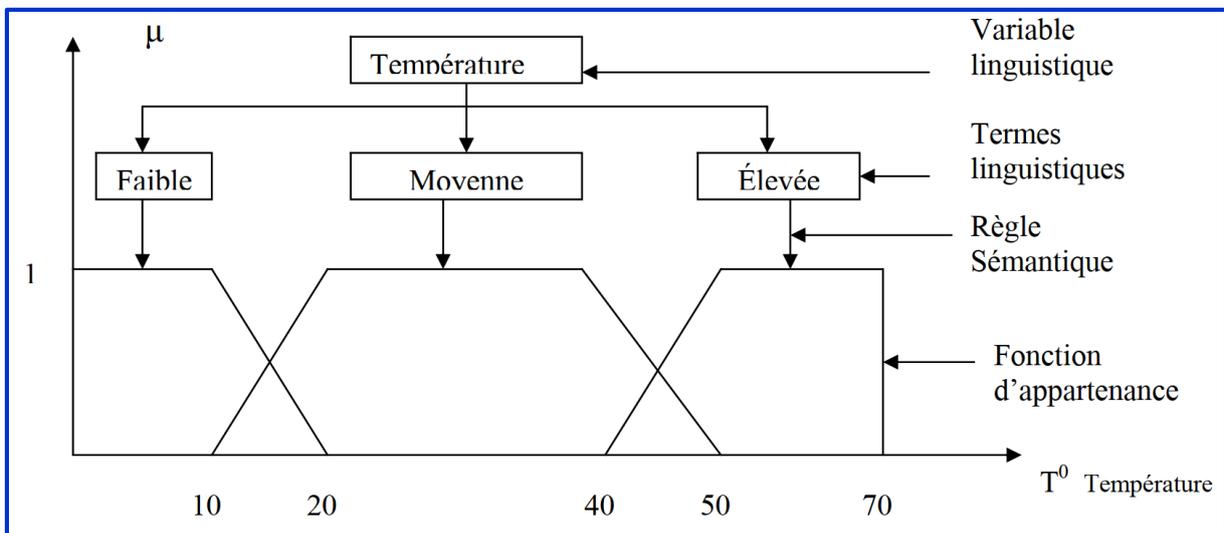


Figure 4.1 : Exemple d'une variable linguistique avec trois termes linguistique

4.3.2.2 Propriétés d'un ensemble flou : Les caractéristiques de l'ensemble flou de U les plus utiles pour le décrire sont celles qui montrent à quel point il diffère d'un ensemble classique de U. Citons les caractéristiques suivantes :

- **Support d'un ensemble flou :** le support d'un ensemble flou, noté $sup(A)$, est l'ensemble des éléments de U qui appartiennent, au moins un peu, à A. C'est la partie de U sur laquelle la fonction d'appartenance de A n'est pas nulle :

$$Sup(A) = \{x \in U / f_A(x) \neq 0\} \tag{4.8}$$

- **Hauteur d'un ensemble flou** : la hauteur, notée $h(A)$, d'un ensemble flou est le plus fort degré avec lequel un élément de U appartient à A , c'est-à-dire la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance.

$$h(A) = \text{Sup}_{x \in X} f_A(x) \quad (4.9)$$

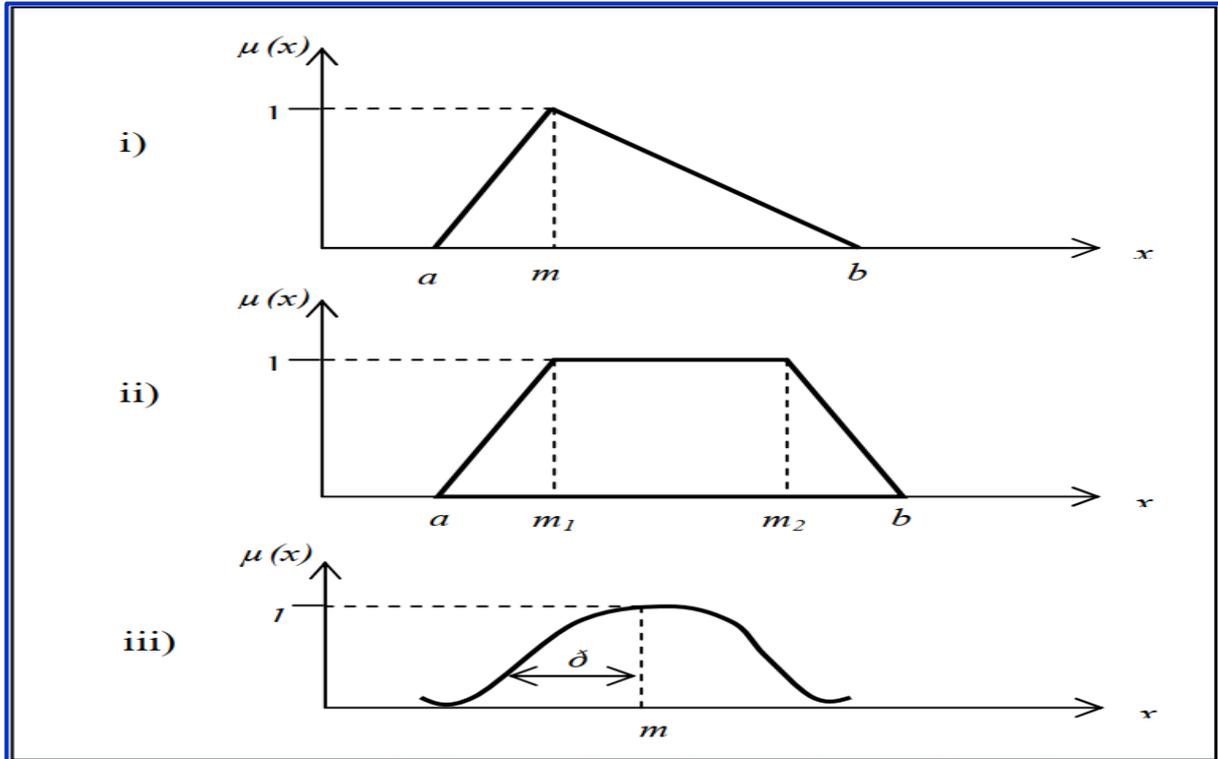
- **Ensemble flou normalisé** : l'ensemble flou A de U est dit normalisé si sa hauteur $h(A)$ est égale à 1.
- **Noyau d'un ensemble flou** : le noyau de l'ensemble flou normalisé A , noté $\text{noy}(A)$, est l'ensemble des éléments de U pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1.

$$\text{noy}(A) = \{x \in U / f_A(x) = 1\} \quad (4.10)$$

4.3.2.3 Fonctions d'appartenance : Les ensembles flous peuvent être définis en leur affectant une fonction continue pour décrire analytiquement ou graphiquement l'appartenance. De ce fait, la représentation des ensembles flous dépend du type de la fonction d'appartenance retenue. Zadeh a proposé une série de fonctions d'appartenance scindée en deux groupes : les fonctions d'appartenance « linéaires » et les fonctions d'appartenance « courbées » ou de forme « gaussienne » :

- La fonction d'appartenance Triangulaire ;
- La fonction d'appartenance Singleton ;
- La fonction d'appartenance Gamma ;
- La fonction d'appartenance Trapézoïdale ;
- La fonction d'appartenance Gaussienne.

Les fonctions d'appartenance les plus répandues sont illustrées par la [Figure 4.2](#).



i) Triangulaire ; ii) Trapézoïdale ; iii) Gaussienne.

Figure 4.2 : Présentation de quelques fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance Triangulaire de la **Figure (4.2.i)** est exprimée comme suit :

$$\mu(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(x - \alpha)}{(m - \alpha)} ; \alpha \leq x \leq m \\ 1 ; x = m \\ \frac{(b - x)}{(b - m)} ; m \leq x \leq b \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

La fonction d'appartenance Trapézoïdale de la **Figure (4.2.ii)** est exprimée comme suit :

$$\mu(x) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(x - \alpha)}{(m_1 - \alpha)} ; \alpha \leq x \leq m_1 \\ 1 ; m_1 \leq x \leq m_2 \\ \frac{(b - x)}{(b - m_2)} ; m_2 \leq x \leq b \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

La fonction d'appartenance Gaussienne de la **Figure (4.2.iii)** est exprimée comme suit :

$$\mu(x) = \exp\left(\frac{(-x - m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.13)$$

4.3.2.4 Opérations sur les ensembles flous : La théorie des ensembles flous propose plusieurs opérateurs ensemblistes. Les principaux opérateurs et relations flous sont présentés ci-dessous [Zadeh., 1965] :

i. **Inclusion** : On dit que A est inclus dans B, et on note $A \subseteq B$, si et seulement si :

$$\forall x \in U \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (4.14)$$

ii. **Egalité** : On dit qu'A et B sont égaux, et on note $A = B$, si et seulement si :

$$\forall x \in U \quad \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (4.15)$$

iii. **Complémentation** : Selon la théorie des ensembles flous, l'opérateur 'NON' correspond à l'ensemble complémentaire **Figure 4.3**, si et seulement si :

$$\forall x \in U \quad \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.16)$$

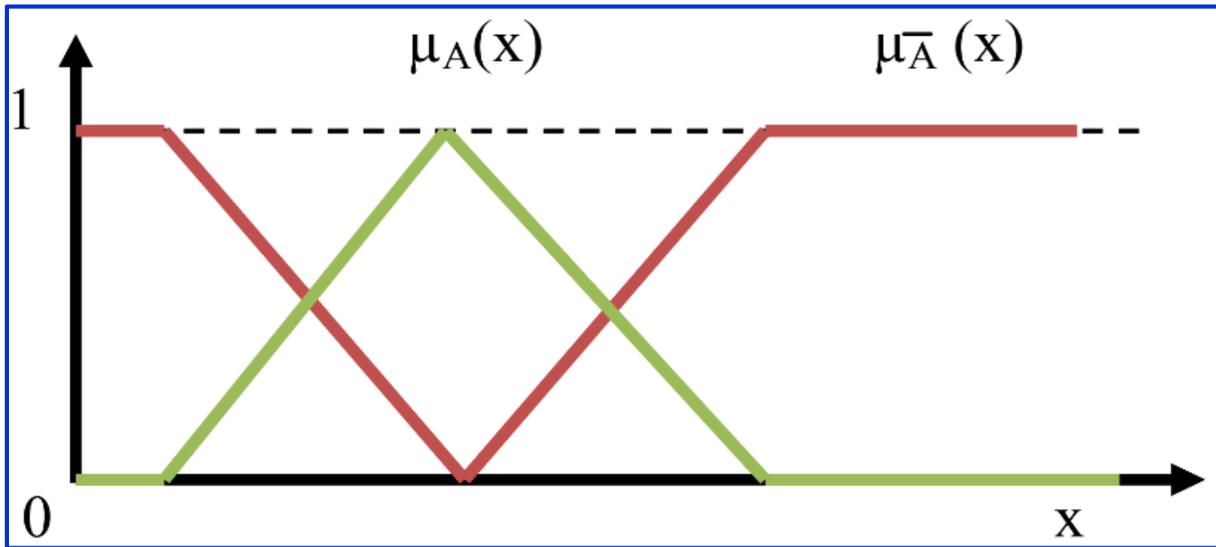


Figure 4.3 : Présentation du complément.

En général, contrairement aux sous-ensembles classiques, la propriété du non contradiction n'est pas satisfaite par les sous-ensembles flous ($A \cap \bar{A} \neq \emptyset$). De même, la propriété du tiers exclus n'est pas satisfaite non plus ($A \cup \bar{A} \neq U$). Les autres propriétés sont conservées.

iv. **Intersection** : On définit l'intersection de A et B, et on note $A \cap B$, par le plus grand

ensemble flou de contenu à la fois dans A et B **Figure 4.4**, c'est-à-dire :

$$\forall x \in U \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4.17)$$

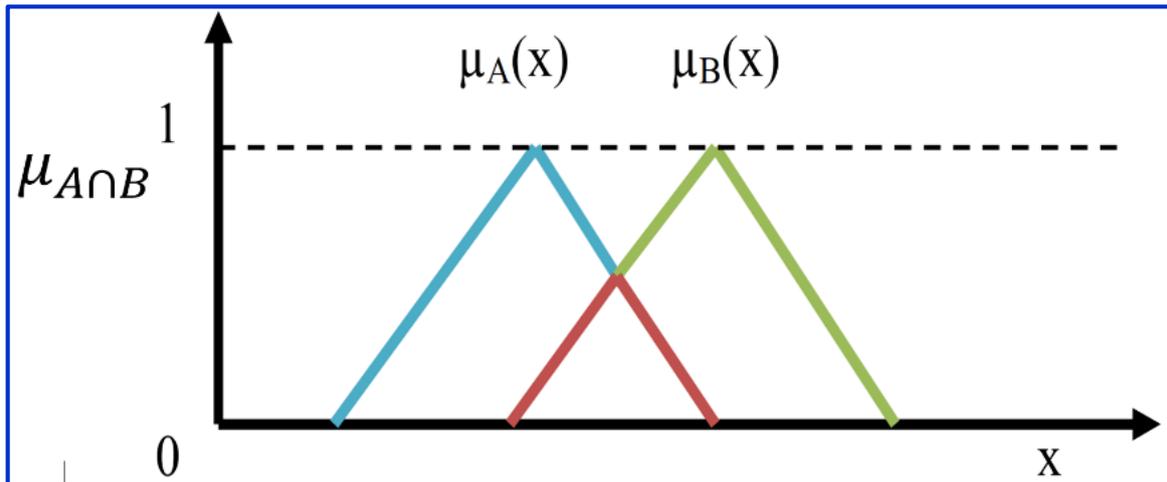


Figure 4.4 : Présentation de l'intersection

- v. **L'Union** : On définit l'union ou l'Union de A et B , et on note $A \cup B$, par le plus petit ensemble flou de U qui contient à la fois A et B , **Figure 4.5**, c'est-à-dire :

$$\forall x \in U \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4.18)$$

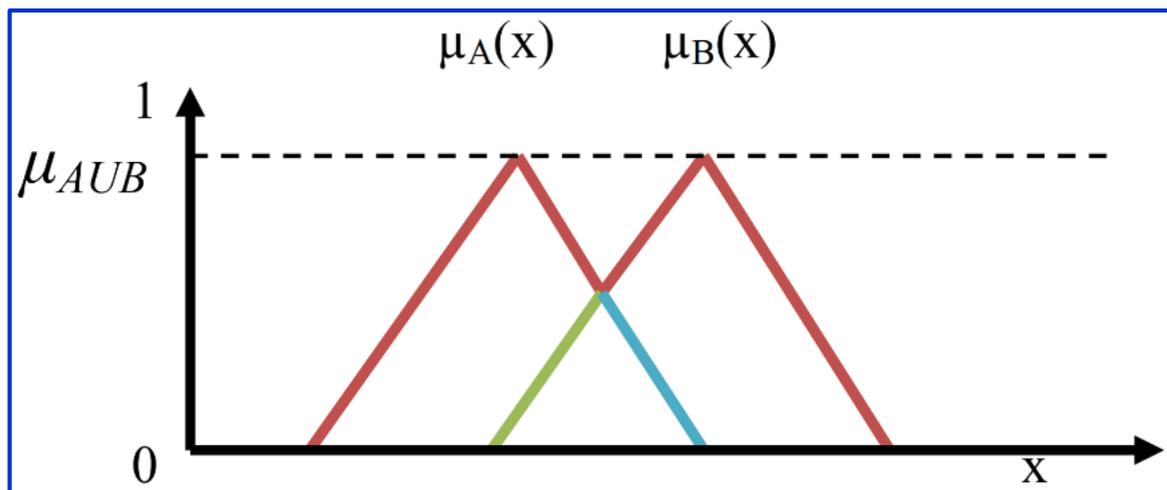


Figure 4.5 : Présentation de l'Union

L'algèbre des ensembles flous est la même que celle des ensembles ordinaires, sauf que le tiers-exclu n'est plus vérifié. En effet, on y retrouve les opérations suivantes :

- i. **Commutativité** :

$$\begin{cases} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{cases} \quad (4.19)$$

- ii. **Associativité** :

$$\begin{cases} A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C \\ A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C \end{cases} \quad (4.20)$$

- iii. **Distributivité** :

$$\begin{cases} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{cases} \quad (4.21)$$

iv. Involution :

$$\overline{\overline{A}} = A \quad (4.22)$$

v. Lois de Morgan :

$$\begin{cases} \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \end{cases} \quad (4.23)$$

4.3.2.5 Notion d α -coupe : Comme mentionné ci-dessus, tout nombre ou intervalle flou « A » proportionne, à un niveau α donné, un intervalle ordinaire appelé une α – coupe. Cet intervalle contient tous les éléments de la quantité floue avec un degré de possibilité au moins égal à α [Marszal., 2002 ; Nait-Said *et al.*, 2009].

A des valeurs de α se rapprochant de 1 correspondent des intervalles à une grande plausibilité.

Une α – coupe est définie alors comme suite :

$$\tilde{A}_\alpha = \{x \in X, \mu_A(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1] \quad (4.24)$$

Ou bien :

$$\tilde{A}_\alpha = [x_\alpha; y_\alpha] \quad (4.25)$$

Où x_α et y_α sont les projections sur l'axe des abscisses des points appartenant à la courbe $y = \mu_{\tilde{A}}(x)$ et d'ordonnée α ; ils représentent respectivement les extrémités gauche et droite de \tilde{A}_α , prises à un niveau α . Pour un nombre flou triangulaire (Figure. 4.6), on a :

$$\tilde{A}_\alpha = [(m - a_1)\alpha + a_1; -(a_2 - m)\alpha + a_2] \quad (4.26)$$

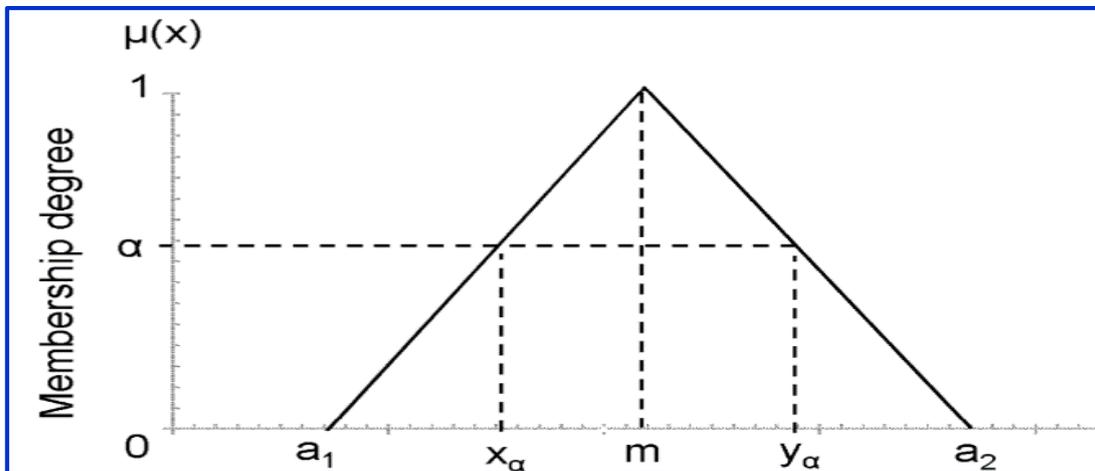


Figure 4.6 : Description d'un ensemble flou triangulaire par ses α -coupes

4.3.2.6 Opérations arithmétiques sur les nombres flous : Les opérations arithmétiques utilisées pour manipuler des nombres ou des intervalles flous requièrent beaucoup de ressources. Cependant, en utilisant la décomposition d'un nombre flou en α -coupes, ces opérations seront largement simplifiées en se réduisant à des opérations sur des intervalles de confiance :

Pour les deux ensembles flous donnés **A** et **B** définis par leurs α -coupes respectives :

$$\tilde{A}_\alpha = [A^-_\alpha; A^+_\alpha] \subset R^+ \text{ et } \tilde{B}_\alpha = [B^-_\alpha; B^+_\alpha] \subset R^+ \quad (4.27)$$

i. Addition :

$$(\tilde{A} + \tilde{B})_\alpha = [A^-_\alpha + B^-_\alpha; A^+_\alpha + B^+_\alpha], \forall \alpha \in [0, 1] \quad (4.28)$$

ii. Soustraction :

$$(\tilde{A} - \tilde{B})_\alpha = [A^-_\alpha - B^-_\alpha; A^+_\alpha - B^+_\alpha], \text{ si } B^+_\alpha \leq A^-_\alpha \forall \alpha \in [0, 1] \quad (4.29)$$

iii. Multiplication :

$$(\tilde{A} \times \tilde{B})_\alpha = [\min(A^-_\alpha \times B^-_\alpha, A^-_\alpha \times B^+_\alpha, A^+_\alpha \times B^-_\alpha, A^+_\alpha \times B^+_\alpha); \max(A^-_\alpha \times B^-_\alpha, A^-_\alpha \times B^+_\alpha, A^+_\alpha \times B^-_\alpha, A^+_\alpha \times B^+_\alpha)] = [A^-_\alpha \times B^-_\alpha, A^+_\alpha \times B^+_\alpha], \forall \alpha \in [0, 1] \quad (4.30)$$

iv. Division :

$$\left(\frac{\tilde{A}}{\tilde{B}}\right)_\alpha = [\min(A^-_\alpha/B^-_\alpha, A^-_\alpha/B^+_\alpha, A^+_\alpha/B^-_\alpha, A^+_\alpha/B^+_\alpha), \max(A^-_\alpha/B^-_\alpha, A^-_\alpha/B^+_\alpha, A^+_\alpha/B^-_\alpha, A^+_\alpha/B^+_\alpha)] = \left[\frac{A^-_\alpha}{B^-_\alpha}, \frac{A^+_\alpha}{B^+_\alpha}\right], \forall \alpha \in [0, 1] \quad (4.31)$$

4.4 Applications de la théorie des ensembles flous à l'analyse des risques

4.4.1 Analyse de modes de défaillances et leur effet flou : L'analyse des modes de défaillances et de leurs effets fournit un outil d'analyse des causes et des effets de défaillances des systèmes industriels. Dans cet outil, chaque mode de défaillance est évalué en fonction de trois paramètres, sa gravité, sa probabilité d'occurrence et la non détection du mode de défaillance.

L'élaboration de l'AMDE floue consiste à traiter ce type d'information de façon plus normale et objective en introduisant la notion des ensembles flous. L'AMDE floue consiste d'utiliser les variables linguistiques pour décrire la gravité, la probabilité d'occurrence et la non détection de chaque mode de défaillance [Romdhane *et al.*, 2007].

4.4.2 Arbre de défaillances (AdD) floue : Les premiers travaux d'analyse floue des arbres de défaillance appartiennent à Tanaka [Tanaka *et al.*, 1983]. Ces travaux sont basés

sur la représentation de la probabilité d'occurrence des événements de base par des nombres flous trapézoïdaux et l'utilisation du principe d'extension de Zadeh [Zadeh., 1965] pour calculer la probabilité d'occurrence de l'événement sommet de l'arbre. Liang et Wang [Liang., 1993] ont représenté les probabilités d'occurrence des événements de base par des nombres flous triangulaires pour évaluer la possibilité d'occurrence de l'événement sommet de l'arbre. Soman et Misra [Soman., 1993] ont proposé une méthode connue sous le nom de l'identité de résolution basée sur la méthode des α -coupes pour traiter les arbres de défaillance comportant des événements répétés. Sawyer et Rao [Sawer., 1994] ont utilisé la méthode des α -coupes pour étudier la fiabilité d'un système mécanique. Par la suite, un nombre important de travaux a été développé sur l'utilisation des arbres de défaillance [Suresh., 1996 ; Huang *et al.*, 2004].

4.4.3 Analyse des couches de protection (LOPA) floue : LOPA fournit un outil efficace pour l'analyse et l'évaluation des risques des scénarios d'accidents. Cet outil semi-quantitatif d'analyse des risques est aussi confronté à des données et informations imparfaites, chose qui rend son application inconsistante. Dans ce contexte, Markowski [Markowski., 2009 ; Hellas *et al.*, 2019b, Hellas *et al.*, 2020b], ont développé une approche de LOPA floue qui tient en faveur l'aspect incertain et imprécis que présente la méthode LOPA classique. LOPA floue proposée par Markowski consiste à élaborer des modèles flous à partir des paramètres d'entrée de LOPA classique.

4.4.4 Graphe de risque étalonné floue : Le graphique de risque **Figure 4.7** est l'une des méthodes les plus utilisées pour déterminer le niveau d'intégrité de sécurité des fonctions instrumentées de sécurité. Cependant, le graphe de risque conventionnel tel que décrit dans la norme CEI 61508 est subjectif et pose un problème d'interprétation des paramètres de risque. Cela peut donc conduire à des résultats incohérents pouvant aboutir à des SIL prudents. Pour surmonter cette difficulté, un graphique de risque modifié utilisant un système basé sur des règles floues est proposé. Cette nouvelle version du graphique de risque utilise des échelles floues pour évaluer les paramètres de risque. Un étalonnage peut être effectué en faisant varier les valeurs des paramètres de risque.

Le graphe de risque s'appuie sur l'équation suivante : $R = f \times C$, où **R** est le risque en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité, **f** est la fréquence de l'événement dangereux en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité et **C** est la conséquence de l'événement dangereux. La fréquence de l'événement dangereux **f** est supposée être le résultat des trois facteurs suivants :

4 Approche floue d'Analyse Quantitative de Risque (QRA)

- ❖ La fréquence et la durée d'exposition dans une zone dangereuse ;
- ❖ La possibilité d'éviter l'événement dangereux ;
- ❖ La probabilité que l'événement dangereux se produise en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité, c'est ce qu'on appelle la probabilité d'occurrence non souhaitée.

Finalement, nous obtenons les quatre paramètres de risque suivants :

- Fréquence et durée d'exposition au danger (F) ;
- Possibilité d'éviter l'événement dangereux (P) ;
- Probabilité de l'occurrence non souhaitée (W) ;
- Conséquence de l'événement dangereux (C).

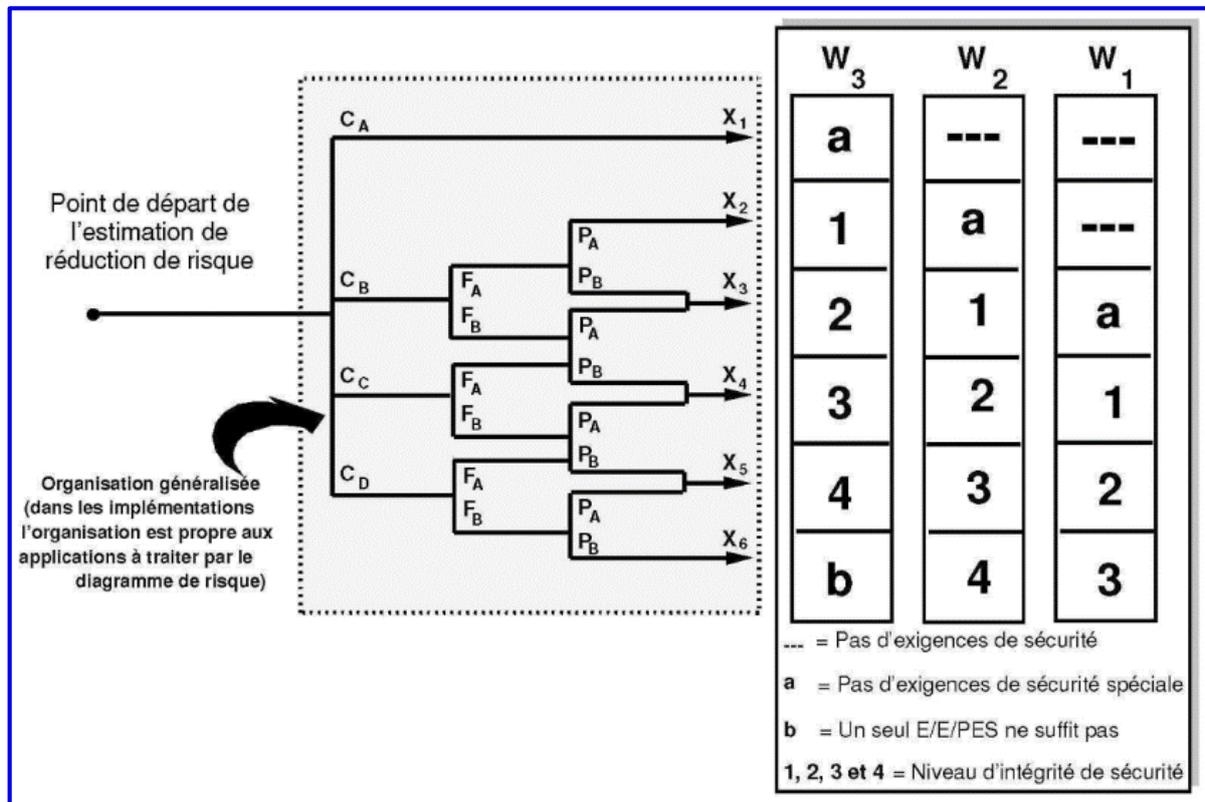


Figure 4.7 : Graphe de hiérarchisation du risque

Ce graphe s'explique de la manière suivante : L'utilisation des paramètres de risque C, F et P aboutit à un certain nombre de sorties (X_1, X_2, \dots, X_n). Chaque sortie est consignée dans une des trois échelles (W_1, W_2 et W_3). Chaque échelle indique le SIL nécessaire que doit satisfaire le système. La mise en correspondance avec W_1, W_2 ou W_3 permet de réaliser la contribution d'autres mesures de réduction du risque. Le décalage dans les échelles W_1, W_2 et W_3 est nécessaire pour avoir trois niveaux différents de réduction des risques. Le graphe est composé de l'échelle W_3 , qui fournit la réduction minimale du risque grâce à des

mesures spécifiques, c'est-à-dire la plus forte probabilité de l'apparition d'un événement non désiré. L'échelle W2 caractérise une contribution moyenne et l'échelle W1 caractérise une contribution maximale. La sortie finale du graphe de risque donne le SIL du Système Instrumenté de Sécurité (SIS) et correspond à une mesure de la réduction nécessaire du risque pour le système.

Compte tenu des insuffisances constatées sur le graphe de risque conventionnel, on a développé un graphe de risque étalonné plus flexible basé sur un système différence floue [Nait-Said *et al.*, 2009]. La méthodologie proposée utilise des partitions floue pour caractériser les paramètres du risque et le SIL. À partir des partitions ordinaires disponibles, les ensembles flous obtenus sont évalués au niveau de la base de règles selon la logique Si /alors du graphe conventionnel. La sortie du système différence est une valeur numérique du facteur de réduction du risque.

4.4.5 La Grille de criticité floue : La grille de criticité bien que largement utilisée dans divers secteurs industriels, présente des insuffisances inhérentes à la nature subjective des jugements d'experts et aux imperfections des connaissances (en terme d'incertitude et imprécision) impliquées lors de l'évaluation du risque de par ses paramètres. Ces derniers sont en effet, exprimés par des qualificatifs linguistiques schématisant la situation réelle, ce qui est à l'origine des différences d'interprétation des résultats de l'évaluation. Ainsi, pour rendre l'évaluation plus précise et plus fiable, il est nécessaire de pouvoir manipuler de manière cohérente et logique les informations subjectives, qualitatives et quantitatives relatives à l'analyse

La logique floue semble offrir un cadre très adéquat pour l'évaluation de la criticité, **Figure 4.8**, dans lequel puissent être traitées des imprécisions, des incertitudes, des connaissances quantitatives et des connaissances exprimées symboliquement par des qualifications en langage naturel [Bouchon - Meunier., 1995].

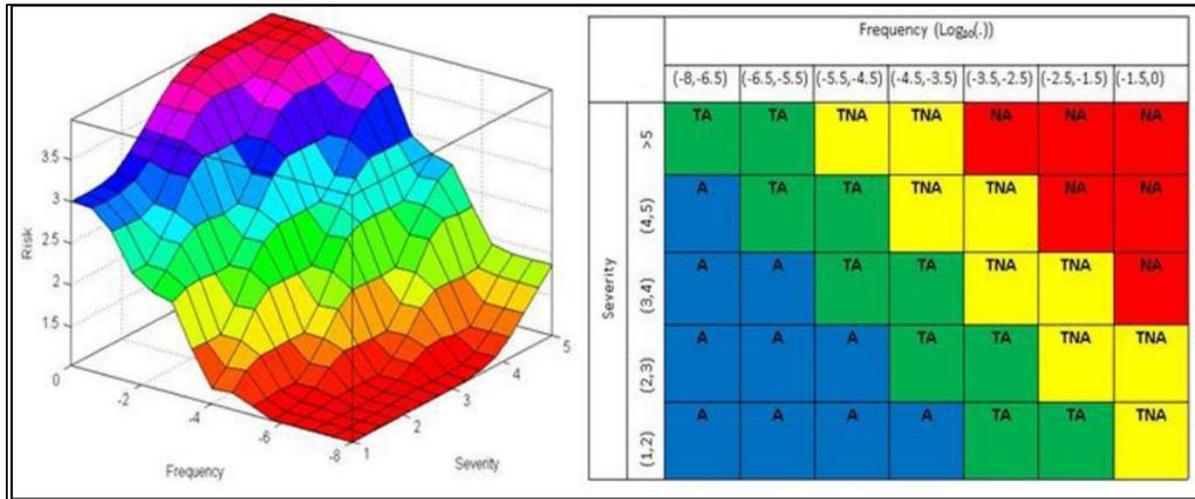


Figure 4.8 : Surface floue et matrice de risque classique [Abul-Haggag., 2013]

4.5 Analyse quantitative de risque floue

Ces dernières années, les systèmes industriels Algériens ont connu une augmentation remarquable du nombre d'accidents catastrophiques majeurs tels que des incendies et des explosions. Celles-ci ont des effets graves sur les personnes (mortalité, blessures), les biens (matériaux et outils de production) et l'environnement (pollution). Le complexe LNL1K de Skikda, qui a provoqué des pertes humaines, matérielles et environnementales considérables, est un exemple.

Afin de maîtriser ces phénomènes, plusieurs techniques et modèles mathématiques de prévision du risque ont été développés. Parmi ces méthodes, nous trouvons l'analyse quantitative des risques, mais toujours il y a un problème d'incertitudes relatives à l'impact du risque. Il était question des éléments de réponse à un problème dans le cadre d'une analyse quantitative des risques, Zadeh, dans son travail [Zadeh., 1975], proposait une base conceptuelle principalement nouvelle pour traiter les informations imprécises - une théorie des ensembles flous. La théorie a été largement développée au cours des dernières années. De nos jours, le flou est utilisé pratiquement dans tous les domaines d'activités scientifiques et pratiques, y compris l'analyse quantitative des risques.

Le QRA classique n'est généralement pas précise et ses résultats ne sont pas sensibles à la gravité et à la fréquence des accidents comme le montre clairement la Figure 4.9. L'évaluation des risques flous peut être une solution pour que les décideurs disposent d'informations détaillées et précises sur les risques et sur la gestion des risques.

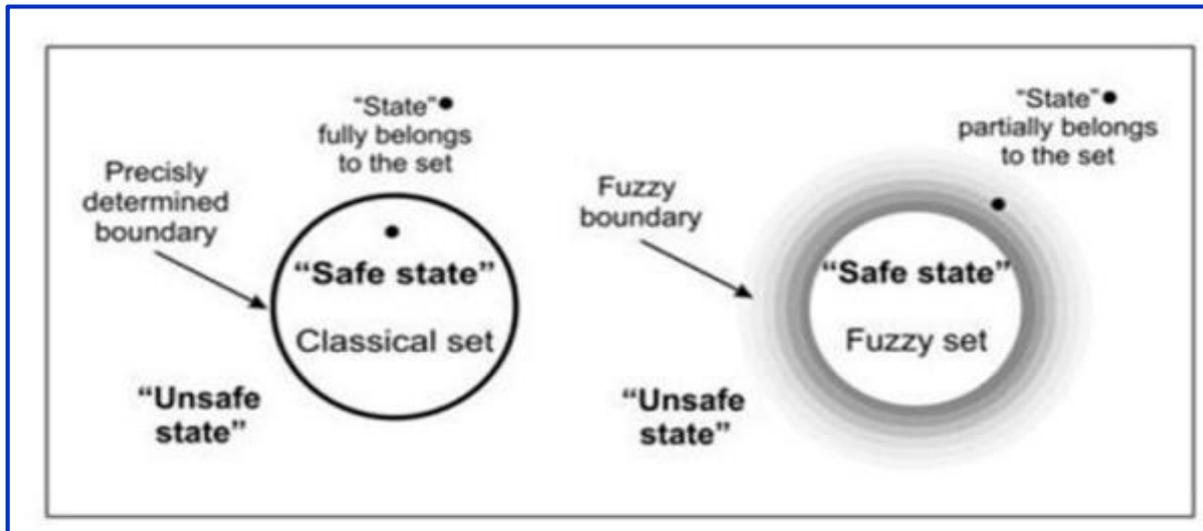


Figure 4.9 : Ensemble classique et ensemble flou [Markowski. 2009]

Les résultats issus d'une QRA floue s'avèrent très encourageants et bien justifiés. En effet, le passage aux variables physiques et de vulnérabilité dans le cas d'une analyse de conséquences d'une part, et aux fréquences floues d'autre part, est basé sur la propriété de monotonie des fonctions (équations) impliquées dans une QRA conventionnelle. Ce qui était en faveur du passage de nombres ordinaires vers des nombres flous (emboîtement d'intervalles de niveau α , $\alpha \in [0, 1]$) [Hellas *et al*, 2019a].

La méthodologie est basée sur l'approche QRA floue (Figure 4.10). Cette approche consiste principalement à identifier des scénarios d'accident potentiels, à estimer leur fréquence et à analyser leurs effets, afin d'estimer les risques individuels en terme floue et ainsi appliquer les mesures à prendre.

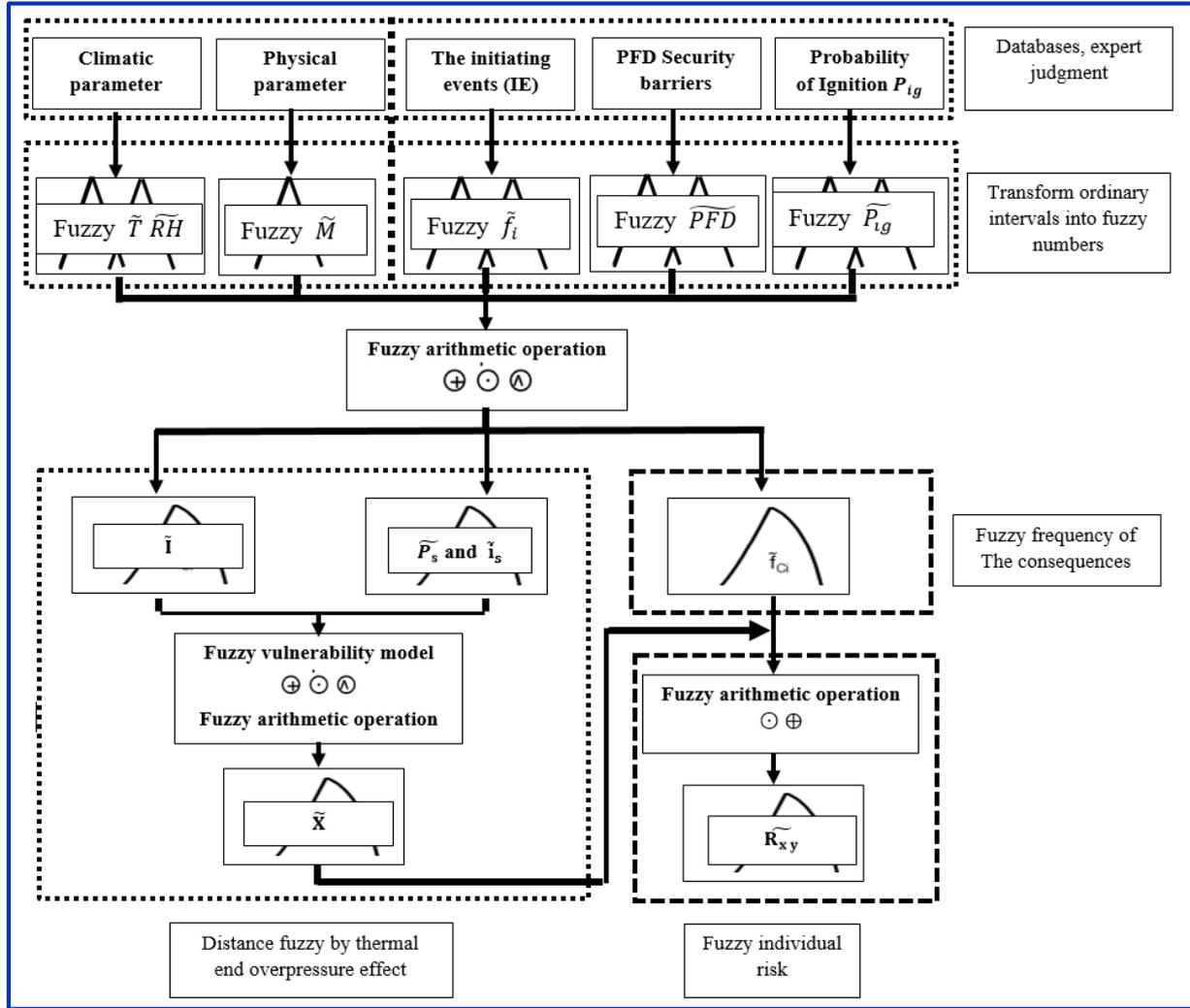


Figure 4.10 : Analyse quantitative de risque floue [Hellas et al., 2019a]

4.5.1 Évaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents : Cette évaluation consiste à modéliser chacun des paramètres à fréquence de l'évènement initiateur, les probabilités de défaillances des barrières de sécurité, les probabilité d'ignition et les conditions climatique ou physique pouvant participer à ma survenance de la conséquence du scénario d'accident selon des distributions de possibilité triangulaires.

Un nombre flou peut être décomposé en α -coupes [Zadeh., 1975].

Soit \tilde{P} et P_α , respectivement, un nombre flou et ses α -coupes. Donc \tilde{P} peut être écrit comme l'union des produits α . P_α , avec α comprise entre 0 et 1:

$$\tilde{P} = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_\alpha \quad (4.32)$$

Avec :

$$P_\alpha = \{p \in [0, 1] | \mu_{\tilde{p}} \geq \alpha\} \quad (4.33)$$

La quantification de la fréquence des conséquences floues est effectuée en utilisant l'équation(4.34) :

$$\tilde{f}_\alpha = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot f_{i_\alpha} \times \prod_{j=1}^j \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot PFD_{i_\alpha}^j \times \prod_{k=1}^k \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot (1 - PFD_i^k)_\alpha \times \prod_{n=1}^n \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_{ii}^n \times \prod_{m=1}^m \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot (1 - P_{di}^m)_\alpha \quad (4.34)$$

4.5.2 Évaluation floue des conséquences du scénario d'accidents : Similairement au modèle d'évaluation floue de la fréquence d'occurrence du scénario d'accidents, ce modèle permet de modéliser les paramètres physiques d'entrée pouvant favoriser l'accroissement de l'effet de la conséquence engendrée. Notons que, selon le phénomène étudié et en fonction des facteurs physique (la masse ou le volume de produite chimique) et environnementaux (humidité, température ambiante, la vitesse de vent, la direction de vent) ainsi que le modèle qui régit ces paramètres, une modélisation de ces paramètres est faite selon des distributions de possibilité triangulaires.

La détermination de l'intensité \tilde{I} , la suppression \tilde{P}_s et la concentration \tilde{C} floue des conséquences sont faites à l'aide de l'équation suivante :

$$\begin{cases} \tilde{I} = f_1(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) \\ \tilde{P}_s = f_2(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) \\ \tilde{C} = f_3(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) \end{cases} \quad (4.35)$$

Où :

- \tilde{P}_n est le nième paramètre physique flou ;
- f_1, f_2, f_3 sont les fonctions des modèles physique respectivement de intensité, suppression et toxique .

La décomposition sont faite en utilisant la méthode des $\alpha - coupes$ comme suit :

$$\begin{cases} \tilde{P}_s = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_{s_\alpha} \\ \tilde{I} = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot I_\alpha \\ \tilde{C} = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot C_\alpha \end{cases} \quad (4.36)$$

Les résultant de l'intensité, la surpression et la concentration floue de la conséquence est un nombre flou qui sera utilisé afin de calculer la probabilité de fatalité (décès) floue moyennant l'équation suivante :

$$\tilde{P}_{Fi} = g(\tilde{Q} ; \tilde{S}; \tilde{T}) \quad (4.37)$$

Où :

- \tilde{P}_{Fi} est la probabilité de fatalité floue ;
- g est la fonction de vulnérabilité ;
- \tilde{Q} est la dose floue de l'effet thermique ;
- \tilde{S} est la dose floue de l'effet de surpression ;
- \tilde{T} est la dose floue de l'effet toxique.

4.5.3 Risque individuel et sociétal floue

4.5.3.1 Risque individuel flou : A partir les résultants issus des modelés analyses des fréquences des conséquences et des effets des conséquences des scenarios d'accidents, ce modèle permet de calcules le risque individuel floue en multipliant la fréquence floue de la conséquence et la probabilité floue des effets létaux [CCPS., 2000 ; Casal., 2017] :

$$\tilde{R}_{x,y,i} = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot f_{ci\alpha} \times \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_{Fi\alpha} \quad (4.38)$$

Le risque individuel total flou à chaque point est égal à la somme des risques individuels flous, à ce point, de tous les cas de résultats incidents associés à l'équation de la plante :

$$\tilde{R}_{x,y} = \sum_{i=1}^n \tilde{R}_{x,y i} \quad (4.39)$$

Où :

- $\tilde{R}_{x,y}$: Le risque individuel total de mortalité floue à l'emplacement géographique x, y (y - 1) ;
- $\tilde{R}_{x,y i}$: Le risque individuel flou de décès à l'emplacement géographique x, y de cas de résultat de l'incident i (chances de décès par an, ou y - 1) ;
- n : Le nombre total de cas de sortie d'incident pris en compte dans l'analyse.

4.5.3.2 Risque sociétal floue : Le risque sociétal flou peut être représenté par les courbes F-N, il est important que les fréquences floue et le nombre de morts floue correctement combinés au nombre N floue de décès soient chaque scénario d'accident est en appliquant la multiplication étendue des α -coupes comme suit (Equation 4.40) [Jones., 1985; CCPS., 1999] :

$$\tilde{SR} = \begin{cases} \tilde{N}_i = \sum_{xyi} \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_{xyi\alpha} \times \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot P_{Fi\alpha} \\ \tilde{F}_N = \sum_{i=1}^n \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} \alpha \cdot F_{Ci\alpha} \end{cases} \quad (4.40)$$

4.6 Exemple application la méthode LOPA floue dans four rebouilleur

La méthodologie est basée sur l'approche LOPA floue (Figure.4.11). Cette approche permet d'évaluer les éléments d'un scénario d'accident et de mesurer la réduction des risques de manière plus souple [hellas., 2020b].

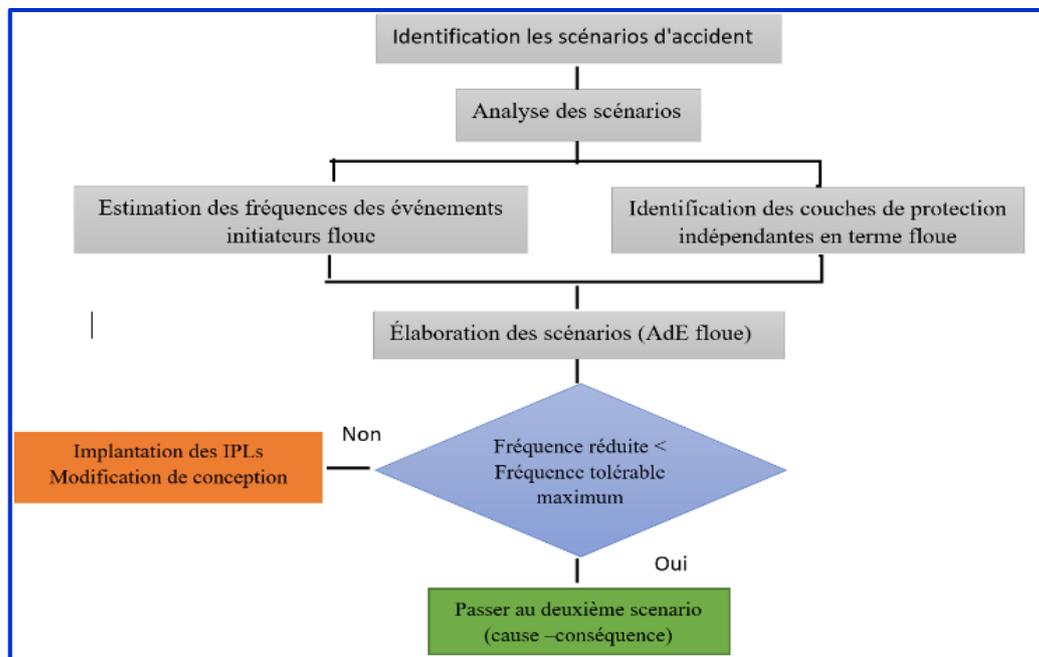


Figure4.11 : Présentation de la LOPA floue

❖ **Présentation du système « Four Rebouilleur » :** Vu l'importance de la partie "Identification des risques", nous présentons la description technique et fonctionnelle du système "Four rebouilleur" Figure4.12 et à l'analyse des différents scénarios d'accidents.



Figure 4.12 : Four Rebouilleur H-101 [SONATRACH., 2008]

Le système Four rebouilleur H-101 comprend :

- Une zone de radiation (rayonnement) constituant la chambre de combustion, garnie intérieurement de matériau réfractaire isolant, dans laquelle des tubes sont exposés à la flamme et reçoivent la chaleur principalement par radiation des produits de combustion ;
- Une zone de convection, éventuellement garnie, installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion. Elle est constituée d'un faisceau de tubes placés perpendiculairement à la direction des fumées ;
 - Un faisceau tubulaire en zone de radiation et éventuellement en zone de convection ;
 - Deux cheminées ;
 - Des accessoires tels que, les portes d'accès, les portes d'explosion, les regards, les thermocouples et les connexions divers nécessaires à la bonne marche du four.

Le rôle principal du Four rebouilleur est de produire des gaz combustibles légers (gaz de vente) qui sont essentiellement des composés du méthane et d'éthane. Le processus de production de ces gaz est représenté dans la **Figure 4.13**. Le condensât du fond de la colonne C-101, est envoyé au moyen des pompes P-101 A/B, au four rebouilleur H-101 à 150°C pour réchauffage puis le fluide sortant du rebouilleur chauffé à 180 °C est renvoyé vers la colonne comme reflux chaud afin d'extraire les gaz légers (gaz de vente).

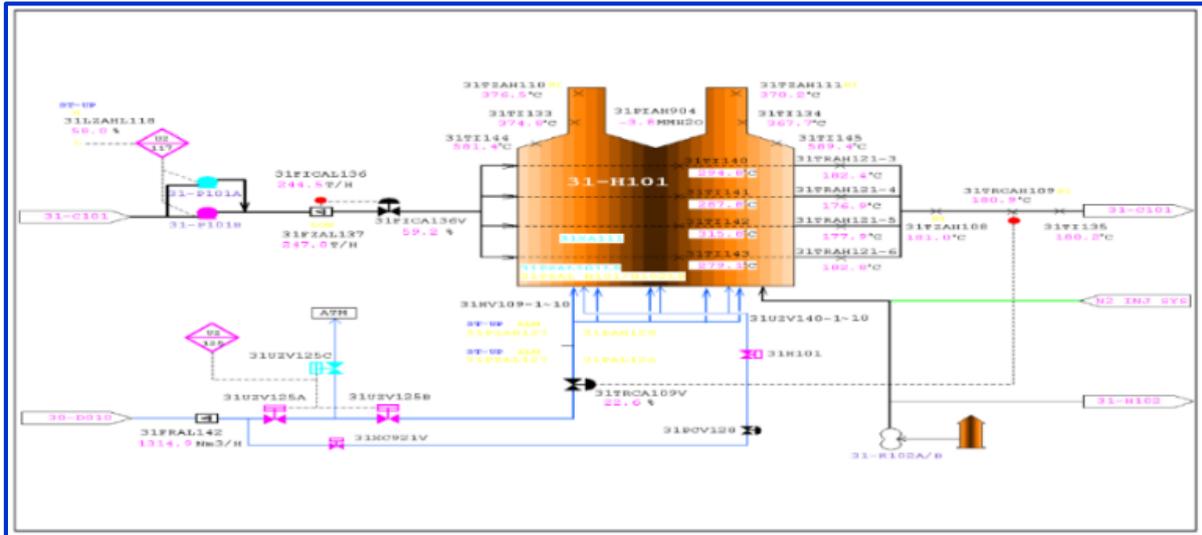


Figure 4.13 : Schéma de canalisation et d'instrumentation du Four rebouilleur H-101

❖ **Analyse structurelle, fonctionnelle du système "Four rebouilleur H-101" :** L'analyse structurelle, fonctionnelle et temporelle est une étape importante permettant de comprendre davantage le système "Four rebouilleur", ses différents sous-systèmes et composants. Pour plus de précision, nous présentons le sous-système et sa fonction :

- SS1 : Circuit alimentation [Alimentation du four rebouilleur] ;
- SS2 : Sous-système de tirage [Assure l'arrivée et la circulation d'air] ;
- SS3 : Sous-système de contrôle [contrôle des paramètres du procédé] ;
- SS4 : Trappe d'explosion [s'ouvre en cas de montée en pression dans la chambre de combustion] ;
- SS5 : Sous-système de prévention [Assure la sécurité du procédé] ;
- SS6 : Sous-système de protection [Maîtriser le feu].

❖ **Élaboration d'une étude HAZOP sur le système "Four Rebouilleur" :** L'intérêt de l'application de la méthode HAZOP [IEC 61882., 2001] est fourni une étude de base permettant de recenser les différentes causes et conséquences des scénarios d'accidents. Elle permet aussi d'envisager les différentes barrières de sécurité pouvant empêcher ces accidents. Toutes ces informations seront utilisées dans LOPA.

Le **Tableau 4.1** de HAZOP montre les différentes causes, conséquences et barrières de sécurité existantes au niveau du four rebouilleur H-101.

Mot guide	Élément	Déviation	Causes possibles	Conséquences	Protections
-----------	---------	-----------	------------------	--------------	-------------

4 Approche floue d'Analyse Quantitative de Risque (QRA)

1	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de condensât	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne FICA-136V	Pas du liquide dans H-101, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- Opérateurs - FICAL-136 - FZL-137
				Mauvais fonctionnement de FICA-136V	Pas du liquide dans H-101, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FICAL-136 - FZL-137
				Mauvaise manipulation sur l'une des vannes.	Pas de débit dans l'un des passes du H-101, température élevée, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FI-138 - TRAH-121-3 - FICAL-136 - FZL-137
				Mauvais fonctionnement de la vanne TRCA-109V, combustion importante dans H-101	Température élevée à la sortie du H-101, endommagement possible du serpentin	- TI-135 - TRAH-121-3~6 - TRCAH-109 - TZH-108
3	MOINS	Température de condensât	Moins de température	Mauvais fonctionnement de TRCA-109V, faible combustion dans H-101	Basse température à la sortie de H-10, passage possible de produit en OFF-SPEC	- TI-135
4	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvais fonctionnement des vannes.	Pas de fuel gaz pour H-101, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF SPEC	- PAL-126 - FRAL-142 - TRCA-109
				Mauvais fonctionnement de la vanne.	Pas de fuel gaz pour H-101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de	PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142

4 Approche floue d'Analyse Quantitative de Risque (QRA)

				produit en OFF SPEC
				Dégagement de fuel gaz en atmosphère, explosive possible & arrêt d'unité - TRCA-109
				Pas de fuel gaz pour H-101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC - Opérateurs (locaux) - PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142 - TRCA-109
NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne manuelle à l'entrée/sortie de TRCA- 109V	
			Mauvais fonctionnement de TRCA-109V	Pas de fuel gaz pour H 101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF SPEC -PAL-126 -PZL-127 - FRAL-142

Tableau 4.1 : Feuille de présentation HAZOP

❖ **Analyse des scénarios :** La méthode LOPA inspire les différents éléments de ses scénarios à partir des résultats fournis par l'HAZOP (**Tableau 4.1**) en annexe.

Les scenarios retenus sont :

- Endommagement du serpentin (incendie) & arrêt d'unité ;
- Dégagement du fuel gaz dans l'atmosphère, incendie & arrêt du processus ;
- Haute pression à l'intérieur du four H101, explosion & arrêt du processus.

Ces scénarios sont tous d'une gravité égale à 3 et sont pour les événements suivants :

- Défaillance de la vanne FICA-136V ;
- Défaillance de l'opérateur (Mauvaise manipulation sur l'une des vannes HXC-907V/908V) ;
- Défaillance de la vanne HXC-907V/908V.

❖ **Estimation des fréquences des événements initiateurs :** Les fréquences d'occurrence

des événements initiateurs présentées sont tirées de la littérature [IEC 61511 Standard., 2003 ; Sonatrach., 2008 ; CCPS., 2001], représentées par la Figure 4.14 et le Tableau 4.2.

Paramètres floue	a	m	b
Défaillance de la vanne de régulation (vanne FICA-136V) et (vanne HXC- 907V/908V) (IE1) (year ⁻¹)	1,0E-1	1,0E-1	1E-1
Défaillance de l'opérateur (Mauvaise manipulation sur l'une des vannes HXC-907V/908V) (IE2) (year ⁻¹)	1,0E-2	3,1E-2	1 E-1
Défaillance d'une vanne de sécurité (TOR) (Ouverture intempestive de la vanne UZ-125C). (IE3) (year ⁻¹)	1,0E-3	3,1E-3	1E-2

Tableau 4.2 : Fréquences des évènements initiateurs floues

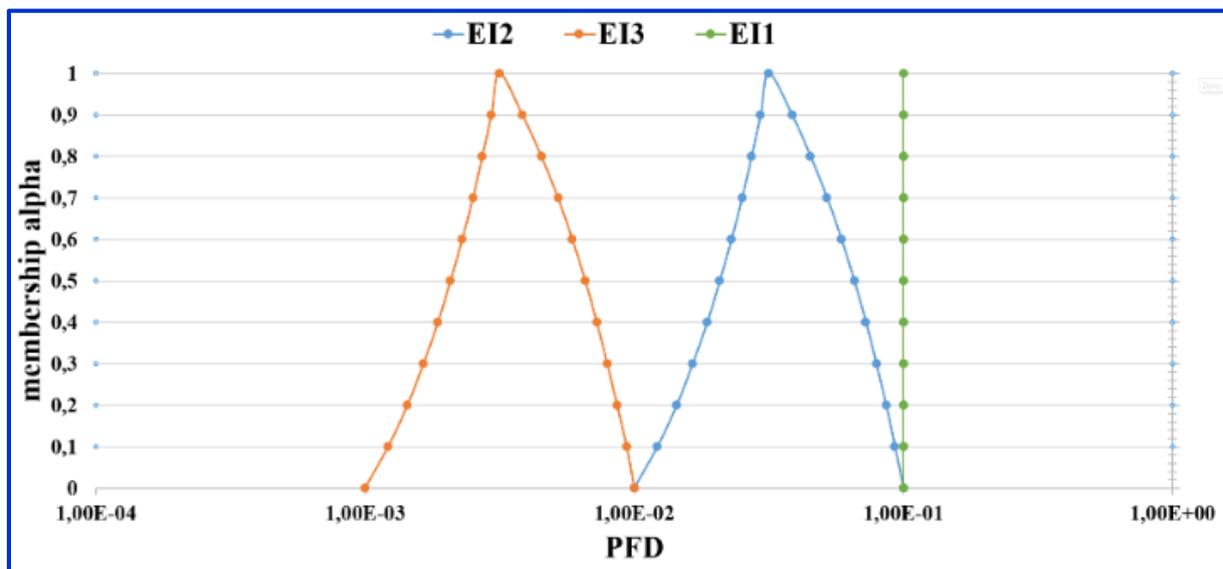


Figure 4.14 : Fréquences des évènements initiateurs floues

❖ **Identification des couches de protection indépendantes :** Rappelons que parmi les barrières de sécurité identifiées au préalable par la méthode HAZOP, il existe des barrières qu'on peut qualifier IPL et celles qui ne le sont pas.

Les couches de protection indépendantes retenues dans notre étude sont les suivantes :

- Alarme & Opérateur ;
- Système d'arrêt d'urgence ;
- Trappe.

Les probabilités de défaillance à la demande de ces couches de protection sont données par le Tableau 4.3 et la Figure 4.15.

Paramètres floue	a	m	b
Réponse de l'opérateur à l'alarme PFD 1	1.09E-1	1.09E-1	1.09E-1

SIS (PLC) PFD 2	1,00E-3	1,00E-2	1,00E-1
Trappe d'explosion PFD 3	1,00E-3	3,16E-3	1,00E-2

Tableau 4.3 : Paramètres PFD floue

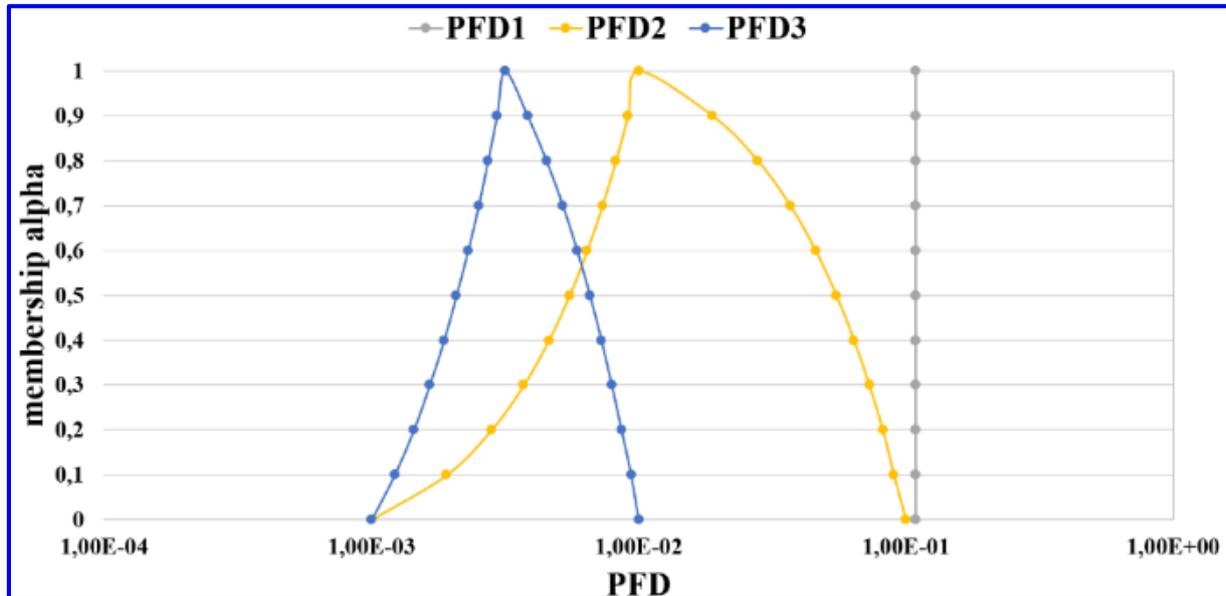
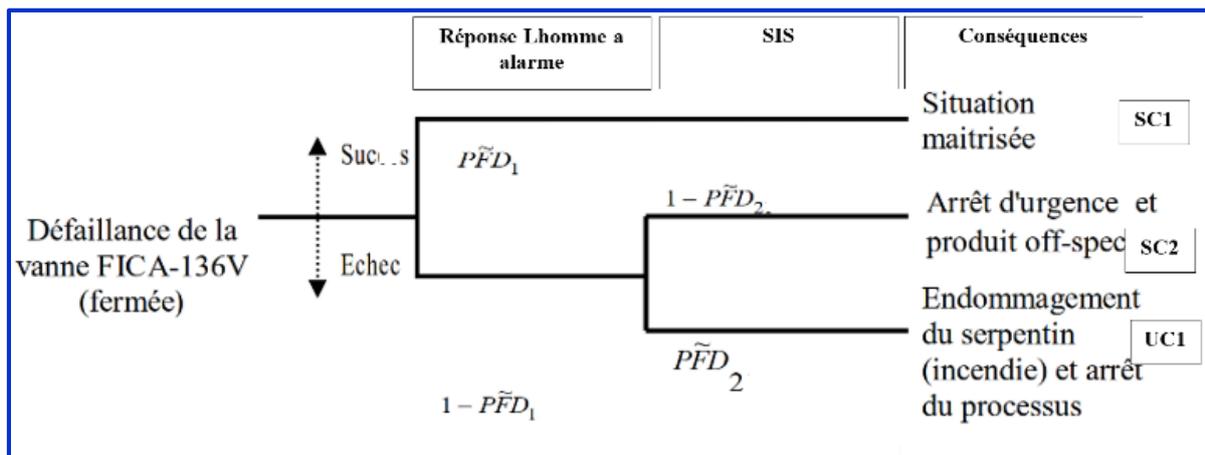
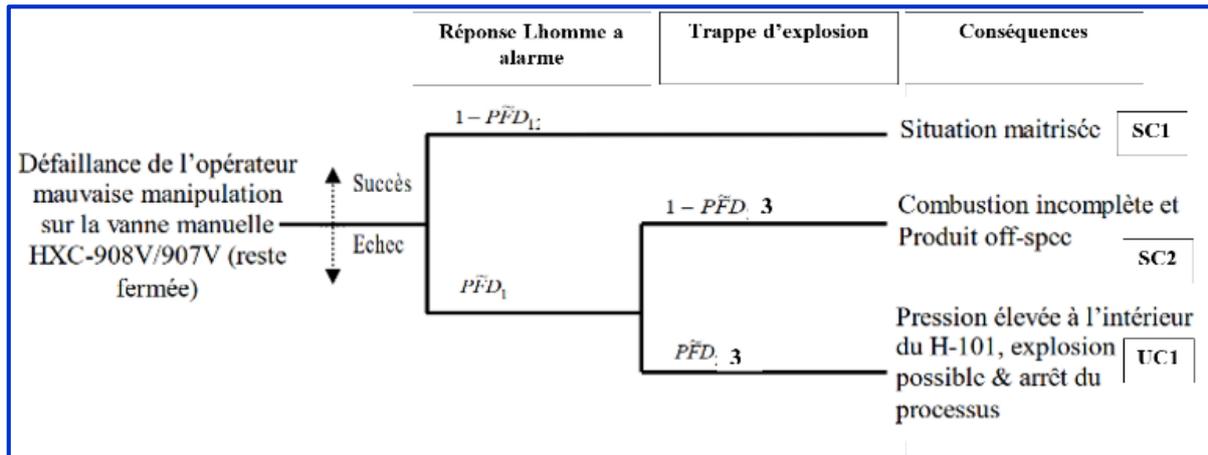


Figure 4.15 : Représentation graphique PFD floue

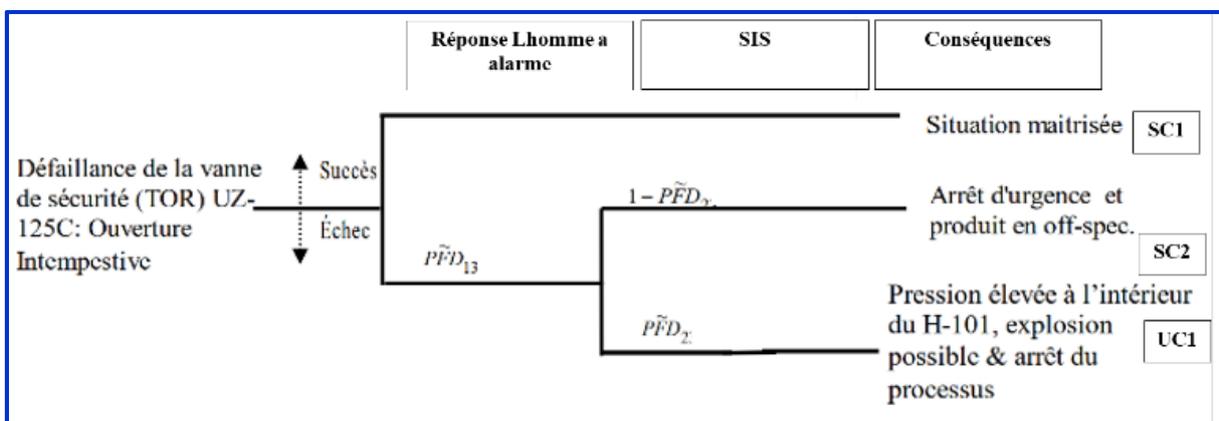
❖ **Élaboration des scénarios :** Les scénarios d'accidents issus de LOPA sont représentés par des Arbres d'Événements (AdE). Le choix de ce modèle nous permet de représenter clairement l'enchaînement des événements, en précisant leurs fréquences et par conséquent la fréquence des scénarios correspondants, [Figure 4.16](#).



Scénario 1



Scenario 2



Scenario 3

Figure 4.16 : Les différents scénarios d'accidents flous

❖ **Calcul de la fréquence de la conséquence réduite de chaque scénario d'accident :**
 L'intervalle de confiance de la fréquence de la conséquence de chaque scénario est obtenu à l'aide l'équation 4.34 en multipliant respectivement les bornes inférieures et supérieures des α -cuts des nombres flous des paramètres d'entrée (IE, PFD). Pour les scénarios d'accident ayant les mêmes conséquences, leur fréquence totale est estimée en additionnant les fréquences de chaque scénario. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la Figure 4.17 et le Tableau 4.4.

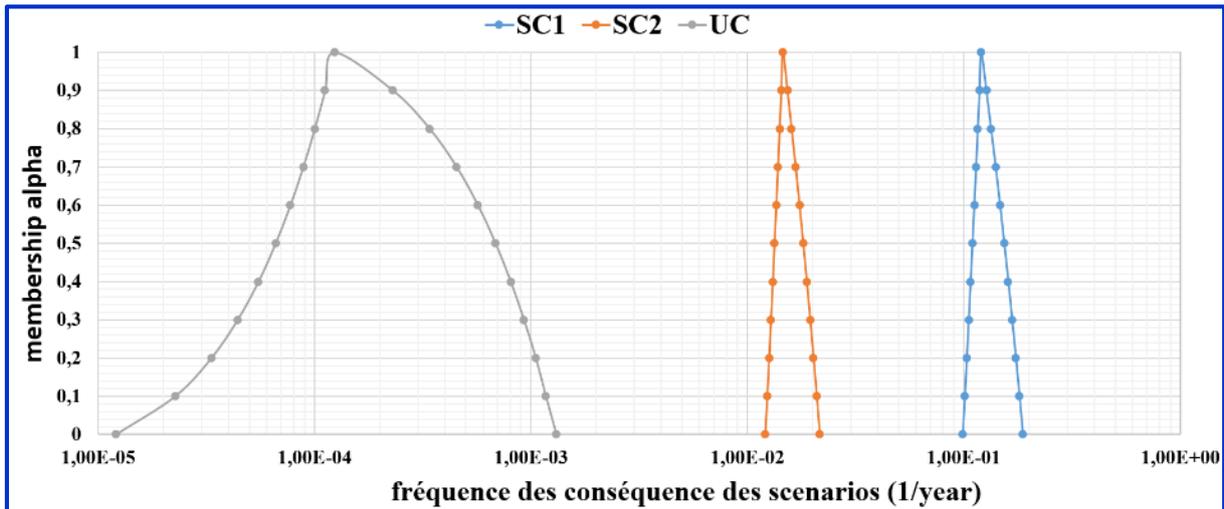


Figure 4.17 : Présentation graphique des fréquences de chaque scénario en terme floue

❖ **Évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères d'acceptabilité :** À partir des fréquences F_{np} et F_t , la norme IEC 61508 [IEC 61508., 2000] détaille la manière dont cette méthode peut être utilisée pour déterminer le SIL d'une fonction de sécurité faiblement sollicitée. La probabilité moyenne de défaillance à la demande de cette fonction (PFD_{avg}) est déterminée selon la procédure illustrée à la Figure 4.18. Dans cette figure, il est clairement mis en évidence que le risque initial (risque inhérent au système opérationnel, qualifié de EUC–Equipment Under Control– dans la norme) est réduit jusqu'à un risque toléré, par le biais du facteur PFD_{avg} . La valeur de ce facteur est bornée par la réduction du risque minimum à apporter, c'est-à-dire par l'inverse du facteur de réduction de risque RRF. Compte tenu de la valeur de PFD_{avg} retenue, le SIL de la fonction peut ensuite être déterminé à partir du Tableau 4.4.

Cette étape consiste à évaluer les scénarios d'accidents estimés par rapport aux critères d'acceptabilité qui ont été fixés au préalable afin de juger de l'acceptabilité de ces scénarios. Chaque scénario est évalué avant et après la mise en place des IPL_s.

Niveaux d'intégrité De sécurité	Faible sollicitation	Demande continue / Forte sollicitation
	Probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFD_{avg})	Probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFH)
SIL 4	$10^{-5} \leq PFD_{avg} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq PFH < 10^{-8}$
SIL 3	$10^{-4} \leq PFD_{avg} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq PFH < 10^{-7}$
SIL 2	$10^{-3} \leq PFD_{avg} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq PFH < 10^{-6}$

SIL 1

$10^{-2} \leq PFD_{avg} < 10^{-1}$

$10^{-6} \leq PFH < 10^{-5}$

Tableau 4.4 : Le SILs selon le mode de fonctionnement des fonctions ou systèmes de sécurité

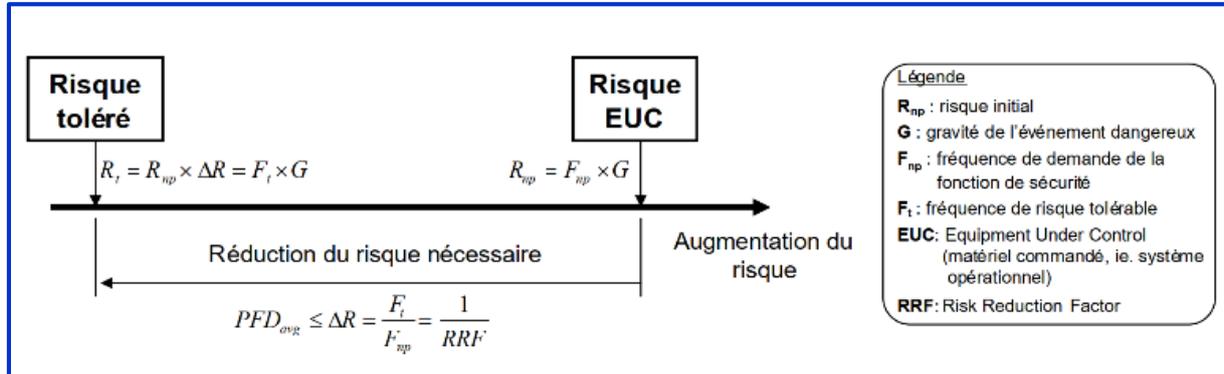


Figure4.18 : Réduction du risque par l'utilisation d'une fonction de sécurité faiblement sollicitée

En se référant au scénario d'accident avec des fréquences allant de « presque intolérable » jusqu'à « tolérable », nous avons vu comment le PFD requis varie en fonction de la différence entre les fréquences floues et la fréquence tolérables, [Figure 4.19](#) et [Tableau 4.5](#).

- SIL 2 si RRF : $\alpha = [0(\text{inférieur}) ; 0.2(\text{inférieur})]$;
- SIL 1 si RRF : $\alpha = [0.2(\text{inférieur}) ; 0.8(\text{supérieur})]$;
- Pas de SIL si RRF : $\alpha = [0.8(\text{supérieur}) ; 0(\text{supérieur})]$.

En outre, avec l'examen des modifications pratiques telles que proposées par les experts, nous avons pu mettre en évidence le potentiel de l'approche proposée dans l'évaluation des jugements d'experts.

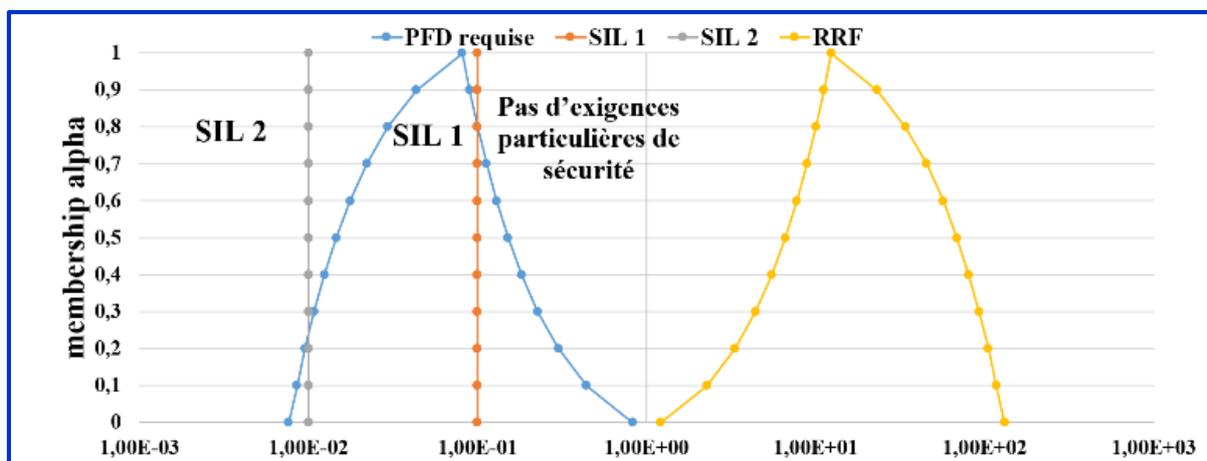


Figure4.19 : Représentation graphique des mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction

α -level	RRF	
0	1.2099	130.8
0.1	2.269668	116.9408
0.2	3.333185	105.094
0.3	4.407557	92.65459
0.4	5.500232	80.46527
0.5	6.602627	68.50301
0.6	7.724459	56.77145
0.7	8.861159	45.28726
0.8	10.00587	34.02438
0.9	11.17173	23.01904
1	12.33321	12.33321

Tableau 4.5 : Mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction

4.7 Conclusion

L'incertitude inhérente à l'analyse des risques constitue un sérieux problème dans la prise de décision concernant les risques. Avec peu d'informations et de statistiques, traiter les fréquences des événements initiateurs, les PFD des IPL, les paramètres physico-chimiques et les conditions climatiques comme des valeurs simples, est une manière controversée.

Pour plus d'illustration, nous présenterons un problème réel dans le chapitre suivant. Il s'agit d'une application de l'approche QRA floue sur un système industriel (**bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A**).

Chapitre 5

Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel

Sommaire

5 Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel	120
5.1. Introduction	121
5.2. Collecte des informations pertinentes	121
5.2.1 Situation géographique	121
5.2.2 Données Météorologiques.....	123
5.2.3 Données techniques sur le processus ou le système analysé.....	124
5.2.4 Données physico-chimiques des produits	126
5.3. Identification des scénarios d'accidents	127
5.4. Analyse des fréquences floues	129
5.5. Analyse des conséquences et leurs effets floues	132
5.5.1 Modélisation des effets de boule de feu floue.....	134
5.5.2 Modélisation des effets de surpression floue	137
5.6. Estimation de risque individuel floue	139
5.7. Evaluation de risque	139
5.8. Conclusion	140

5.1 Introduction

Dans le cadre d'analyse des risques et particulièrement durant l'application des méthodes de sûreté de fonctionnement, qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives dans les secteurs industriels, de nombreux problèmes sont rencontrés, citons le problème de l'indisponibilité de données liées aux différents éléments et paramètres d'évaluation des risques.

Bien que ces données soient établies par des experts avec leurs jugements pertinents et fournies aussi par des banques de données spécialisées, une inévitable subjectivité et incertitude dans l'évaluation des différents paramètres des scénarios d'accidents reste à connaître. Toujours dans le domaine d'analyse des risques, les descriptions linguistiques utilisées pour évaluer la gravité des conséquences voire les risques vagues par essence et fournies par des experts, sont aussi un autre exemple de données difficilement analysables de façon ordinaire et classique. Pour ces raisons et d'autres il apparaît intéressant de faire appel à des modèles de représentation sous forme d'ensembles flous et possibilistes. Ceci pour une bonne prise en compte de ces problèmes.

Ce chapitre est consacré à l'application de la méthode QRA floue au niveau de la zone industrielle In Amenas plus précisément le bac de stockage GPL On-Spec 05-V-411A.

5.2 Collecte des informations pertinentes

5.2.1 Situation géographique : La zone du contrat de partage de production (Production Sharing Contract – PSC) d'In Amenas est située dans le sud-est de l'Algérie, dans le bassin d'Illizi, à environ 500 km de Hassi-Messaoud et à 40 kilomètres (km) au sud-ouest de la ville d'In Amenas. La zone du contrat, telle qu'illustrée dans la **Figure 5.1**, comprend les quatre champs suivants avec leurs découvertes d'hydrocarbures prouvées :

- Tigentourine (~ 2 581 km²) ;
- Hassi Farida (~ 243 km²) ;
- Ouan Taredert (~ 149 km²) ; et
- Hassi Ouan Abecheu (~ 121 km²).

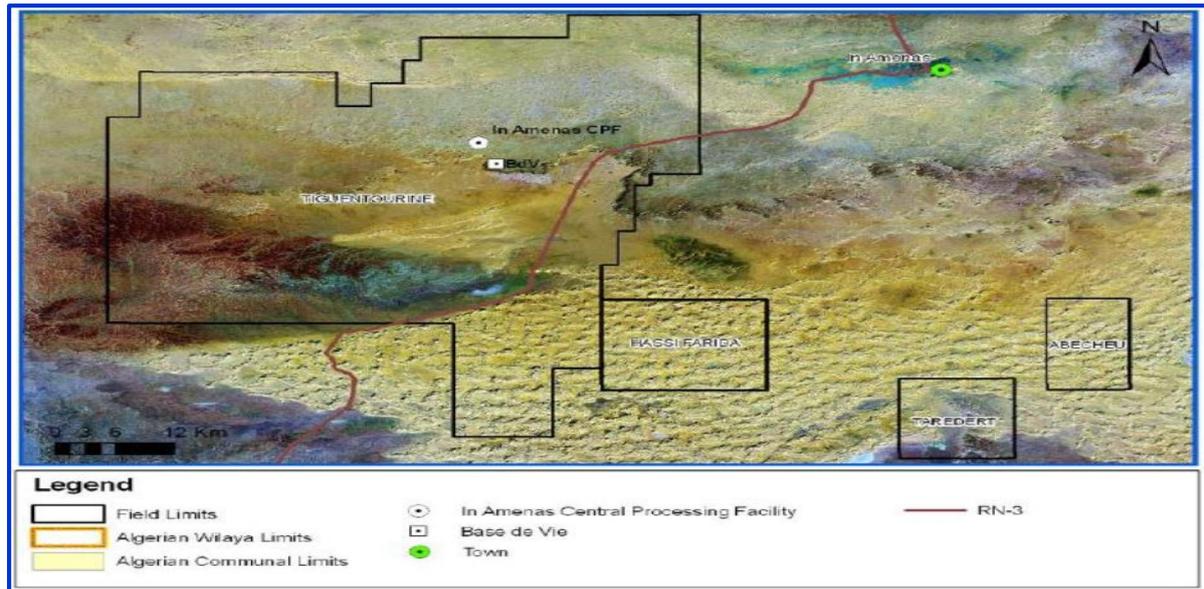


Figure 5.1 : Emplacements sur le champ d'In Amenas

In Amenas est le plus grand développement de champ de gaz humide en Algérie, conçu pour produire une moyenne annuelle de 28,2 millions de m³ standard/jour de gaz brut.

Le champ d'application du développement initial, qui fut achevé en 2006, comprenait dix (10) puits de production, un système de collecte de la production, une installation centrale de traitement (Central Processing Facility - CPF), trois canalisations d'évacuation de produit et toutes les infrastructures de développement y afférentes [CH2MHILL., 2009].

Le système de collecte de la production consiste en un réseau de lignes d'écoulement de puits individuelles reliées par des manifolds de champ à cinq canalisations régionales principales existantes, conçues pour transporter des fluides de puits à phases multiples vers l'installation centrale de traitement qui est située sur la falaise de Tiguentourine, au nord de la zone de développement. Depuis 2006, un programme de forage de développement continu a été lancé pour soutenir le débit de production potentiel à son niveau initial et les infrastructures du système de collecte ont été étendues pour relier les nouveaux puits aux manifolds de champ.

De plus, le projet de compression d'admission a été proposé pour renforcer la capacité de compression existante pour les installations d'In-Amenas, afin de maintenir le plateau de production dans le temps. La capacité du projet de compression d'admission permettra obligatoirement, au minimum, de maintenir la capacité totale de la CPF au débit plateau de 29,86 millions de m³/jour d'alimentation en gaz humide à une pression d'admission au train de gaz de 72 barg avec une pression de réservoir en épuisement.

L'installation d'une compression d'admission à l'installation centrale de traitement permettra de réduire la pression de service du système de collecte, réduisant ainsi la contre-pression aux puits reliés et augmentant la production provenant du stock des puits producteurs. Il n'est pas réalisable de réduire la pression de service à l'admission du train de gaz pour améliorer la performance des puits, car le système de turbo-détendeur cryogénique utilisé pour traiter le gaz exige une baisse de pression minimum, pour obtenir les spécifications du produit gazeux requises (point de rosée du gaz et pouvoir calorifique supérieur). La **Figure 5.2** détaille la CPF d'In Amenas existante et l'emplacement envisagé pour les installations de compression.

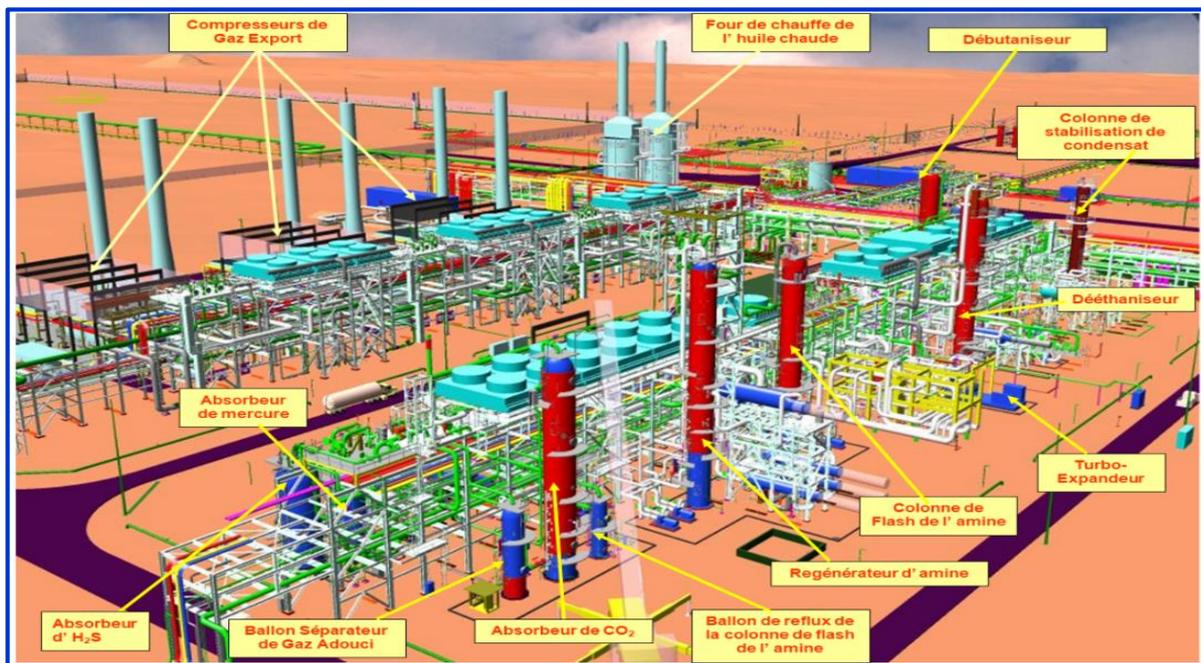


Figure 5.2 : L'installation centrale de traitement (CPF)

Le développement des champs de Hassi Farida, Ouan Taredert et Hassi Ouan Abecheu fait partie du plan de développement actuel et fournit un moyen supplémentaire d'augmenter la récupération des réserves à partir de la zone contractée d'In Amenas et de prolonger la période de production plateau. Il faut noter que, à cause des réservoirs ayant une pression moindre, l'exploitation des champs satellites est liée au projet de compression d'admission. C'est pourquoi la conception et la définition des installations de compression d'admission tiendront compte de l'impact produit par l'introduction de la production des champs satellites dans la production du champ principal. Cela évitera la nécessité d'installations de compression supplémentaires dans le cadre du développement de tout champ satellite

5.2.2 Données Météorologiques : Les installations et les équipements du projet In-

Amenas Gas sont conçus pour les conditions suivantes de l'environnement.

Facteurs	Conditions
Température (max/min)	45 °C / 0 °C
Humidité (max / min)	60% / 20 %
Moyenne annuelle de pluviométrie	110 mm
Vitesse du vent	5 m/s
Vent dominats	Nord-ouest
Elévation	600 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer
Température du sol (max/min)	25 °C / 15 °C

Tableau 5.1 : Données Météorologiques d'In Amenas [CH2MHILL., 2009].

5.2.3 Données techniques sur le processus ou le système analysé : Bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A **Figures 5.3et 5.4** est de ballon sous pression cylindriques avec un diamètre ID de 3700 mm et la longueur entre les tangentes de 20800 mm Le GPL est stocké dans le bac à la pression 16.3 barg et à la température de 60°C jusqu'à 91°C.

Il y a quatre bacs de stockage de GPL On-Spec disposées dans deux paires parallèles. Chaque paire est conçue pour fonctionner comme unité simple, partageant les canalisations d'entrée communes et de sortie et la canalisation d'équilibrage de vapeur pour relier l'espace de vapeur de chaque bac. L'espace de vapeur de chaque paire de bac est assuré avec le gaz couvrant à partir du gaz de carburant et envoyé la surpression d'évent au collecteur d'évent MP.

Le liquide recyclé des pompes booster GPL de pipeline et Les pompes GPL principales de pipeline s'écoule dans la ligne d'aborder de GPL On-Spec. D'amont des paires de bullet de stockage.

Le GPL traité plus n'importe recyclage s'écoule vers le stockage bac 05-V-411A/B à travers la vanne d'arrêt d'aspiration 05-SDV-4100 et le Bac de stockage 05-V-411C/D à travers la vanne d'arrêt d'aspiration 05-SDV-4120.

Le GPL entre dans les balles de stockage par une section d'admission monté en haut et un tuyau interne incliné d'immersion pour empêcher la perturbation de la surface de liquide. La perturbation de la surface liquide peut causer le flashing de GPL, ayant pour résultat d'échapper à la torche et produit excessif sera perdu. Le gaz de couverture est alimenté la ligne d'équilibrage de vapeur 05-V-411A/B à travers la vanne de commande de pression 05-PV-4105B.

5 Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel

Le même branchement à la ligne d'équilibrage est également utilisé pour envoyer le gaz découverte au collecteur d'évent MP à travers la vanne de contrôle de pression 05-PV-4105A. Les vannes doubles sont fournies dans la ligne commune alimentation/évent de gaz de couverture pour permettre Bac d'être préparé pour la maintenance. Similairement, le gaz de couverture est alimenté à 05-V-411C/D à travers 05-PV-4125B et envoyé au collecteur d'évent à travers 05-PV-4125A.

Les vannes d'isolation double de maintenance sont également fournies sur le côté amont de 05-PV-4105B/4125B. Le produit GPL sort de bac de stockage 05-V-411A/B à travers la vanne d'arrêt de refoulement 05-SDV-4109 et sort de Bullet de stockage 05-V-411C/D à travers la vanne d'arrêt 05-SDV-4129 vers la ligne commune qui forme le collecteur d'aspiration passent aux pompes booster de pipeline 5-P-413A/B.

Les assemblages des branchements au système de prélèvement sont fournis en de chaque paire de bac pour permettre les prélèvements d'être collectés pour les analyses lorsque seront exigés.

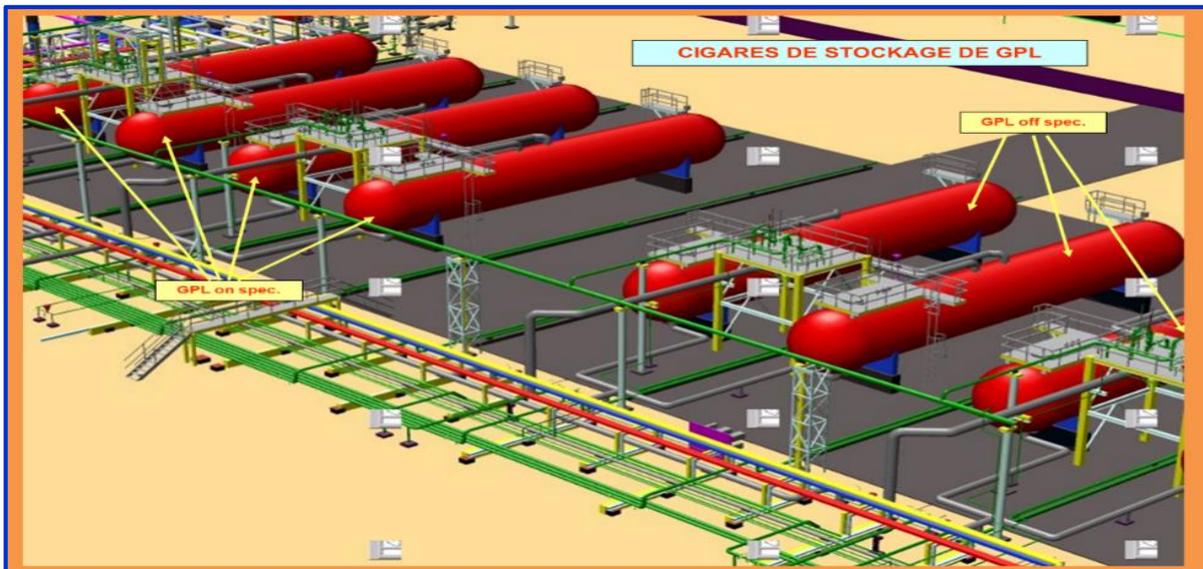


Figure 5.3 : les bacs de stockage GPL

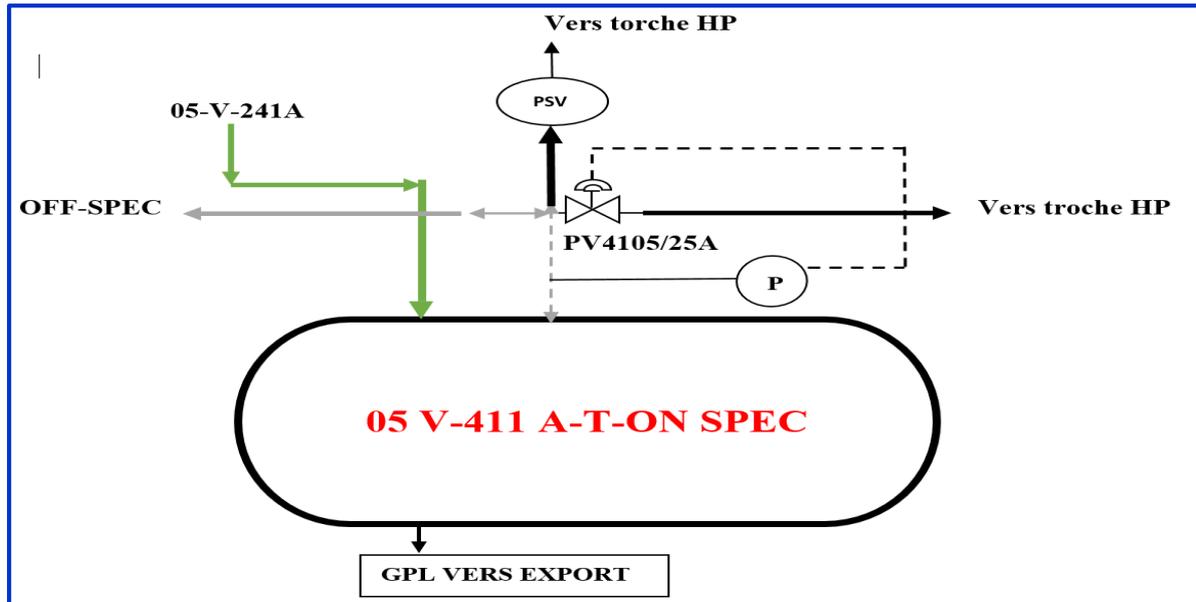


Figure 5.4 : Bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A

caractéristiques	Valeurs
substance	GPL
type	Ballon cylindrique horizontal sous pression
taille	3700 mm ID x 20800 mm T/T (250 m ³)
Conditions Design	21.0 bar; 130°C / -29°C
Capacité	Each bullet 250 m ³
Matériels	Acier au carbone calaminé
Pression de service	16.3bar
Température de service	60°C – 91°C

Tableau 5.2 : Caractéristiques du Bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A/B/C/D

5.2.4 Données physico-chimiques des produits : Le produit étudié dans notre système comme il est décrit précédemment est le GPL. Ce dernier est un mélange majoritairement composé de propane. Cet élément a été choisi pour se rapprocher davantage des propriétés physico-chimiques, inflammables et toxicologiques du mélange représenté. L'ensemble des propriétés de cette substance dangereuse est repris le **Tableau 5.3**.

Caractéristique	GPL (Propane)
Formule chimique	C ₃ H ₈
Point d'ébullition à 1013 mbar	-42 °C
Masse volumique du liquide à 15°C	515(kg/m ³)
Masse volumique du gaz à 15°C et 1013 mbar	1.87 (kg/m ³)
Densité par rapport à l'air	1.56
Tension de vapeur relative à 15°C et 1013 mbar	7(bar)
Limite inférieure d'inflammabilité	2.4(%)

Limite supérieure d'inflammabilité	9.3(%)
Pouvoir calorifique supérieur à 15°C et 1013 mbar	49.8 (MJ/Kg) ou 13.8 (KWh/kg)
Pouvoir calorifique inférieure à 15°C et 1013 mbar	46.0 (MJ/Kg) ou 12.78 (KWh/kg)
Vitesse de propagation de la flamme	32(cm/s)

Tableau 5.3 : Caractéristique physico-chimiques de propane

5.3 IDENTIFICATION DES SCÉNARIOS D'ACCIDENTS

L'intérêt de l'application de la méthode HAZOP [IEC 61882., 2001] est qu'elle fournit une étude de base permettant de recenser les différentes causes et conséquences des scénarios d'accidents. Elle permet aussi d'envisager les différentes barrières de sécurité pouvant empêcher ces accidents. Toutes ces informations seront utilisées dans l'Arber des événements. Le **Tableau 5.4** de HAZOP montre les différentes causes, conséquences et barrières de sécurité existantes au niveau du bac de stockage. Dans ce tableau ne figurent que les déviations jugées inacceptables, en l'occurrence « pression » et qui peuvent engendrer des conséquences graves et catastrophiques telles que BLEVE, VCE, l'endommagement de système et la mort des personnes.

Nœud ou équipement : bac de Stockage GPL On-Spec 05-V-411A						
N° de dessin (PID) :						
Paramètre	Mot-guide	Déviaton	Causes possibles	Conséquences	Sécurités existante	Recommandations
Pression	Plus de	Haute pression	Augmentation excessive de niveau et mauvaise opération de contrôleurs 05-PIC-4105A	Haute pression du bac 05-V-411A Fireball/ VCE possible Dompage possible des équipements	Alarme haute pression PRAH-4105 Operateurs Soupape de sécurité PSV-4106	Procédure à l'installation des détecteurs de flamme dans la Zone du V -411A avec un système de déluge automatique pour limiter les conséquences
			Feu externe au niveau du V-411A	Supression excessive au niveau du V-411A Fireball/ VCE possible Dompage possible des équipements	Soupape de sécurité PSV-4106	
	Moins	Basse pression	Mauvais fonctionnement de la vanne PIC 4105A(ouvert)	Plus de s'échappe de V-411A verts torche HP Basse pression au niveau de V-411A	Indicateur	

Tableau 5.4 : Application la Méthode HAZOP : Cas du paramètre de pression

5.4 ANALYSE DES FRÉQUENCES FLOUES

L'incertitude des fréquences d'événements indésirables, des probabilités de défaillances des barrières ou d'ignition, et les conditions climatiques (température, humidité) ou physique (la masse de produit chimique) sont représentées par la prise en compte de nombres flous (Voire le **Tableau 5.5, Figure 5.5**). Les intervalles de confiance fournis par des experts ou tirés de bases de données et de la littérature [**CCPS., 1989 ; OREDA., 2002 ; INERIS DRA-41., 2004**] sont convertis en nombres flous en calculant la valeur moyenne quadratique des limites de l'intervalle. Les fonctions d'appartenance triangulaire sont choisies car elles permettent de calculer simplement des résultats de fréquence flous.

Le tableau montre la fréquence des événements déclencheurs et les PFD flous via une représentation paramétrique. Les paramètres a, b et m sont la limite inférieure, la limite supérieure et la valeur modale du nombre flou respectivement. Lorsque la probabilité de défaillance est unique en tant que cas de PFD₁ et de probabilité d'inflammation, elle peut être considérée comme un nombre singulier flou avec a = b = m.

Paramètres flous	a	m	b
Mauvaise opération de contrôleurs 05-PIC-4105A (year⁻¹)	1.00E - 2	3.16E - 1	1.00E - 1
Feu externe au niveau du V-411A (year⁻¹)	1.00E - 3	1.00E - 2	1.00E - 1
Alarme et réponse de l'opérateur à l'alarme PRAH-4105 ($\overline{\text{PFD}}_1$)	1.09E - 1	1.09E - 1	1.09E - 1
Soupape de sécurité PSV-4106 ($\overline{\text{PFD}}_2$)	1.00E - 3	1.00E - 2	1.00E - 1
Ignition immédiate	7.00E - 1	7.00E - 1	7.00E - 1
Ignition différée	9.00E - 1	9.00E - 1	9.00E - 1
Température (K)	273	300	315
Humidité relative (%)	20	40	60
La masse (kg)	40234	64375	80468

Tableau 5.5 : Probabilité de défaillance de la barrière et probabilité d'allumage

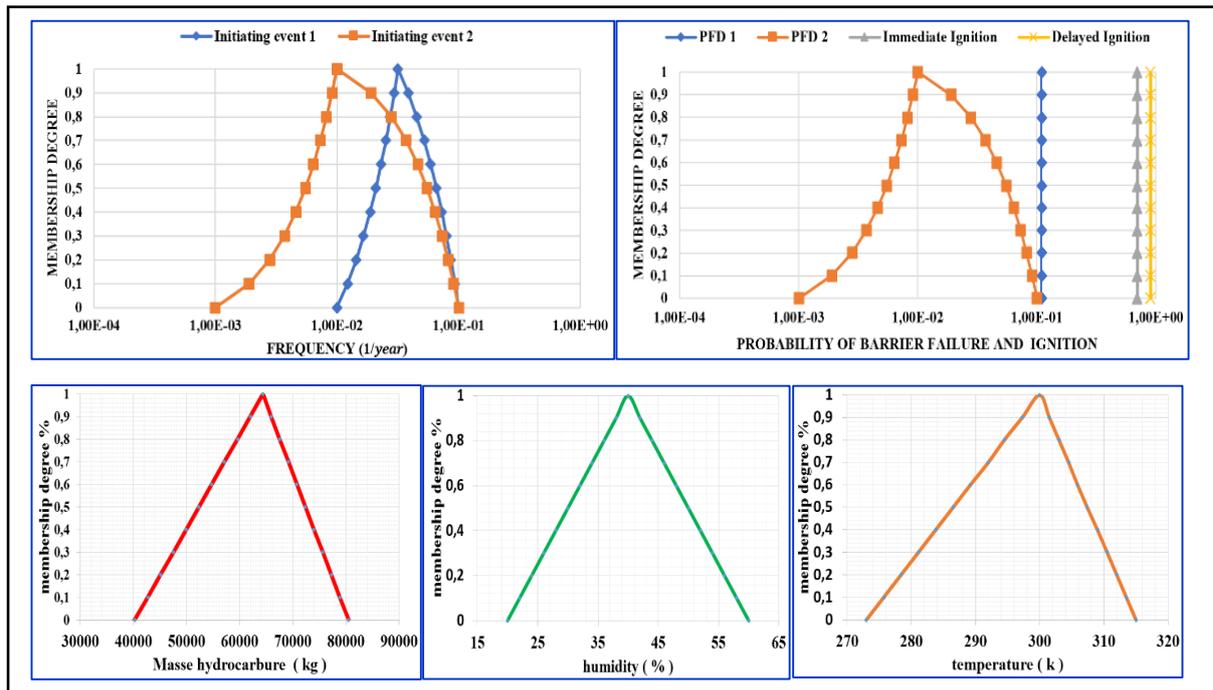


Figure 5.5 : Paramètres flous de QRA

Les scénarios d'accident sont présentés dans les Figures 5.6 et 5.7 :

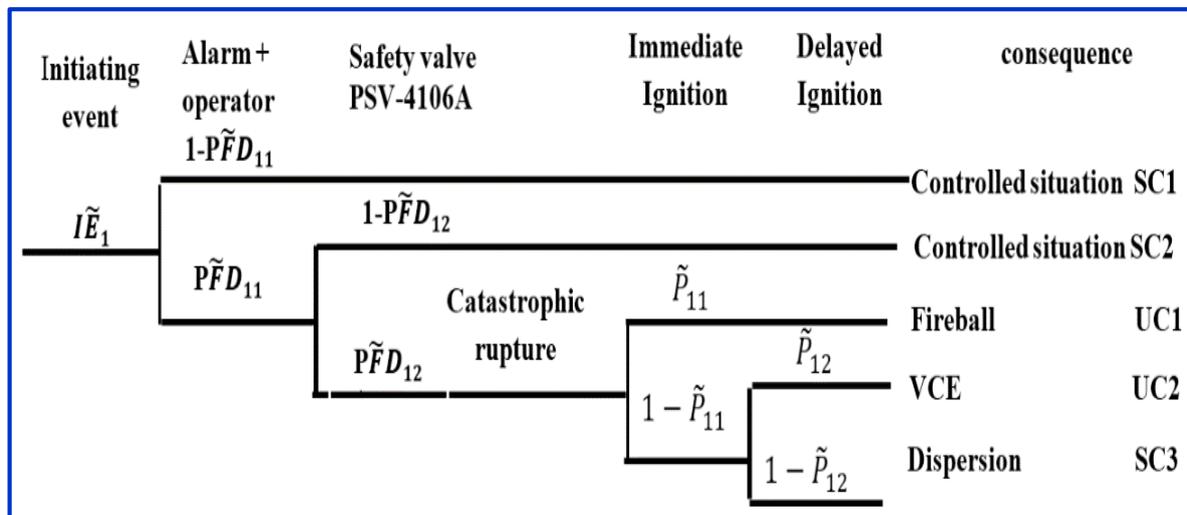


Figure 5.6 : Arbre d'événement de scénario d'accident (1)

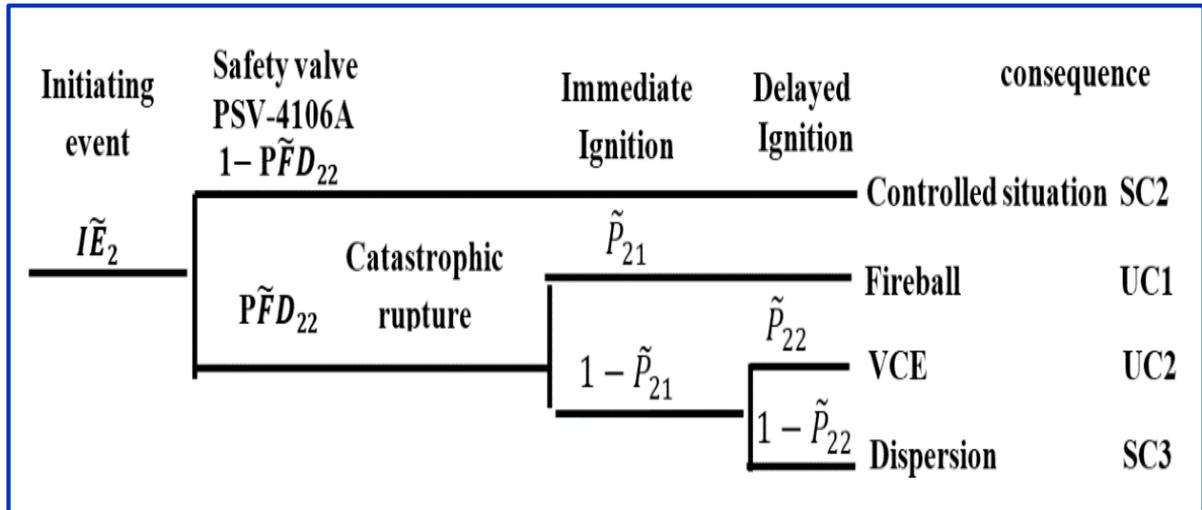


Figure 5.7 : Arbre d'événement de scénario d'accident (2)

Intervalle de confiance de la fréquence de la conséquence de chaque scénario est obtenu à l'aide des équations (4.34) du chapitre (4), en multipliant respectivement les bornes inférieure et supérieures des α -cuts des nombres flous des paramètres d'entrée (IE, PFD et ignition). Pour les scénarios d'accident ayant les mêmes conséquences, leur fréquence totale est estimée en additionnant les fréquences de chaque scénario. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la Figure 5.8 et Tableau 5.6).

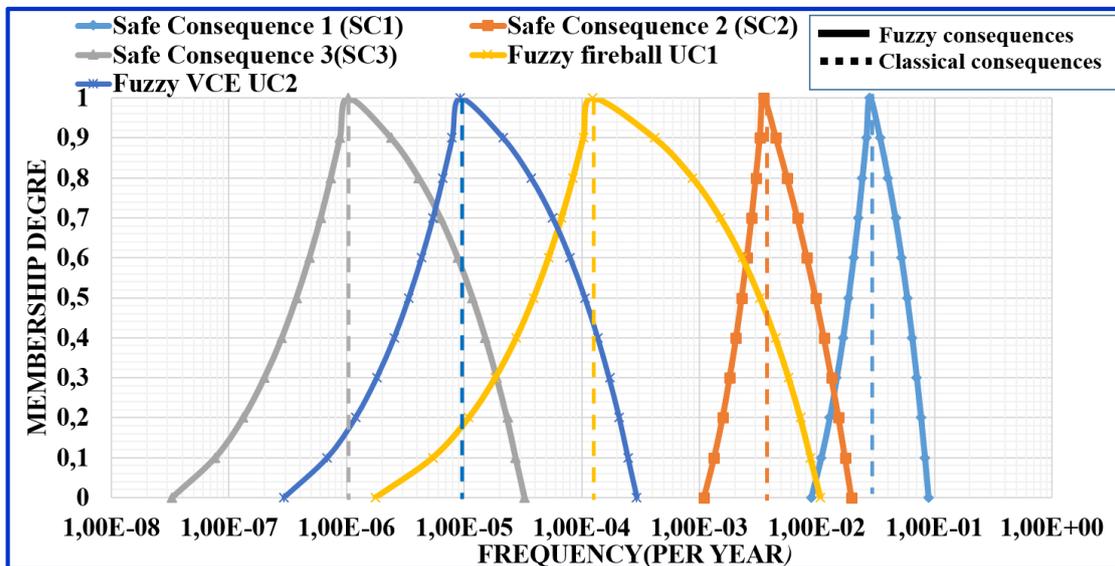


Figure 5.8 : Fréquence floue des conséquences des scénarios d'accident

α	SC1		SC2		SC3		UC1		UC2	
0.0	8.91E-03	8.91E-02	1.09E-03	1.98E-02	3.27E-08	3.27E-05	1.76E-06	1.08E-02	2.94E-07	2.94E-04
0.1	1.09E-02	8.30E-02	1.33E-03	1.74E-02	7.63E-08	2.74E-05	5.41E-06	8.84E-03	6.86E-07	2.47E-04
0.2	1.28E-02	7.69E-02	1.57E-03	1.54E-02	1.32E-07	2.31E-05	1.10E-05	7.26E-03	1.19E-06	2.08E-04
0.3	1.47E-02	7.08E-02	1.81E-03	1.33E-02	2.00E-07	1.89E-05	1.84E-05	5.76E-03	1.80E-06	1.70E-04
0.4	1.67E-02	6.47E-02	2.05E-03	1.15E-02	2.82E-07	1.52E-05	2.78E-05	4.44E-03	2.54E-06	1.37E-04
0.5	1.85E-02	5.85E-02	2.29E-03	9.79E-03	3.75E-07	1.18E-05	3.91E-05	3.30E-03	3.37E-06	1.06E-04

5 Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel

0.6	2.05E-02	5.25E-02	2.53E-03	8.24E-03	4.82E-07	8.84E-06	5.23E-05	2.32E-03	4.34E-06	7.96E-05
0.7	2.25E-02	4.64E-02	2.78E-03	6.84E-03	6.03E-07	6.29E-06	6.74E-05	1.51E-03	5.42E-06	5.66E-05
0.8	2.43E-02	4.03E-02	3.02E-03	5.57E-03	7.33E-07	4.13E-06	8.44E-05	8.78E-04	6.60E-06	3.71E-05
0.9	2.63E-02	3.44E-02	3.27E-03	4.49E-03	8.79E-07	2.39E-06	1.03E-04	4.15E-04	7.91E-06	2.15E-05
1.0	2.82E-02	2.82E-02	3.51E-03	3.51E-03	1.03E-06	1.03E-06	1.24E-04	1.24E-04	9.30E-06	9.30E-06

Tableau 5.6 : Niveaux α des intervalles des fréquences floues

5.5 ANALYSE DES CONSÉQUENCES ET LEURS EFFETS FLOUS

La détermination de probabilité de fatalité floue de l'effet thermique (Fireball) et de surpression (VCE) sont faite selon la méthodologie décrite aux chapitres 3 et 4 (**équations 3.4 et 4.37**), il peut être représenté comme suit :

$$\tilde{P}_{Fi} = 50 \times \left[1 + \frac{\tilde{Y}-5}{|\tilde{Y}-5|} \times \operatorname{erf} \left(\frac{|\tilde{Y}-5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (5.1)$$

Pour la variable probit floue \tilde{Y} sont basées sur une variable causale \tilde{v} (représentant la dose floue), et au moins deux constantes (**équation 5.2**):

$$\tilde{Y} = K1 + k2 \times \ln(\tilde{v}) \quad (5.2)$$

Sur la base de dernière **Equation (5.2)** et **Tableau 3.4** situés dans chapitre 3, l'équation probit pour les effets létaux prend différentes formes, comme le montre le **Tableau 5.7** qui présente diverses équations probit floue pour différents types d'exposition.

Les effets	Dose floue	Probit floue
Brûlure au 1er degré		$\tilde{Y} = -39.83 + 3.02 \times \ln(\tilde{Q})$
Brûlure au 2e degré	$\tilde{Q} = (\tilde{t}_p \times \tilde{I}^{4/3})$	$\tilde{Y} = -43.14 + 3.02 \times \ln(\tilde{Q})$
Décès		$\tilde{Y} = -36.38 + 2.56 \times \ln(\tilde{Q})$
Rupture du tympan	$\tilde{s} = \tilde{p}_s$	$\tilde{Y} = +5.00 - 5.750 \times \ln(\tilde{S})$
	$\tilde{s} = \frac{4.2}{P_{bar}} + \frac{1.3}{I_{bar}}$	
Dommmages aux poumons	$\tilde{P}_{bar} = \frac{\tilde{p}_s}{P_a}, \tilde{I}_{bar} = \frac{\tilde{I}_s}{m^{1/3} \times \sqrt{P_a}}$	$\tilde{Y} = +5.00 - 5.750 \times \ln(\tilde{S})$
Impact du déplacement du corps entier	$\tilde{s} = \frac{7.38 \times 10^3}{\tilde{p}_s} + \frac{1.3 \times 10^9}{\tilde{p}_s \times \tilde{I}_s}$	$\tilde{Y} = +5.00 - 2.440 \times \ln(\tilde{S})$
Impact sur la tête	$\tilde{s} = \frac{2.43 \times 10^3}{\tilde{p}_s} + \frac{4 \times 10^8}{\tilde{p}_s \times \tilde{I}_s}$	$\tilde{Y} = +5.00 - 8.490 \times \ln(\tilde{S})$

Tableau 5.7 : Les différentes équations probit et leurs doses en termes flou

5.5.1 Modélisation des effets de boule de feu : Plusieurs méthodes de modélisation des boules de feu peuvent être trouvées dans la littérature (DNV., 2018), y compris celles proposées dans chapitre 2 pour déterminer le rayonnement thermique reçu par la personne. En utilisant les équations des **Tableaux 5.7 et 5.8**, l'équation (5.1) et les équations (4.35, 4.36 et 4.37) du chapitre 4 et en utilisant le programme Matlab. Nous déterminons la distance floue du bruleur de probabilité a 100% de boule de feu qui peut se produire sur le réservoir de stockage de GPL. Les résultats des calculs sont illustrés dans les **Figure 5.9. 5.10 et Tableau5.9**.

Modèle	\tilde{H}_p [m]	\tilde{t}_p [s]	\tilde{r}_p [m]	\tilde{F}_{21}	$\tilde{\tau}_a$	\tilde{E} [kW/m ²]	\tilde{I} [kW/m ²]
Process hazard analysis software tool (TNO Model)	$2 \times \tilde{r}_p$	$0.852 \times \tilde{M}^{0.26} 3.24 \times \tilde{M}^{0.32}$	$\left(\frac{\tilde{r}_p}{\tilde{L}}\right)^2, \tilde{L} = \sqrt{(\tilde{r}_p^2 + x^2)}$	*	$\tilde{E} = \frac{f_s \times \tilde{M} \times \Delta H_c}{4\pi \times \tilde{r}_b \times \tilde{r}_b^2}$	$\tilde{E} \times \tilde{F}_{21} \times \tilde{\tau}_a$	
					$f_s = 0.27 \left(\frac{P_{Sat}}{10^6}\right)$		

Note: $*\tilde{\tau}_a = 1.006 - 0.01171 \times \log_{10}(X(\tilde{H}_{20})) - 0.02368 \times \log_{10}(X(\tilde{H}_{20}))^2 - 0.03188 \times \log_{10}(X(\tilde{CO}_2)) + 0.001164 \times \log_{10}(X(\tilde{CO}_2))^2$ (Wayne,

$$\tilde{x} = x - \tilde{r}_p$$

$$X(\tilde{H}_{20}) = \frac{(2.165 \times \tilde{P}_w \times \tilde{x})}{\tilde{r}_a} \quad (1991)$$

$$X(\tilde{CO}_2) = \frac{(273 \times \tilde{x})}{\tilde{r}_a}$$

$$\tilde{P}_w = 99.89 \times \tilde{R}\tilde{H} \times \exp\left(21.66 - \frac{5431.3}{\tilde{r}_a}\right)$$

Tableau 5.8 : Intensité thermique floue reçue par la personne

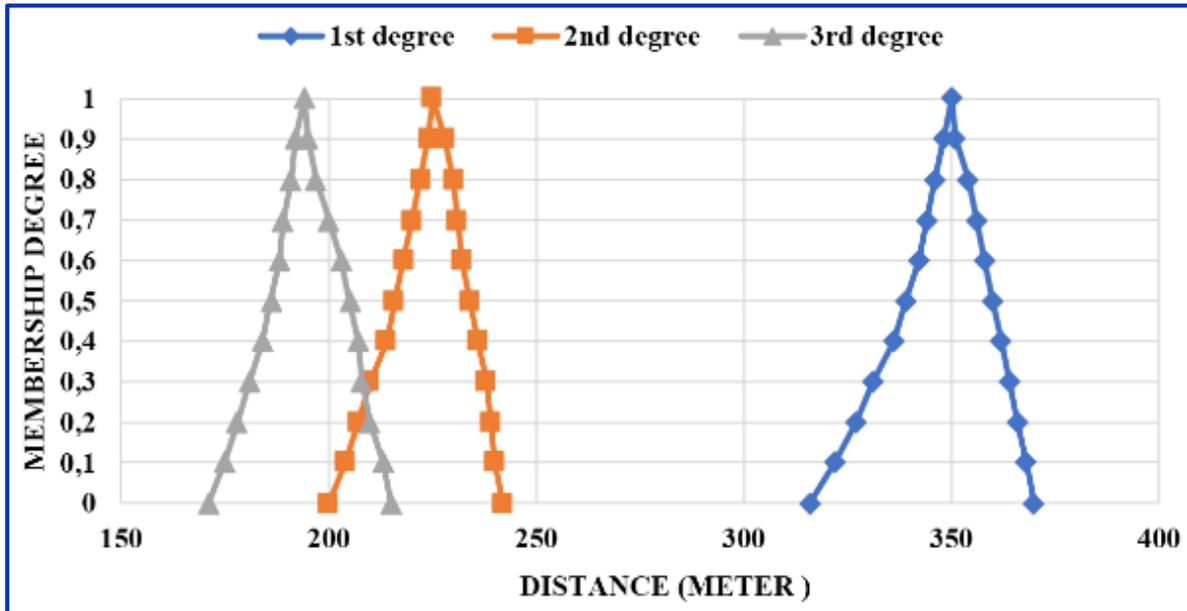


Figure 5.9 : Distance floue de probabilité du brûleur 100% par l'effet thermique

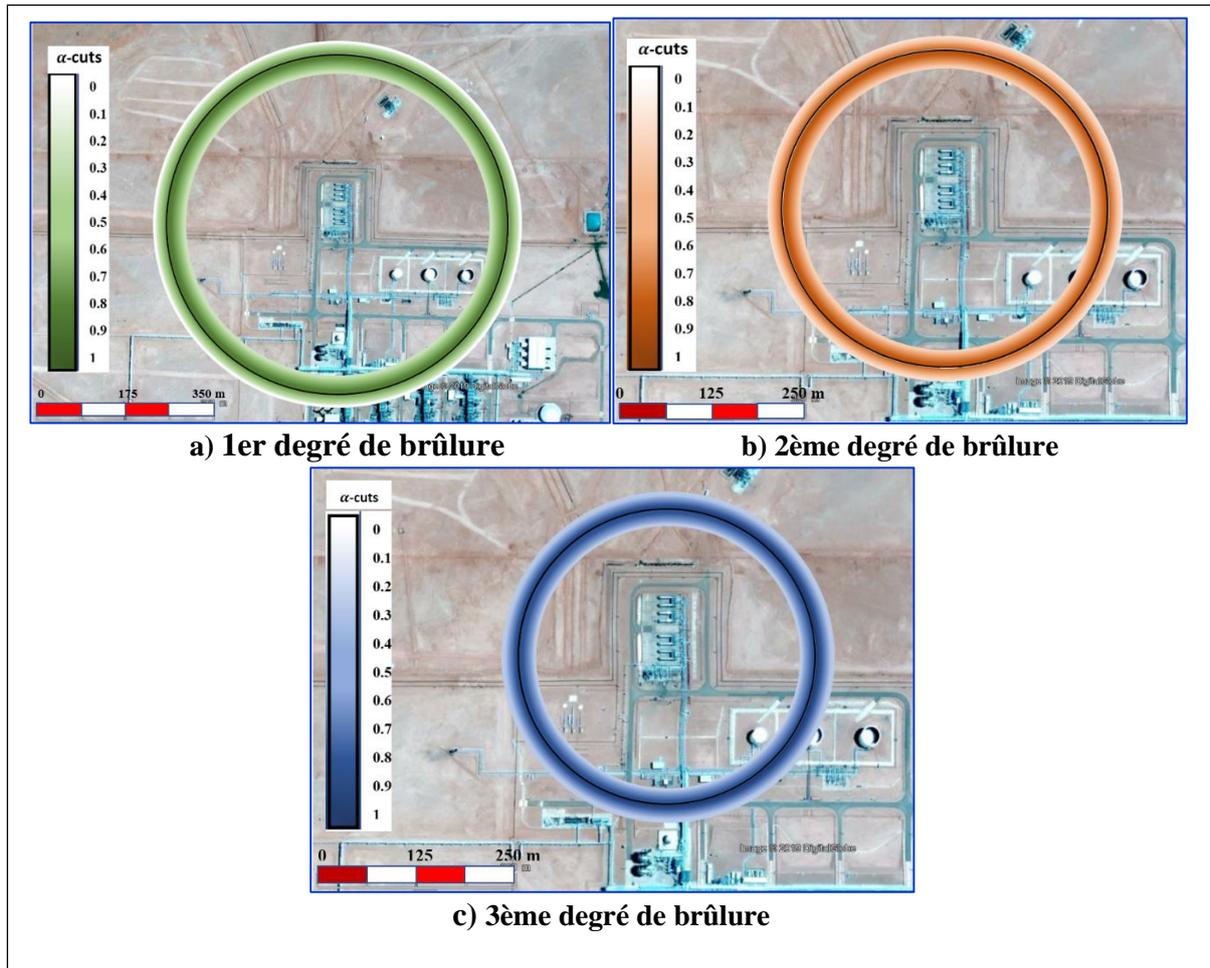


Figure 5.10 : Contour de distance floue de probabilité de brûleur 100% par l'effet thermique

α -level	3ème degré de brûlure (m)	2ème degré de brûlure (m)	1er degré de brûlure (m)
0.0	316	215	200
0.1	322	213	204
0.2	327	210	207
0.3	331	208	210
0.4	336	207	214
0.5	339	205	216
0.6	342	203	218
0.7	344	200	220
0.8	346	197	222
0.9	348	195	224
1.0	350	194	225

Tableau. 5.9 : α -cutede distance floue de probabilité de brûleur 100% par l'effet thermique (Fireball)

5.5.2 Estimation des effets de surpression floue : A partir de méthode TNO Multi-énergies, nous pouvons modéliser les effets de la surpression. L'indice de la violence choisie est de l'ordre de 10. Cependant, cet indice permet de prendre en compte un phénomène de détonation et de propagation des ondes de choc. Sur la base des abaques du chapitre 2, **Tableau 5.7, Equation (5.1)** et les **Equations (4.35, 4.36 et 4.37)** du chapitre 4, nous déterminons la distance floue de probabilité de décès par la surpression qui peut se produire sur le réservoir de stockage lpg on-spec 05-v-411a. Les résultats des calculs sont illustrés dans les **Figure 5.11, 5.12 et Tableau 5.10**.

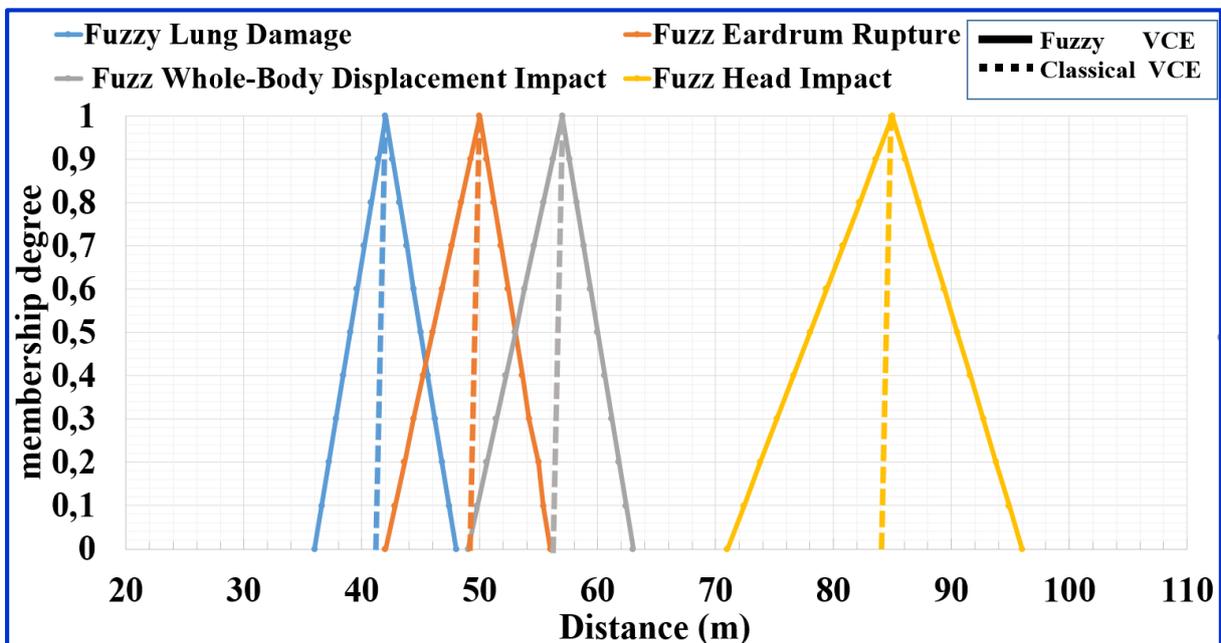


Figure 5.11 : Distance floue de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE

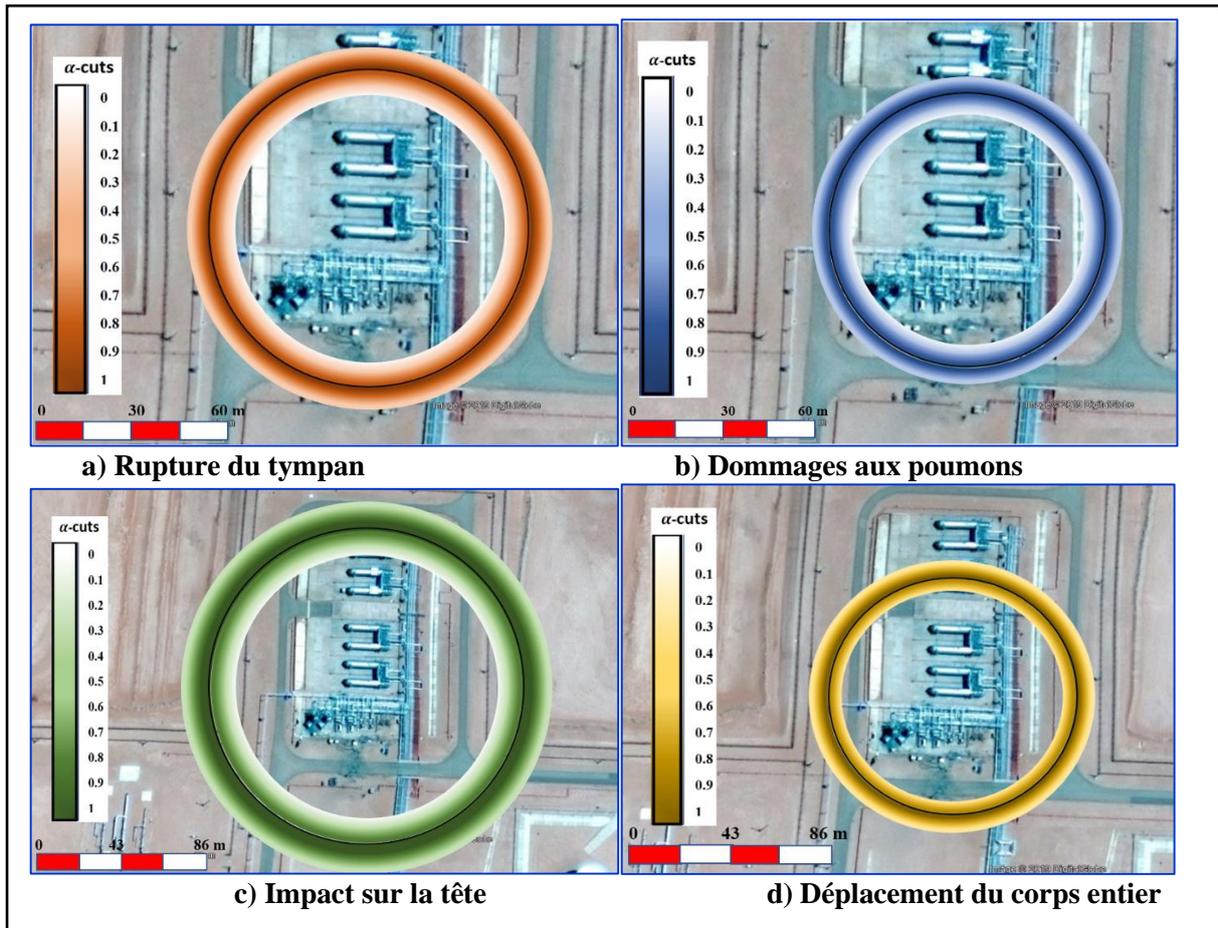


Figure 5.12 : Contour flou de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE

α -level	Dommages aux poumons	Rupture du tympan	Déplacement du corps entier	Impact sur la tête
0.0	36	215	42	242
0.1	36.6	213	42.8	240
0.2	37.2	210	43.6	239
0.3	37.8	208	44.4	238
0.4	38.4	207	45.2	236
0.5	39	205	46	234
0.6	39.6	203	46.8	232
0.7	40.2	200	47.6	231
0.8	40.8	197	48.4	230
0.9	41.4	195	49.2	228
1.0	42	194	50	225

Tableau. 5.10 : α -niveau de distance flou de probabilité de mortalité 100% par effet de surpression VCE

5.6 Estimation de risque individuel floue

En se basant sur les résultants issus des modèles d'évaluation de fréquence de la conséquence (Figure 5.8) et de l'effet des conséquences des scénarios Fireball et VCE (Figures 5.9 et 5.11), et au moyen des Equations (4.38 et 4.39) du chapitre (4), nous procédons au calcul de risque individuel flou totale. Les résultants de ces calculs sont représentés graphiquement par la Figure 5.13 et Tableau 5.11.

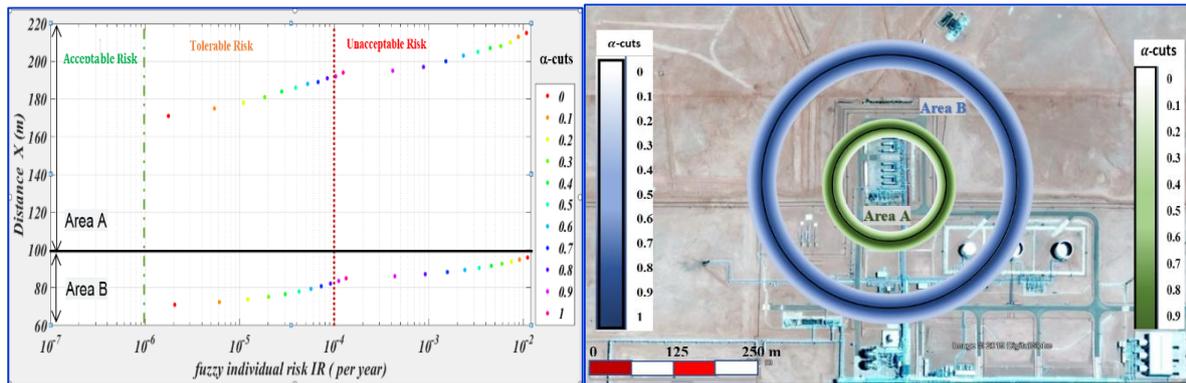


Figure 5.13 : Courbes et contours de risque individuel flou totale

α -cut	UC2+UC2		Distance (m)		UC1		Distance (m)	
0.0	2.06E-06	1.11E-02	71	96	1.76E-06	1.08E-02	171	215
0.1	6.09E-06	9.09E-03	72.4	94.9	5.41E-06	8.84E-03	175	213
0.2	1.21E-05	7.46E-03	73.8	93.8	1.1E-05	7.26E-03	178	210
0.3	2.02E-05	5.94E-03	75.2	92.7	1.84E-05	5.76E-03	181	208
0.4	3.03E-05	4.58E-03	76.6	91.6	2.78E-05	4.44E-03	184	207
0.5	4.24E-05	3.40E-03	78	90.5	3.91E-05	3.30E-03	186	205
0.6	5.66E-05	2.40E-03	79.4	89.4	5.23E-05	2.32E-03	188	203
0.7	7.28E-05	1.57E-03	80.8	88.3	6.74E-05	1.51E-03	189	200
0.8	9.1E-05	9.15E-04	82.2	87.2	8.44E-05	8.78E-04	191	197
0.9	1.11E-04	4.36E-04	83.6	86.1	1.03E-04	4.15E-04	192	195
1.0	1.33E-04	1.33E-04	85	85	1.24E-04	1.24E-04	194	194

Tableau 5.11 : α -niveaude risque individuel flou totale

5.7 Evaluation de risque

Sur la base des critères d'acceptabilité de risque HSE du Royaume-Uni Figure 3.18 du chapitre 3 [HSE., 1992], le risque individuel auquel les opérateurs sont exposés :

- $IR < 10^{-6}$ Risque est acceptable ;
- $10^{-6} < IR < 10^{-4}$ Risque est tolérable ; et
- $IR > 10^{-4}$ Risque est inacceptable.

Nous pouvons bien constater que IR issue d'une QRA classique (valeur unique ; $\alpha = 1$) la **Figure 5.13** montre clairement que IR auquel les opérateurs sont exposés ($1.33E - 4Y^{-1}$ et $1.24E - 4Y^{-1}$) qui correspondent les régions A et B est jugé inacceptable. Cependant, pour les risques individuels flous, vous évalueriez comme suit :

- IR est tolérable si $\alpha = [0(\text{inférieur}) ; 0.8(\text{inférieur})]$ qui correspondent la distance $x = 71 - 82.2$ la région A et $x = 171 - 191$ la région B ;
- IR est inacceptable Si $\alpha = [0.9(\text{inférieur}) ; 0(\text{supérieur})]$ qui correspondent la distance $x = 83.6 - 96$ la région A et $x = 195 - 215$ la région B.

5.8 Conclusion

De nos jours, les méthodes de calcul de l'intelligence artificielle (IA), telles que les systèmes à base de connaissances, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques et la logique floue, ont été de plus en plus appliquées à plusieurs recherches industrielles.

La théorie des ensembles flous traite des incertitudes liées aux informations des modèles mathématiques et a été développée et appliquée dans un certain nombre d'applications du monde réel.

Le modèle QRA flou basé sur des règles floues. Ses principaux avantages peuvent inclure les suivants :

- ❖ L'incertitude des fréquences d'événements indésirables, des PFD, et les conditions climatique ou physique sont représentées par la prise en compte de nombres flous ;
- ❖ Représenter graphiquement les distances floues de probabilité de fatalité ou de blessure par l'effet thermique et surpression ;
- ❖ Visualiser les contours de risque flous ;
- ❖ Réduire l'incertitude relative aux intervalles de confiance larges par des valeurs modales représentant le maximum de présomption ;
- ❖ Nous pouvons bien constater que IR issue d'une QRA classique (valeur unique ; $\alpha=1$) le risque est inacceptable. Cependant, pour les risques individuels flous le risque est inacceptable et tolérable selon la valeur d'alpha.

Développement d'un software permettant de calculer la probabilité de décès par effet de surpression et la classer les organes les plus sensibles, ainsi que traiter l'incertitude dans les informations relatives aux paramètres des scénarios d'accidents.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

Généralement, pour traiter les problèmes d'analyse des risques industriels, on fait appel aux approches d'analyses qualitatives des risques conventionnels. Ces derniers marquent des insuffisances aux problématiques des incertitudes. Désormais, avec la croissance technologique des installations algériennes existantes et émergentes, il est devenu important de renforcer la sécurité de ces installations en améliorant les méthodes d'analyse des risques tout en dénouant ce problème d'incertitudes. C'est pourquoi, le travail réalisé dans le cadre de cette thèse avait pour objectif de répondre à la problématique des incertitudes paramétriques relatives aux données utilisées le plus souvent par les approches d'analyse quantitatives des risques industriels, en particulier le QRA conventionnel. Cette dernière a été choisie pour servir de cadre méthodologique pour notre travail, vu qu'elle est qualifiée d'approche rigoureuse et largement utilisée dans les industries des procédés pétrochimiques. De plus, l'inconvénient que présentaient les méthodes utilisées en sûreté de fonctionnement et particulièrement la méthode QRA est celui d'imperfection des données et le manque de robustesse dans les résultats finaux (estimation subjective des fréquences et effet des conséquences des scénarios). Cette subjectivité résulte de plusieurs facteurs notamment, le nombre élevé de composants dans le système étudié, les connexions et les interactions structurelles et les dépendances de fonctionnement entre les composants y compris les conditions d'exploitation. De même, les facteurs physiques et environnements influencent l'état et le fonctionnement du système. Tous ces facteurs endoctrinent la crédibilité et la perfection des données d'analyse de sécurité. De ce fait, le recours au développement d'une approche floue d'évaluation des risques se justifie fortement. Ce qui nous incite à faire appel à des outils issus de la théorie des ensembles flous et de celle des possibilités.

Comme résultat du travail réalisé dans le cadre de cette thèse, on a :

A. Publications internationales:

1. Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2020). 'Abacus to determine the probability of death or glass breakage to the overpressure effect by two methods: TNT and TNO multi-energy'. U.P.B. Sci. Bull., series D, Vol.82, ISSN 1454-2358.
https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezcee_760885.pdf
2. Hellas, M., Chaib, R.&Verzea, I. (2019). 'Artificial intelligence treating the problem of uncertainty in quantitative risk analysis (QRA)'.*Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 18 No. 1, pp. 40-54. <https://doi.org/10.1108/JEDT-03-2019-0057>
3. Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2020). 'Modelling of accidental phenomena related to leakage and tank rupture of a vehicle converted to LPG'. *World Journal of Engineering*,

Conclusion Générale et Perspectives

- Hellas M.S, Chaib. R& Verzea I. (2018). 'Quantitative Risk Analysis Detailed Study of Thermal and Overpressure Risks Case Study'. RECENT J., Vol 19, n° 3; (56); 128-136. <https://doi.org/10.31926/RECENT.2018.56.128>.

B. Publications nationales:

- Hellas M.S& Chaib. R. (2020). 'Fuzzy LOPA for the evaluation of accident scenarios and risk reduction measures in supplier manner'. Algerian Journal of Signals and Systems, Vol. 5, Issue 1. pp: 10-17. http://ajss.univ-boumerdes.dz/files/Vol.5_issue1/paper2.pdf

C. Communications internationales:

- Hellas M. S& Chaib. R. (October 22-24, 2019). 'Modélisation des scénarios d'accidents potentiels en cas de fuite dans un réservoir de voiture converti au GPL'. Fifth International conference on energy, Materials, Applied Energetics and Pollution (ICMAEP'19). Constantine, Algérie. <https://www.scribd.com/document/410910327/1st-Call-for-Papers-icemaep2019>
- Hellas M.S & Chaib.R. (December 19-21, 2018). 'The overpressure effect determination of death probability using an abacus'. 4 th International Conference on Advances in Mecanical Engineering Istanbul 2018 (ICAME2018), Yildiz Technical University, Istanbul-Turkey. ISBN 978-605-9546-13-3. <http://icame2018conference.com/participants.php>
- Hellas M.S & Chaib.R. (December 19-21, 2018). 'Qualitative risk analysis: case of LPG Constantine, Algeria'. 4 th International Conference on Advances in Mecanical Engineering Istanbul 2018 (ICAME2018), Yildiz Technical University, Istanbul-Turkey. ISBN 978-605-9546-13-3. <http://icame2018conference.com/participants.php>
- Hellas M.S, Chaib. R & Chebila.M. (April 29-30, 2018). 'Approche QRA pour modéliser des conséquences des scénarios d'accidents Fireball et VCE cas Bac de stockage GPL In Aminas Algérien'. Fourth International Conference on Energy, Mterials, Applied Energetics and Pollution (ICEMAEP'2018). Université Frères Mentouri Constantine1, Algérie. ISBN 978-9931-9229-6-4. <https://drive.google.com/file/d/1wyYe5aQ-p84dI-7-NZGBBwIyPUFUDk6k/view>
- Hellas M.S & Chaib. R. (Novembre 26-28, 2019). 'Modélisation des données incertaines dans l'approche noeud papillon flou: étude de cas'. International conference on advanced Engineering in Petrochemical industry ICAEPI'19. Université 20 aout 1955 Skikda, Algérie. <http://ftech.univ-skikda.dz/icaepi2019/>.
- Hellas M. S & Chaib.R. (Novembre 18-19, 2019). 'LOPA floue pour évaluation des scénarios d'accidents et les mesures de réduction des risques de manière plus souple'. 5th international conference on maintenance and industrial safety (CIMSI2019). Universiy 20 Août, 1955-Skikda. <http://ftech.univ-skikda.dz/index.php/en/departements/ge/2-non-categorise/1182-nternational-conference-on-maintenance-and-industrial-safety-cimsi-2019>
- Hellas M. S & Chaib R. (October-23-24, 2018). 'Poser un abaque pour déterminer la probabilité de fatalité de l'effet de surpression par deux TNT et TNO multi-énergie'. International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics

Conclusion Générale et Perspectives

(ISIEAM'2018). University 20 Août, 1955-Skikda. <http://conferences.univ-skikda.dz/isieam2018/>

Perspectives :

À l'issue de cette thèse, bien que les résultats obtenus soient encourageants, ils peuvent être considérés comme une première étape. Il serait intéressant d'exploiter, dans des études futures, le développement d'un software permettant de visualiser les contours de risque flous. C'est très important d'envisager cette problématique dans des études futures.

Références bibliographiques

- API, R. (1990). 521, Recommended Practice 521.
- American Petroleum Institute. (1973). Guide for pressure relieving and depressing systems; API Recommended Practice 521, appendix A
- Abul-Haggag, O. Y., & Barakat, W. (2013). Application of fuzzy logic for risk assessment using risk matrix. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(1), 49-54.
- Book, T. G. (1989). Methods for the determination of possible damage. Rep CPR E, 16.
- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation* Elsevier. The Netherlands.
- BAKER et al. (1996). Vapor Cloud Explosion Analysis, *Process Safety Progress*, Vol. 15, N° 2, pp 106-109
- Bowen, J.G., Fletcher, E.R. and Richmond, D.R. (1968). Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast. Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Report DASA-2113, Albuquerque, NM
- BS IEC 61511-1. (2003). Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector. International Electrotechnical Commission
<http://www.cechina.cn/eletter/standard/safety/iec61511-1.pdf>
- Brasie, W. C., & Simpson, D. W. (1968). Guidelines for Estimating Damage from Chemical Explosions. In 63rd Meeting, AICh. E.
- Van den Schoor, F., Middha, P., & Van den Bulck, E. (2013). Risk analysis of LPG (liquefied petroleum gas) vehicles in enclosed car parks. *Fire safety journal*, 57, 58-68
- Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50(2), 203-213.
- BABUŠKA, R. (2001). Fuzzy and neural control. DISC Course Lecture Notes Control, Engineering Laboratory, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands
- Bouchon – Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications-Vie artificielle*. Ed. Addison - Wesley France, Paris
- Baudrit, C. (2005). *Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : Application à l'évaluation des risques liés aux sites et sols pollués (Doctoral dissertation)*
- CCPS. (2001). *Layer of protection analysis: simplified process risk assessment*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York

Références bibliographiques

- CCPS. (2000). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 2nd edition
- Casal, J. (2017). Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Elsevier
- CCPS. (2009). Guidelines for developing quantitative safety risk criteria. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA
- CPR. (1997). Committee for the Prevention of disaster. Yellow Book, Methods for the calculation of physical effects, Part 2, CPR 14E, Chap. 5, 3 editions.
- CCPS. (1989). Guidelines for process equipment reliability data with data tables. AIChE, New York.
- CCPS. (1999). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2nd ed. New York: AIChE.
- Crossthwaite, P. J., Fitzpatrick, R. D., & Hurst, N. W. (1988). Risk Assessment for Siting of Developments near Liquified Petroleum Gas Installations. I. In Chem. E. Symposium (No. 110, pp. 373-400).
- CH2MHILL. (2009). Addendum Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) In Amenas Compression Project, 356787 JOB ALGERIA IN AMENAS.
- Denis-Remis, C. (2007). Approche de la maîtrise des risques par la formation des acteurs (Doctoral dissertation).
- Dupont, R., Theodore, L., Reynolds, J., & De HemmerGudme, O. (1993). Sécurité industrielle (de la prévention des accidents à l'organisation des secours).
- Farmer F.R. (1967). Siting Criteria - A New Approach. Proceedings of the IAEA symposium on nuclear siting, IAEA, STI/PUB/154, SM-89, pp. 303-329.
- Hellas, M. S., Chaib, R., & Verzea, I. (2020a). Abacus to determine the probability of death or glass breakage to the overpressure effect by two methods: TNT and TNO Multi-energy.U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 82, Iss. 1. pp.239-254.
- Hellas M.S., Chaib.R. (2020b). Fuzzy LOPA for the evaluation of accident scenarios and risk reduction measures in supplier manner.AlgerianJornal of Signals and Systems.
- Hellas M.S.,chaib r. (2018a). QRA approach to model consequences of fireball accident scenarios and VCE case LPG storage tank In Aminasalgerien.International conference of energy, mterials, applied energetics and pollution (ICEMAEP, 2018); 29-30 april 2018, université frères mentouri constantine1, Algérie.
- Hellas, M. S., Chaib, R., & Verzea, I. (2018b). Quantitative risk analysis detailed study of thermal and overpressure risks case study. Journal of RECENT, 19(3), 56.

Références bibliographiques

- Hellas M.S.,chaib r. (2018c). Quantitative risk analysis: case of LPG Constantine – Algeria.4th international conference on advances in mechanical engineering Istanbul 2018 (ICAME2018), vol. 3, ISBN 978-605-9546-13-3, pp. 279- 287.
- Hellas M.S.,chaibR. (2018d). Quantitative risk analysis: case of LPG Constantine –Algeria. 4th international conference on advances in mechanical engineering Istanbul 2018 (ICAME2018), vol. 3, ISBN 978-605-9546-13-3, pp. 279- 287.
- Hellas, M.S., Chaib, R. & Verzea, I. (2019a). Artificial intelligence treating the problem of uncertainty in quantitative risk analysis (QRA). Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 18 No. 1, pp. 40-54
- Hellas M.S.,Chaib R. (2019b). LOPA floue pour l'évaluation des scénarios d'accident et les mesures de réduction des risques de manière plus souple. International seminar in industrial engineering and applied mathematics (ISIEAM, 2019); 2-3 December 2019, université 20 Aout 1955 Skikda.
- Hymes, D. H. (1983). Essays in the history of linguistic anthropology (Vol. 25). John Benjamins Publishing.
- Hancock, R. E. (1997). Peptide antibiotics. The Lancet, 349(9049), 418-422.
- Health and Safety Executive. (1992). The tolerability of risk from nuclear power stations. HSE (revised 1992).<http://www.onr.org.uk/documents/tolerability.pdf>
- Hirsch, F.G.(1968). Effects of overpressure on the ear – a review. Annals of the New York Academy of Sciences. 152:147-162.
- Huang, H. Z., Tong, X., &Zuo, M. J. (2004). Posbist fault tree analysis of coherent systems. Reliability Engineering & System Safety, 84(2), 141-148.
- INERIS DRA006. (2002). Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
- INERIS. (2003). Outils d'analyse des risques générés par l'installation industrielle, INERIS, direction des risques accidentels (DRA), p71.
- INERIS DRA-41. (2004). Appui technique pour la mise en œuvre des PPRT. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
- ICSI.(2011).Institue pour une Culture de Sécurité Industrielle « Pratiques de la décision en situation d'incertitude- approche de l'incertitude » disponible sur : <http://www.FonCSI.org/fr/>.
- IEC 61882.(2001).Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – guide d'application. International Electrotechnical Commission (IEC)
<http://www.onr.org.uk/documents/tolerability.pdf>.
- IEC 61511 Standard. (2003). Functional safety-Safety instrumented systems for the process industry sector-, Parts 1-3, First edition.

Références bibliographiques

- IEC 61508. (2000). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. IEC 61508-1 to 7. Geneva, Switzerland, IEC, International Electrotechnical Commission.
- Jones, R., Allen, J. (1985). Archaeological Research in Kakadu National Park.
- Gobert, M. (1982). La recherche clinique et les problèmes administratifs qu'elle pose au Centre de recherches du Service de santé des armées : solution proposée (Doctoral dissertation).
- Gouriveau, R., & Noyes, D. (2003). Description et évaluation de risques en conduite de systèmes industriels. *Journal européen des systèmes automatisés*, 37(5), 661-684.
- Kinsella K.G. (1993). A rapid Assessment methodology for the prediction of vapour cloud explosions. Research report N° 357, Technical Research Centre of Finland.
- Kumamoto, H. (2007). Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment. Springer Science & Business Media.
- Kiszka. J. B, Gupta M.M., and Nikiforuk P.N. (1985). Energetic stability of fuzzy dynamic systems. *IEEE Trans. On Syst. Man Cybern.* SMC-15(5):783-792.
- KaidTlilane N. (2007). L'impact des rejets industriels sur l'environnement et la sante de la population en Algérie, Premières Rencontres nternationales sur l'Économie de l'Environnement d'Annaba.
- Lannoy, A. (1984). Analyse des explosions air-hydrocarbure en milieu libre : études déterministe et probabiliste du scénario d'accident, prévision des effets de surpression. *Bulletin de la Direction des études et recherches-Electricité de France. Série A, nucléaire, hydraulique, thermique*, (4).
- Lees, D. C. (1996). The Périnet effect? Diversity gradients in an adaptive radiation of Madagascan butterfly (Satyrinae: Mycalesina) contrasted with other species-rich rainforest taxa.
- Liang, G. S., & Wang, M. J. J. (1993). Fuzzy fault-tree analysis using failure possibility. *Microelectronics Reliability*, 33(4), 583-597.
- Mannan, S. (2012). Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification. *Assessment and Control*, 1.
- Marszal, E. M., & Scharpf, E. W. (2002). Safety integrity level selection: Systematic methods including layer of protection analysis. Research Triangle Park, NC: Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Markowski, A. S., & Mannan, M. S. (2009). Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA). *Journal of loss prevention in the process industries*, 22(6), 921-927.
- Nait-Said, R., Zidani, F., & Ouzraoui, N. (2009). Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2-3), 651-658.

Références bibliographiques

- OREDA.SINTEF. (2002). Offshore Reliability Data Handbook. 4th ed. DNV Technica, Norway.
- Ollierou, R., & Quantinet, B. (2004). Vulnérabilité une notion d'avenir. École nationale supérieure des Mines Saint Étienne (ESM-SE), Axe Cindynique.
- Pasman, H. J., Rogers, W. J., & Mannan, M. S. (2017). Risk assessment: What is it worth? Shall we just do away with it, or can it do a better job? *Safety Science*, 99, 140-155.
- Périlhon, P. (2007). La gestion des risques : méthode MADS-MOSAR II : manuel de mise en oeuvre-application aux installations et plus particulièrement aux installations industrielles. Demos.
- Ronza, A., Carol, S., Espejo, V., Vílchez, J. A., & Arnaldos, J. (2006). A quantitative risk analysis approach to port hydrocarbon logistics. *Journal of hazardous materials*, 128(1), 10-24.
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process—a framework and guidance. *Environmental modelling & software*, 22(11), 1543-1556.
- Roberts, A. F. (1981). Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Fire Safety Journal*, 4(3), 197-212.
- Romdhane, T. B., Ammar, F. B., & Badreddine, A. (2007). Une approche par la logique floue pour l'optimisation multicritère de la prise de décision appliquée à l'AMDEC. *Journal of decision systems*, 16(4), 505-544.
- Simon, C., Sallak, M., & Aubry, J. F. (2007). SIL allocation of SIS by aggregation of experts' opinions.
- Soman, K. P., & Misra, K. B. (1993). Fuzzy fault tree analysis using resolution identity. *J. Fuzzy Math*, 1, 193-212.
- SONATRACH. (2008). Document SONATRACH DP HRM.
- Sawyer, J. P., & Rao, S. S. (1994). Fault tree analysis of fuzzy mechanical systems. *Microelectronics Reliability*, 34(4), 653-667.
- Suresh, P. V., Babar, A. K., & Raj, V. V. (1996). Uncertainty in fault tree analysis: A fuzzy approach. *Fuzzy sets and Systems*, 83(2), 135-141.
- TNO. (1989). Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials, in Roos, A.J. (Ed.), Green Book, Report CPR 16E.
- TNO. (1997). Committee for the Prevention of Disasters. Methods for determining and processing probabilities (Red Book), CPR 12E. The Hague.
- TNO. (1999). Guidelines for quantitative risk assessment (purple book): CPR 18E. Committee for the Prevention of Disasters, Sdu Uitgevers, Den Haag.

Références bibliographiques

- Tang, M. J., & Baker, Q. A. (1999). A new set of blast curves from vapor cloud explosion. *Process Safety Progress*, 18(4), 235-240.
- Théberge, M. C. (2002). Analyse de risques d' accidents technologiques majeurs. Direction des évaluations environnementales, Ministère de l'Environnement, Québec.
- Tanaka, H., Fan, L. T., Lai, F. S., & Toguchi, K. (1983). Fault-tree analysis by fuzzy probability. *IEEE Transactions on reliability*, 32(5), 453-457.
- US Department of the Army. (1990). Structures to resist the effects of accidental explosions. Technical manual TM5-1300.
- Villa, V., Paltrinieri, N., Khan, F., & Cozzani, V. (2016). Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry. *Safety science*, 89, 77-93.
- Van den Berg, A. C. (1985). The multi-energy method: a framework for vapour cloud explosion blast prediction. *Journal of Hazardous materials*, 12(1), 1-10.
- Van Den Bosh, C. J. H., & Weterings, R. A. P. M. (1997). Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Wayne, F. D. (1991). An economical formula for calculating atmospheric infrared transmissivities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 4(2), 86-92.
- Witold, P., Fernando, G. (1998). *An introduction to fuzzy sets: Analysis and Design*. Massachusetts.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, parts II and I. *Information Sciences*, Vol. 8 No. 3, pp. 199-249. 301-357.

Sommaire

Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2018)	152
Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2019)	153
Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2020a)	154
Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2020b)	155
Hellas M.S, Chaib. R (2020c)	156

Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2018)

RECENT J. (2018), 56:128-136
<https://doi.org/10.31926/RECENT.2018.56.128>



Quantitative Risk Analysis Detailed Study of Thermal and Overpressure Risks Case Study

Mohamed Seddik HELLAS

University Frères Mentouri, Constantine 1, Algeria, hsehsee@gmail.com

Rachid CHAIB

University Frères Mentouri, Constantine 1, Algeria, r3chaib@yahoo.fr

Ion VERZEA

"Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi Romania, verzea2000@yahoo.com

Abstract

Oil and gas companies generate high levels of risks because they process and store large quantities of flammable, explosive and toxic liquids and gaseous products. Actually, no country is immune to disasters related to the industrial installations of oil and gas complexes where several tragic experiences have caused significant human, material and environmental losses. Therefore, the importance of the rigorous monitoring of management procedures and the strict observance of industrial safety measures are required to ensure not only the reliability of the facilities themselves but also to protect the human resources. Locally, the catastrophic explosion of the liquefaction complex of Skikda in January 2004 caused 27 fatalities and 73 injuries and revealed many weaknesses in the risk prevention within Sonatrach. In order to master these phenomena several techniques and mathematical models of risk prediction have been developed. Among these methods, we find the Quantitative Risk Analysis (QRA), which is the objective of our work, whose objective is to evaluate the probability of damage caused by a potential accident. This method, initially developed in the field of transport and nuclear power, has been progressively adapted to the process industry, particularly in northern European countries for Seveso type installations. In this work, we are interested in the application of the QRA method to the LPG industrial zone located in Constantine, Algeria. The objective is the study of undesired events, their frequencies and their effects, including the probability of fatality or injury by thermal effect (1st degree burn, 2nd degree burn, deaths) and by overpressure (lung damage, eardrum rupture, head impact, whole-body displacement impact, building collapse, major structural damage, minor damages, breakage of window panes). The purpose is to estimate the individual risks and the societal risk, and to apply the measures that suitably deal with these estimates.

Keywords

QRA, probability of injury or death, thermal effect, overpressure effect, individual and societal risk

1. Introduction

The terms QRA (Quantitative Risk Analysis), PSA (Probabilistic Safety Assessment) and PRA (Probabilistic Risk Analysis) are used synonymously in different industries to describe various techniques for evaluating risk. Whilst quantification of risk for specific issues has been around for a long time, the grandfather of modern probabilistic assessment of the overall risk for an entire major hazard facility is generally accepted to be WASH-1400, commissioned by the US Nuclear Regulatory Commission in 1975. This quantified the safety risks associated with the operation of all electricity generating nuclear power plants in the US. The nuclear industry led the way, motivated by a desire to demonstrate that the actual risk was less than other industrial facilities and counter the public's perception that nuclear stations are very risky because the worst-case consequences are potentially so catastrophic.

It is not surprising that the petrochemical industry followed suit shortly after, since the toxic effects of large chemical releases can disperse many miles and affect large numbers of people in local towns and cities. Explosion effects can also be devastating. For example, an explosion of the liquefaction

Hellas M.S, Chaib. R & Verzea I. (2019).

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at:
www.emeraldinsight.com/1726-0531.htm

Artificial intelligence treating the problem of uncertainty in quantitative risk analysis (QRA)

Artificial
intelligence
treating

Mohamed Seddik Hellas

Transportation Engineering, University of Constantine 1, Batna, Algeria

Rachid Chaib

Transportation Engineering, Université Constantine 1, Constantine, Algeria, and

Ion Verzea

*Department of Engineering and Management,
Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Iasi, Romania*

Received 5 March 2019
Revised 29 April 2019
Accepted 15 June 2019

Abstract

Purpose – Nowadays, artificial intelligence computational methods, such as knowledge-based systems, neural networks, genetic algorithms and fuzzy logic, have been increasingly applied to several industrial research studies, the purpose of this paper is to study the contribution of fuzzy and possibilistic techniques to quantitative risk analysis (QRA) in the presence of imperfect knowledge about the occurrence and consequences of accidental phenomena.

Design/methodology/approach – To solve the problem of uncertainties related to the elements of the accident scenario such as the frequency and severity of the consequences, the authors used fuzzy logic. Using this type of analysis, it is possible to visualize the contours of the dead or fuzzy injury by fireball thermal effect (first- and second-degree burn, death) and lesions caused by vapor cloud explosion overpressure (lung damage, eardrum rupture, head impact, whole-body displacement). The frequency and severity of fuzzy results are calculated by extended multiplication using the alpha-cuts method.

Findings – This research project aims to reflect the real situation in the in Amenas industrial area (SONATRACH company), specifically the liquefied petroleum gas storage tank On-Spec 05-V-411A, to deal with this type of risk. Using this analysis allows us to estimate the fuzzy individual risk using the approach of fuzzy logic to treating this uncertainty in the parameter information of accident scenarios. This index individual risk (IR) was evaluated against the criterion of acceptability and then used for decision-making in the field of industrial risk analysis and evaluation.

Originality/value – The originality of the work is to identify the weak points of the classical QRA to solve the problem of the uncertainties related to the elements of the accident scenario such as the frequency and severity of the consequences to visualize the fuzzy risk contours. On the one hand and the development of software to calculate the probability of death by the overpressure effect and classify the most sensitive organs on the other hand. Given the importance of this study, it can be generalized for similar sites in the region.

Keywords Uncertainty, Contours of death and fuzzy risk, Fireball, Fuzzy QRA, VCE

Paper type Research paper

Acronyms

CCPS = Center for Chemical Process Safety;
DNV = Det Norsk Veritas;
Ē = fuzzy Surface emissive power [kW/m²];



Journal of Engineering, Design
and Technology
© Emerald Publishing Limited
1726-0531
DOI 10.1108/JEDT-03-2019-0057

ABACUS TO DETERMINE THE PROBABILITY OF DEATH OR GLASS BREAKAGE TO THE OVERPRESSURE EFFECT BY TWO METHODS: TNT AND TNO MULTI-ENERGY

Mohamed Seddik HELLAS¹, Rachid CHAIB², Ion VERZEA³

Safety and environmental protection are among the most important concerns of companies worldwide. They develop complex software to model the consequences of damage in an accident at a petrochemical plant. In particular, the explosions. Generally, in order to achieve the objectives, we suggest an abacus very easy to use and simple as to determine the fatality probability (lethality likelihood) or material damage (glass breakage) by the overpressure effect by two methods: TNT and TNO Multi-Energy, and at the same time to determine the strengths and weaknesses of these two methods.

Keywords: fatality probability, TNT, TNO multi-energy, abacus, overpressure.

1. Introduction

Oil has been the main source of energy in the world for 40 years. This has very important implications for the country's economy. It is therefore extremely important to have several refineries around the world to make the most of crude oil. Even when precautions are taken to reduce the accident risks in chemical plants that happen from time to time According to the Labor Statistics Bureau in 2009, industrial accidents were the causes of non-productive time losses due to no fatal injuries for more than 1.2 million workers in the United States. Although, this represents 9 % decrease in accidents compared to 2008, there is still room for improvement. The industrial accidents death number recorded in 2009 is 4340. Based on the main causes of accidents, companies may take the necessary steps to reduce their happening probability in the future [1-3]. In addition, some domino effects may occur in these accidents types that could increase damage and affect other areas [4-6].

As a result, hygiene and industrial safety is a key factor in the hydrocarbon industry. Thus, estimating and evaluating the effects of such explosions in real scenarios involving diverse and complex environments will be possible [7, 8]. This allows protecting goods and people working on such sites that store, transport or handle flammable and hazardous materials. In order to achieve the objectives, an easy and simple abacus for use has been suggested in order to determine the fatality probability or glass breakage damage by the overpressure

¹ PhD student., Laboratory of transportation engineering and environment, Constantine 1, Algeria- e-mail: hsehsee@gmail.com

² Prof., Laboratory of transportation engineering and environment, Constantine 1, Algeria, e-mail: r3chaib@yahoo.fr

³ Prof., "Gheorghe Asachi" Technical University of Iasi, Romania, e-mail: iverzea@tuiasi.ro

Hellas M.S, Chaib. R (2020b)

Modelling of accidental phenomena related to leakage and tank rupture of a vehicle converted to LPG

Mohamed Seddik Hellas and Chaib Rachid

Department of Transportation Engineering, University of Constantine 1 Algeria, and

Ion Verzea

Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, Iasi, Romania

Abstract

Purpose – Liquefied petroleum gas (LPG), known by its ecological qualities, making Algeria has since the 1980s carried out a policy of development of LPG fuel in substitution of traditional fuels and especially petrol. However, following a series of accidents (fires, explosions, etc.) that occurred in 1999, 20 years after the introduction of the LPG in France these incidents led to the search for the strengthening of the safety of the installations by better or new technical and/or organizational measures. This strategy consists in establishing a balance between environmental protection and economic profitability while ensuring the safety aspect.

Design/methodology/approach – The approach used is quantitative risk analysis authors have identified the potential accident scenarios that consist of leakage and rupture of tanks depend on bow tie. According to the latter using PHAST software, to model these scenarios (thermal, overpressure and dispersion) and their effects on human beings and goods.

Findings – In this paper, it was noted that there are scenarios such as (jet fire, dispersion), are affected by atmospheric conditions (wind speed humidity), the stronger the wind, the higher the LPG spread unlike instant scenarios (1.3 s for the fireball and millisecond for the explosion) that have not been related to climatic conditions because they have a short duration on the one hand, and on the other hand, a safe distance is given in each phenomenon. Finally, some instructions for drivers and installers have been identified by protective and preventive action.

Originality/value – Based on a quantitative risk analysis, this work involves modelling potential accident scenarios such as (fireball, jet fire, flash fire and explosion) in the event of a gas leak and rupture in the tank. It aims to sensitize drivers and LPG kit installers, even to get a clear view on these accidental phenomena and how to avoid them.

Keywords LPG, Accidental phenomena, QRA, Leakage and rupture of a tank, Modelling of accident scenarios

Paper type Research paper

Abbreviations

LPG	= Liquefied Petroleum Gas ;
CFD	= Computational Fluid Dynamics;
PRV	= Pressure Relief Valve;
PRD	= Pressure Relief Device;
ECU	= Electronic Control Unit;
UFL	= Upper Flammability Limit;
LFI	= Lower Flammability Limit;
UE	= Undesired Event;
DNV	= Det Norske Veritas;
PHAST	= Process Hazard Analysis Software Tool;
ppm	= parts-per-million;
TNT	= Trinitrotoluene;
QRA	= Quantitative Risk Analysis;
VCE	= Vapor Cloud Explosion;
HSE	= Health and Safety Executive; and

ARAMIS = Accidental Risk Assessment Methodology for Industries.

1. Introduction

During the past 20 years, a new type energy has made its way alongside oil and natural gas, which is the liquefied fuel gas (LPG) as this product has great importance in Algeria and the world. It is considered because of its pure and transportable energy assets for industry and automotive, as an effective source of energy that contributes to reach global energy demands. The national requirement for LPG is around 15 million tonnes, including 90% butane, 5% propane, and 5% LPG fuel. The LPG comprises propane and butane, has emerged mainly because of its attributes, its flexibility of use, given its high calorific value and its non-polluting appearance because it does not contain sulfur. To note, also that LPG is an interesting petrochemical charge for polymer manufacturing (Singh *et al.*, 2020; Mora *et al.*, 2019). This fuel is used in several applications thanks to many advantages such as the reasonable yield of its storage, transport, the security of supply, its competitive cost and ecological superiority. The crucial

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at: <https://www.emerald.com/insight/1708-5284.htm>



World Journal of Engineering
© Emerald Publishing Limited [ISSN 1708-5284]
[DOI 10.1108/WJE-03-2020-0083]

Received 21 March 2020
Revised 21 October 2020
24 November 2020
Accepted 21 December 2020

Fuzzy LOPA for the evaluation of accident scenarios and risk reduction measures in supplier manner

Hellas Mohamed Seddik⁽¹⁾, Chaib Rachid⁽¹⁾

⁽¹⁾ Transportation Engineering, University of Constantine 1, Algeria
hsehsee@gmail.com, r3chaib@yahoo.fr

Abstract: The analysis and evaluation of risks by the LOPA method requires the presence of certain data and information on the various risk evaluation parameters such as, the frequencies of initiating events, the probabilities failures of the security barriers and also probability of ignition .This data is generally obtained from the history of the system analyzed. In the absence or lack of data on the state of the system, other sources such as databases and expert judgment are used. Despite the fact that the choice of data is made while respecting the adaptation of this data to the system studied, based on its history and on similar systems having the same mode of operation, it seems important to emphasize the fact that imperfections are not properly taken into account. linked to the data used by the various risk analysis methods including the LOPA method, the results are always uncertain and imprecise. To address such a problem, we use the "fuzzy LOPA" approach. As a case study, we used an operational industrial system which is a heater H-101.

Keywords: Fuzzy LOPA, Uncertain and imprecise, Reduced frequencies consequence, Risk assessment.

1. INTRODUCTION

Quantitative Risk Analysis (QRA) [1; 2 and 3], also called probabilistic risk assessment, consists of identifying all the possible scenarios that can lead to undesirable events, assessing the severity of their consequences, calculating their probabilities of occurrence and assess them against the acceptability criteria established beforehand.

In the context of risk analysis and particularly during the application of dependability, qualitative, semi-quantitative and quantitative methods in industrial sectors, many problems are encountered, let us cite the problem of the unavailability of data related to different risk assessment elements and parameters.

And despite the fact that these data are established by experts with their relevant judgments and also provided by specialized databases, there will always be an inevitable subjectivity and uncertainty in the evaluation of the various parameters of the accident scenarios.

Still in the area of risk analysis, the linguistic descriptions used to assess the gravity of the consequences, even the vague risks in essence and provided by experts, are also another example of data that is difficult to analyze in an ordinary and conventional manner. For these and other reasons, it

seems interesting to use representation models in the form of fuzzy sets and possibilistic. This for a good consideration of these problems.

In what follows, we present a fuzzy approach to LOPA taking into account uncertain and / or imprecise data. One of the possible representations of data by fuzzy intervals is proposed [4;5;6 and 7].

2. METHODOLOGY

The methodology is based on the fuzzy LOPA approach (Fig. 1). This approach makes it possible to assess the elements of an accident scenario and to measure risk reduction in a more flexible manner.

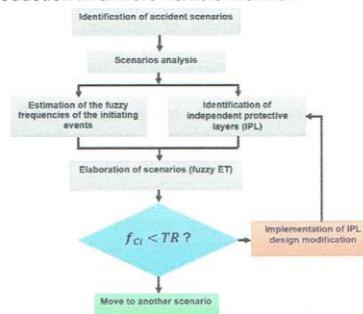


Fig 1. Methodology of working