

Table des matières

Dédicace	iii
Remerciement	iv
Table des matières	v
Table des figures	viii
Liste des tableaux	x
Acronymes et Abréviations	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Analyse quantitative des risques (QRA)	3
1.1. Introduction	3
1.2. Concepts et définitions	3
1.2.1. Notion de danger	4
1.2.2. Notion du risque	4
1.2.3. Notion de criticité / Grille de criticité	4
1.3. Processus de gestion des risques	4
1.3.1. Analyse du risque	5
1.3.2. Evaluation du risque	5
1.3.3. Acceptation du risque	5
1.3.4. Réduction du risque	6
1.4. Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques	6
1.4.1. Méthodes qualitatives	6
1.4.1.1. Analyse préliminaire des risques (APR)	6
1.4.1.2. Hazard and operability study (HAZOP)	7
1.4.2. Méthodes semi-quantitatives	8
1.4.2.1. Analyse des couches de protection (LOPA)	8
1.4.3. Méthodes quantitatives	8
1.4.3.1. Arbre des événements (AdE)	9
1.4.3.2. Méthodologie d'analyse quantitative des risques (QRA)	9
1.4.3.2.1. Objectifs de l'analyse quantitative des risques	10
1.4.3.2.2. Etapes de l'analyse quantitative des risques	10
1.4.3.2.3. Cartographie du risque	15

Table des matières

1.4.3.2.4. Vulnérabilité	19
1.4.3.2.5. Acceptabilité et critères d'acceptabilité du risque	22
1.4.3.2.6. Avantages de la méthode QRA	24
1.4.3.2.7. Limites de la méthode QRA	24
1.5. Conclusion	24
Chapitre 2 : Analyse floue du risque : vers une QRA floue	25
2.1. Introduction	25
2.2. Modèles de traitement de l'incertitude	26
2.2.1. Théorie des probabilités	26
2.2.1.1. Définition et propriétés	26
2.2.1.2. Limites de la théorie des probabilités	27
2.2.2. Théorie des ensembles flous	27
2.2.2.1. Concepts de base des mathématiques floues	28
2.2.2.2. Caractéristiques d'un ensemble flou	29
2.2.2.3. Opérations sur les ensembles flous	29
2.2.2.4. Notion d' α -coupe / Intervalle de confiance	30
2.2.2.5. Opérations arithmétiques sur les nombres flous	31
2.2.3. Théorie des possibilités	32
2.3. Applications de la théorie des ensembles flous à l'analyse des risques	34
2.3.1. Analyse de modes de défaillances et leurs effets	34
2.3.2. Arbre de défaillances	34
2.3.3. Arbre des événements	35
2.3.4. Analyse des couches de protection	35
2.3.5. Graphe de risque étalonné	36
2.3.6. Analyse quantitative des risques (QRA)	36
2.4. Présentation de la méthodologie générale	37
2.5. Présentation de l'approche "QRA floue" développée	37
2.5.1. Evaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents	38
2.5.2. Evaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents	39
2.5.3. Evaluation de l'indice de risque flou	40
2.6. Conclusion	41
Chapitre 3 : Analyse quantitative des risques d'un système opérationnel	42
3.1. Introduction	42
3.2. Application de la méthode QRA au Ballon D-108	42

Table des matières

3.2.1. Collecte des informations pertinentes	42
3.2.1.1. Situation géographique	42
3.2.1.2. Données climatiques	44
3.2.1.3. Données techniques sur le système analysé	46
3.2.1.4. Données physico-chimiques des produits	47
3.2.2. Identification des scénarios de dangers	48
3.2.3. Estimation des fréquences des événements initiateurs	50
3.2.4. Développement des arbres d'événements	50
3.2.5. Analyse des conséquences et des effets	54
3.2.5.1. Description du phénomène BLEVE	54
3.2.5.2. Modélisation des effets du BLEVE	56
3.2.5.3. Modélisation des effets thermiques du BLEVE par SAFETI	59
3.2.6. Estimation du risque individuel	60
3.2.7. Evaluation du risque par rapport aux critères d'acceptabilité	60
3.3. Conclusion	60
Chapitre 4 : Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel	62
4.1. Introduction	62
4.2. Application de l'approche "QRA floue" au Ballon D-108	62
4.2.1. Evaluation floue de la fréquence des scénarios d'accidents	62
4.2.2. Evaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents	64
4.2.3. Evaluation de l'indice de risque flou	65
4.3. Conclusion	66
Conclusion générale	67
Bibliographie	68
Résumés	73

Table des figures

Figure 1.1 - Processus de gestion des risques	5
Figure 1.2 - Classification générale des méthodes d'analyse des risques	7
Figure 1.3 - Schéma d'un arbre des événements	9
Figure 1.4 - Principales étapes d'une analyse quantitative des risques	11
Figure 1.5 - Exemple de contours de risque individuel	15
Figure 1.6 - Procédure de calcul des contours de risque individuel	17
Figure 1.7 - Exemple d'une courbe F/N	18
Figure 1.8 - Distribution normale : réponse d'une population à un accident majeur donné	19
Figure 1.9 - Relation entre la variable probit et le pourcentage (la probabilité)	20
Figure 1.10 - Relation dose-réponse appliquée au cas de décès par hémorragie pulmonaire	20
Figure 1.11 - Diagramme probabilité-conséquence	23
Figure 1.12 - Risque tolérable et ALARP	23
Figure 2.1 - Exemple d'un nombre flou	28
Figure 2.2 - Intervalle flou trapézoïdal	29
Figure 2.3 - Nombre flou triangulaire	31
Figure 2.4 - Modèle d'évaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents	38
Figure 2.5 - Modèle d'évaluation floue de la conséquence	40
Figure 2.6 - Modèle d'évaluation de l'indice de risque flou	41
Figure 3.1 - Représentation de la position géographique de Hassi R'mel	43
Figure 3.2 - Champ de Hassi R'mel	43
Figure 3.3 - Rose de vent annuelle de la station Hassi R'mel	45
Figure 3.4 - Ballon de reflux D-108	47
Figure 3.5 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°1	51
Figure 3.6 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°2	52
Figure 3.7 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°3	53
Figure 3.8 - Processus de réalisation du BLEVE	55
Figure 3.9 - Contours de la probabilité de décès due aux effets thermiques	59
Figure 3.10 - Contours du risque individuel dû aux effets thermiques	60
Figure 4.1 - Nombres flous des fréquences des événements initiateurs	63

Table des figures

Figure 4.2 - Nombres flous des PFD et des probabilités d'ignition	63
Figure 4.3 - Fréquences floues des conséquences des scénarios d'accidents	63
Figure 4.4 - Fréquence floue de la conséquence du scénario BLEVE (UC1)	64
Figure 4.5 - Nombre flou de l'humidité relative	64
Figure 4.6 - Nombre flou de la température	64
Figure 4.7 - Probabilité floue des effets létaux (décès)	65
Figure 4.8 - Indices de risque flou et conventionnel relatifs au scénario du BLEVE	66

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Fréquences des événements de perte de confinement.....	12
Tableau 1.2 - Relation entre la variable probit et le pourcentage	21
Tableau 3.1 - Unités de la Région de Hassi R'mel	44
Tableau 3.2 - Evolution des températures minimales à l'année.....	45
Tableau 3.3 - Evolution des températures maximales à l'année.....	45
Tableau 3.4 - Moyennes mensuelles des précipitations	46
Tableau 3.5 - Moyennes mensuelles des taux d'évaporation	46
Tableau 3.6 - Conditions météorologiques utilisées pour modélisation d'accidents	46
Tableau 3.7 - Caractéristiques du ballon de reflux D-108	46
Tableau 3.8 - Caractéristiques physico-chimiques de GPL	48
Tableau 3.9 - Application de la méthode HAZOP : Cas du paramètre Pression	49
Tableau 3.10 - Scénarios de dangers retenus	48
Tableau 3.11 - Fréquences des événements initiateurs	50
Tableau 3.12 - Probabilités d'ignition et de défaillance des barrières	50
Tableau 3.13 - Fréquences des conséquences des scénarios d'accidents	53
Tableau 3.14 - Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques	58
Tableau 3.15 - Résultats de l'outil SAFETI	59
Tableau 4.1 - Intervalles de confiance des EI, des PFD et des probabilités d'ignition	62
Tableau 4.2 - Intervalles de confiance des paramètres physiques	64

Acronymes et Abréviations

AdE	Arbre des Evénements
AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres
AMDE	Analyse des Modes de Défaillance et leurs Effets
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
APD	Analyse Préliminaire de Dangers
APR	Analyse Préliminaire de Risques
ARAMIS	Accidental Risk Assessment Methodology for Industries
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion
BS	Barrière de Sécurité
CCPS	Center for Chemical Process Safety
DNV	Det Norske Veritas
DP	Division Production
EI	Evénement Initiateur
EPA	Environmental Protection Agency
F/N	Frequency/Number
FR	Flow Recorder
FRC	Flow Recorder Controller
FRCA	Flow Recorder Control Alarm
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard and Operability Study

Acronymes et Abréviations

HP	High Pressure
HRM	Hassi R'mel
HSE	Health, Safety and Environment
IR	Individual Risk
LIC	Level Indicator Controller
LOPA	Layers Of Protection Analysis
MADS	Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement des Systèmes
MOSAR	Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques
MPP	Module Processing Plant
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PFD	Probability of Failure on Demand
PG	Pressure Gauge
PHA	Process Hazard Analysis
PHAST	Process Hazard Analysis Software Tool
PIC	Pressure Indicator Controller
PID	Piping and Instrumentation Diagram
PRAH	Pressure Recorder Alarm High
PSA	Process Safety Analysis
PSV	Pressure Safety Valve
PZH	Pressure Emergency Shutdown High
QRA	Quantitative Risk Analysis
RH	Relative Humidity
RRF	Risk Reduction Factor
SC	Safe Consequence
SH	Sonatrach
SIL	Safety Integrity Level

Acronymes et Abréviations

SIS	Safety Instrumented System
Sonatrach	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures
TNO	The Netherlands Organisation of applied Scientific Research
TRC	Thornton Research Center
UC	Unsafe Consequence
VCE	Vapor Cloud Explosion
VROM	Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu (Ministry of Housing, Spatial Planning, and the Environment, Netherlands)

1. Problématique

L'objectif d'une analyse de sécurité des procédés industriels (Process Safety Analysis, PSA) est de s'assurer que les risques inhérents à ces procédés sont suffisamment réduits pour qu'ils appartiennent à la zone des risques acceptables ou à la limite à celle des risques tolérables (régie par le principe ALARP : As Low As Reasonably Practicable). Ces deux zones étant délimitées par des critères d'acceptabilité du risque. La prévention des accidents majeurs ayant des impacts graves sur les personnes, les biens et l'environnement demeure un souci majeur pour les industriels. En fait, malgré l'application systématique des mesures de sécurité classiques (engineering codes, checklists), ces accidents ne cessent de se produire.

Durant ces dernières années, plusieurs techniques et modèles mathématiques de prévision des risques ont été développés. Citons à titre d'exemple, l'analyse des dangers du procédé (Process Hazard Analysis : PHA), l'analyse des couches de protection (Layers Of Protection Analysis : LOPA), l'analyse quantitative des risques (Quantitative Risk Analysis : QRA). Cette dernière est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette approche consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences, moyennant des méthodes d'analyse des risques (HAZOP, Arbre des Causes, Arbre des Evénements, ...) et des modèles mathématiques des effets et de vulnérabilité. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et par suite appliquer les mesures qui répondent convenablement à cette estimation.

La 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 précisément distingués, les taux de défaillance sont à valeurs précises et par conséquent, une valeur unique d'estimation du risque est obtenue. Cette valeur est souvent assez conservatrice, car elle est basée sur le principe du "cas le plus défavorable". Cependant, la variabilité des taux de défaillance et des paramètres physiques ainsi que les différentes suppositions sur les modèles mathématiques utilisés sont souvent incertains et de nature subjective. Ainsi, dans une 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'incertitudes.

On distinguera d'ailleurs trois types d'incertitudes : les incertitudes liées à la complétude, les incertitudes liées à la modélisation et les incertitudes liées aux paramètres d'entrée d'une QRA.

Le présent travail veut apporter des éléments de réponse à la problématique des incertitudes inhérentes à une QRA, en s'aidant des outils de la théorie des ensembles flous et celle de possibilité. En considérant les types d'incertitudes suscitées, les modèles flous et possibilistes apporteront des solutions plus souples permettant une maîtrise de risque adaptative.

2. Objectif

Le but essentiel de ce mémoire est d'étudier l'apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse quantitative des risques en présence de connaissances imparfaites sur l'occurrence et les conséquences des phénomènes accidentels.

3. Organisation du mémoire

Le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre intitulé "Analyse quantitative des risques (QRA)" a pour objectif de présenter le cadre global de ce mémoire. Dans un premier temps, nous commençons d'abord par présenter quelques concepts et définitions fondamentaux liés à la démarche d'analyse des risques industriels, puis discuter la démarche de gestion des risques en décrivant les différentes étapes constituant cette démarche. Nous abordons ensuite quelques méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives d'analyse et d'évaluation des risques. Enfin, nous examinons en détail la méthode QRA.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par présenter trois théories de représentation et de traitement des données incertaines et/ou imprécises à savoir la théorie des probabilités, la théorie des ensembles flous et la théorie des possibilités. Nous abordons ensuite quelques approches d'application de la théorie des ensembles flous à l'analyse et l'évaluation des risques. Enfin, nous présentons l'approche floue développée dans le cadre de notre travail. Nous examinons la méthodologie générale avec une modélisation floue des données incertaines et/ou imprécises des paramètres d'entrée d'une QRA conventionnelle.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du système "Ballon de reflux D-108" de traitement de gaz (Sonatrach, Hassi R'mel) qui a fait l'objet de notre étude de cas, et à l'identification des risques inhérents à ce système. Une collecte et adaptation de données est entreprise dans un but de se rapprocher du système réel et de son environnement. Ces données utilisées par la QRA conventionnelle nous ont servi pour la validation de la "QRA floue" proposée.

Le quatrième chapitre présentera la mise en œuvre de l'approche "QRA floue" avec une comparaison des résultats avec ceux de la QRA conventionnelle.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale décrivant le travail réalisé et les perspectives envisagées.

1.1. Introduction

Durant ces dernières décennies, le monde a connu un accroissement technologique qui a modifié profondément les exigences en termes de sûreté de fonctionnement des systèmes qui sont devenus de plus en plus complexes. Les systèmes industriels ont connu une augmentation notable du nombre des accidents majeurs et des catastrophes telles que les incendies et les explosions occasionnant des impacts et des effets graves sur les personnes, les biens et l'environnement. Pour cela, des efforts considérables sont fournis pour maîtriser la sécurité des installations industrielles. La maîtrise de ces phénomènes est obtenue grâce à des analyses qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives des risques, reposant sur à un certain nombre de données et d'informations sur le système analysé et son environnement ainsi que sur le phénomène étudié.

Au cours de ces dernières années, plusieurs techniques et modèles mathématiques de prévision des risques ont été développés. Citons à titre d'exemple, l'analyse des dangers du procédé (Process Hazard Analysis : PHA), l'analyse des couches de protection (Layers Of Protection Analysis : LOPA) et l'analyse quantitative des risques (Quantitative Risk Analysis : QRA). Cette dernière est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette approche consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences, moyennant des méthodes d'analyse des risques (HAZOP, Arbre des Causes, Arbre des Événements, ...) et des modèles mathématiques des effets et de vulnérabilité. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et par suite appliquer les mesures qui répondent convenablement à cette estimation.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps donner quelques concepts et définitions liés à la gestion des risques et décrire le processus de gestion des risques en insistant sur l'aspect analyse et évaluation du risque. Ensuite, nous allons aborder quelques méthodes d'analyse des risques, en décrivant brièvement leurs principes de déroulement et la méthode QRA fera l'objet d'une présentation détaillée.

1.2. Concepts et définitions

Bien que les concepts liés à l'analyse des risques soient bien définis par plusieurs auteurs, textes réglementaires et normes, il nous a paru utile de reprendre quelques notions fondamentales apparaissant dans toute démarche d'analyse des risques.

1.2.1. Notion de danger

Le terme "danger" est défini comme une propriété intrinsèque d'une substance dangereuse ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement [ISO/CEI 51, 1999].

Dans MADS MOSAR [Griot et Ayrat, 2002], on définit le danger comme étant un état ou situation comportant une potentialité de dommages inacceptables. C'est la situation d'un système où sont réunis tous les facteurs pouvant conduire à la réalisation d'un accident potentiel.

Notons que d'autres définitions de danger proposées par d'autres normes et auteurs portent le même sens malgré leurs vocabulaires différents.

1.2.2. Notion du risque

Le risque est défini comme une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences [Villemeur, 1988].

Dans MADS MOSAR [Griot et Ayrat, 2002], le risque est caractérisé par une grandeur à trois dimensions au minimum associée à une phase précise du système et caractérisant un événement non souhaité par sa probabilité d'occurrence, sa gravité (ou impact sur les cibles) et son acceptabilité.

Notons qu'en fonction de la probabilité et de la gravité d'un risque qu'on qualifie un risque de majeur, acceptable, inacceptable, ...etc.

1.2.3. Notion de criticité / Grille de criticité

Cette notion est définie comme le résultat d'agrégation des deux dimensions, gravité et probabilité d'occurrence. Elle permet d'estimer l'ampleur d'un risque. L'ensemble des niveaux de risque sont ajustés et classés proportionnellement en fonction de l'importance des deux dimensions (probabilité et gravité) dans une grille appelée grille de criticité. Cette dernière est considérée comme une balance qui nous permet de peser le risque et de décider s'il est acceptable ou inacceptable. A l'issue d'un tel résultat qu'on décide de l'opportunité des mesures nécessaires pour maîtriser ce risque.

1.3. Processus de gestion des risques

Bien qu'il existe des différences importantes entre les termes liés à la gestion des risques, la définition de processus de gestion des risques est relativement identique dans tous les référentiels et les normes [ISO/CEI 51, 1999], [IEC 61511, 2003]. Dans le cadre de la gestion des risques, l'analyse et l'évaluation des risques peuvent être menées, selon la nature et la qualité de l'information et de données recueillies sur le système par plusieurs façons, qualitative, semi-quantitative ou quantitative. Dans ce qui suit et pour chaque approche, nous présentons quelques méthodes.

Dans les guides [ISO/CEI 73, 2002] et ISO/CEI 51, 1999], la gestion des risques est définie comme l'ensemble des activités coordonnées, menées en vue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable, à un moment donné et dans un contexte donné.

Le processus de gestion des risques est un processus itératif incluant les étapes suivantes (figure 1.1) :

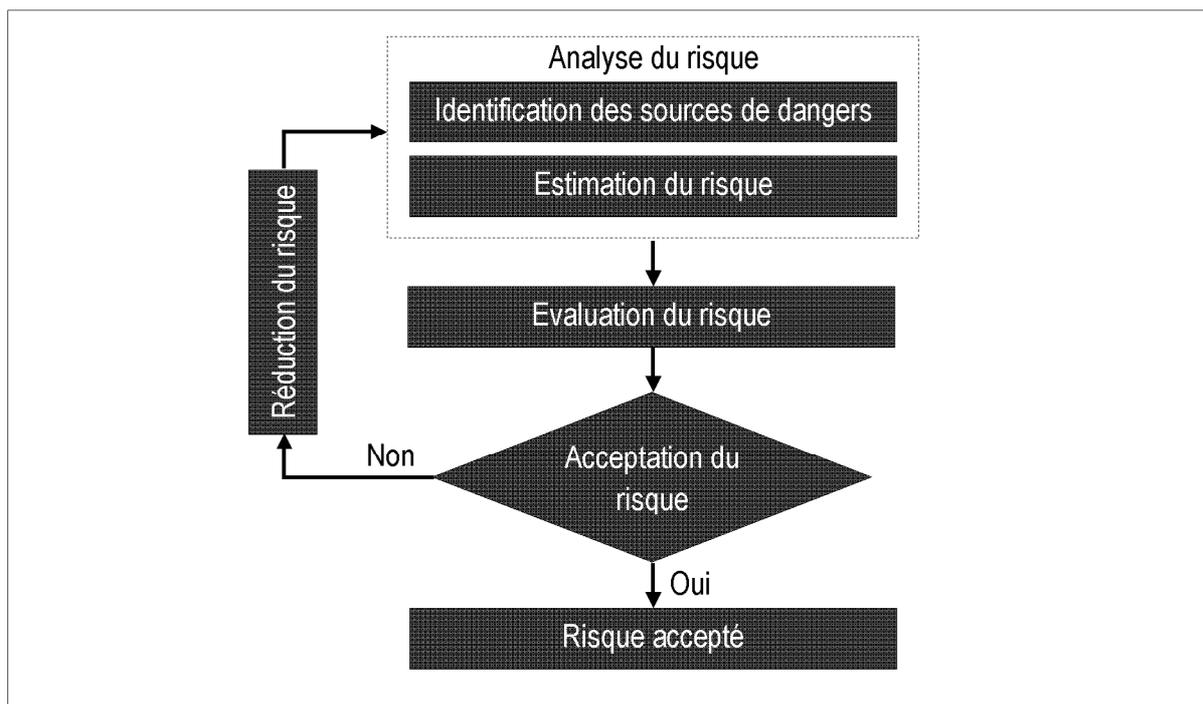


Figure 1.1 - Processus de gestion des risques [ISO/CEI 51, 1999]

1.3.1. Analyse du risque

L'analyse des risques occupe une place centrale dans le processus de gestion des risques. Cette étape sert à définir le système ou l'installation à étudier en recueillant toutes les informations et données nécessaires. Dans ce volet, une description à trois niveaux, structurel, fonctionnel et temporel est indispensable afin de mener une analyse efficace et atteindre les objectifs voulus en matière de maîtrise des risques. Dans un premier temps, les principales sources de dangers et les scénarios d'accident doivent être recensés et identifiés. La complexité de certains systèmes étudiés requiert l'utilisation des outils d'analyse aidant à l'identification des dangers [INERIS DRA-35, 2003]. Citons par exemple HAZID (Hazard Identification), HAZOP (Hazard and Operability Study), APD (Analyse Préliminaire de Dangers) et d'autres. Ces outils d'analyse permettent aussi d'identifier les différentes barrières de sécurité existantes dans le système étudié. Une fois le danger est identifié, le risque associé doit être estimé. L'estimation peut être qualitative, semi-quantitative et/ou quantitative en termes de probabilité de son occurrence et de la gravité de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement.

1.3.2. Evaluation du risque

Après avoir estimé le risque, on doit le comparer aux critères d'acceptabilité établis préalablement par l'entreprise concernée. Cette évaluation permet de prendre une décision sur l'acceptabilité ou l'inacceptabilité de chaque risque [ISO/CEI 51, 1999], c'est-à-dire, déterminer s'il convient d'accepter le risque tel qu'il est ou bien de le réduire.

1.3.3. Acceptation du risque

L'acceptabilité d'un risque est faite à partir de ses deux paramètres. Le niveau du risque quantifié sera positionné dans une matrice d'évaluation et en fonction des critères d'acceptabilité retenus qu'on juge

de l'acceptabilité ou la non-acceptabilité du risque [ISO/CEI 51, 1999]. Si le risque est jugé acceptable, le processus de gestion sera terminé et le risque jugé sera surveillé. Dans le cas contraire, le processus continue en passant à l'étape de réduction.

Dans le cas où les critères de risque sont exprimés en termes de fréquence maximale tolérable ou acceptable pour des conséquences bien définies (cas de mort, par exemple), le risque estimé sera comparé à ces fréquences. Les courbes F/N décrivent parfaitement ce type de critères.

1.3.4. Réduction du risque

Cette étape consiste à mettre en œuvre les différentes mesures et barrières de prévention et de protection afin de réduire l'intensité du phénomène dangereux (réduction potentielle de danger, atténuation des conséquences) et diminuer sa probabilité d'occurrence [Kirchsteiger, 1999]. Outre les améliorations techniques et de fiabilité d'équipements, la prévention passe aussi par une meilleure prise en compte des facteurs de risque liés à l'organisation et aux personnes. Le choix des actions préventives à engager est effectué en comparant les coûts de leur mise en œuvre avec les coûts des conséquences de risque, en tenant compte de leur probabilité d'apparition. Un suivi régulier de l'évolution des risques est recommandé dans la démarche de gestion des risques afin de contrôler et d'assurer la pertinence des actions préventives engagées et de corriger les dispositions prévues [INERIS DRA-35, 2003].

1.4. Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques

Dans cette partie nous allons décrire brièvement les principales méthodes utilisées dans une démarche d'analyse des risques. Ces méthodes seront classées dans trois principales catégories : méthodes qualitatives, méthodes semi-quantitatives et méthodes quantitatives (voir figure 1.2).

1.4.1. Méthodes qualitatives

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toute autre analyse. En effet, elle permet la bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants [Villemeur, 1988]. Pour une bonne évaluation qualitative du risque, cette approche ne s'appuie pas explicitement sur des données chiffrées, mais elle se réfère à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le retour d'expérience et les jugements d'experts [Kirchsteiger, 1999]. Cette approche nécessite alors une très bonne connaissance des différents paramètres et causes liés au système étudié. Dans quelques études de dangers, cette approche peut être suffisante pour atteindre les objectifs voulus si elle est bien menée et justifiée.

De nombreux outils d'analyse et d'évaluation des risques à caractère qualitatif existent, parmi lesquels nous retrouvons l'APR et HAZOP, présentées ci-après.

1.4.1.1. Analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques est un outil à caractère qualitatif utilisé et appliqué jusqu'à l'heure actuelle dans de nombreuses industries surtout quand il s'agit de connaître et d'évaluer les différents éléments et situations dangereuses dans un système ou installation en phase de conception [Villemeur, 1988]. Les étapes de cette méthode peuvent être résumées comme suit :

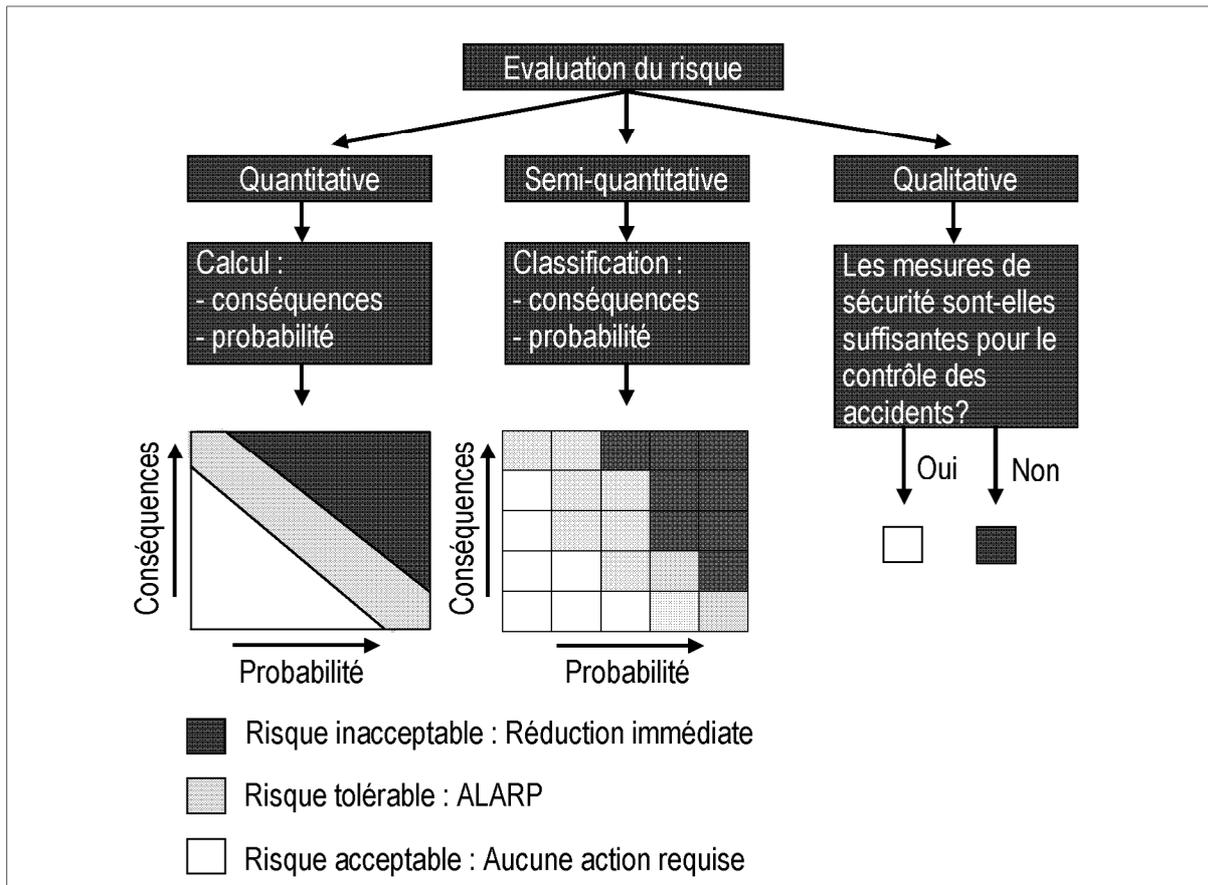


Figure 1.2 - Classification générale des méthodes d'analyse des risques [Dziubiński et al., 2006]

Dans un premier temps, cette méthode permet d'identifier et de lister les éléments du système et les événements pouvant conduire à des situations dangereuses et des accidents. A ce niveau, on analyse des séquences d'événements qui conduisent à un simple incident ou à un accident grave.

Dans un second temps, il s'agit d'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels. Enfin, on doit prévoir toutes les mesures préventives permettant de maîtriser ou d'éliminer les situations dangereuses et les événements causant les accidents potentiels.

1.4.1.2. Hazard and operability study (HAZOP)

La méthode HAZOP est un outil qualitatif très utilisé en particulier dans l'industrie pétrochimique. Généralement, HAZOP représente une extension de l'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE). Elle consiste à détecter des problèmes potentiels qui peuvent causer un écart par rapport à la conception d'origine et à voir les causes et les conséquences de ces écarts. Cette méthode est mise en œuvre à la fin de phase de conception et précisément au début de phase de réalisation des systèmes industriels puisqu'elle s'appuie sur les plans de circulation des fluides et les schémas détaillés PID (Piping and Instrumentation Diagram) du système étudié [IEC 61882, 2001].

Son déroulement est comme suit :

Après avoir décomposé le système en parties (lignes de circulation), tous les paramètres associés au fonctionnement du système doivent être identifiés, généralement les paramètres rencontrés concernent

la température, la pression, le débit et le temps [INERIS DRA-35, 2003]. Ces derniers peuvent subir des contraintes qui vont rendre anormal le fonctionnement du système. Citons par exemple :

- augmentation / diminution de débit,
- diminution / élévation de la température ou de la pression,
- dépassement du temps, ...etc.

Ces variations (dérives potentielles) des paramètres engendrent des conséquences potentielles et pour prévenir ces conséquences, HAZOP identifie pour chaque dérive les moyens de détection et les différentes barrières de sécurité prévues pour réduire l'occurrence des accidents.

1.4.2. Méthodes semi-quantitatives

L'analyse semi-quantitative des risques est une approche qui n'est ni purement qualitative ni purement quantitative [Desroches, 1995]. Cette démarche a pour but d'enlever l'aspect hautement subjectif de l'information utilisée dans l'approche qualitative en lui donnant plus de précision et d'exactitude, et en même temps pour assouplir et combler le manque de la robustesse des données de l'approche quantitative.

De nombreux outils et méthodes d'analyse et d'évaluation à caractère semi-quantitatif ont été développés. Dans ce qui suit, on présentera une méthode parmi les plus utilisées dans l'évaluation des risques.

1.4.2.1. Analyse des couches de protection (LOPA)

La méthode LOPA fut historiquement l'une des méthodes récentes qui a été développée à la fin des années 1990 par le CCPS (Center for Chemical Process Safety) [CCPS, 2001]. LOPA est un acronyme qui signifie "Layers Of Protection Analysis" (analyse des couches de protection). Cette méthode fut utilisée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes et des procédés industriels chimiques, pétrochimiques et nucléaires [IEC 61511, 2003].

1.4.3. Méthodes quantitatives

L'analyse quantitative des risques est considérée comme l'approche la plus retenue pour une bonne prise de décision sur les risques. Cette approche consiste à caractériser les différents paramètres d'analyse des risques par des mesures probabilistes [Desroches, 1995].

L'obtention de ces mesures passe généralement par un traitement mathématique [Villemeur, 1988] en prenant en compte les données relatives aux différents paramètres évalués et aussi aux informations qui sont de nature quantitative.

À l'égard de l'application de cette démarche, une attention particulière aux données utilisées, à leur origine et à leur adéquation aux cas étudiés doit être portée, car une simple erreur remettra l'étude en cause.

L'arbre des événements (AdE) et l'analyse quantitative des risques (QRA) représentent par excellence ce type de méthodes.

1.4.3.1. Arbre des événements (AdE)

L'arbre des événements est une méthode déductive [Villemeur, 1988] qui consiste à partir d'un événement initiateur conduisant à des conséquences redoutées à envisager l'échec ou le succès des fonctions de sécurité puis définir les événements susceptibles de se produire en aval de l'événement initiateur, les barrières de sécurité et leurs fonctions doivent être identifiées en leurs affectant des probabilités de défaillance. Comme le montre la figure (1.3), l'arbre des événements construit permet d'identifier les différentes séquences d'événements susceptibles de conduire ou non à des conséquences catastrophiques.

Les étapes de la méthode sont : (1) définition de l'élément initiateur, (2) identification des barrières de sécurité et leurs fonctions, (3) construction de l'arbre, (4) traitement de l'arbre.

La probabilité d'occurrence de l'événement initiateur par celles des barrières de sécurité existantes pouvant empêcher le scénario d'accident.

L'arbre des événements sert comme support pour la méthode QRA. Pour ce, nous ferons appel à cette méthode pour représenter les scénarios d'accidents.

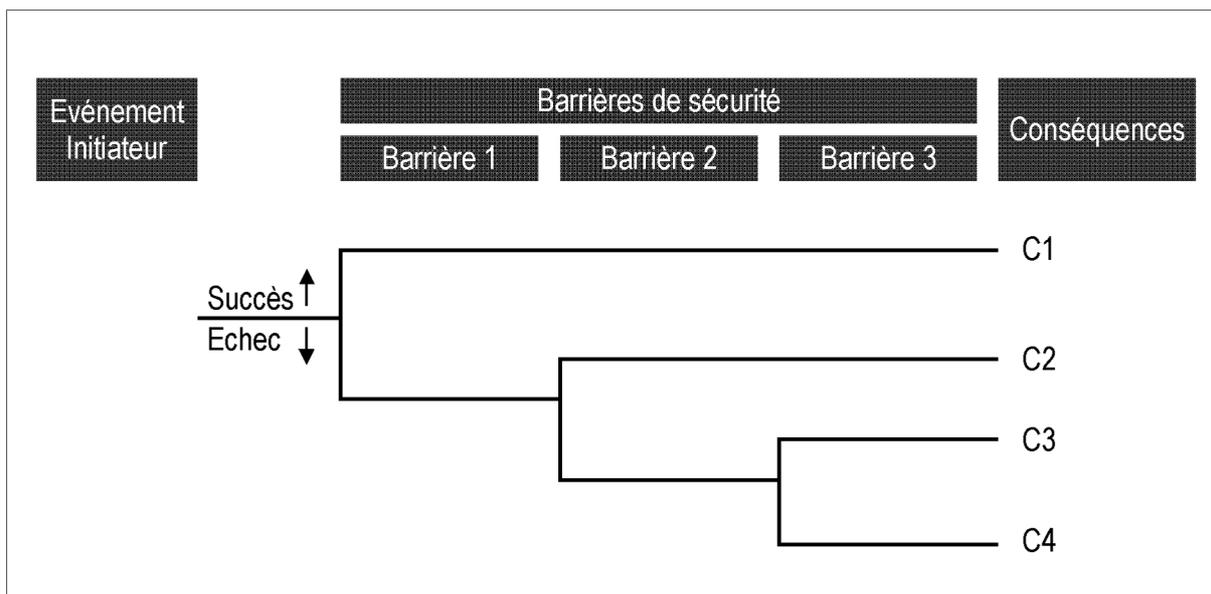


Figure 1.3 - Schéma d'un arbre des événements

1.4.3.2. Méthodologie d'analyse quantitative des risques (QRA)

L'analyse quantitative des risques (QRA) est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette approche consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences, moyennant des méthodes d'analyse des risques et des modèles mathématiques des effets et de vulnérabilité. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et par suite appliquer les mesures qui répondent convenablement à cette estimation.

1.4.3.2.1. Objectifs de l'analyse quantitative des risques

La démarche de gestion des risques prévue dans le cadre de l'étude de dangers et d'impacts environnementaux des procédés industriels prévoit l'analyse quantitative des risques et l'identification de mesures de prévention des accidents technologiques majeurs. Ses objectifs sont :

- Identifier les différentes sources de dangers potentiels et de nuisance générées 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.

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

- Que peut-il arriver ? 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 ?

Dans le but précis de répondre à ces questions, la partie suivante du présent chapitre est basée sur un processus en plusieurs étapes.

1.4.3.2.2. Etapes de l'analyse quantitative des risques

La démarche d'analyse quantitative des risques (QRA) est généralement réalisée à travers une série d'étapes ou d'activités qui sont schématisées dans la figure (1.4).

a) Collecte des informations pertinentes

Cette première étape consiste à recueillir toutes les informations pertinentes. Ceci peut inclure des informations géographiques sur l'emplacement de la zone étudiée : situation géographique ; données climatiques (humidité, rayonnement solaire, rose des vents, stabilité atmosphérique) ; les propriétés physico-chimiques des substances impliquées et enfin, des informations sur le processus ou le système analysé.

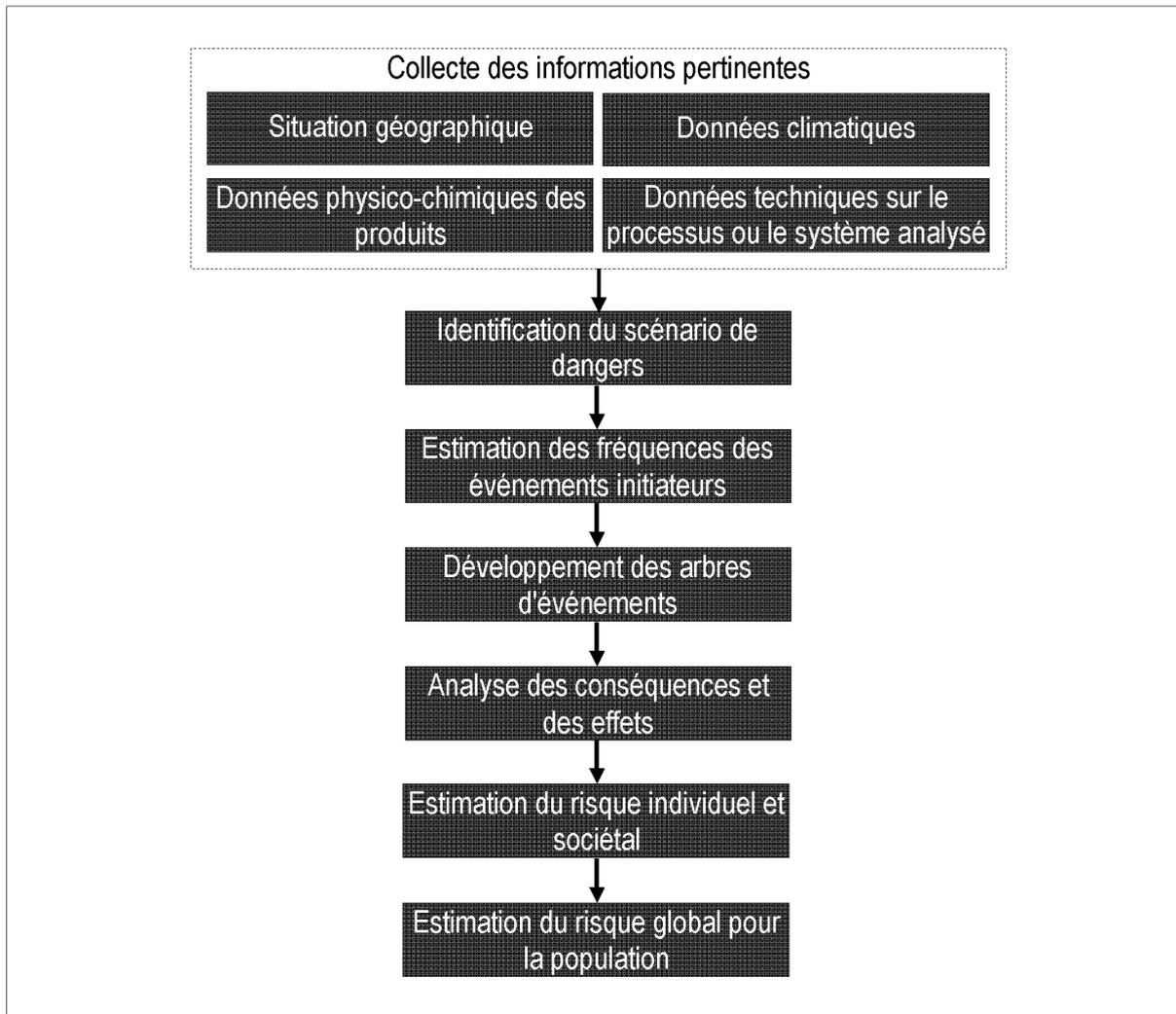


Figure 1.4 - Principales étapes d'une analyse quantitative des risques [Ronza, 2007]

b) Identification du scénario de dangers

Une fois que les informations pertinentes sont acquises, se révèle indispensable d'identifier les différents scénarios de dangers envisagés (par exemple : rupture d'une conduite de gaz, explosion d'un séparateur sous pression, ...etc).

Les scénarios d'accidents sont développés sur la base d'une analyse qualitative des risques en utilisant des outils traditionnels tels que HAZOP, AMDEC (voir § 1.4.1.2). L'application préalable de ces méthodes d'analyse des risques permet d'identifier les causes et les conséquences et aussi les différentes barrières de prévention et de protection qui seront retenues et exploitées pour l'élaboration des scénarios de dangers de la QRA.

c) Estimation des fréquences des événements initiateurs

Pour les scénarios d'accidents identifiés, il est nécessaire d'estimer les fréquences des événements initiateurs respectives. Pour pouvoir estimer ces événements initiateurs en termes de fréquence, la QRA fait appel aux différentes méthodes d'estimation telles que le retour d'expérience, le jugement

d'experts et les données génériques établies par les banques de données. Le tableau (1.1) montre une sélection des valeurs les plus utilisées dans les industries pétrolières.

Tableau 1.1 - Fréquences des événements de perte de confinement [TNO, 1999]

System		Instantaneous release of the complete inventory	Release of the complete inventory in 10 min	Continuous release from a hole with $d_s = 10$ mm
Stationary vessels	Pressure vessel	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹
	Process vessel	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
	Reactor vessel	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
Atmospheric tanks	Single containment tank	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-4}$ year ⁻¹
	Mounded tank	$1 \cdot 10^{-8}$ year ⁻¹		
Heat exchangers	Dangerous substance outside pipes	$5 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-3}$ year ⁻¹
	Dangerous substance inside pipes	$1 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-3}$ year ⁻¹	$1 \cdot 10^{-2}$ year ⁻¹
Road tankers and tank wagons in an establishment	Instantaneous release of the complete inventory	Continuous release from a hole (largest connection size)	Full bore rupture of the loading/unloading hose	Leak of the loading/unloading hose
Pressurized tank	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$4 \cdot 10^{-6}$ h ⁻¹	$4 \cdot 10^{-5}$ h ⁻¹
Atmospheric tank	$1 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ year ⁻¹	$4 \cdot 10^{-6}$ h ⁻¹	$4 \cdot 10^{-5}$ h ⁻¹
Pipes		Full bore rupture	Leak ($d = 0.1 \cdot d_s$, max 50 mm)	
$d < 75$ mm		$1 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	
$75 \text{ mm} \leq d \leq 150$ mm		$3 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$2 \cdot 10^{-6}$ m ⁻¹ year ⁻¹	
$d > 150$ mm		$1 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	$5 \cdot 10^{-7}$ m ⁻¹ year ⁻¹	
Installation		Discharge with maximum discharge rate		
Pressure relief device		$2 \cdot 10^{-5}$ year ⁻¹		

d) Développement des arbres d'événements

Chaque événement initiateur conduit à des différentes séquences d'événements qui, à leurs tours, susceptibles de conduire à des différents types d'accidents. Par conséquent, il est nécessaire de développer les arbres d'événements correspondants en introduisant la probabilité associée à chaque séquence afin d'estimer les fréquences des scénarios d'accidents (voir § 1.4.3.1).

La détermination des fréquences des scénarios d'accidents est une étape clé qui sert à évaluer d'une manière chiffrée les scénarios d'accidents en termes de leur probabilité d'occurrence et leurs conséquences engendrées.

e) Analyse des conséquences et des effets

Une fois que les arbres d'événements sont établis, les conséquences doivent être déterminées en estimant 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 environnantes et l'intégrité de l'environnement naturel et humain pourraient être affectées. Ces informations sont retenues pour la planification d'urgence.

Les conséquences d'un scénario d'accident se définissent à l'aide de deux notions : (1) les caractéristiques de l'accident et (2) son impact. Les caractéristiques sont déterminées à partir de la modélisation de l'accident et l'impact est établi en modélisant l'effet de ces caractéristiques sur les éléments du milieu environnant. Par exemple, lors d'un incendie (événement accidentel), la radiation thermique (caractéristique) entraîne des brûlures (impact) aux individus exposés [Théberge, 2000].

Les conséquences peuvent être calculées à l'aide de tables et abaques, ou à l'aide de formules mathématiques (voir § 3.2.5.2) et de modèles de vulnérabilité (voir § 1.4.3.2.4) permettant la modélisation des accidents potentiels et de leurs conséquences sur les récepteurs. Plusieurs auteurs présentent les fondements théoriques de ces modèles [CCPS, 1994], [CCPS, 1999], [Lee's, 2005] et ces approches de calculs [EPA, 1999], [TNO, 2005], [TNO, 1992].

Des logiciels permettent une automatisation de certaines approches de calcul sont disponibles sur internet, notamment le logiciel de l'EPA "ALOHA", s'ajoutent les logiciels commerciaux tels que "PHAST" et "SAFETI" [DNV, 2006].

f) Estimation du risque individuel et sociétal

Lors de l'estimation des risques liés à une installation, le risque peut être calculé pour chaque type de conséquences (décès, blessures, pertes économiques, ...etc.). Cependant, l'analyse quantitative des risques prend souvent en compte les effets mortels, car les critères d'acceptabilité des risques portent principalement sur le risque de décès.

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 des deux métriques de représentation que sont le risque individuel et le risque sociétal.

Ces deux notions fondamentales dans la QRA sont particulièrement bien définies dans les guides [TNO, 1999], [TNO, 1997] élaborés par le Committee for the Prevention of Disasters pour le VROM (Ministère Néerlandais Chargé de l'Environnement). Cet ensemble de guides forme le "Guide pour l'Analyse Quantitative des Risques aux Pays-Bas", qui est à la disposition de l'analyste afin de l'aider notamment dans la phase de quantification des risques.

f.1) Risque individuel

Le risque individuel peut être défini comme une fonction de coordonnées spatiales qui représente la probabilité par an qu'une personne exposée de façon permanente au danger soit tuée [Casal, 2008]. L'unité utilisée pour mesurer le risque individuel est an⁻¹.

La notion de risque individuel est généralement représentée sur une carte par des contours d'iso-risque individuel (distance d'effet maximale à laquelle un individu est exposé à une probabilité de mort) (voir § 1.4.3.2.3).

Le risque individuel à un endroit donné est défini mathématiquement par [CCPS, 2000] :

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{i=n} IR_{x,y,i} \quad (1.1)$$

Où : $IR_{x,y}$ est le risque individuel total de décès à l'endroit géographique (x,y) (an^{-1}), $IR_{x,y,i}$ est le risque individuel de décès à l'endroit géographique (x,y) suite à un scénario d'accident "i" (an^{-1}) et "n" est le nombre total de scénarios d'accidents identifiés dans l'analyse.

Le $IR_{x,y,i}$ est exprimé en fonction de la fréquence et de la probabilité par :

$$IR_{x,y,i} = f_{Ci} \cdot P_{Fi} \quad (1.2)$$

Où : f_{Ci} est la fréquence du scénario d'accident "i" (an^{-1}) et P_{Fi} est la probabilité que ce scénario entraîne un décès à l'endroit (x,y) .

La valeur de la P_{Fi} est obtenue en appliquant les modèles de vulnérabilité (voir § 1.4.3.2.4). Enfin, la f_{Ci} est calculée à partir de la fréquence de l'incident (événement initiateur) et de la probabilité que la séquence des événements menant au scénario d'accident "i" :

$$f_{Ci} = f_i \cdot P_{\text{sequence } i} \quad (1.3)$$

Où : f_i est la fréquence d'occurrence de l'incident ou l'événement initiateur (an^{-1}) et $P_{\text{sequence } i}$ est la probabilité globale de la séquence d'événements qui mènent au scénario d'accidents "i".

Les événements initiateurs ayant des fréquences de moins de $10^{-9} an^{-1}$ ne sont pas généralement retenus dans l'analyse quantitative des risques. Il en est de même pour les accidents dont la probabilité de létalité au-delà d'une certaine distance est de 1% [Casal, 2008].

f.2) Risque sociétal

Le risque sociétal est la relation entre la fréquence d'occurrence d'un accident et le nombre de personnes subissant l'impact (généralement le décès) de l'accident, dans une population donnée. Son calcul est complexe puisqu'il demande la connaissance de l'occupation des sols et des mouvements de population dans le temps (présence selon l'heure de la journée, selon le jour de la semaine, selon les saisons), afin d'établir le profil de la population exposée. Ce type de risque nous informe notamment de la probabilité qu'un accident dans une installation étudiée ait lieu au cours d'une année et occasionne le décès de plus de "N" individus [Théberge, 2000].

La notion de risque sociétal est généralement représentée par des courbes dites F/N (fréquence annuelle de N morts ou plus en fonction du nombre de fatalités) [Casal, 2008] (voir § 1.4.3.2.3).

Le risque sociétal est exprimé mathématiquement par [Casal, 2008] :

$$\text{Risque sociétal} = \iint (\text{risque individuel}) \cdot [\text{densité de la population } (x,y)] dx dy \quad (1.4)$$

g) Estimation du risque global pour la population

En combinant les conséquences et leurs fréquences correspondantes, on obtient le risque individuel à n'importe quelle distance souhaitée et par conséquent, on estime le risque global pour la population.

Le risque individuel moyen est calculé comme la moyenne des risques individuels de toutes les personnes exposées dans un établissement donné. Notons que le risque individuel moyen est souvent calculé pour la population exposée, mais il pourrait également être calculé pour la population totale

dans une zone donnée sans prendre en compte si la totalité ou une partie seulement des personnes sont exposées. Cela peut considérablement réduire la valeur du risque moyen.

Le risque individuel moyen pour la population exposée est calculé par [CCPS, 2000] :

$$IR_{av} = \frac{\sum_{x,y} IR_{x,y} \cdot P_{x,y}}{\sum_{x,y} P_{x,y}} \quad (1.5)$$

Où : IR_{av} est le risque individuel moyen (population exposée) (an^{-1}) et $P_{x,y}$ est le nombre de personnes dans l'endroit (x,y) .

1.4.3.2.3. Cartographie du risque

a) Contours de risque individuel

Les contours représentent les niveaux de risque individuel autour de l'installation analysée (voir figure 1.5). Un contour de risque relie tous les endroits géographiques autour d'une activité dangereuse à un risque individuel égal, c-à-d tous les endroits ayant la même probabilité globale de létalité. Afin d'établir un contour de risque, il est nécessaire de calculer les contributions respectives des différents scénarios d'accidents, dont chacun a sa propre probabilité de létalité. Le risque global résultant est la somme des risques correspondants à chacun des scénarios d'accidents.

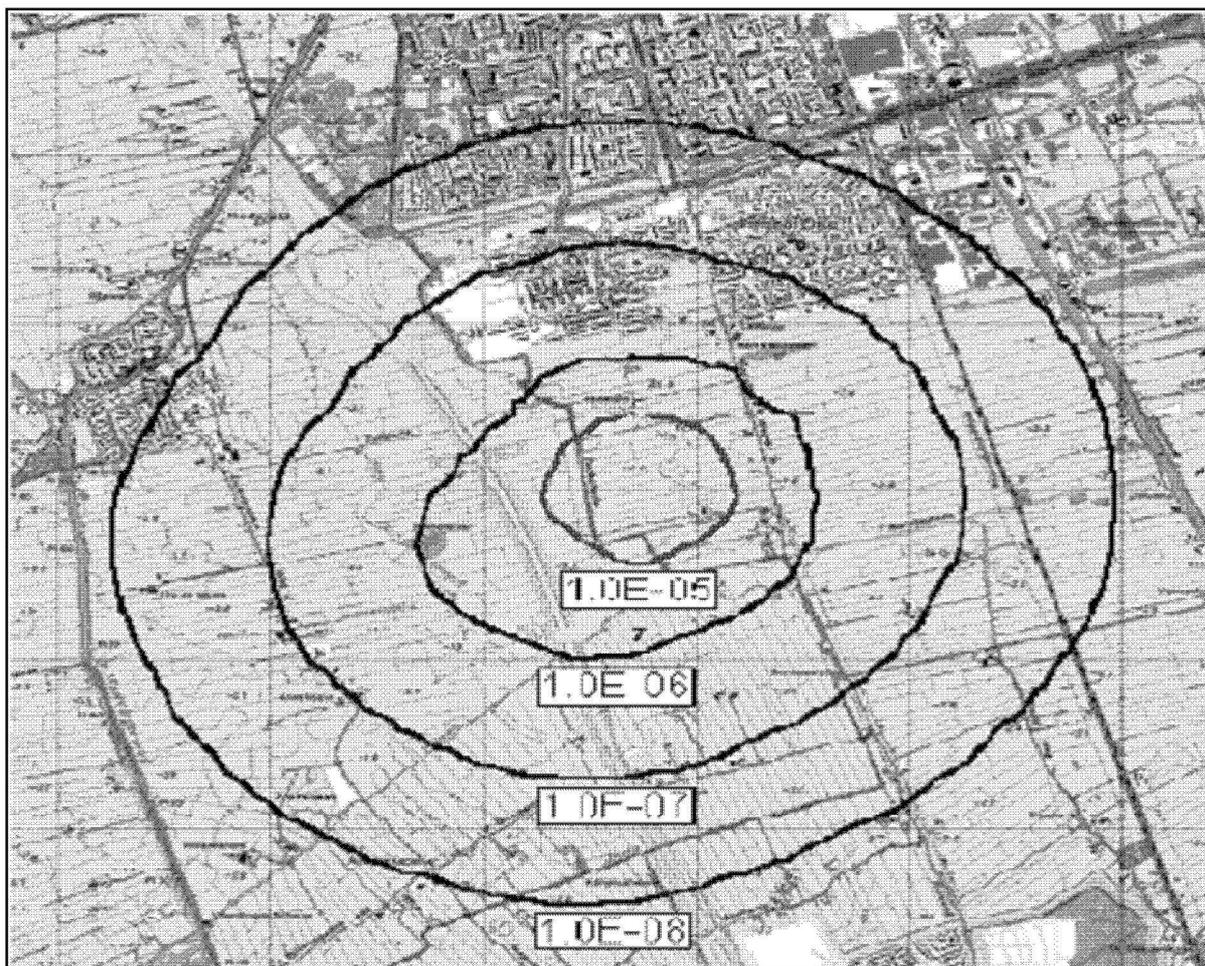


Figure 1.5 - Exemple de contours de risque individuel [TNO, 1999]

Afin d'établir les contours de risque, il est nécessaire d'effectuer les calculs correspondants aux :

- différents scénarios d'accidents,
- différentes réactions du système suite à un incident particulier (défaillance du système, intervention de l'opérateur, ...etc),
- différentes conditions météorologiques (stabilité atmosphérique, direction et vitesse du vent, ...),
- différents lieux d'ignition.

Les contours de risque individuel peuvent être de forme circulaire, si les effets physiques des accidents sont répartis uniformément dans toutes les directions, ou de forme irrégulière si l'intensité des effets varie en fonction de la direction. On peut donc distinguer entre le risque radial et le risque directionnel.

Le risque radial produit des contours de risque circulaires, où la valeur du risque diminue avec le rayon. Les scénarios d'accidents typiquement liés à ce type de risque sont le BLEVE et certaines explosions, car le rayonnement thermique et la surpression sont répartis uniformément dans toutes les directions.

Le risque directionnel produit des contours de risque irréguliers dus à la distribution non homogène de la direction du vent en fonction du temps (rose des vents), aux diverses catégories possibles de la stabilité atmosphérique et à certains paramètres directionnels physiques. Les scénarios d'accidents liés à ce type de risque sont la dispersion atmosphérique des substances inflammables ou toxiques et l'éjection des missiles lors de l'explosion des récipients cylindriques.

Quand les risques radial et directionnel chevauchent, les contours du risque globaux sont obtenus en ajoutant les risques correspondants à chaque scénario d'accidents et par conséquent, la forme du contour sera modifiée.

b) Procédure de calcul des contours de risque individuel

La procédure de calcul des contours de risque individuel est généralement réalisée à travers une série d'étapes qui sont citées ci-après (voir figure 1.6) :

1. Définir un maillage de points permettant de calculer le risque individuel. Le maillage doit inclure l'activité/usine analysée et doit couvrir au moins la distance maximale sur laquelle les conséquences mortelles des scénarios d'accidents sont observées. Les mailles sont généralement de 25mx25m pour des distances de moins de 300 m et de 100mx100m pour des distances plus grandes.
2. Etablir les coordonnées (x,y) du point à partir duquel le scénario d'accident (j) commence. Etablir la fréquence (f_{ij}) de l'événement initiateur pour ce scénario d'accident.
3. Etablir les données météorologiques : la classe de stabilité et sa probabilité correspondante (P_M). Etablir la probabilité de la direction du vent (rose des vents) pour chaque secteur (P_W). $P_M = P_W = 1$ pour les scénarios d'accidents qui produisent des radiations thermiques.
4. Déterminer la probabilité du scénario d'accident final (P_{jf}). Déterminer la surface couverte par des effets létaux et les probabilités de décès (P_d) pour chaque classe de stabilité et direction du vent pour chaque point de maille.

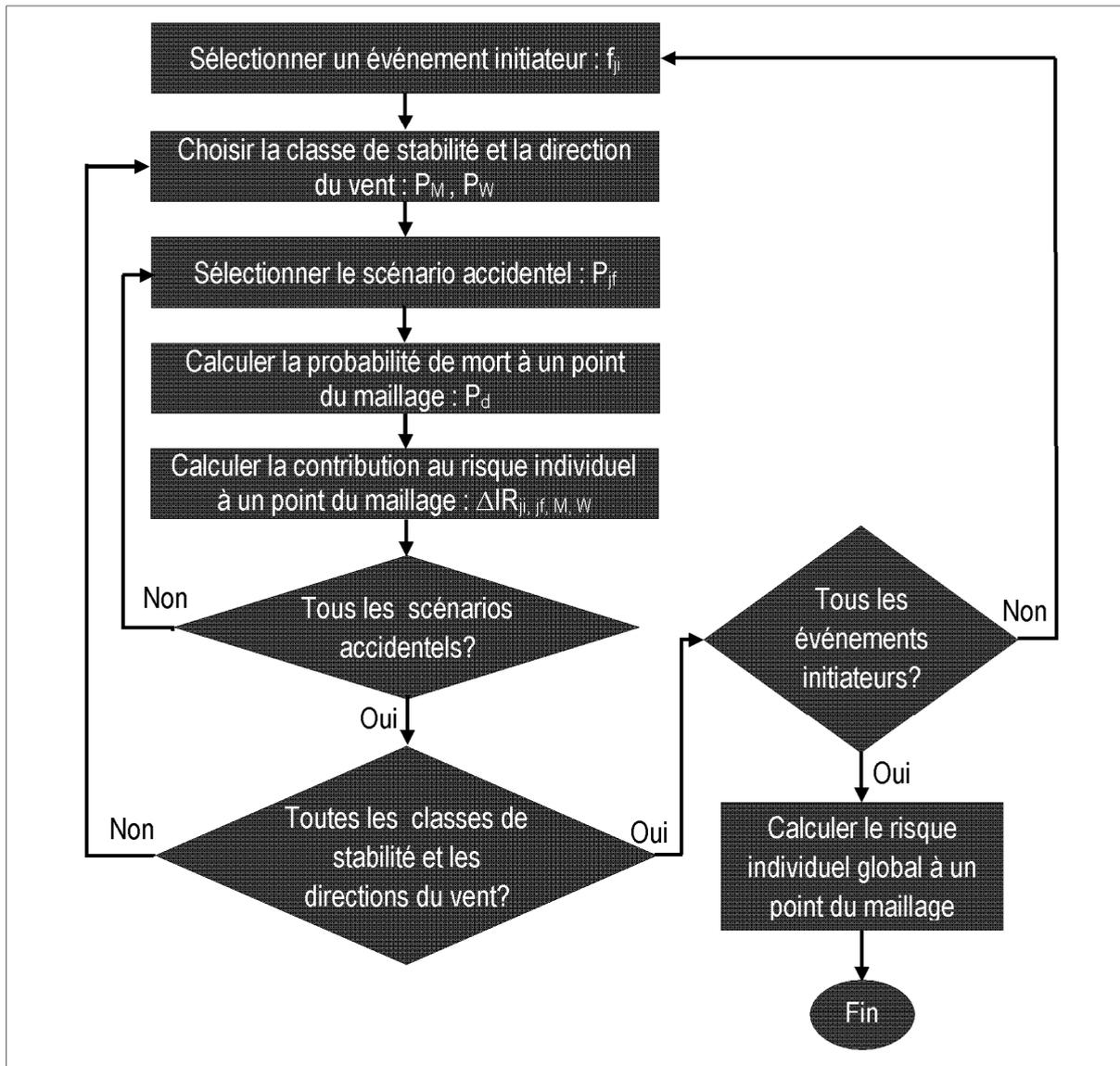


Figure 1.6 - Procédure de calcul des contours de risque individuel [Casal, 2008]

5. Calculer la contribution au risque individuel ($\Delta IR_{ji, jf, M, W}$) pour le scénario d'accident considéré, incluant la fréquence de l'événement initiateur, la probabilité du scénario d'accident final, la probabilité de la classe de stabilité, la probabilité de la direction du vent et la probabilité de mort à un point donné de la maille :

$$\Delta IR_{ji, jf, M, W} = f_{ji} \cdot P_{jf} \cdot P_M \cdot P_W \cdot P_d \quad (1.6)$$

6. Le risque individuel global (IR) à un point donné de la maille est exprimé par :

$$IR = \sum_{ji} \sum_{jf} \sum_M \sum_W \Delta IR_{ji, jf, M, W} \quad (1.7)$$

Les contours de risque individuel sont généralement tracés pour des ordres de grandeur, car ce processus de calcul est assez complexe et est couramment effectué par l'utilisation des codes informatiques appropriés [DNV, 2006].

c) Courbes F/N

Le risque sociétal est couramment représenté à l'aide de courbes dites F/N comme le montre la figure (1.7). Ces courbes sont obtenues en traçant la fréquence cumulative des scénarios d'accidents qui causent N ou plus de morts par an en fonction de N (généralement sur une échelle log-log).

Afin de calculer une courbe F/N, il est important que les fréquences et le nombre de morts soient combinés correctement. Le nombre de N_i de morts de chaque scénario d'accidents est calculé par [CCPS, 2000] :

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} \cdot P_{Fi} \quad (1.8)$$

Où $P_{x,y}$ est le nombre de personnes 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 morts et sa fréquence associée doivent être estimés pour chaque scénario d'accidents et par conséquent, la fréquence cumulative est exprimée par [CCPS, 2000] :

$$f_N = \sum_i f_{Ci} \text{ pour tous les scénarios d'accidents "i" pour lesquels } N_i \geq N \quad (1.9)$$

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

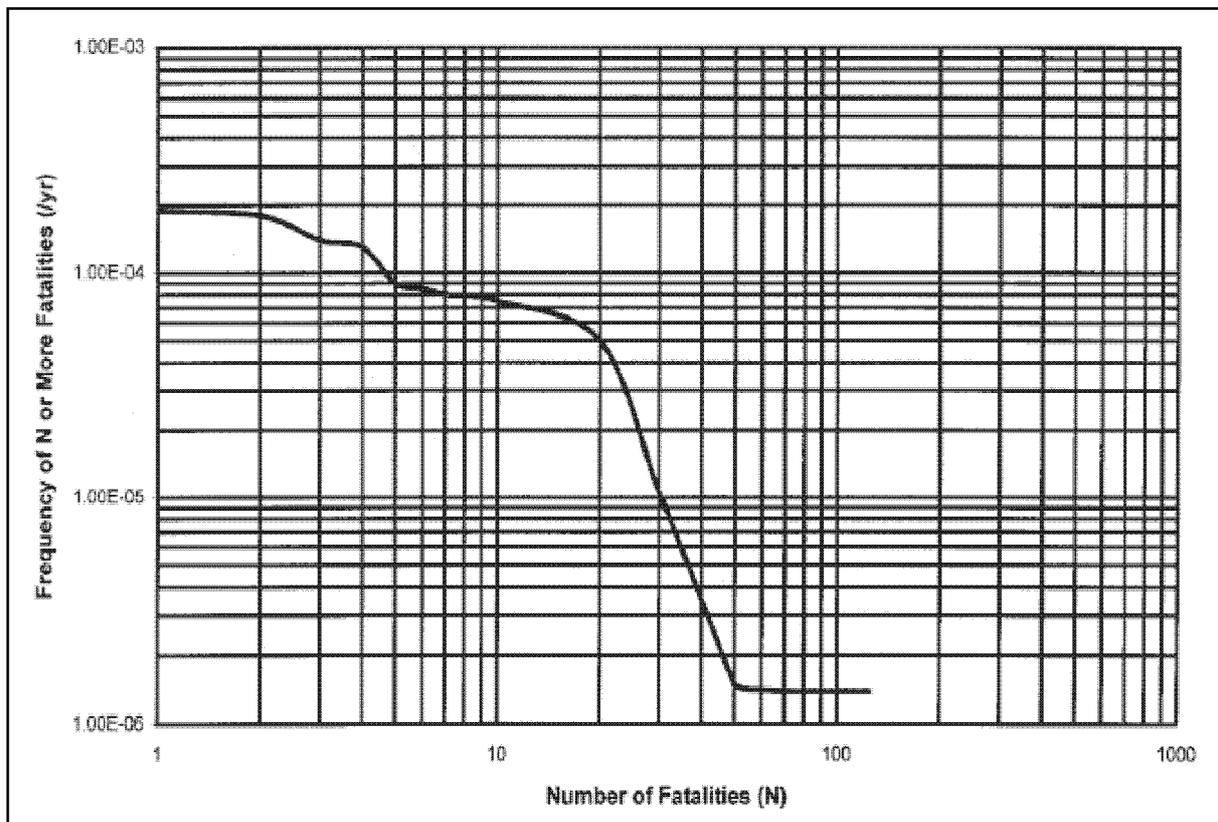


Figure 1.7 - Exemple d'une courbe F/N [CCPS, 2001]

1.4.3.2.4. Vulnérabilité

Une fois que les conséquences (caractéristiques) d'un accident (rayonnement thermique, surpression, dose d'une substance toxique) sont établies, ses effets doivent être déterminés en estimant les impacts sur les individus, les installations et l'environnement.

Cette estimation peut être faite à l'aide de tables et abaquages, ou à l'aide de formules et modèles mathématiques. La validité de l'estimation dépendra de la bonne application de ces modèles et comme dans d'autres domaines d'ingénierie, sur les critères et l'expérience de l'analyste. Ce chapitre donne un aperçu sur des différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour estimer les conséquences d'un accident.

a) Réponse de la population à un accident

Les individus d'une population ne répondront pas tous de la même manière lorsqu'ils sont exposés aux effets d'un accident (tels que le rayonnement thermique, la dose d'une substance toxique, la surpression d'une explosion). Pour une intensité ou une dose donnée, certains individus ne seront que légèrement touchés, tandis que d'autres seront sévèrement affectés, et la majorité montrera une réponse intermédiaire.

La réponse globale d'une population à une telle situation est généralement représentée par une distribution normale (voir figure 1.8) [Lee's, 2005] :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (1.10)$$

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

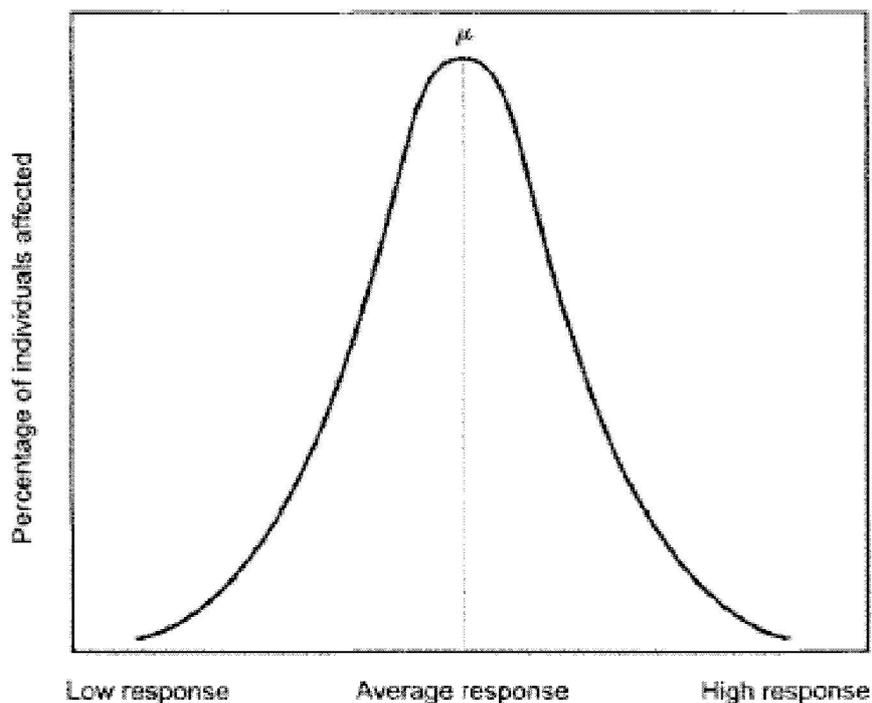


Figure 1.8 - Distribution normale : réponse d'une population à un accident majeur donné [Casal, 2008]

b) Analyse de probit

La fonction qui associe l'ampleur de la conséquence (par exemple, le rayonnement thermique d'un feu) au degré de dommages qu'elle occasionne (c-à-d relation dose-réponse), est nécessaire pour estimer les conséquences d'un accident. La méthode la plus utilisée souvent est l'analyse de probit, qui relie la variable probit à la probabilité.

La variable probit Y est une mesure du pourcentage d'une population soumise à une intensité donnée V qui entrainera un dommage donné. Cette variable suit une distribution normale avec une valeur moyenne de 5 et un écart normal de 1. La relation entre la variable probit Y et la probabilité P est exprimée par [CCPS, 2000] :

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] \cdot dV \tag{1.11}$$

Dans la pratique, la probabilité (variant entre 0 et 1) est remplacée par un pourcentage (de 0 à 100), qui est beaucoup plus pratique pour des buts d'analyse des risques. La figure (1.9) montre le graphe de la relation (1.11) entre la probabilité et la variable probit, et les données correspondantes sont regroupées dans le tableau (1.2). L'équation (1.11) transforme facilement la forme sigmoïde correspondante à la relation dose-réponse (par exemple, suppression-pourcentage des morts) en ligne droite (voir figure 1.10).

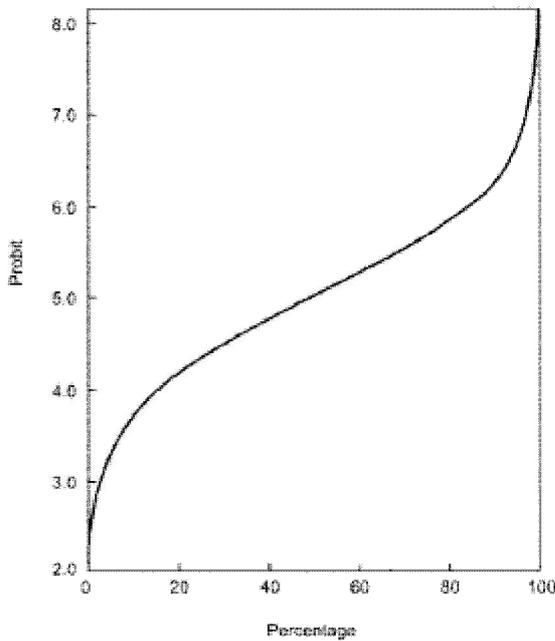


Figure 1.9 - Relation entre la variable probit et le pourcentage (la probabilité) [Casal, 2008]

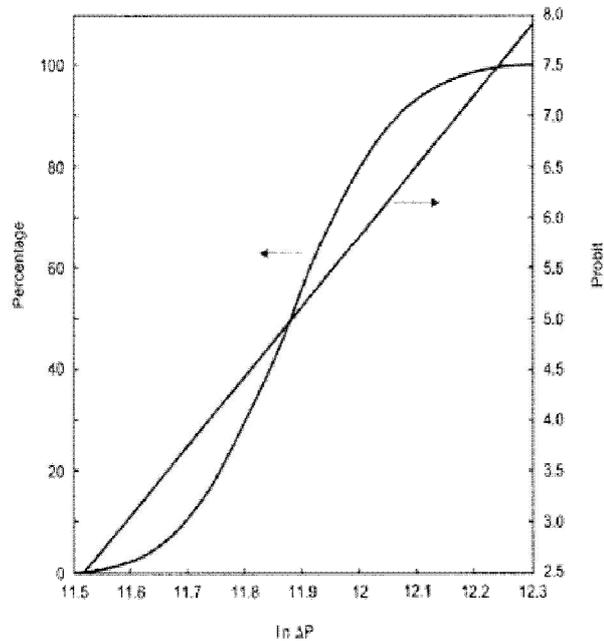


Figure 1.10 - Relation dose-réponse appliquée au cas de décès par hémorragie pulmonaire (ΔP : N/m²) [Casal, 2008]

Si le pourcentage de la population éprouvant une certaine réponse n'est pas tracé en fonction de l'intensité ou la dose, mais plutôt par rapport à son logarithme, la courbe résultante est beaucoup plus proche d'une distribution normale. Par conséquent, la relation suivante peut être établie entre la variable probit et V comme suit [CCPS, 2000] :

$$Y = 5 + \frac{\ln V - \mu}{\sigma} \quad (1.12)$$

Où μ et σ sont respectivement la moyenne et l'écart type de la distribution normale.

L'équation (1.12) peut être modifiée pour donner l'expression suivante, qui est généralement utilisée pour calculer la valeur de la variable probit Y [CCPS, 2000] :

$$Y = a + b \cdot \ln V \quad (1.13)$$

Où a et b sont des constantes déterminées expérimentalement à partir d'informations sur les accidents. V est une mesure de la dose de l'effet néfaste, qui peut être un seul paramètre (par exemple, la surpression d'une explosion) ou une combinaison de différents paramètres (par exemple, une combinaison de la radiation thermique et du temps dans le cas d'un incendie).

D'après [Lee's, 2005], l'équation de probit pour les effets létaux prend les formes suivantes en fonction des effets :

$$\text{Pour les produits toxiques : } Y = a + b \cdot \ln (C^n t) \quad (1.14)$$

Où a, b et n sont des constantes qui sont propres au produit étudié, C est la concentration (ppm) et t est le temps d'exposition (min).

$$\text{Pour les effets thermiques : } Y = a + b \cdot \ln (Q^{4/3} t) \quad (1.15)$$

Où Q est le flux reçu (W/m^2) et t est le temps d'exposition (s).

$$\text{Pour la surpression : } Y = a + b \cdot \ln (P^0) \quad (1.16)$$

Où a et b sont des constantes en fonction de l'effet considéré (éclatement des poumons, éclatement des tympans, ...) et P^0 est la surpression (N/m^2).

Une fois que la valeur de Y est déterminée, la variable probit doit être convertie en un pourcentage des personnes touchées, afin d'estimer les conséquences réelles de l'accident pour la population (c-à-d le nombre de blessés ou morts). Ceci peut être fait en utilisant les données du tableau (1.2).

Tableau 1.2 - Relation entre la variable probit et le pourcentage [CCPS, 2000]

%	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

Une autre expression qui rapporte le pourcentage de personnes affectées par un effet donné à la variable probit, qui peut être appropriée à certaines procédures de calcul, est exprimée par [Casal, 2008] :

$$\text{Pourcentage} = 50 \left[1 + \frac{Y - 5}{|Y - 5|} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{|Y - 5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1.17)$$

Actuellement, la méthode probit est largement utilisée pour estimer les conséquences des accidents majeurs sur les individus.

1.4.3.2.5. Acceptabilité et critères d'acceptabilité du risque

La définition de critères d'acceptabilité du risque est une étape clé dans le processus de gestion du risque dans la mesure où elle va motiver la nécessité de considérer de nouvelles mesures de réduction du risque et rétroactivement, influencer la façon de mener l'analyse et l'évaluation des risques.

Il est entendu que ces critères sont fonction du contexte de l'établissement concerné et des objectifs poursuivis dans la gestion des risques. Il existe plusieurs conceptions générales susceptibles d'inspirer le choix de ces critères. Dans ce qui suit, on présentera un critère parmi les plus utilisés dans l'évaluation des risques.

a) Critère de Farmer

Lors du second colloque de l'AIEA consacré à la sûreté des réacteurs, Farmer présente un texte appelé à devenir célèbre, intitulé "Siting Criteria, A New Approach", où il développe une nouvelle méthode d'évaluation de la sûreté d'un réacteur [Farmer, 1967].

L'approche proposée par Farmer consiste à mesurer le risque exprimé en termes de 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 défaillance des matériels successifs qui y conduiraient et 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 comme ordonnées les probabilités sous forme d'intervalle de temps moyen entre deux événements (en années de fonctionnement de réacteur), et comme abscisses les quantités de rejets d'iode correspondantes. A partir de ce graphique probabilités-conséquences (voir figure 1.11), Farmer propose un critère de sûreté sous 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 risque faible.

A ce propos, les décisions relatives aux risques sont prises par comparaison des données d'entrée du problème (mesure du risque) et de critères d'acceptabilité définis par l'exploitant de l'installation, dans un souci de cohérence et d'équité. Un danger est jugé inacceptable si le risque individuel ou le risque sociétal dépasse le Risque Maximum Tolérable. Ci-dessous, le principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable) s'applique pleinement, l'industriel doit porter le risque "aussi bas que raisonnablement réalisable" afin d'améliorer la sûreté de son installation. C'est une zone de négociation et de gestion.

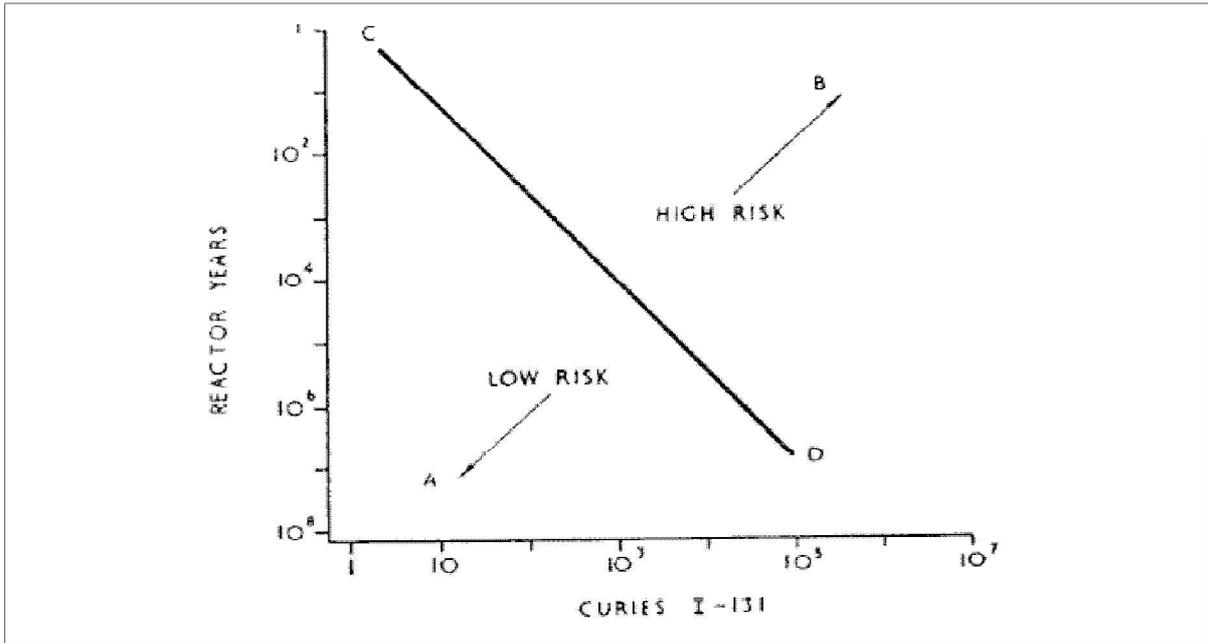


Figure 1.11 - Diagramme probabilité-conséquence [Farmer, 1967]

b) Concept d'ALARP

Le modèle ALARP (As Low As Reasonably Practicable) est une approche particulière permettant de parvenir à un risque tolérable. Le principe ALARP consiste que tout risque doit être ramené au plus bas niveau possible ou jusqu'à un niveau qui soit aussi faible que possible de manière raisonnable [IEC 61508, 1998]. Ce concept d'ALARP peut être employé lorsque les évaluations de risque qualitatives ou quantitatives sont adoptées. Si un risque se situe entre les deux extrêmes (zone inacceptable et zone globalement acceptable) et si le principe ALARP a été appliqué, le risque résultant est le risque tolérable pour l'application concernée. Cette approche de trois zones est illustrée par la figure (1.12).

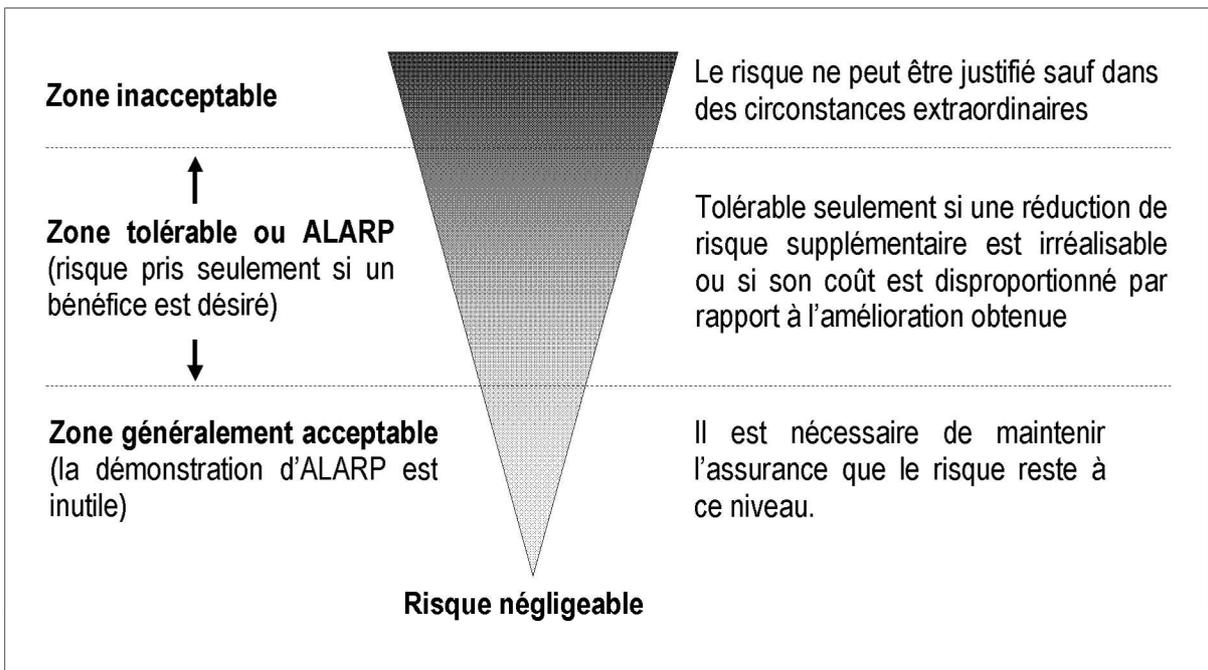


Figure 1.12 - Risque tolérable et ALARP [IEC 61508, 1998]

1.4.3.2.6. Avantages de la méthode QRA

L'analyse quantitative des risques permet au futur exploitant d'une installation de disposer d'une appréciation chiffrée du risque auquel son personnel est exposé. Elle permet également de mesurer et de comparer le gain potentiel en réduction du risque apporté par différentes mesures de maîtrise des risques envisagées. Une étude QRA est donc un outil précieux d'aide à la décision et d'économies de temps et d'argent.

1.4.3.2.7. Limites de la méthode QRA

La 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 précisément distingués, les taux de défaillance sont à valeurs précises et par conséquent, une valeur unique d'estimation du risque est obtenue. Cette valeur est souvent assez conservatrice, car elle est basée sur le principe du "cas le plus défavorable". Cependant, la variabilité des taux de défaillance et des paramètres physiques ainsi que les différentes suppositions sur les modèles mathématiques utilisés sont souvent incertains et de nature subjective. Ainsi, dans une 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'incertitudes.

On distinguera d'ailleurs trois types d'incertitudes [Markowski et al., 2010] :

- Les incertitudes liées à la complétude : elles concernent le choix et la pertinence des phénomènes accidentels étudiés ainsi que les relations causales qui s'y attachent.
- Les incertitudes liées à la modélisation : elles concernent les insuffisances et l'inadéquation des modèles utilisés pour le calcul des probabilités et surtout des conséquences. Pour ces dernières, ces incertitudes sont de nature subjective et issues de jugements d'experts.
- Les incertitudes liées aux paramètres d'entrée d'une QRA : leur source potentielle étant l'imprécision voir l'indisponibilité des données sur les différents paramètres, soit par manque informations et ou par méconnaissance. Ce type d'incertitude est inhérent à toutes les étapes d'une QRA.

1.5. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de notre cadre de travail. Après avoir présenté la démarche générale de la gestion des risques, il était question de mettre l'accent sur les méthodes d'analyse et d'évaluation des risques. Un intérêt particulier est prêté à la méthode d'analyse quantitative des risques QRA, son principe et ses étapes, ses avantages et ses limites.

Il s'avère que la disponibilité de données statistiquement fiables est problématique et qu'un modèle double de représentation et de traitement de données imparfaites est inévitable, d'où l'objet du chapitre suivant.

Analyse floue du risque : vers une QRA floue

2.1. Introduction

La bonne mise en œuvre de la démarche QRA dans les secteurs industriels exige dans sa globalité une collecte d'information consistante et quasi exhaustive sur les différents paramètres techniques, humains et environnementaux permettant de décrire réellement les scénarios d'accidents. Vu le caractère purement quantitatif dominant cette démarche d'évaluation des risques, les fréquences des événements initiateurs, les probabilités de défaillance des barrières de sécurité et la fiabilité humaine ainsi que les paramètres physico-chimiques et environnementaux (pression, vitesse de vent, température ambiante, ...) doivent être identifiés, arrêtés et tirés de la réalité de l'industrie afin d'aboutir à une bonne estimation des risques analysés et des décisions crédibles en matière de réduction des risques industriels.

La démarche QRA fournit alors un outil efficace pour l'analyse et l'évaluation des risques des scénarios d'accidents industriels. Cependant son efficacité dépend de la disponibilité et la qualité de données et d'informations objectives recueillies durant sa mise en œuvre, qui sont souvent non représentatives (retour d'expérience faible), et même si ces données sont disponibles, elles devraient être ajustées à l'équipement ou au système étudié et à ses conditions opératoires pour qu'elles puissent être utilisées [CCPS, 2000], [Simon et al. 2007]. A ceci s'ajoute le problème d'imperfection (incertitude et imprécision) qui les entache.

Et malgré que ces données soient fournies par des jugements d'experts et par des banques de données spécialisées, une inévitable subjectivité et incertitude dans l'évaluation des différents paramètres des scénarios d'accidents demeure toujours, car il semble illusoire de considérer une précision absolue de données quelque soit leur type (valeur unique ou intervalle large) et masquer le problème en ne considérant que la valeur moyenne géométrique ou arithmétique par exemple.

Dans le cadre de l'évaluation quantitative des risques, notamment en étape d'évaluation de la gravité des conséquences, les valeurs des risques individuel et sociétal fournies par des experts sont aussi un autre exemple de données difficilement analysables de façon simple.

Pour ces raisons et d'autres et en vue d'une bonne prise en compte de ces problèmes, il apparaît intéressant de faire appel à des modèles de représentation souples sous forme d'ensembles flous et de possibilité [Markowski et al., 2010].

Dans ce chapitre, nous allons examiner la prise en compte de l'imperfection (imprécision et incertitude) des données sur les paramètres d'estimation du risque, notamment les fréquences d'événements initiateurs, les probabilités de défaillance des composants des systèmes et les paramètres physiques, par les différentes approches de traitement de l'information incertaine. Un intérêt particulier sera consacré à la théorie des ensembles flous.

Nous présentons ensuite une approche "QRA floue" tenant compte des données incertaines et/ou imprécises. Une des représentations possibilistes des données par des intervalles flous est proposée. La démarche proposée fera l'objet d'une application dans le chapitre suivant sur un système industriel là où on va surmonter les problèmes que nous venons d'exposer tout à l'heure.

2.2. Modèles de traitement de l'incertitude

2.2.1. Théorie des probabilités

La théorie des probabilités constitue le plus ancien formalisme permettant de traiter les incertitudes dans les connaissances imparfaites. Elle repose donc sur des fondements mathématiques et une expérience solide.

Compte tenu de l'étendue de cette théorie, notre présentation se limitera à quelques définitions et propriétés, aux avantages et limites du modèle probabiliste dans le domaine de l'analyse des risques.

2.2.1.1. Définition et propriétés

a) Définition

Dans un ensemble référentiel (Ω) constituant l'ensemble de tous les événements observables possibles. L'application de l'événement A dans l'espace des nombres réels est appelée probabilité de l'événement A "P(A)". La probabilité est une grandeur numérique par laquelle on exprime le caractère aléatoire (possible et non certain) d'un événement. La probabilité d'occurrence de cet événement est décrite par la mesure de probabilité :

$$P : S(\Omega) \mapsto [0,1] \quad (2.1)$$

Où $S(\Omega)$ est l'ensemble des parties de Ω et qui satisfait les axiomes suivants :

$$\forall A \in S(\Omega) : P(\Phi) = 0 \leq P(A) \leq P(\Omega) = 1 \quad (2.2)$$

$$\forall A, B \in S(\Omega), \text{ Si } A \cap B = \Phi : P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (2.3)$$

L'axiome d'additivité (2.3) établit que, si deux événements sont incompatibles ($A \cap B = \Phi$), alors la probabilité qu'au moins l'un d'entre eux ait lieu, est la somme de leurs probabilités individuelles.

On peut déduire aussi des deux axiomes (2.2) et (2.3) les deux propriétés suivantes :

b) Propriété 1 : Si la probabilité d'un événement A est connue alors la probabilité de l'événement contraire \bar{A} est exactement déterminée :

$$\forall A \in S(\Omega) : P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (2.4)$$

c) Propriété 2 : On peut caractériser la probabilité d'événements w_i sur Ω en utilisant la distribution de probabilité :

$$p : \Omega \mapsto [0,1] \quad \text{où} \quad \sum_{w_i \in \Omega} p(w_i) = 1 \quad (2.5)$$

La distribution de probabilité p est définie à partir de la mesure de probabilité P par :

$$p(w_i) = P(\{w_i\}) \quad (2.6)$$

On obtient alors :

$$\forall A \in S(\Omega) : P(A) = \sum_{w_i \in A} p(w_i) \quad (2.7)$$

La mesure de probabilité P possède deux interprétations, fréquentiste et subjectiviste. Dans l'interprétation fréquentiste, utilisée dans le cas des informations statistiques, $P(A)$ représente la limite de la fréquence d'occurrence de l'événement A dans une séquence infinie d'expériences indépendantes [Ruegg, 1985]. Dans l'interprétation subjectiviste, $P(A)$ représente la croyance qu'un expert accorde à l'occurrence de A [Shafer, 1976].

2.2.1.2. Limites de la théorie des probabilités

La théorie des probabilités semble peu adaptée à des situations où la connaissance d'un événement comme la connaissance de son contraire sont très limitées [Zouhal, 1997]. Comme limite, cette théorie est trop rigide pour exprimer le cas de l'ignorance totale [Zimmermann, 1983], [Zouhal, 1997]. Elle modélise ce cas par un ensemble d'événements w_i mutuellement disjoints et équiprobables :

$$\forall w_i \in \Omega : p(w_i) = \frac{1}{|\Omega|} \quad (2.8)$$

Où : $|\Omega|$ est le nombre d'événements de l'ensemble de référence Ω .

En conclusion, la théorie des probabilités constitue un outil efficace pour le traitement des incertitudes aléatoires et 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 sont une autre forme d'imperfection des connaissances [Gouriveau, 2003]. D'où la nécessité d'introduire la notion des ensembles flous dans la section suivante qui permet de traiter l'aspect imprécis et vague des connaissances imparfaites.

2.2.2. Théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous a été introduite pour la première fois par le professeur Lotfi Zadeh [Zadeh, 1965] dans le cadre d'une généralisation de la théorie classique des ensembles. Cette théorie est considérée comme étant le seul cadre dans lequel puissent être traitées des connaissances numériques et des connaissances exprimées symboliquement par des qualifications du langage naturel [Bouchon-Meunier, 1995].

L'avantage de cette théorie est qu'elle permet de représenter convenablement les informations imprécises sous forme de fonctions d'appartenance [Zadeh, 1965]. Ces dernières offrent une modélisation souple, plus interprétable et représentative de la réalité.

Le concept d'ensemble flou a été introduit pour but d'éviter le passage brusque et rigide d'une classe à une autre. Dans le cadre d'analyse et d'évaluation du risque, on a introduit ce concept pour éviter le passage brusque entre les zones de risque et permettre une appartenance partielle aux zones

[Markowski & Mannan, 2008]. Par exemple, le risque peut être acceptable et inacceptable en même temps, mais à des degrés différents (plutôt acceptable qu'inacceptable, par exemple).

2.2.2.1. Concepts de base des mathématiques floues

a) Ensemble flou

Soit X un ensemble référentiel et soit x un élément de X . Un ensemble flou \tilde{A} de X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ [Zadeh, 1965] qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Cette fonction donne le degré d'appartenance de x dans \tilde{A} . Un ensemble ordinaire est un cas particulier d'un ensemble flou ($\mu_A(x)$ ne prend que 0 ou 1). Formellement, l'ensemble flou \tilde{A} peut s'écrire comme :

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad (2.9)$$

b) Nombre flou / Intervalle flou

On appelle "nombre flou" tout ensemble flou \tilde{A} de référentiel l'ensemble \mathfrak{R} des nombres réels et possédant les deux propriétés suivantes [Dubois & Prade, 1988] (voir figure 2.1) :

1. \tilde{A} est normalisé : il existe au moins une valeur $m \in \mathfrak{R}$ telle que $\mu_A(m) = 1$.
2. \tilde{A} est convexe : $\forall (\alpha, \acute{\alpha}) \in [0, 1]^2 : (\alpha \geq \acute{\alpha}) \Rightarrow ([m_1 \ n_1] \leq [m_2 \ n_2])$.

Ainsi, un nombre flou peut être considéré comme une superposition d'intervalles auxquels correspondent des niveaux $\alpha = \mu_A(x)$ dits niveaux de "présomption" ; $\alpha = 1$ étant le "maximum de présomption", il correspond à la valeur m . A mesure que α diminue, les intervalles obtenus s'emboîtent progressivement (emboîtement continu).

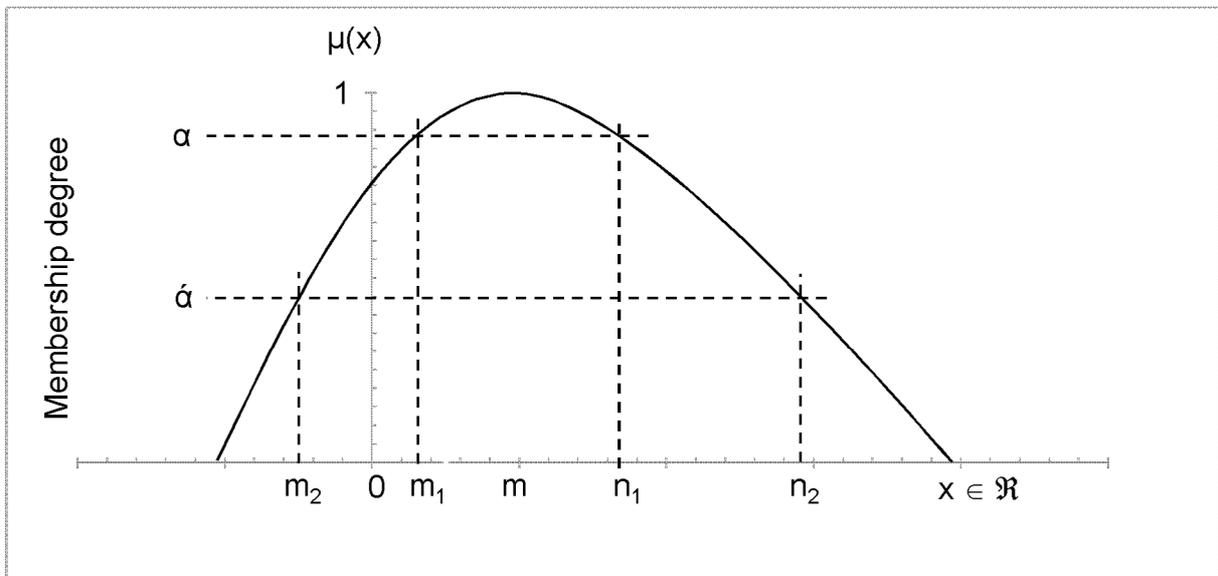


Figure 2.1 - Exemple d'un nombre flou

Un intervalle flou généralise un nombre flou avec la présence d'un maximum de présomption sous forme d'intervalle (voir figure 2.2). La représentation paramétrique d'un intervalle flou s'écrit :

$$\tilde{A} = (a_1, [a_2, a_3], a_4) \quad (2.10)$$

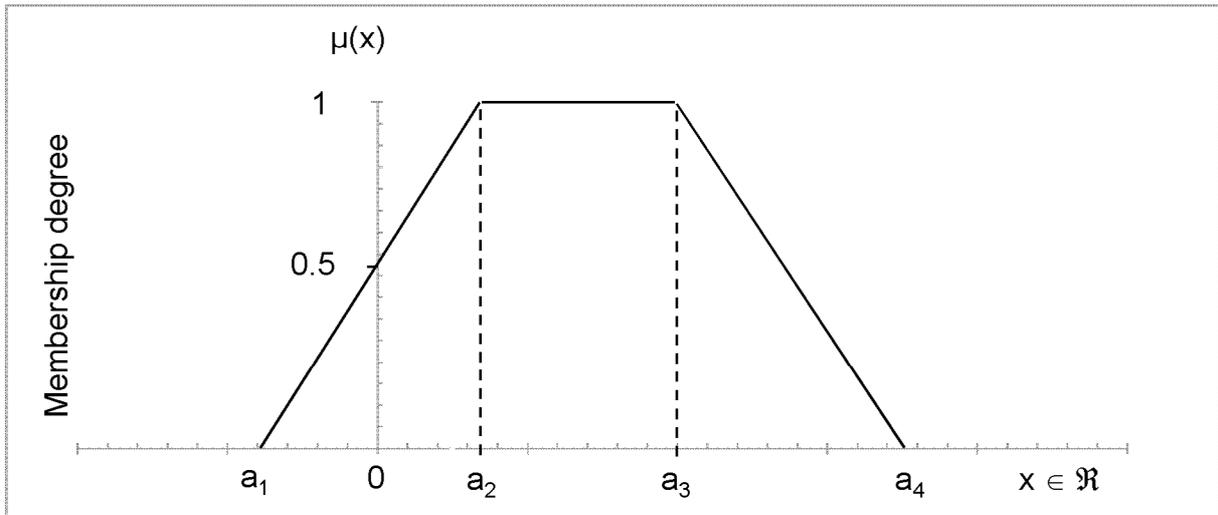


Figure 2.2 - Intervalle flou trapézoïdal

2.2.2.2. Caractéristiques d'un ensemble flou

Un ensemble flou est caractérisé par :

a) Support :

Un support d'un ensemble flou noté $\text{supp}(A)$, est défini comme l'ensemble classique des éléments ayant un degré d'appartenance non nul :

$$\text{supp}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) > 0 \} \quad (2.11)$$

b) Noyau :

Le noyau d'un ensemble flou A est défini comme l'ensemble classique des éléments x appartenant totalement à A (c'est-à-dire pour lesquels $\mu_A(x) = 1$) :

$$\text{noy}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) = 1 \} \quad (2.12)$$

c) Hauteur :

La hauteur d'un ensemble flou A est représentée par la valeur maximale de sa fonction d'appartenance.

$$h(A) = \sup \mu_A(x) \quad (2.13)$$

2.2.2.3. Opérations sur les ensembles flous

Soient A et B deux ensembles flous définis sur l'univers de discours X , ayant respectivement les fonctions d'appartenances $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$.

a) Union :

L'union de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou dont la fonction d'appartenance est définie par :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.14)$$

b) Intersection :

L'intersection de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou dont la fonction d'appartenance est définie par :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.15)$$

c) Inclusion :

L'ensemble flou A est inclus dans B, si et seulement si :

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (2.16)$$

d) Complémentation :

Les deux ensembles flous A et B sont complémentaires, si et seulement si :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = 1 - \mu_B(x) \quad (2.17)$$

e) Egalité :

Les deux ensembles flous A et B sont égaux, si et seulement si :

$$A = B \Leftrightarrow \forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (2.18)$$

Notons que malgré les différences existantes entre les deux théories classique et floue, les opérations appliquées dans la théorie des ensembles flous sont des extensions des opérations appliquées dans la théorie des probabilités, ceci confirme que la théorie des ensembles flous n'est qu'une généralisation de la théorie classique.

2.2.2.4. Notion d' α -coupe / Intervalle de confiance

Comme mentionné ci-dessus, tout nombre ou intervalle flou \tilde{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 & Scharpf, 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 :

$$A_\alpha = \{x \in X, \mu_A(x) \geq \alpha\}, \alpha \in [0, 1] \quad (2.19)$$

Ou bien :

$$A_\alpha = [x_\alpha, y_\alpha] \quad (2.20)$$

Où x_α et y_α sont les projections sur l'axe des abscisses des points appartenant à la courbe $y = \mu_A(x)$ et d'ordonnée α , ils représentent respectivement les extrémités gauche et droite de A , prises à un niveau α . Pour un nombre flou triangulaire (voir figure 2.3) :

$$A_\alpha = [(m - a_1)\alpha + a_1, -(a_2 - m)\alpha + a_2] \quad (2.21)$$

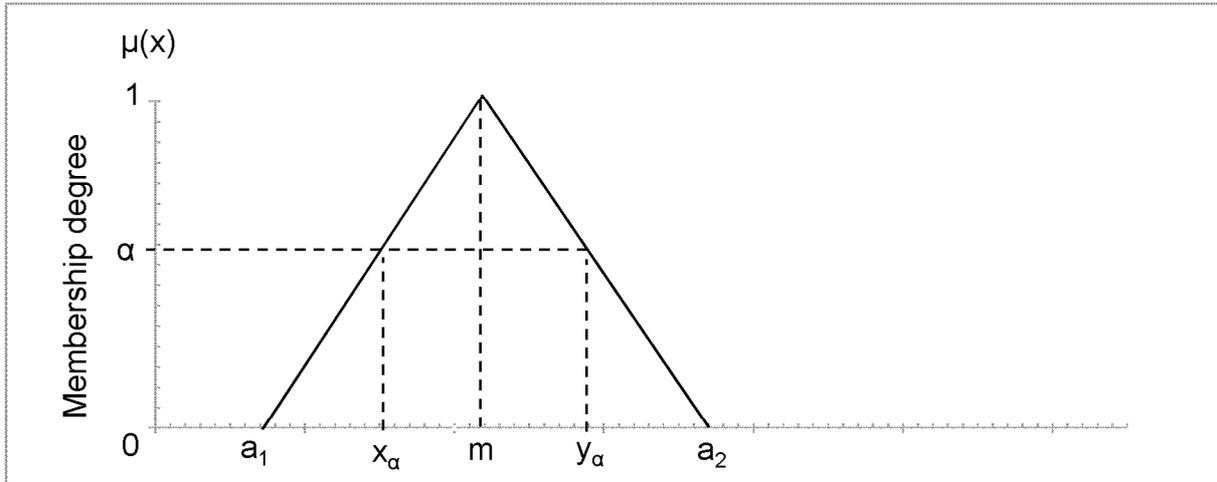


Figure 2.3 - Nombre flou triangulaire

2.2.2.5. 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 :

$$A_\alpha = [a_\alpha^-, a_\alpha^+] \subset \mathbb{R}^+ \text{ et } B_\alpha = [b_\alpha^-, b_\alpha^+] \subset \mathbb{R}^+ \quad (2.22)$$

On définit les opérations arithmétiques suivantes :

a) Addition :

La somme A+B peut être calculée comme suit :

$$(A + B)_\alpha = [a_\alpha^- + b_\alpha^-, a_\alpha^+ + b_\alpha^+], \forall \alpha \in [0, 1] \quad (2.23)$$

b) Soustraction :

La différence A-B est donnée par :

$$(A - B)_\alpha = [a_\alpha^- - b_\alpha^+, a_\alpha^+ - b_\alpha^-] \text{ si } b_\alpha^+ \leq a_\alpha^- \quad \forall \alpha \in [0, 1] \quad (2.24)$$

c) Multiplication :

Le produit A · B est donné par :

$$\begin{aligned} (A \cdot B)_\alpha &= [\min(a_\alpha^- \cdot b_\alpha^-, a_\alpha^- \cdot b_\alpha^+, a_\alpha^+ \cdot b_\alpha^-, a_\alpha^+ \cdot b_\alpha^+), \max(a_\alpha^- \cdot b_\alpha^-, a_\alpha^- \cdot b_\alpha^+, a_\alpha^+ \cdot b_\alpha^-, a_\alpha^+ \cdot b_\alpha^+)] \\ &= [a_\alpha^- \cdot b_\alpha^-, a_\alpha^+ \cdot b_\alpha^+], \forall \alpha \in [0, 1] \end{aligned} \quad (2.25)$$

d) Division :

Le rapport A/B est calculé comme suit :

$$(A/B)_\alpha = [\min (a_\alpha^- / b_\alpha^-, a_\alpha^- / b_\alpha^+, a_\alpha^+ / b_\alpha^-, a_\alpha^+ / b_\alpha^+), \max (a_\alpha^- / b_\alpha^-, a_\alpha^- / b_\alpha^+, a_\alpha^+ / b_\alpha^-, a_\alpha^+ / b_\alpha^+)]$$

$$= [a_\alpha^- / b_\alpha^+, a_\alpha^+ / b_\alpha^-], \forall \alpha \in [0, 1] \quad (2.26)$$

2.2.3. Théorie des possibilités

La théorie des possibilités [Zadeh, 1978] constitue un cadre alternatif pour représenter les informations incertaines. Elle est étroitement liée à la théorie des ensembles flous présentée précédemment. Elle est basée sur l'idée des variables linguistiques et comment elles sont liées aux ensembles flous [Zadeh, 1978], [Dubois & Prade, 1988]. Dans cette théorie, les concepts des ensembles flous et des fonctions d'appartenance sont interprétés en tant que distributions linguistiques de possibilité. Au lieu de parler de degrés d'appartenance, on parlera de degrés de possibilité, mais tous les outils et propriétés définis pour les ensembles flous sont également applicables aux distributions de possibilité.

La théorie de possibilités est tout à fait différente de celle de probabilités. L'exemple illustré par Zadeh [Zadeh, 1978] donne une idée claire quant à cette différence, ceci se voit dans l'interprétation des deux degrés de possibilité et de probabilité, un faible degré de probabilité n'est pas synonyme d'un faible degré de possibilité et un fort degré de possibilité n'implique pas un fort degré de probabilité, seulement on peut dire qu'un degré de possibilité nul implique une probabilité nulle.

a) Distribution de possibilité

Une distribution de possibilité peut être vue comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des éléments possibles. Les données incertaines sont représentées par l'intermédiaire de ces distributions et de deux fonctions caractérisant l'occurrence des événements, la possibilité (Π) et la nécessité (N) [Dubois & Prade, 1988].

L'incertitude d'un événement quelconque, au contraire des probabilités, est donc caractérisée par deux valeurs : sa possibilité (Π) et sa nécessité (N).

b) Mesure de possibilité

Une mesure de possibilité est une fonction prenant ses valeurs dans l'intervalle [0, 1] telle que :

$$\Pi(\Omega) = 1 \quad (2.27)$$

$$\Pi(\Phi) = 0 \quad (2.28)$$

Cette mesure permet d'évaluer à quel point la réalisation d'un événement est possible [Bouchon-Meunier, 1995], si cet événement est tout à fait possible de se réaliser, la mesure de sa possibilité est égale à 1. S'il est impossible de se réaliser alors, sa mesure de possibilité est égale à 0.

Dans le cas de deux événements contraires A et \bar{A} , la possibilité de réalisation de l'un n'implique pas l'impossibilité de réalisation de l'autre. Ceci est traduit par :

$$\max (\Pi(A), \Pi(\bar{A})) = 1 \quad (2.29)$$

c) Mesure de nécessité

L'occurrence d'un événement (A) est quantifiée par son degré de possibilité avec lequel cet événement est possible, mais cette mesure n'est pas suffisante pour décrire complètement l'incertitude existante sur cet événement. La mesure de nécessité donne une information supplémentaire et complémentaire à cette mesure de possibilité permettant de décrire cette incertitude [Bouchon-Meunier, 1995]. La mesure de nécessité est une mesure duale à celle de possibilité qui indique avec quel degré la réalisation de l'événement A est certaine. Cette mesure possède des propriétés spécifiques par rapport à celles de mesure de possibilité.

Les deux degrés, de possibilité et de nécessité nous permettent de décrire dans une distribution de possibilité ou de nécessité à la fois le degré avec lequel l'événement A est susceptible de se réaliser et le degré de certitude qu'on peut attribuer à cette réalisation.

Les deux mesures de possibilité et de nécessité sont liées par les relations suivantes :

$$N(A) = 1 - \Pi(\bar{A}) \quad (2.30)$$

$$N(A) > 0 \Rightarrow \Pi(A) = 1 \quad (2.31)$$

$$\Pi(A) < 1 \Rightarrow N(A) = 0 \quad (2.32)$$

A partir de ces relations qui décrivent la dualité des deux mesures, on comprend que tout événement certain est tout à fait possible et qu'on peut avoir la moindre certitude sur un événement qui n'est pas relativement possible. On peut aussi tirer de ces relations qu'il n'est pas nécessaire de définir une distribution de nécessité et qu'une distribution de possibilité est largement suffisante pour déterminer une mesure de nécessité [Bouchon-Meunier, 1995].

En conclusion, durant l'analyse des risques certaines connaissances et données dont nous disposons sur des différentes situations sont généralement imprécises et incertaines, devant cette combinaison d'imperfection, l'utilisation des deux théories à la fois est recommandée afin de prendre en compte ce type d'imperfection.

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

Actuellement, la théorie des ensembles flous a prouvé son existence comme un outil intéressant et efficace de traitement des données et des informations imparfaites utilisées dans divers domaines y compris l'analyse des risques. Ceci en raison de son apport en termes de réduction de l'incertitude et de l'imprécision entachant les données. Dans ce contexte, de nombreuses applications floues sont développées.

Dans ce qui suit, nous présentons à titre limitatif quelques principales méthodes classiques d'analyse des risques utilisant cette théorie.

2.3.1. Analyse de modes de défaillances et leurs effets

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 de mode de défaillance. L'évaluation quantitative de ces paramètres est très difficile surtout dans le cas où les composants des systèmes possèdent un mode de fonctionnement dégradé, ces paramètres sont généralement estimés qualitativement par des variables linguistiques telles que : défaillance probable, très élevé, ...etc. Cependant, il est souvent difficile d'évaluer avec objectivité ces variables, les interdépendances entre les effets et les modes de défaillance dans le même système rendent cette évaluation incertaine et incomplète [Sharma et al., 2005]. En outre, il n'est pas susceptible de combiner les différentes évaluations qualitatives, il est aussi difficile d'obtenir des distributions de probabilités où plusieurs modes de défaillances surviennent simultanément. En présence de ces interactions et dépendances dans les systèmes, l'AMDE perd ses performances surtout en termes de robustesse des données. 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 en premier temps d'utiliser les variables linguistiques pour décrire la gravité, la probabilité d'occurrence et la non-détection de chaque mode de défaillance [Chin et al., 2008]. Ces dernières seront fuzzifiées pour déterminer les degrés d'appartenance pour chaque paramètre. Les paramètres fuzzifiés seront évalués en utilisant des bases de règles linguistiques et les opérations des ensembles flous, ceci afin d'obtenir une classe pour le mode de défaillance qui est représenté par une fonction d'appartenance. Cette dernière sera défuzzifiée pour d'obtenir un niveau de priorité pour le mode de défaillance.

2.3.2. Arbre de défaillances

L'arbre de défaillances est une méthode très utilisée en analyse des risques. Son aspect d'analyse purement quantitatif et exigeant la présence des données sur les différents paramètres de sûreté de fonctionnement et d'analyse des risques des systèmes étudiés le permet d'être assujéti à des données et connaissances imparfaites et difficile à appliquer convenablement, chose qui a poussé les analystes de penser à un arbre de défaillances flou.

Ce dernier consiste à calculer la probabilité d'occurrence floue de l'événement redouté à partir des probabilités d'occurrence floues des événements de base conduisant à l'événement redouté. Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été développés, débutant par celui de Tanaka en 1983 [Tanaka et al.,

1983] dont les probabilités d'occurrence des événements de base sont représentées par des nombres flous trapézoïdaux. En 1990, Singer [Singer, 1990] a développé les arbres de défaillance en représentant les probabilités d'occurrence des événements de base par des nombres flous. Dans le même contexte et en 1993 deux travaux ont été apparus, celui de Liang et Wang [Liang & Wang, 1993] qui ont représenté les probabilités d'occurrence des événements de base par des nombres flous triangulaires et celui de Soman et Misra [Soman & Misra, 1993] qui ont proposé une méthode très connue basée sur la méthode des α -coupes pour traiter les arbres de défaillance comportant des événements répétés.

2.3.3. Arbre des événements

L'arbre d'événements est une méthode quantitative très utilisée en analyse des risques. Les probabilités et les conséquences dans cet arbre sont traitées généralement comme des valeurs exactes, cependant il est difficile d'évaluer les probabilités et les conséquences à partir du retour d'expérience, car la majorité des situations qui se trouvent dans le passé du système étudié ne sont pas similaires et souvent inexistantes. L'estimation par des valeurs singulières des probabilités et fréquences des conséquences est aussi un autre problème qui rend l'analyse des risques par l'arbre inconsistante [Lai et al., 1988], ceci revient à l'incertitude et l'imprécision de données utilisées par cet arbre.

Dans ce contexte, la théorie des ensembles flous a été introduite pour s'occuper de l'incertitude de données utilisées par l'arbre d'événements. Chaque chemin de l'arbre conduisant à une conséquence est représenté par sa probabilité d'occurrence qui est calculée en multipliant les probabilités des événements conduisant à cette conséquence.

Les probabilités des événements doivent être transformées en des probabilités floues [Dumitrescu et al., 2002]. Ces dernières sont représentées par différentes formes, trapézoïdale, triangulaire, ...etc. La probabilité floue de chaque conséquence est calculée en multipliant les probabilités des événements flous de même chemin. Le résultat obtenu est une probabilité de conséquence floue, cette dernière sera défuzzifiée afin d'obtenir une valeur plus représentative pour la prise de décision.

2.3.4. Analyse des couches de protection

La méthode LOPA (Layer Of Protection Analysis) fut historiquement l'une des méthodes récentes qui a été développée à la fin des années 1990 par le CCPS (Center for Chemical Process Safety). Cette méthode semi-quantitative fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes et des procédés industriels chimiques, pétrochimiques, nucléaires, ...etc.

Dans le cadre de LOPA, Markowski a développé une approche floue [Markowski & Mannan, 2009] 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, l'indice de réduction de gravité est aussi introduit afin d'évaluer la gravité des conséquences engendrées. LOPA floue permet de fournir des données plus précises et représentatives pour meilleure évaluation des scénarios d'accidents et aussi une évaluation plus appropriée de l'efficacité des couches de protection. Pour chaque scénario d'accident, la fréquence floue de conséquence réduite est estimée en multipliant la fréquence floue de l'événement initiateur par

le produit flou des couches de protection puis en défuzzifiant cette fréquence pour obtenir une valeur plus précise.

2.3.5. Graphe de risque étalonné

Le graphe de risque étalonné est une méthode semi-quantitative utilisée en sûreté de fonctionnement et largement appliquée dans de nombreux domaines, pétrolier, chimique, nucléaire, ...etc. Cette méthode a pour but de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) d'une fonction instrumentée de sécurité caractérisant un système instrumenté de sécurité (SIS) [IEC 61511, 2003].

Dans un travail récent, Nait-Said [Nait-Said et al., 2009] a soulevé les difficultés liées à l'application du graphe de risque conventionnel et a proposé une nouvelle approche pour apporter la solution à certains problèmes liés à l'imperfection des connaissances impliquées dans la méthode. Un graphe de risque à base de règles floues a été développé pour la prise en compte des données incertaines.

D'après l'auteur, bien que le graphe de risque est une méthode relativement facile à appliquer et permettant une évaluation rapide des SIL, il présente tout de même, des insuffisances quant à l'interprétation des termes linguistiques utilisés pour caractériser les paramètres d'entrée de graphe de risque conventionnel ("C" : conséquence de l'événement dangereux, "F" : fréquence et durée d'exposition, "P" : possibilité d'éviter l'événement dangereux, "W" : probabilité que l'événement dangereux se produise en l'absence des SIS), laquelle peut différer d'un jugement à l'autre et d'un secteur industriel à l'autre en raison de la subjectivité liée à la définition qualitative des paramètres suscités. A ceci s'ajoute les déclarations fermes en termes de probabilités et taux exprimant les paramètres C, F, P, W et le SIL ; et le problème de rigidité des intervalles ordinaires utilisés pour la représentation quantitative de ces paramètres.

Ces inconvénients recensés sont à l'origine des incohérences des résultats et éventuellement du conservatisme, lequel peut se traduire par une surestimation du SIL.

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 d'inférence floue. La méthodologie proposée utilise des partitions floues pour caractériser les paramètres du risque et le SIL. A 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 d'inférence est une valeur numérique du facteur de réduction du risque (RRF : Risk Reduction Factor).

2.3.6. Analyse quantitative des risques (QRA)

La QRA fournit un outil efficace pour l'analyse et l'évaluation des risques des scénarios d'accidents. Cet outil quantitatif d'analyse des risques est aussi confronté à des données et informations imparfaites conduisant souvent à une analyse des risques industriels inconsistante et subjective.

Dans ce contexte, Markowski [Markowski et al., 2010] a développé une approche de QRA floue qui tient compte de l'aspect incertain et imprécis que présente l'approche QRA classique. Cette approche floue consiste à élaborer des modèles flous à partir des paramètres d'entrée de la QRA classique, à savoir les fréquences des événements initiateurs, les probabilités de défaillance des barrières de sécurité et les paramètres physiques (température ambiante, humidité, ...etc.) afin d'évaluer les risques

analysés. Dans ce volet, l'évaluation des scénarios d'accidents est faite en tenant compte de l'occurrence des risques d'accidents et des effets qui peuvent survenir.

Pour chaque scénario, la fréquence floue de la conséquence est estimée à base d'un arbre d'événements en multipliant la fréquence floue de l'événement initiateur par les probabilités de défaillances floues des barrières de sécurité. Le résultat final est un nombre flou décrivant la fréquence d'occurrence du scénario. Ce nombre est défuzzifié afin d'obtenir une valeur unique de la fréquence de conséquence.

Quant aux effets (radiations thermiques) engendrés par ce scénario, les paramètres physiques (température ambiante, humidité, ...etc.) sont fuzzifiés par des ensembles flous trapézoïdaux, le calcul de ces effets est fait sur la base d'un modèle physique de la conséquence (voir § 3.2.5.2) moyennant le logiciel PHAST [DNV, 2006]. Le résultat obtenu est un nombre flou décrivant cet effet. Ce nombre est par suite défuzzifié pour obtenir une valeur unique qui est transformée à une des catégories linguistiques décrites sous une échelle qualitative [Markowski & Mannan, 2008].

Enfin, la fréquence ainsi que l'effet de la conséquence calculés après défuzzification sont introduits dans une grille floue d'évaluation semi-quantitative [Markowski & Mannan, 2008]. Ceci dans le but de calculer un indice de risque qualitatif (linguistique) qui permet de juger l'acceptabilité/inacceptabilité du risque analysé.

2.4. Présentation de la méthodologie générale

L'inconvénient que présentaient les méthodes de sûreté de fonctionnement et particulièrement la méthode QRA [CCPS, 2000], [Markowski et al., 2010] est celui d'imperfection des données et manque de robustesse dans les résultats finaux (estimation subjective des fréquences et effets des conséquences des scénarios d'accidents). Cette subjectivité est issue de plusieurs facteurs notamment, le nombre élevé de composants dans le système étudié, les connexions et interactions structurelles et les dépendances de fonctionnement entre les composants y compris les conditions d'exploitation et même les facteurs physiques et environnementaux influençant l'état et le fonctionnement du système.

Tous ces facteurs altérant la crédibilité et la perfection des données ainsi que les résultats d'analyse de sécurité, justifient fortement le développement d'une approche floue d'évaluation des risques.

Le but de notre approche développée est de réduire l'incertitude entachant les données utilisées par la QRA conventionnelle afin de renforcer ses caractéristiques et performances et atteindre des résultats plus représentatifs et moins vagues.

2.5. Présentation de l'approche "QRA floue" développée

La procédure de développement de la QRA floue consiste à utiliser les partitions floues pour décrire les paramètres des scénarios de la QRA (probabilités de défaillance, fréquences des événements initiateurs, paramètres physiques). Comme le montre les figures (2.4, 2.5 et 2.6), chaque valeur ou intervalle de valeurs associé aux variables d'entrée est fuzzifié par des nombres flous moyennant des fonctions d'appartenance triangulaires et des singletons flous.

L'approche floue proposée consiste à modéliser les paramètres d'entrée utilisés par l'approche classique, par retour d'expérience sur le système étudié ou par référence aux banques de données [OREDA, 2002], [ICSI, 2009]. Une modélisation floue des paramètres d'entrée est faite à l'aide du concept de la valeur moyenne d'un nombre flou en utilisant des fonctions triangulaires [Dubois & Prade, 1987]. L'intérêt de ces nombres flous par rapport aux nombres ordinaires est de donner un ensemble de valeurs possibles avec une valeur modale représentant le maximum de présomption [Bouchon-Meunier, 1995].

Selon les scénarios d'accidents développés, les paramètres et les variables qui s'y attachent ainsi que l'aspect incertain et imparfait que présentent ces paramètres et variables, l'analyse floue des risques dans le cadre de la QRA consiste en trois modèles d'évaluation flous prenant en considération tous les paramètres et variables pouvant participer ou être à l'origine des scénarios d'accidents industriels (défaillances des barrières de sécurité, événements initiateurs d'ordre technique et humain, les ignitions tardives et immédiates, ainsi que les paramètres environnementaux). Les figures (2.4, 2.5 et 2.6) illustrent respectivement les étapes d'évaluation intervenant dans l'approche QRA floue proposée.

2.5.1. Evaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents

Cette évaluation consiste à modéliser chacun des paramètres à savoir la fréquence de l'événement initiateur, les probabilités de défaillance des barrières de sécurité et les probabilités d'ignition pouvant participer à la survenance de la conséquence du scénario d'accident selon des distributions de possibilité triangulaires.

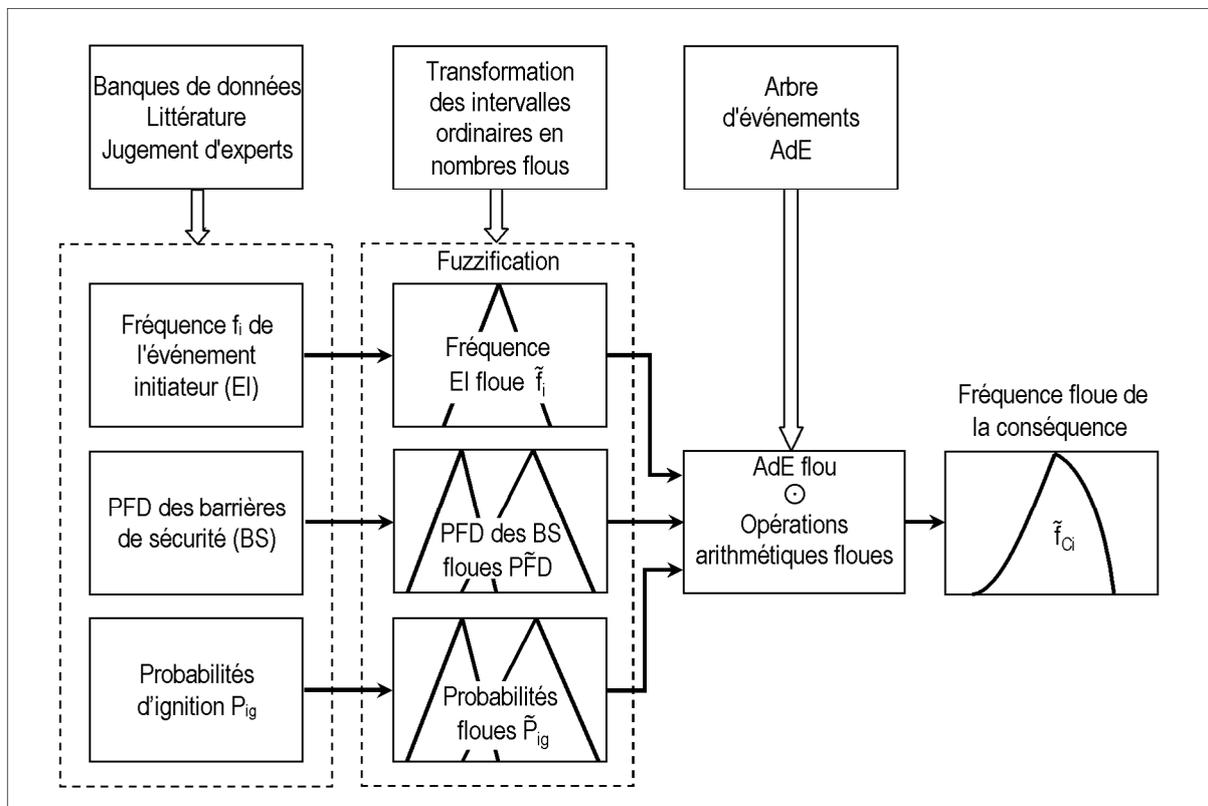


Figure 2.4 - Modèle d'évaluation floue de la fréquence du scénario d'accidents

La fréquence floue de la conséquence \tilde{f}_{Ci} est obtenue ensuite suivant le modèle d'analyse des risques AdE (arbre d'évènements) à partir des nombres flous de la fréquence d'évènement initiateur \tilde{f}_i , les probabilités de défaillance PFD des barrières de sécurité et les probabilités d'ignition \tilde{P}_{ig} , moyennant la multiplication étendue des α -coupes des paramètres d'entrée fuzzifiés en utilisant l'équation suivante :

$$\tilde{f}_{Ci} = \tilde{f}_i \times \prod_{j=1}^j P\tilde{F}D_i^j \times \prod_{k=1}^k (1 - P\tilde{F}D_i^k) \times \prod_{m=1}^m \tilde{P}_{ig}^m \times \prod_{n=1}^n (1 - \tilde{P}_{ig}^n) \quad (2.33)$$

Où : \tilde{f}_{Ci} est la fréquence floue de la conséquence, \tilde{f}_i est la fréquence de l'évènement initiateur "i", PFD_i est la probabilité de défaillance de la barrière de sécurité et \tilde{P}_{ig} est la probabilité d'ignition.

L'utilisation de la méthode des α -coupes permet de simplifier les calculs par décomposition de la fonction d'appartenance des nombres flous [Zadeh, 1975]. Cette décomposition permet d'écrire :

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{Ci} = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{f}_{Ci \alpha} = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{f}_i \alpha \times \prod_{j=1}^j \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot P\tilde{F}D_{i \alpha}^j \times \prod_{k=1}^k \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot (1 - P\tilde{F}D_{i \alpha}^k) \times \\ \times \prod_{m=1}^m \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{P}_{ig \alpha}^m \times \prod_{n=1}^n \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot (1 - \tilde{P}_{ig \alpha}^n) \end{aligned} \quad (2.34)$$

Le résultat final est un nombre flou sous une forme possibiliste triangulaire qui sera utilisé par le modèle de la figure (2.6) afin de calculer l'indice de risque. La figure (2.4) illustre la démarche d'analyse et d'évaluation floue de la fréquence de conséquence.

2.5.2. Evaluation floue de la conséquence 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 physiques et environnementaux 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 floue de la conséquence est faite à l'aide de l'équation suivante :

$$\tilde{I} = g_1(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) \quad (2.35)$$

Où : \tilde{I} est l'intensité floue de la conséquence, \tilde{P}_n est le nième paramètre physique flou et g_1 est la fonction du modèle physique de l'intensité.

La décomposition est faite en utilisant la méthode des α -coupes comme suit :

$$\tilde{I} = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{I} \alpha \quad (2.36)$$

Le résultat de l'intensité floue de la conséquence est un nombre flou qui sera utilisé afin de calculer la probabilité floue des effets létaux (décès) moyennant l'équation suivante :

$$\tilde{P}_{Fi} = g_2(\tilde{I}) \quad (2.37)$$

Où : \tilde{P}_{Fi} est la probabilité floue des effets létaux (décès), \tilde{I} est l'intensité floue de la conséquence et g_2 est la fonction du modèle de vulnérabilité.

La méthode des α -coupes permet d'écrire :

$$\tilde{P}_{Fi} = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{P}_{Fi \alpha} \quad (2.38)$$

Le résultat final est un nombre flou avec une distribution de possibilité triangulaire des effets létaux (décès) de la conséquence qui correspond au scénario d'accident analysé et qui sera utilisé par le modèle de la figure (2.6) afin de calculer l'indice de risque. La figure (2.5) illustre cette démarche d'analyse et d'évaluation floue de la conséquence.

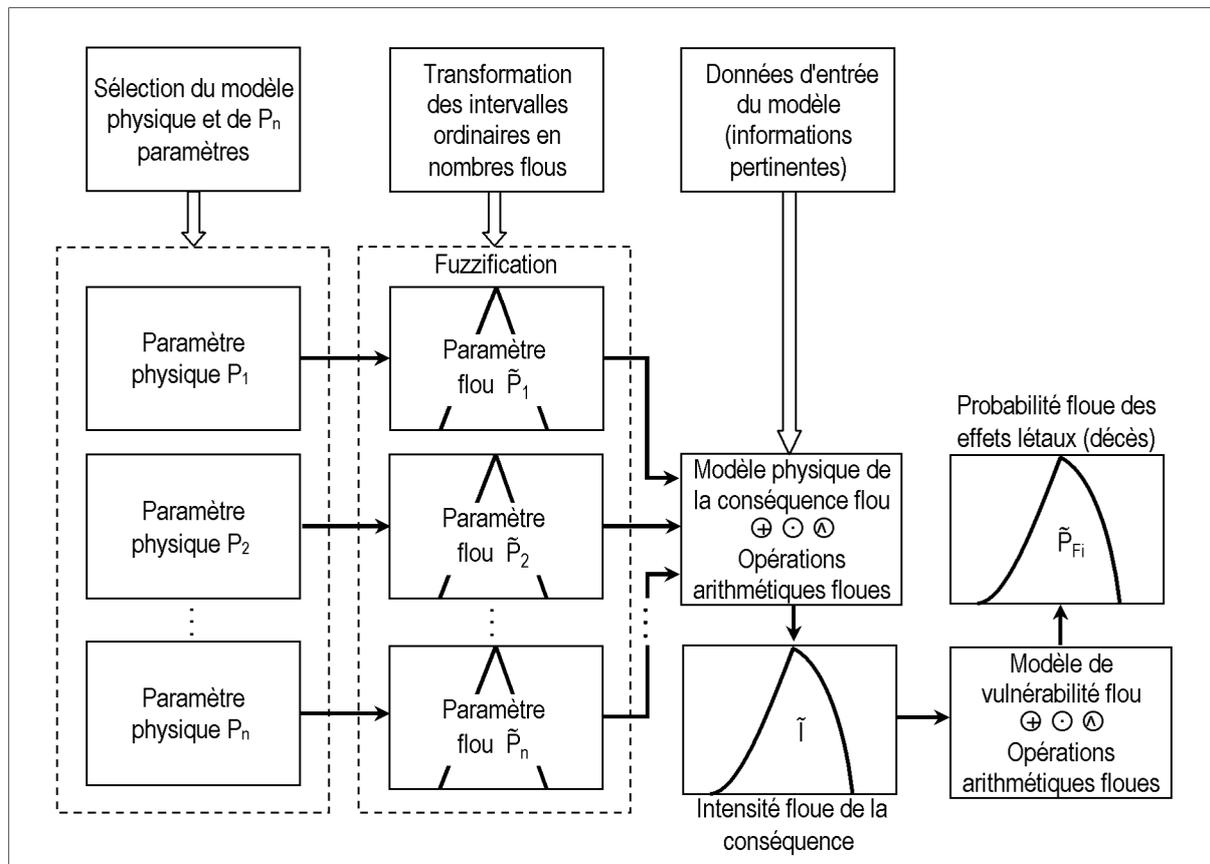


Figure 2.5 - Modèle d'évaluation floue de la conséquence

2.5.3. Evaluation de l'indice de risque flou

En se basant sur les résultats issus des modèles d'évaluation de la fréquence de la conséquence (figure 2.4) et de l'effet de la conséquence du scénario d'accident (figure 2.5), ce modèle permet de calculer l'indice de risque flou en multipliant la fréquence floue de la conséquence \tilde{f}_{Ci} et la probabilité floue des effets létaux \tilde{P}_{Fi} :

$$\tilde{I\tilde{R}} = \tilde{f}_{Ci} \times \tilde{P}_{Fi} \quad (2.39)$$

Où : $\tilde{I\tilde{R}}$ est l'indice de risque flou, \tilde{f}_{Ci} est la fréquence floue de la conséquence et \tilde{P}_{Fi} est la probabilité floue des effets létaux (décès).

Notons que cet indice de risque flou est calculé en appliquant la multiplication étendue des α -coupes comme suit :

$$\tilde{I}R = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{I}R_{\alpha} = \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{f}_{Ci \alpha} \times \bigcup_{\alpha=0}^1 \alpha \cdot \tilde{P}_{Fi \alpha} \quad (2.40)$$

Le résultat final est un nombre flou décrivant l'indice de risque qui correspond au scénario d'accident analysé. Cet indice sera évalué par rapport aux critères d'acceptabilité (risque maximum tolérable) puis exploité pour la prise de décision dans le domaine d'analyse et d'évaluation des risques industriels. La figure (2.6) illustre le modèle d'évaluation de l'indice de risque flou.

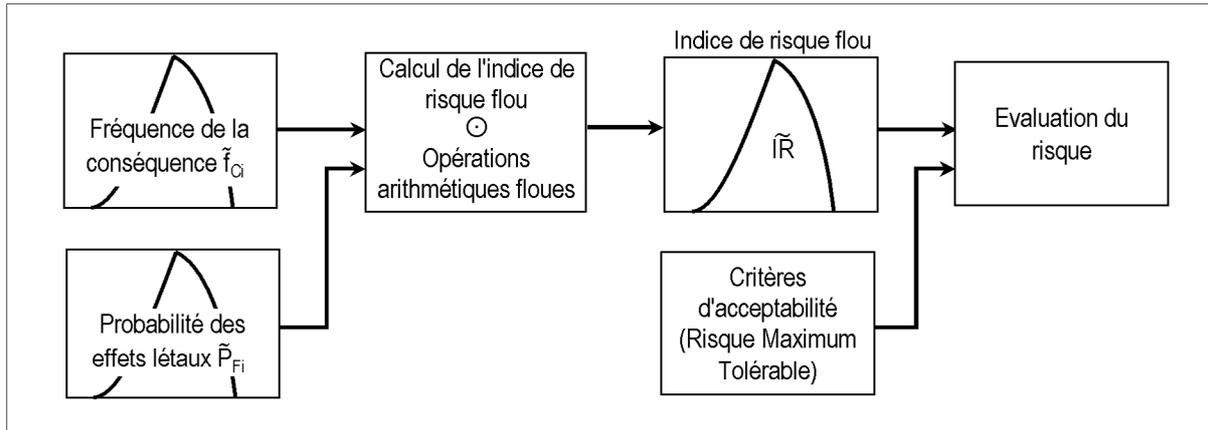


Figure 2.6 - Modèle d'évaluation de l'indice de risque flou

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de décrire le contexte et la problématique de la gestion des risques industriels. Ensuite, nous avons discuté le problème de données imprécises et incertaines étanchant les étapes d'analyse des risques conventionnelle. Nous avons proposé une nouvelle approche floue "QRA Floue" pour pallier ces problèmes d'incertitude et d'imperfection de données et permettre la gestion de l'aspect imprécis des données utilisées par la démarche classique et ce, en fournissant des représentations concises de données incertaines et imprécises.

Dans un but de comparaison avec l'approche floue proposée, nous présenterons dans le chapitre suivant une application de la méthode QRA à un système industriel (Ballon de reflux D-108).

Analyse quantitative des risques d'un système opérationnel

3.1. Introduction

L'analyse des risques par la méthode QRA exige la présence de certaines données et informations sur les différents paramètres d'évaluation des risques telles que, les fréquences d'événements initiateurs, les données physico-chimiques du système et aussi les probabilités de défaillance des différentes barrières de sécurité existantes.

Ces données sont obtenues généralement à partir de l'historique du système analysé. En l'absence ou par manque de données sur l'état du système, on fait appel à d'autres sources telles que, les banques de données et les jugements d'experts [ICSI, 2009], [CCPS, 2001]. Malgré que le choix des données se fait en respectant l'adaptation de ces données au système étudié en se basant sur son historique et sur des systèmes similaires ayant le même mode de fonctionnement, il paraît important de souligner la non-prise en compte convenable des imperfections liées aux données utilisées par les différentes méthodes d'analyse des risques y compris la méthode QRA.

Ce chapitre est consacré à l'application de la méthode QRA au niveau de la zone industrielle de Hassi R'mel (particulièrement au système "Ballon de reflux D-108" au niveau du module de traitement de gaz brut MPP3) au sein de l'entreprise Sonatrach-DP. En se référant d'une part, aux opinions exprimés par les assureurs qui considèrent l'accumulateur de reflux D-108 comme un nœud dangereux, et que la PSV (soupape de sécurité) n'assure pas la sécurité totale de l'accumulateur et d'autre part, à l'analyse dysfonctionnelle révélant que l'événement non souhaité pour le D-108 est le phénomène BLEVE, notre choix a porté sur ce système qui fera l'objet d'une étude de cas réel.

3.2. Application de la méthode QRA au Ballon D-108

3.2.1. Collecte des informations pertinentes

3.2.1.1. Situation géographique

La région de Hassi R'mel possède environ 10 % des ressources mondiales en gaz naturel, l'Algérie se place en sixième rang des pays producteurs de gaz, elle satisfait ses besoins et ceux d'une partie de l'Europe en gaz sec, le GPL et le condensât qui sont des produits de qualité, subissant des traitements au niveau des raffineries avant d'être vendus ou envoyés vers l'industrie pétrochimique.

Hassi R'mel, porte du désert se trouve à 550 km au sud de la capitale à une altitude moyenne de 760 m (voir figure 3.1), elle est située au sein de la région administrative de la wilaya de Laghouat à environ 40 kilomètres à l'ouest de Berriane, 60 kilomètres au nord-ouest de Ghardaïa et 130 kilomètres

au sud-est de Laghouat. Le paysage est constitué d'un vaste plateau rocailleux où ne pousse qu'une faible végétation composée essentiellement de buissons et de B'toums (pistachiers géants).

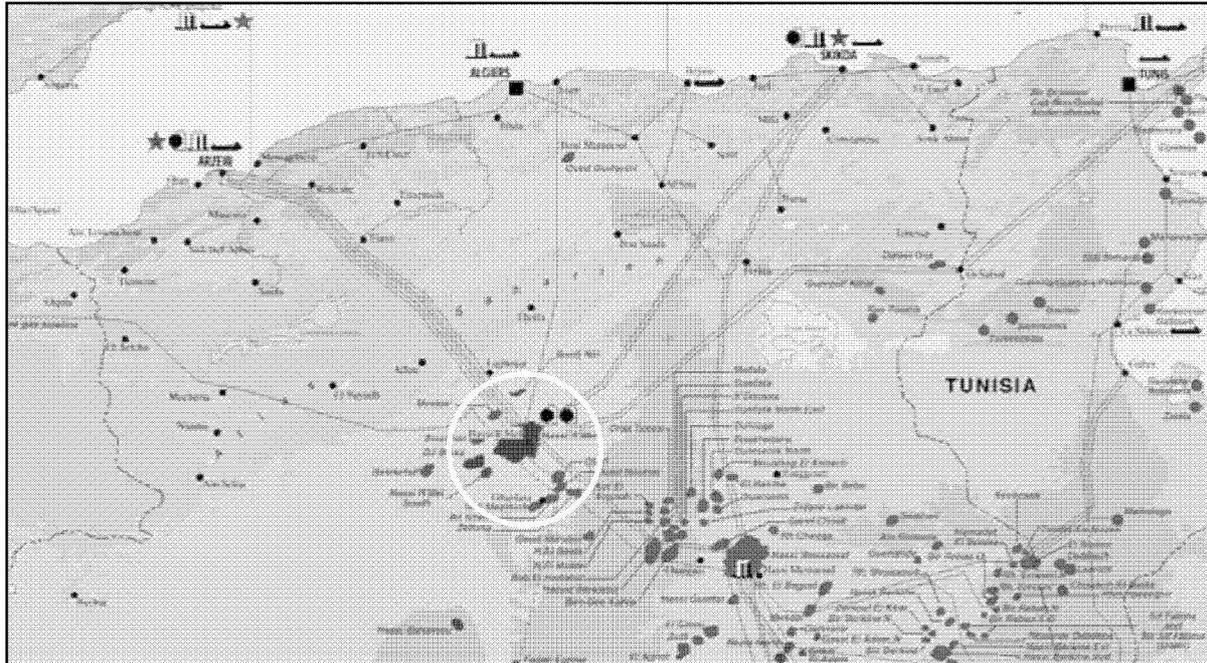


Figure 3.1 - Représentation de la position géographique de Hassi R'mel [Bourekda, 2008]

La région de Hassi R'mel est un champ qui produit le gaz naturel, le GPL et le condensât avec une activité secondaire qui consiste à produire le pétrole. Le champ de Hassi R'mel est divisé en trois zones de production (voir tableau 3.1) :

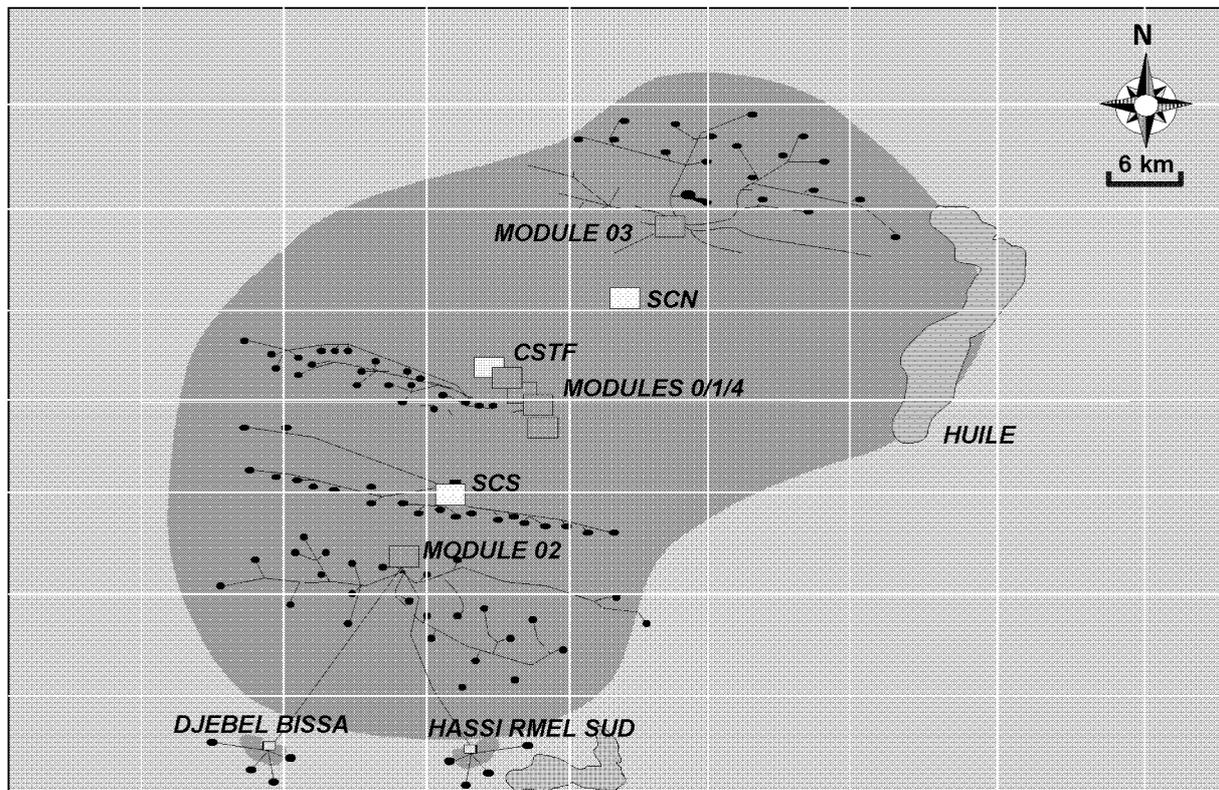


Figure 3.2 - Champ de Hassi R'mel [Bourekda, 2008]

Tableau 3.1 - Unités de la Région de Hassi R'mel [Bourekda, 2008]

Zones	Unités
Zone nord	<ul style="list-style-type: none"> - Module de traitement de gaz brut (MPP3) - Station de déshuilage - Station de Réinjection Nord (SC-Nord) - Centres de traitement d'huile (CTH2, CTH4) - Centre de stockage et de prélèvement butane (NAFTAL) - Centrale électrique (SONELGAZ)
Zone centre	<ul style="list-style-type: none"> - Modules de traitement de gaz brut (MPP0, MPP1 et MPP4) - Station de Boosting gaz Centre (SBC) - Centre de stockage et transfert du GPL et condensat (CSTF) - Communs (Phase B de MPP0 et MPP1) - Station de compression des gaz associés (SRGA) - Centres de traitement d'huile CTH1-CTH3 - Centre national de dispatching de gaz (CNDG) - Station de compression de gaz GR1/GR2 - Station de compression de gaz (GR3) - Station de pompage (SP4) - Centre de stockage et de prélèvement butane et propane (NAFTAL) - Centrale électrique (SONELGAZ) - Station d'épuration (STEP) - Station de déshuilage
Zone sud	<ul style="list-style-type: none"> - Modules Traitement de gaz brut (MPP2, DJB et HRSUD) - Station de réinjection gaz HP (SC-Sud) - Unité de traitement d'huile CTH- Sud) - Station de déshuilage

3.2.1.2. Données climatiques

L'analyse des données climatiques permet d'appréhender les effets des phénomènes accidentels et d'identifier les différents facteurs pouvant favoriser l'intensité de ces effets. Au plan biogéographique, la zone Hassi R'mel appartient au secteur du Sahara septentrional, sous secteur oriental du secteur septentrional. Ceci justifie sa position dans l'étage bioclimatique saharien, caractérisé par un climat continental désertique. Ce climat est caractérisé par de grandes chaleurs (températures très élevées), des précipitations très réduites et une sécheresse remarquable d'ambiance climatique et de l'environnement en général.

Les données météorologiques sont issues de la station météorologique de Hassi R'mel pour la période 1999-2008 et elles ont été communiquées par Sonatrach Division Production pour les besoins des audits environnementaux [SONATRACH, 2011].

a) Température

Les températures sont marquées par une grande amplitude entre les saisons ou entre le jour et la nuit. La température maximale peut atteindre 46 °C et la température minimale -6 °C en hiver (voir tableau 3.2 et 3.3).

Tableau 3.2 - Evolution des températures minimales à l'année [SONATRACH, 2011]

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
Moyenne mensuelle	1.9	4.0	8.2	11.6	16.6	21.6	25.2	24.2	19.7	15.2	7.3	3.5
Température min (°C)	-6	-3.5	-1.7	2.6	6	12.1	17.2	18.3	10.7	7.5	-2.4	-3.5

(Période 1999-2008)

Tableau 3.3 - Evolution des températures maximales à l'année [SONATRACH, 2011]

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec
Moyenne mensuelle	14.1	16.6	21.8	25.4	30.7	35.9	39.7	38.5	32.8	27.4	19.1	14.7
Température max (°C)	23.8	27.8	34	35.3	39.7	42.6	46	44	41.6	37.2	30.7	22.1

(Période 1999-2008)

b) Vents

A trente degrés de latitude nord, des vents du nord et des courants descendants secs dominant et vers midi rendent le ciel brumeux. Même des brises légères peuvent rendre le ciel brumeux. Occasionnellement, des tempêtes de sable violentes peuvent avoir lieu, capables de soulever plus de 59 grammes de sable par mètre cube d'air à des hauteurs de plus de 0,6 m. Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux de l'hiver sont froids et humides.

Les vents de sable sont fréquents dans la zone surtout en période printanière d'avril à juin. La figure (3.3) issue de la station de Hassi R'mel illustre la distribution des classes de vent selon huit directions (rose de vent).

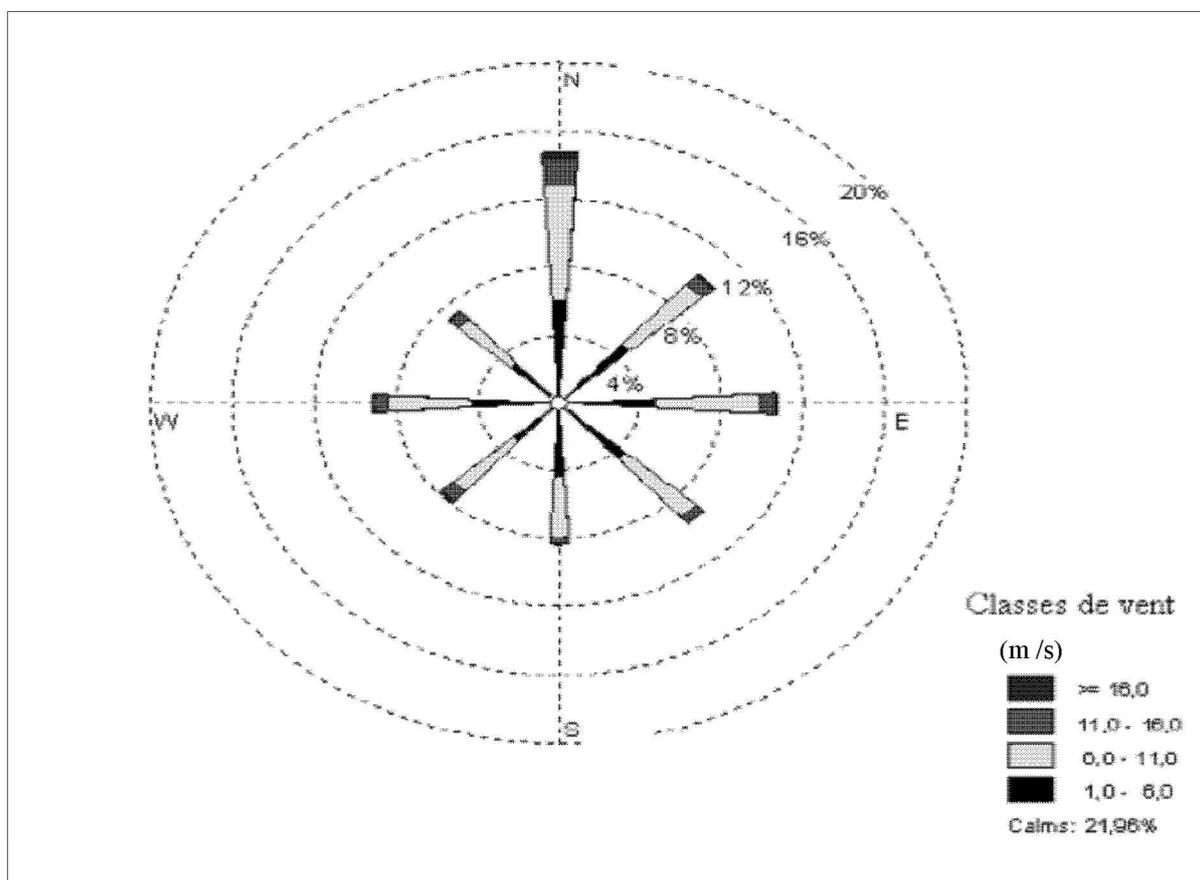


Figure 3.3 - Rose de vent annuelle de la station Hassi R'mel [SONATRACH, 2011]

c) Précipitations

Les précipitations sont faibles spécialement durant l'été et irrégulières, et durent peu de temps. Elles peuvent être torrentielles (voir tableau 3.4 et 3.5). Exceptionnellement, il peut neiger.

Tableau 3.4 - Moyennes mensuelles des précipitations [SONATRACH, 2011]

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
Précipitations (mm)	11.4	4.38	8.7	0.94	3.52	1.23	0.56	3.07	20.8	7.1	10.7	6.16	78.6

(Période 1999-2008)

Tableau 3.5 - Moyennes mensuelles des taux d'évaporation [SONATRACH, 2011]

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Evaporation (mm)	83.0	115.1	188.9	246.1	305.9	363.6	422.8	381.2	270.6	193.7	111.3	81.5

(Période 1999-2008)

Récapitulatif : Pour simuler les conséquences d'un accident majeur sur la région de Hassi R'mel, les experts de la Sonatrach-DP [SONATRACH, 2010] ont défini quatre (04) conditions météorologiques représentatives du climat général de cette région (voir tableau 3.6).

Tableau 3.6 - Conditions météorologiques utilisées pour modélisation d'accidents [SONATRACH, 2010]

Conditions	Vitesse de vent (m/s)	Stabilité de l'air	Humidité (%)	Température de l'air (°C)
Jour Eté	6	C		
Jour Hiver	4	B		
Nuit Eté	3	D		
Nuit Hiver	2	F		

Les classes de stabilité atmosphérique sont déterminées en fonction des vitesses de vent, de l'ensoleillement et des conditions générales de l'atmosphère au niveau du site. La sélection est réalisée en suivant la distribution proposée par [Lee's, 2005].

3.2.1.3. Données techniques sur le système analysé

La figure (3.4) montre le Ballon de reflux D-108. Les produits lourds venant du dééthaniseur sont envoyés vers le débutaniseur C102 à une température de (64°C) environ, leur température baisse jusqu'à (40°C) à l'aide de l'aéroréfrigérant E-108. Puis ils passent par le ballon de reflux D-108 qui a pour rôle d'accumuler le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) afin d'éviter la cavitation et l'endommagement des pompes (P-105 A et B). Une partie de condensât alimente la tête de la colonne de distillation C102 comme reflux à l'aide de la pompe P-105 où le débit est contrôlé par la vanne FRC-143, l'autre partie est envoyée vers la section de stockage ou de transfert selon la qualité de GPL produit. Les caractéristiques du ballon de reflux D-108 sont reprises dans le tableau (3.7).

Tableau 3.7 - Caractéristiques du ballon de reflux D-108 [SONATRACH, 2010]

Caractéristiques	Valeurs
Type d'installation	Ballon de reflux (D-108)
Substance	GPL (Propane)
Température de service	
Température calcul	
Pression de service	
Pression de calcul	
Volume total	

La masse considérée pour ce système est de 23280 kg (soit un réservoir d'un volume de 50 m³ avec une densité liquide du GPL produit de 466 kg/m³).

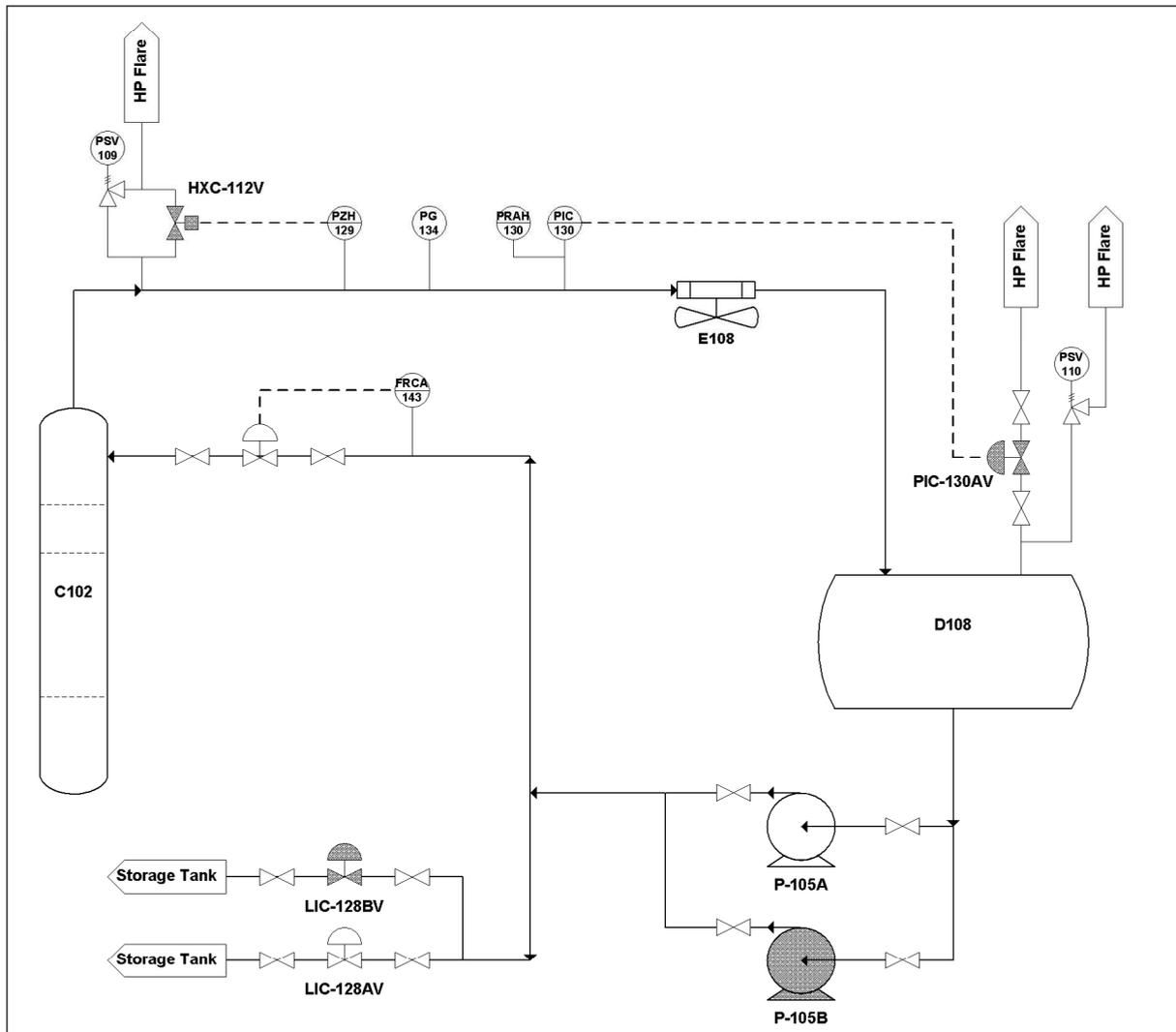


Figure 3.4 - Ballon de reflux D-108 [SONATRACH, 2008]

3.2.1.4. Données physico-chimiques des produits

Il n'est pas toujours aisé de modéliser des mélanges complexes afin de simuler les effets d'un accident majeur. Pour pallier à cet inconvénient, les méthodes suivantes sont appropriées : (1) choisir le composant dominant dans le mélange et modéliser la substance uniquement avec ce composant, (2) choisir un composant pur dans la base de données dont les propriétés ressemblent à celles du mélange, et (3) choisir le composant dominant dans le mélange et ajuster ses propriétés physiques afin de prendre en compte l'effet des autres composants.

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 dans le tableau (3.8).

Tableau 3.8 - Caractéristiques physico-chimiques de GPL [Cheremisinoff, 2000], [CFBP, 2011]

Caractéristiques	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 (%)
PCS (pouvoir calorifique supérieur) à 15°C et 1013 mbar	49,8 (MJ/kg) ou 13,8 (kWh/kg)
PCI (pouvoir calorifique inférieur) à 15°C et 1013 mbar	46,0 (MJ/kg) ou 12,78 (kWh/kg)
Vitesse de propagation de la flamme	32 (cm/s)

3.2.2. Identification des scénarios de dangers

Dans notre cas, l'identification des scénarios de dangers liés au ballon de reflux D-108 est faite moyennant la méthode HAZOP [IEC 61882, 2001]. Cette méthode nous a permis d'analyser les différentes déviations des paramètres de fonctionnement du ballon de reflux D-108 à savoir la pression, la température, le niveau, le débit et de déterminer leurs causes, conséquences et les mesures de sécurité mises en place pour faire face à ces déviations. Un exemple des déviations relatives au paramètre pression est donné par le tableau (3.9).

Il ressort à travers cette analyse que plusieurs incidents et/ou accidents peuvent avoir lieu, et que l'événement le plus redouté dans le cas de l'accumulateur de reflux D-108 est le phénomène BLEVE. Dans ce qui suit, on procédera à une étude d'impact de ce phénomène.

Le tableau (3.10) montre les scénarios d'accidents retenus pour une évaluation par l'approche QRA.

Tableau 3.10 - Scénarios de dangers retenus

Scénario	Événement initiateur	Conséquence
1	Défaillance de la vanne PIC-130AV (fermée)	Haute pression au niveau du D-108 & BLEVE possible
2	Mauvaise opération sur la vanne manuelle à l'admission de la vanne PIC-130AV (fermée)	Haute pression au niveau du D-108 & BLEVE possible
3	Feu externe au niveau du D-108	Surpression excessive au niveau du D-108 & BLEVE possible

Chapitre 3 : Analyse quantitative des risques d'un système opérationnel

Tableau 3.9 - Application de la méthode HAZOP : Cas du paramètre Pression

Nœud ou équipement : Ballon de reflux D-108						
N° du dessin (PID) : 7 9345-10-A1-007						
Paramètre	Mot-guide	Déviaton	Causes possibles	Conséquences	Sécurités existantes	Recommandations
Pression	Plus	Haute pression	Mauvaise opération sur la vanne manuelle à (l'admission/la sortie) de la vanne PIC-130AV (fermée) pendant l'opération de condensation	- Haute pression au niveau du D-108 et C-102	- Alarme haute pression PRAH-130	Procéder à l'installation des détecteurs de flammes dans la zone du D-108 avec un système de déluge automatique pour limiter les conséquences du BLEVE.
				- Explosion BLEVE possible	- Opérateurs	
			Défaillance de la vanne PIC-130AV (fermée) pendant l'opération de condensation	- Haute pression au niveau du D-108 et C-102	- Alarme haute pression PRAH-130	
			Feu externe au niveau du D-108	- Explosion BLEVE possible	- Opérateurs	
				- Surpression excessive au niveau du D-108	- Soupape PSV-110	
				- Explosion BLEVE possible		
				- Dommage possible des équipements		
	Moins	Basse pression	Mauvais fonctionnement de la vanne PIC-130AV (ouverte) pendant l'opération de condensation partielle	- Plus de gaz GPL s'échappe de D-108 vers torche HP	- Indicateur FR-158	
			Mauvais fonctionnement de la vanne PIC-130AV (ouverte) pendant l'opération de condensation totale	- Basse pression au niveau du D-108 et C-102	- Indicateur PG-140	
				- Plus de gaz GPL s'échappe de D-108 vers torche HP	- Grandes flammes au niveau de la torche HP	
				- Basse pression au niveau du D-108 et C-102	- Indicateur FR-158	
				- Basse pression au niveau du D-108 et C-102	- Indicateur PG-140	
				- Basse pression au niveau du D-108 et C-102	- Grandes flammes au niveau de la torche HP	

3.2.3. Estimation des fréquences des événements initiateurs

Les fréquences d'occurrence des événements initiateurs présentées dans le tableau (3.11) sont tirées de la littérature [ICSI, 2009], [CCPS, 2001] & [INERIS DRA-41, 2004] :

Tableau 3.11 - Fréquences des événements initiateurs

Événement initiateur	Fréquence (/an)	Remarques
Défaillance d'une vanne de régulation (PIC-130AV)	1,00E-01	Valeur unique
Erreur humaine sur une tâche habituelle (mauvaise opération sur vanne manuelle)	3,16E-02	Moyenne géométrique
Feu externe de grande ampleur	3,16E-03	Moyenne géométrique

A L'exception de la défaillance de la vanne de régulation dont la fréquence est donnée sous forme de valeur unique, la fréquence des autres défaillances est donnée sous forme d'intervalle dont nous avons calculé la moyenne géométrique.

3.2.4. Développement des arbres d'événements

Les probabilités de défaillance des barrières de sécurité et les probabilités d'ignition (inflammation) sont données par le tableau (3.12).

A noter que ces probabilités sont estimées en se référant à plusieurs sources telles que, la norme IEC 61511 [IEC61511, 2003], un ouvrage de référence du Centre of Chemical Process Safety [CCPS, 2001], un document issu des travaux du groupe d'échange animé par l'Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle [ICSI, 2009], un ouvrage de référence du Committee for the Prevention of Disasters utilisé aux Pays-Bas et au Québec [TNO, 1999] et des données fournies par le projet européen ARAMIS [ARAMIS, 2004].

Tableau 3.12 - Probabilités d'ignition et de défaillance des barrières

Barrière / Séquence	Probabilité de défaillance / Probabilité d'ignition	Remarques
Alarme	1,00E-01	Valeur unique
Réponse de l'opérateur aux alarmes	3,16E-02	Moyenne géométrique
Soupape de sécurité	1,00E-02	Moyenne géométrique
Ignition immédiate	7,00E-01	Valeur unique
Ignition différée	9,00E-01	Valeur unique

Les scénarios d'accidents issus de la QRA sont représentés moyennant 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 (voir figures 3.5, 3.6 & 3.7).

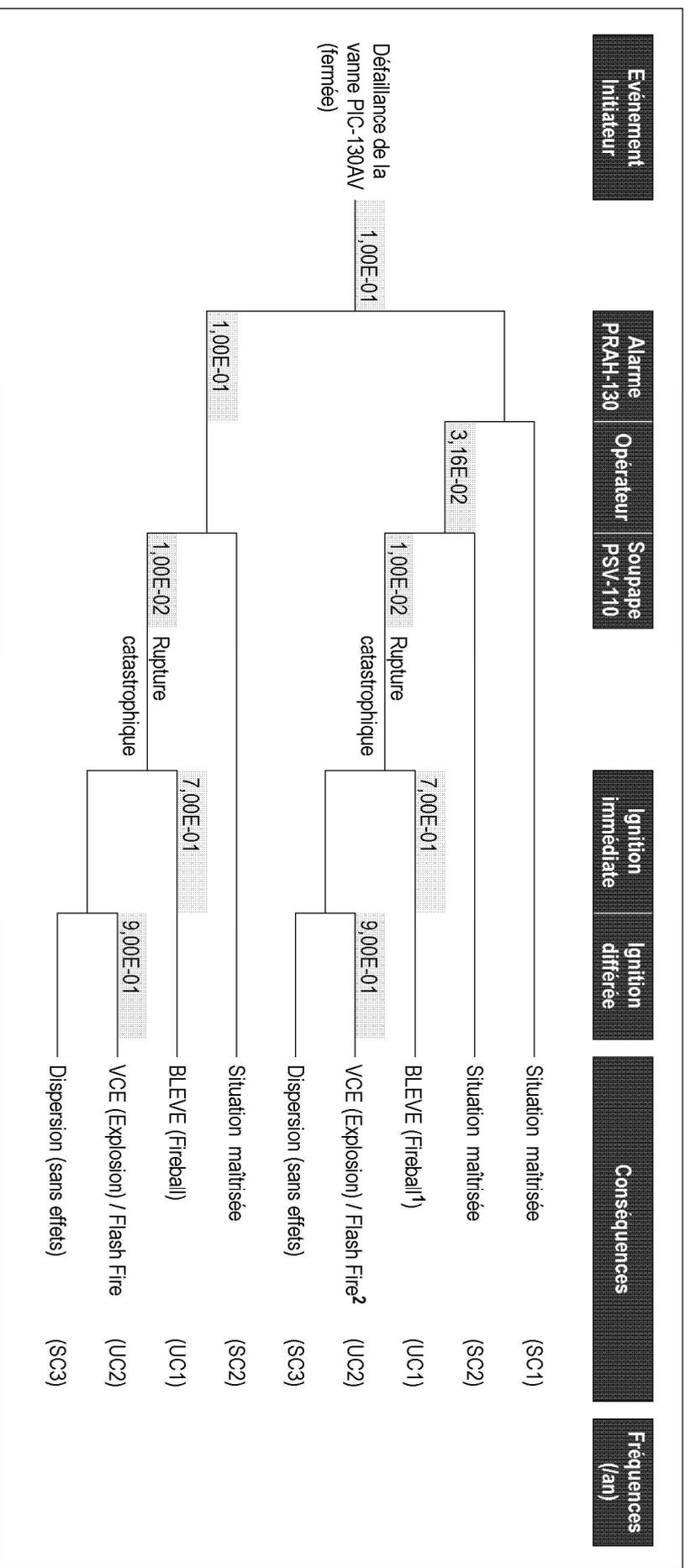


Figure 3.5 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°1

¹ Fireball : boule de feu

² Flash Fire : c'est une combustion d'un nuage de gaz en mélange avec de l'air, dans lequel la flamme se propage de telle manière qu'il n'y ait pas génération de surpression dommageable. En d'autres termes, la vitesse de propagation est suffisamment faible.

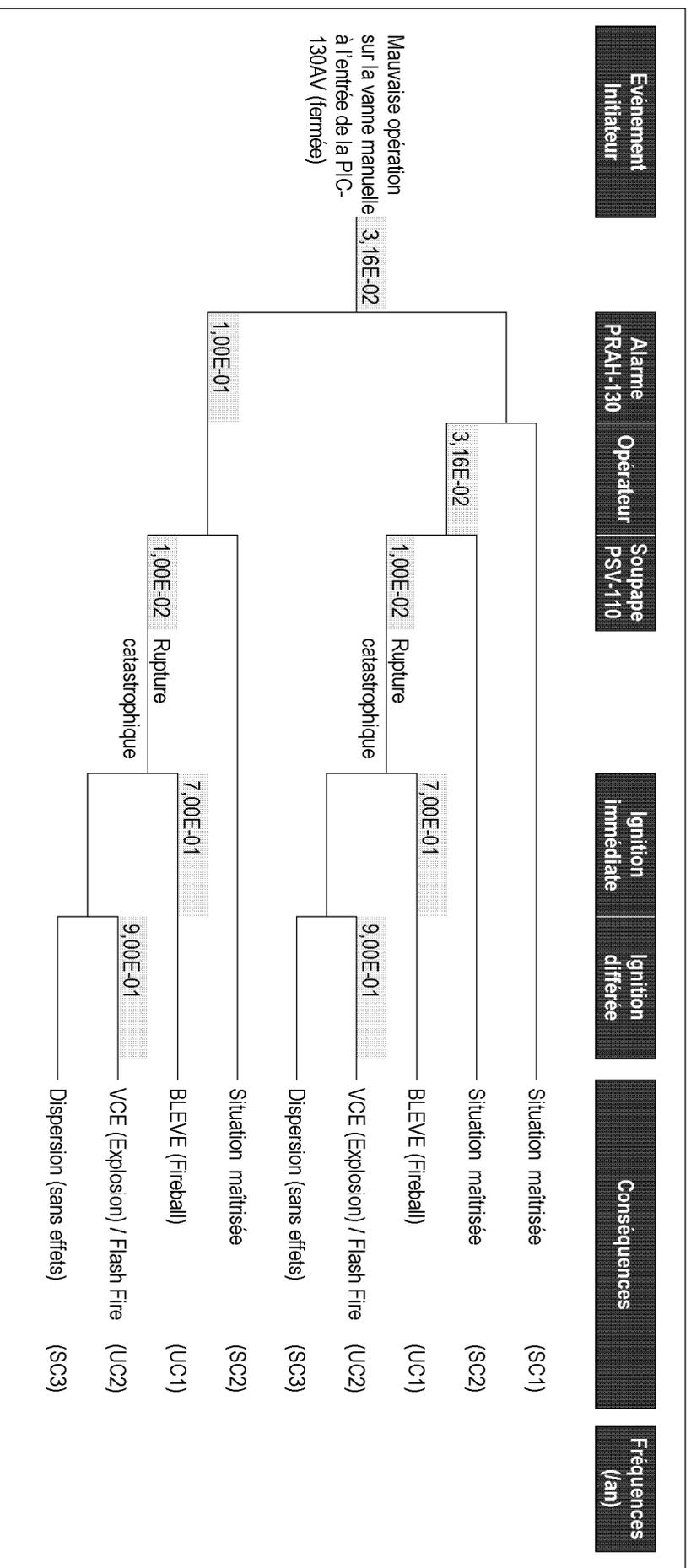


Figure 3-6 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°2

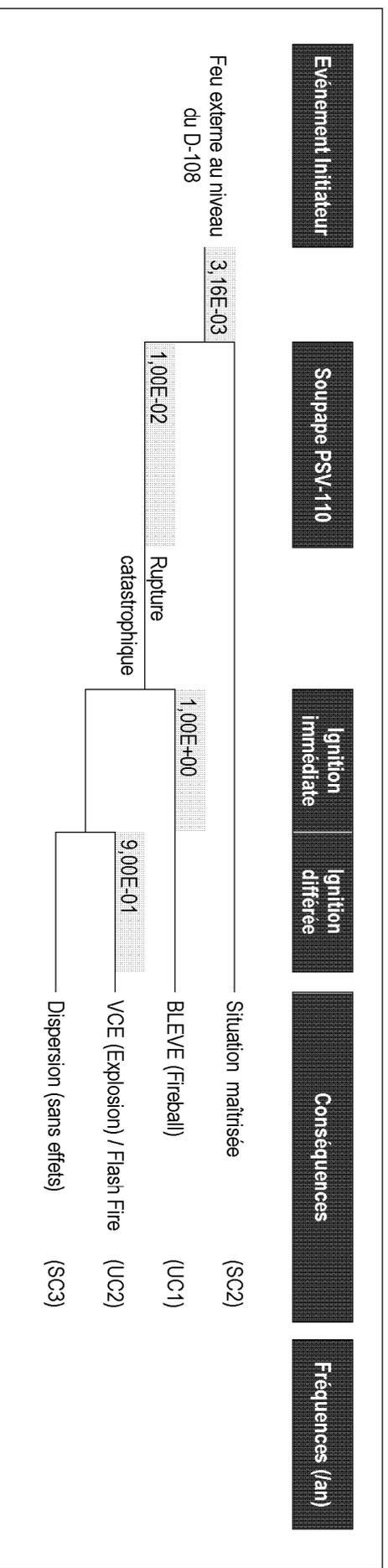


Figure 3.7 - Arbre d'événements relatif au scénario d'accidents n°3

Les fréquences des conséquences des scénarios d'accidents n°1, 2 et 3, sont calculées en multipliant les probabilités des événements du même chemin. Pour les scénarios d'accidents ayant les mêmes conséquences, leur fréquence totale est estimée en additionnant les fréquences des conséquences de chaque scénario. Les résultats de cette analyse sont donnés par le tableau (3.13).

Tableau 3.13 - Fréquences des conséquences des scénarios d'accidents

Conséquences	Fréquences des conséquences du scénario n°1 (an)	Fréquences des conséquences du scénario n°2 (an)	Fréquences des conséquences du scénario n°3 (an)	Fréquences totales des conséquences (an)
SC1 : Situation maîtrisée				1,15E-01
SC2 : Situation maîtrisée				1,99E-02
SC3 : Dispersion				5,07E-06
UC1 : BLEVE (Fireball)				1,50E-04
UC2 : VCE / Flash Fire				4,57E-05

Il ressort à travers ces résultats obtenus que la fréquence d'occurrence des événements redoutés la plus élevée est celle relative au phénomène BLEVE. Dans ce qui suit, on procédera à une étude d'impact de ce phénomène.

3.2.5. Analyse des conséquences et des effets

L'analyse des conséquences est une étape indispensable dans le processus de gestion des risques. Les conséquences de chaque accident potentiel doivent être quantifiées puis évaluées. Dans ce qui suit, on essaiera d'examiner les méthodes qui permettent de traiter les effets du phénomène BLEVE et d'estimer quantitativement ses conséquences.

3.2.5.1. Description du phénomène BLEVE

a) Définition

Le BLEVE est un acronyme qui signifie "Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion". Ce phénomène correspond à une vaporisation violente, à caractère explosif, suite à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température normale d'ébullition à la pression atmosphérique [INERIS DRA-006, 2002].

En effet, le phénomène BLEVE est généré suite à des ruptures totales des réservoirs. Ces dernières peuvent se produire de trois manières [INERIS DRA-006, 2002] :

- fissure spontanée due à une fragilisation du réservoir,
- vaporisation explosive déclenchée par la chute de pression d'un liquide à une température proche ou supérieure à sa température limite de surchauffe,
- montée en pression du réservoir et maintien de cette dernière à des valeurs significativement supérieures à la pression d'apparition de la fissure initiale.

b) 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 (3.8).

c) Causes du BLEVE

De multiples causes de BLEVE sont recensées, on distingue notamment : l'exposition du réservoir à un incendie extérieur, l'impact d'un projectile, la fatigue du réservoir, le sur-remplissage du réservoir, la corrosion, les équipements défectueux (rupture de tuyauteries), l'accident routier, l'erreur humaine, l'erreur de conception, un matériau non adapté.

d) Effets du BLEVE

Les effets d'un BLEVE sur l'environnement se manifestent généralement de trois manières :

1. Propagation d'une onde de surpression : L'effet de la surpression est la conséquence d'une explosion qui se manifeste par la propagation d'une onde de pression dans l'atmosphère à une vitesse de l'ordre de celle des ondes acoustiques (340 m/s dans l'air à 15°C). Au cours de la propagation de cette onde, en un point fixe de l'espace, on observe une impulsion positive de pression (surpression) dont sa durée mesurée en général est de l'ordre de millisecondes suivie par la suite d'une phase de dépression.

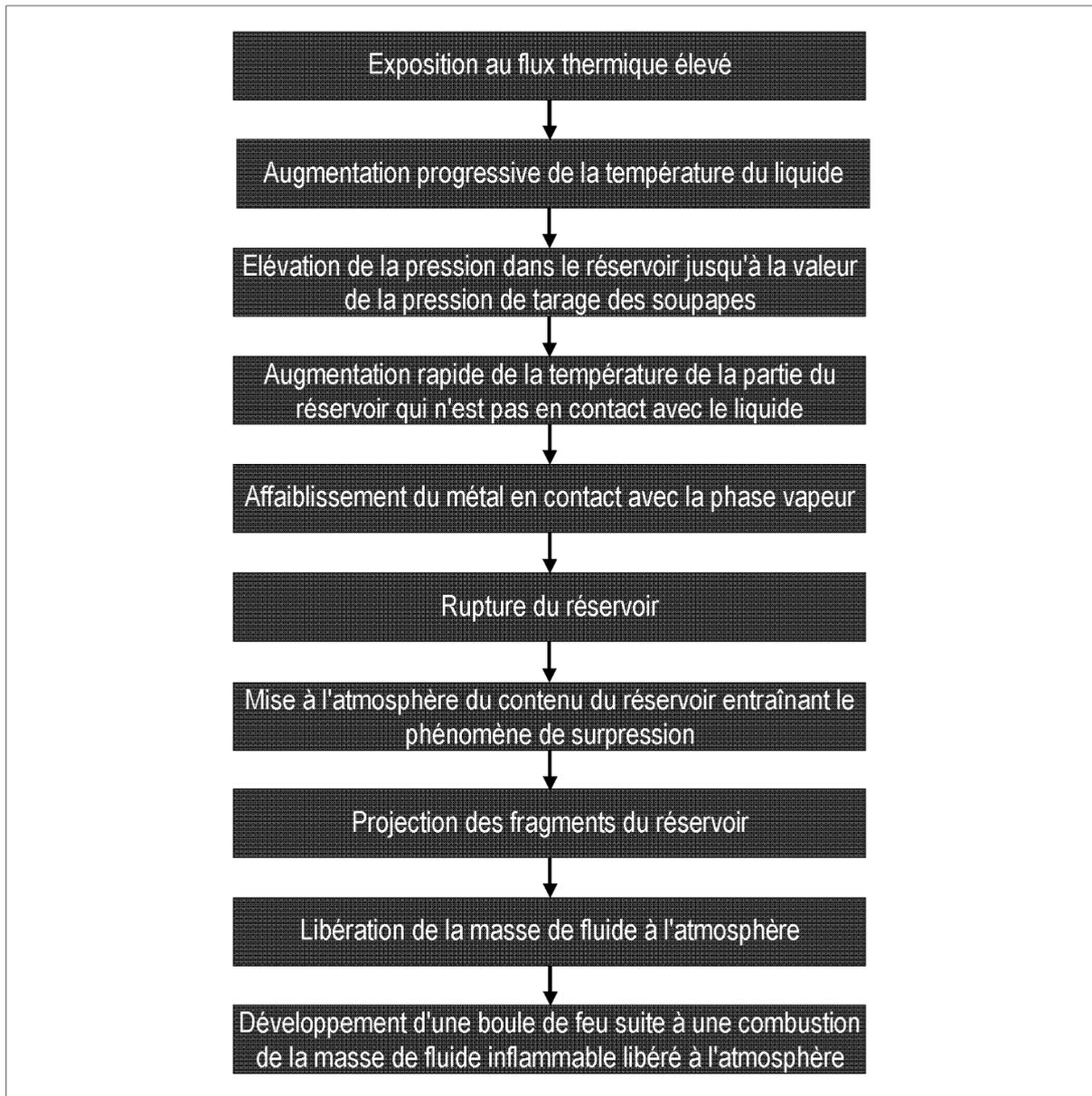


Figure 3.8 - Processus de réalisation du BLEVE [INERIS DRA-006, 2002]

2. Projection de fragments : L'impact d'un projectile est susceptible de produire deux types d'effets sur l'homme et/ou sur les structures : (1) le choc, qui peut être la cause des atteintes sur le corps humain et de la destruction des structures, (2) la pénétration, que se soit dans le corps humain ou dans les structures.

3. Effet thermique : Dans le cas d'un BLEVE de liquide inflammable, la formation d'une boule de feu peut devenir prépondérante en termes de conséquences. Toutefois, il faut dire que la durée d'exposition à cet effet conditionne les effets observés :

- Dans le cas où la durée du phénomène est supérieure à 2 minutes (régime permanent), le calcul des distances d'effets est effectué en termes de flux exprimés en kW/m^2 , c'est le cas notamment des feux de nappe, des incendies de stockage et des feux torche si la cible potentielle n'est pas en mesure de s'éloigner ou de se protéger de l'incendie en moins de 2 minutes.

- Dans le cas où la durée du phénomène est inférieure à 2 minutes (régime dynamique), le calcul des distances se fait en termes de doses thermiques reçues exprimées en $[(kW/m^2)^{4/3}] \cdot s$; c'est le cas notamment de l'ignition initiale d'une fuite de gaz, d'un BLEVE ou d'un Boil-over où la durée d'exposition n'excède généralement pas 2 minutes compte tenu de la durée du phénomène.

3.2.5.2. Modélisation des effets du BLEVE

Plusieurs méthodes de modélisation relatives au BLEVE, se trouvent dans la littérature, citons celles qui sont proposées par :

- CCPS (Center for Chemical Process Safety),
- TNO (The Netherlands Organisation of applied Scientific Research),
- TRC (Thornton Research Center, Shell).

Il est intéressant de noter que ces modèles sont développés pour modéliser des BLEVE d'hydrocarbures uniquement. Dans notre étude de cas, la modélisation des conséquences du phénomène BLEVE est élaborée moyennant le modèle de CCPS. Le choix de ce modèle a été fait en prenant en considération son efficacité et ses résultats [Sellami et al., 2010]. Dans ce qui suit, nous présenterons ce modèle qui va nous servir pour modélisation des effets thermiques du BLEVE pouvant survenir au niveau du ballon D-108.

a) Présentation du modèle CCPS

Le modèle développé par le CCPS [CCPS, 1994] est basé sur des corrélations empiriques établies par Roberts [Roberts, 1982]. Ce modèle permet, connaissant la masse d'hydrocarbures contenue dans la boule de feu, de calculer aisément le diamètre maximal et la durée de vie de la boule de feu à partir des formules suivantes :

$$D_{\max} = 5.8 M^{1/3} \quad (3.1)$$

$$t_{\text{BLEVE}} = 0.45 M^{1/3} \text{ lorsque } M < 30000 \text{ kg} \quad (3.2)$$

$$t_{\text{BLEVE}} = 2.6 M^{1/6} \text{ lorsque } M > 30000 \text{ kg} \quad (3.3)$$

$$H = 0.5 D_{\max} \quad (3.4)$$

Où : D_{\max} est le diamètre maximal de la boule de feu (m), M est la masse d'hydrocarbure contenue dans la boule de feu en (kg), t_{BLEVE} est la durée de vie de la boule de feu (s) et H est la hauteur de la boule de feu.

Les effets radiatifs de la boule de feu sont évalués à l'aide d'un modèle de flamme solide, où le flux rayonné à une certaine distance de la boule de feu est donné par la formule [CCPS, 2000] :

$$I = E \cdot F \cdot \tau_a \quad (3.5)$$

avec : I est le flux reçu (kW/m^2), E est l'émissivité de la boule de feu (kW/m^2), F est le facteur de forme et τ_a est l'atténuation atmosphérique du rayonnement.

L'émissivité de la boule de feu est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$E = \frac{R M H_c}{\pi D_{\max}^2 t_{\text{BLEVE}}} \quad (3.6)$$

Où : R est la fraction de chaleur émise par radiation, M est la masse d'hydrocarbure et H_c est le pouvoir calorifique du produit.

La fraction de chaleur émise par radiation est donnée par l'équation suivante :

$$R = 0.27 \left(\frac{P_{sat}}{10^6} \right)^{0.32} \quad (3.7)$$

Où : P_{sat} est la pression d'éclatement (saturated burst pressure) en (N/m²).

Le facteur de forme est calculé à l'aide des équations suivantes :

$$F = (F_v^2 + F_h^2)^{1/2} \quad \text{où} \quad F_v = \frac{L (D_{max}/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}} \quad \text{et} \quad F_h = \frac{H (D_{max}/2)^2}{(L^2 + H^2)^{3/2}} \quad (3.8)$$

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

L'atténuation atmosphérique du rayonnement est évaluée à l'aide d'une corrélation empirique donnée par [CCPS, 2000] :

$$\tau_a = 2.02 (P_w \cdot X_s)^{-0.09} \quad (3.9)$$

Où : P_w est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (N/m²) et X_s est la distance entre la surface de flamme et la cible (m).

La distance entre la surface de flamme et la cible est donnée par l'équation suivante :

$$X_s = (L^2 + H^2)^{1/2} - \frac{D_{max}}{2} \quad (3.10)$$

La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_w = 1013.25 (RH) \exp \left(14.4114 - \frac{5328}{T_a} \right) \quad (3.11)$$

Où : RH est l'hygrométrie (humidité relative en %) et T_a est la température ambiante (°K).

b) Vulnérabilité due au rayonnement thermique

Les principaux effets du flux thermique sur les individus sont les brûlures de la peau, dont la gravité dépend de l'intensité du rayonnement (kW/m²) et de la dose reçue. Les brûlures sont classées en trois catégories : brûlures de premier degré, brûlures de deuxième degré et brûlures de troisième degré.

L'existence de ces brûlures sur une grande surface du corps, et la destruction ou la dégradation conséquente de la peau augmente considérablement la probabilité des infections et de mort. La probabilité de survivre dans une telle situation est une fonction du pourcentage de surface corporelle brûlée et de l'âge de la personne [Casal, 2008].

Il existe des différentes équations de probit pour estimer les effets du flux thermique sur les individus. La dose, dans ce cas, est généralement considérée comme étant (t·I^{4/3}). Les équations les plus utilisées sont indiquées ci-dessous [Casal, 2008] :

$$\text{Pour les brûlures du premier degré : } Y = -39.83 + 3.0186 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t) \quad (3.12)$$

$$\text{Pour les brûlures du deuxième degré : } Y = -43.19 + 3.0186 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t) \quad (3.13)$$

$$\text{Pour les effets létaux (décès) : } Y = -36.38 + 2.56 \cdot \ln(I^{4/3} \cdot t) \quad (3.14)$$

Où : t est la durée d'exposition (s) et I est l'intensité de rayonnement (W/m²).

Notons que l'équation probit (3.14) sera utilisée dans notre cas pour l'évaluation des effets thermiques du BLEVE pouvant survenir au niveau du ballon D-108.

La valeur de la variable probit Y sera utilisé afin de calculer la probabilité des effets létaux (décès) au moyen de l'équation suivante [Casal, 2008] :

$$P_{Fi} = 0.5 \left[1 + \frac{Y - 5}{|Y - 5|} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{|Y - 5|}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1.17)$$

Le résultat final décrivant la probabilité des effets létaux (décès) sera utilisé par la suite pour calculer l'indice de risque individuel.

c) Valeurs relatives aux seuils d'effets thermiques

Le tableau (3.14) donne, de manière approximative, les niveaux de dommages et les valeurs de référence pour les différents flux thermiques.

Tableau 3.14 - Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques [MEDD, 2004]

	Seuils thermiques	Effets / Dommages
Effets sur les structures	5 kW/m ²	Seuil des destructions de vitres significatives.
	8 kW/m ²	Seuil des effets domino et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures.
	16 kW/m ²	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton.
	20 kW/m ²	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton.
	200 kW/m ²	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.
Effets sur l'homme	3 kW/m ² ou 600 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine.
	5 kW/m ² ou 1000 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des premiers effets létaux correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine.
	8 kW/m ² ou 1800 [(kW/m ²) ^{4/3}].s	Seuil des effets létaux significatifs correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine.

3.2.5.3. Modélisation des effets thermiques du BLEVE par SAFETI

Dans notre travail, la modélisation des conséquences du phénomène BLEVE est élaborée à l'aide de l'outil SAFETI [DNV, 2006]. Cet outil de DNV Software fournit une méthode conviviale pour l'industrie en vue de réaliser des évaluations quantitatives des risques pour des installations onshore chimiques et pétrochimiques.

SAFETI permet d'identifier les facteurs majeurs de risque. Il est conçu pour réaliser dans un cadre de travail structuré tous les éléments d'une évaluation quantitative des risques tels que les calculs, les traitements de données et la présentation de résultats (contours de risque individuel, courbes F/N). En effet, SAFETI analyse les conséquences complexes des scénarios accidentels prenant en compte les populations locales, l'occupation des sols et les conditions météorologiques. Il incorpore la modélisation des conséquences de PHAST qui est lui-même un logiciel de référence dans l'industrie.

Les résultats de l'analyse des effets thermiques du BLEVE pouvant survenir au niveau du ballon D-108 sont représentés en format graphique (voir tableau 3.15 et figure 3.9).

Tableau 3.15 - Résultats de l'outil SAFETI

Données d'entrée	Données de sortie	Rayons des effets relatifs aux seuils
Matière : GPL (Propane)	Diamètre de la boule de feu : 165,0 m	Létalité 100% : 109,65 m
Masse : 23280,84 Kg	Rayon de la boule de feu : 82,53 m	Létalité 50% : 215,45 m
Température ambiante : 22,5 °C	Durée de boule de feu : 12,81 s	Létalité 01% : 305,50 m
Humidité relative : 40 %	Hauteur de la boule de feu : 82,53 m	
Méthode de calcul : Roberts (HSE)	Pouvoir d'émissivité : 316,55 KW/m ²	

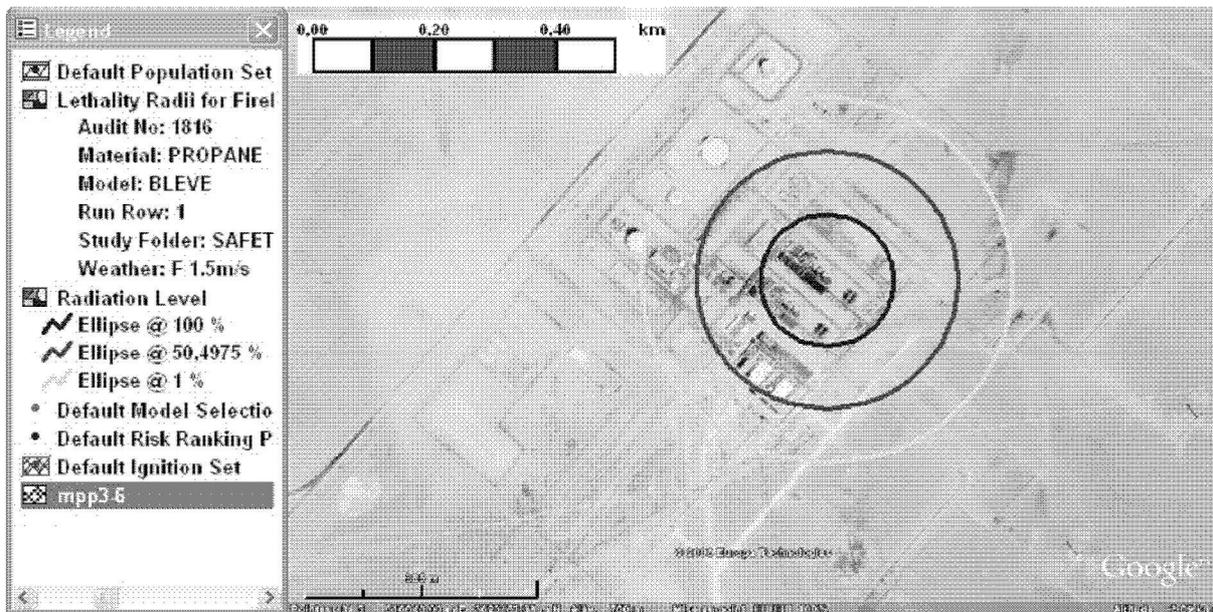


Figure 3.9 - Contours de la probabilité de décès due aux effets thermiques (MPP3, SH-HRM)

La figure (3.9) montre clairement les différentes zones de létalité dues aux effets thermiques du BLEVE (probabilités de létalité : 1, 0.50 et 0.01 qui correspondent aux distances : 109 m, 215 m et 305 m).

En se référant à ces résultats, on constate que la majorité des individus travaillant au niveau du MPP3 sont exposés aux effets létaux avec une probabilité supérieure à 0.50. Le reste du personnel est exposé avec des probabilités inférieures (entre 0.50 et 0,01).

3.2.6. Estimation du risque individuel

Les résultats de l'estimation du risque individuel dû aux effets thermiques du BLEVE pouvant survenir au niveau du ballon D-108 sont représentés dans la figure (3.10).



Figure 3.10 - Contours du risque individuel dû aux effets thermiques (MPP3, SH-HRM)

La figure (3.10) montre les différents contours du risque individuel (10^{-4} , 10^{-5} et 10^{-6} /an). On constate que la majorité des individus sont exposés à une fréquence de mort de 10^{-4} /an (fréquence proche de la conséquence UC1), car ils sont exposés à un effet létaux de 100%.

3.2.7. Evaluation du risque par rapport aux critères d'acceptabilité

En se basant sur le critère d'acceptabilité (Risque Maximum Tolérable) défini par l'entreprise Sonatrach qui est arrêté à 10^{-5} /an [SONATRACH, 2010], la figure (3.10) montre que le risque individuel auquel les opérateurs sont exposés (10^{-4} /an) est jugé inacceptable. Ce qui confirme les recommandations données par les assureurs qui ont proposé l'installation des détecteurs de flammes dans la zone de l'accumulateur D-108 avec un système de déluge (rideau d'eau) automatique pour limiter les conséquences du BLEVE.

3.3. Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons appliqué l'approche quantitative d'analyse des risques QRA à un système industriel (Ballon de reflux D-108). Cette application qui a été faite moyennant l'outil informatique SAFETI, nous a permis d'estimer l'ampleur des effets dangereux du phénomène BLEVE et visualiser les différents contours du risque individuel associés.

L'application de ce genre d'approche qui consiste principalement à estimer les fréquences des scénarios d'accidents potentiels et analyser leurs conséquences, s'avère délicate. Beaucoup de difficultés ont été soulevées à savoir le manque de données sur le système et son environnement et l'incertitude au niveau des paramètres des modèles utilisés, notamment : les fréquences des événements initiateurs, les probabilités de défaillances des barrières, les probabilités d'ignition et les paramètres physiques tels que la température ambiante, l'humidité, ...etc.

Pour ces raisons et d'autres et en vue d'une bonne prise en compte de ces problèmes, il apparaît intéressant de faire appel à des modèles de représentation souples sous forme d'ensembles flous et de possibilité, dont la mise en œuvre fera l'objet du chapitre suivant.

Application de l'approche QRA floue à un système opérationnel

4.1. Introduction

Le présent chapitre sera consacré à l'application de l'approche QRA floue proposée en chapitre (2) au système "Ballon de reflux D-108". En considérant les données utilisées par l'approche QRA classique (tableaux 3.6, 3.7, 3.8, 3.11 & 3.12) du chapitre (3) comme référentielles, on montrera la faisabilité et l'intérêt particulier de la QRA floue en menant une étude comparative entre les résultats issus des valeurs uniques et des intervalles ordinaires et ceux obtenus par des intervalles flous.

4.2. Application de l'approche "QRA floue" au Ballon D-108

L'approche floue proposée en chapitre (2) consiste à étendre l'approche classique, en considérant les paramètres d'entrée utilisés par cette dernière comme des variables floues. La modélisation floue est faite à l'aide du concept de nombre flou en utilisant les valeurs moyennes données par les banques de données telles que [OREDA, 2002] et [ICSI, 2009] comme des valeurs hypothétiques, nous avons fait recours au concept de la valeur moyenne d'un nombre flou [Dubois & Prade, 1987] pour représenter les paramètres d'entrée de la QRA floue. L'avantage des nombres flous par rapport aux intervalles ordinaires est qu'ils fournissent un maximum de présomption grâce à la valeur modale ($\mu(m) = 1$).

Selon les scénarios d'accidents développés, les paramètres et les variables qui s'y attachent ainsi que l'aspect incertain et imparfait que présentent ces paramètres et variables, l'analyse floue des risques dans le cadre de la QRA consiste en trois modèles d'évaluation flous prenant en considération tous les paramètres et variables pouvant participer ou être à l'origine de ces scénarios (événements initiateurs, défaillances des barrières, ignitions tardives et immédiates ainsi que la température ambiante et l'humidité). Voir figures (2.4), (2.5) et (2.6) illustrées en chapitre (2).

4.2.1. Evaluation floue de la fréquence des scénarios d'accidents

Reprenons les données et résultats de référence utilisés par la QRA conventionnelle, lesquels sont représentés sous forme d'intervalles de confiance et de valeurs uniques (voir tableau 4.1).

Tableau 4.1 - Intervalles de confiance des EI, des PFD et des probabilités d'ignition

Fréquences EI, PFD des barrières et probabilités d'ignition	Borne inférieure E-	Borne supérieure E+
EI1 : Défaillance d'une vanne de régulation (PIC-130AV)		
EI2 : Mauvaise opération sur vanne manuelle		
EI3 : Feu externe de grande ampleur		
PFD1 : Alarme		
PFD2 : Réponse de l'opérateur aux alarmes		
PFD3 : Soupape de sécurité		
P _{ig} 1 : Ignition immédiate		
P _{ig} 2 : Ignition différée		

Nous transformons les intervalles de confiance des fréquences des événements initiateurs, des probabilités de défaillance des différentes barrières et les probabilités d'ignition en des nombres flous. Les résultats de cette transformation sont donnés par la figure (4.1) et (4.2).

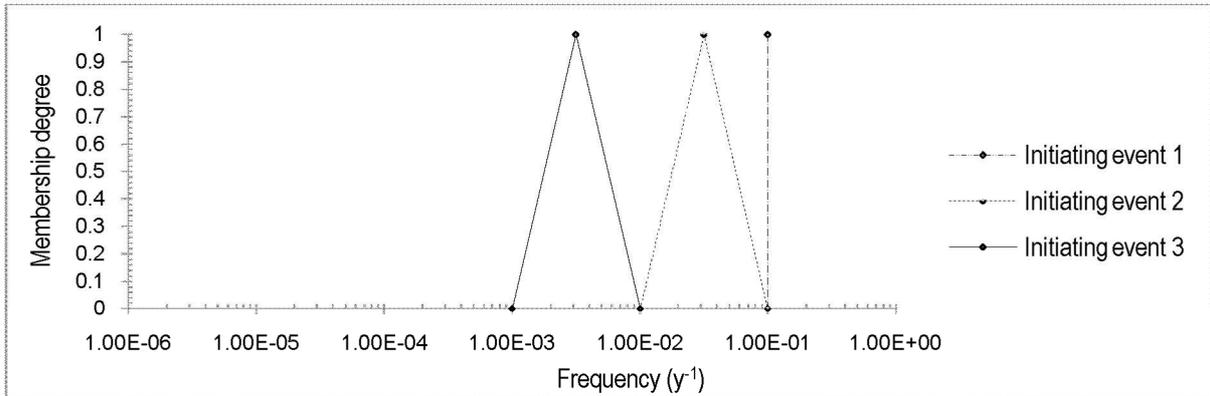


Figure 4.1 - Nombres flous des fréquences des événements initiateurs

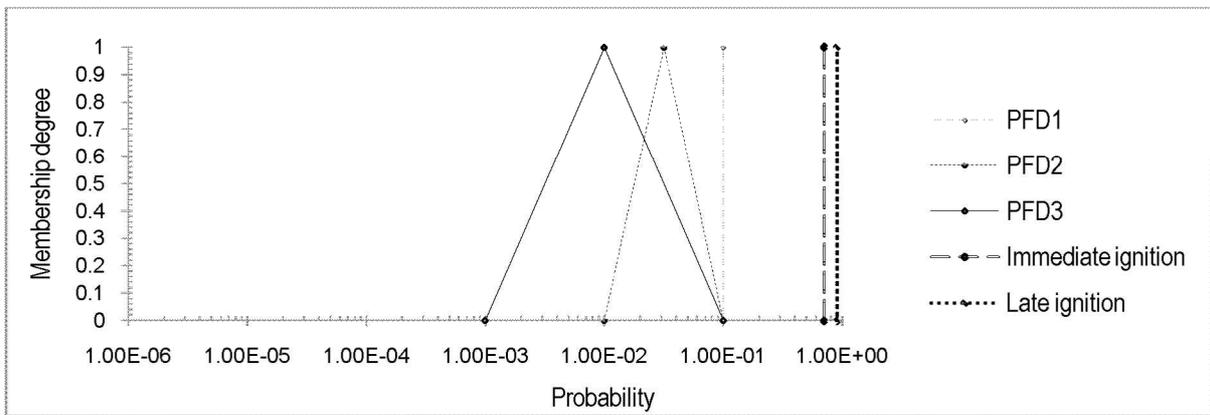


Figure 4.2 - Nombres flous des PFD et des probabilités d'ignition

L'intervalle de confiance de la fréquence de la conséquence de chaque scénario est obtenu à l'aide des équations (2.33) et (2.34) du chapitre (2), en multipliant respectivement les bornes inférieures et supérieures des α -coupes des nombres flous des paramètres d'entrée (EI, PFD, Ignition). Les résultats sont représentés par la figure (4.3).

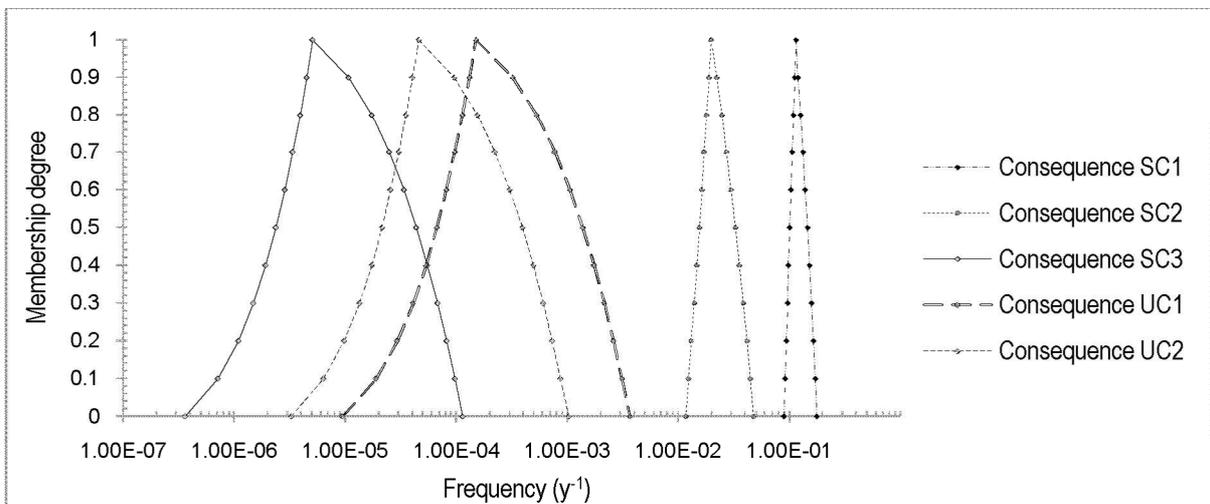


Figure 4.3 - Fréquences floues des conséquences des scénarios d'accidents

Le résultat de l'estimation de la fréquence totale de la conséquence du scénario relatif au phénomène BLEVE est donné par la figure (4.4) suivante :

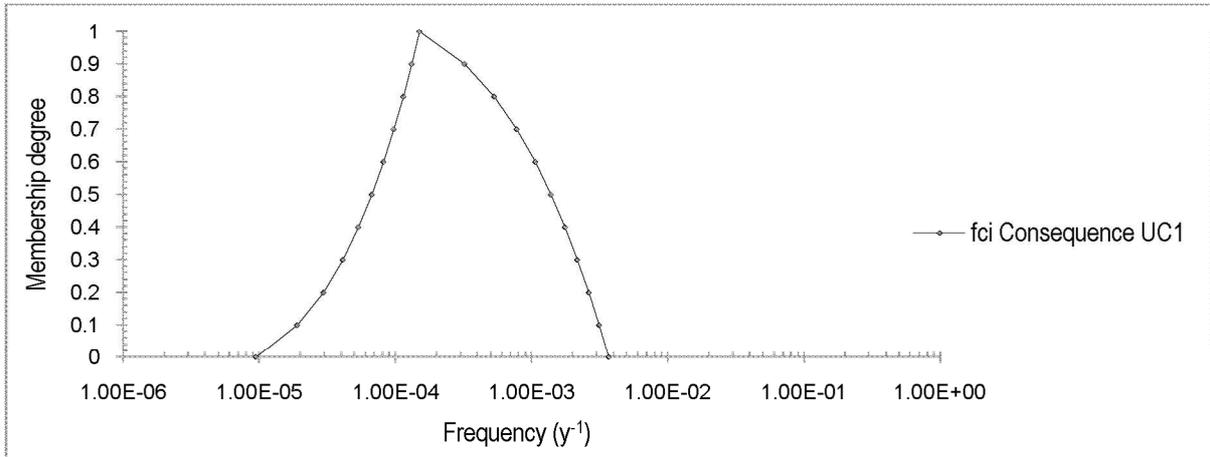


Figure 4.4 - Fréquence floue de la conséquence du scénario BLEVE (UC1)

On peut constater que les fréquences floues des différentes conséquences (cas du BLEVE, le support de la fréquence floue : [9.39E-06 , 3.66E-03]) contiennent les fréquences sous forme de valeurs uniques issues d'une QRA conventionnelle (cas du BLEVE, la fréquence unique : 1.50E-04). A noter que c'est grâce à la monotone croissante de la fonction fréquence des conséquences, qu'on a pu passer des valeurs uniques vers des nombres flous (superposition d' α -coupes).

4.2.2. Evaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents

Dans cette partie, on reprend les données de référence utilisées par la QRA classique (température ambiante et humidité relative), lesquelles sont représentées sous forme d'intervalles de confiance et de valeurs uniques (voir tableau 4.2).

Tableau 4.2 - Intervalles de confiance des paramètres physiques

Paramètres physiques	Borne inférieure E-	Borne supérieure E+
P1 : Température ambiante de l'air (°K)		
P2 : Humidité relative (%)		

Par référence au modèle d'évaluation floue de la conséquence du scénario d'accidents décrit dans la section (§ 2.5.2), nous transformons ces intervalles de confiance en des nombres flous. Les résultats de cette transformation sont donnés par les figures (4.5) et (4.6).

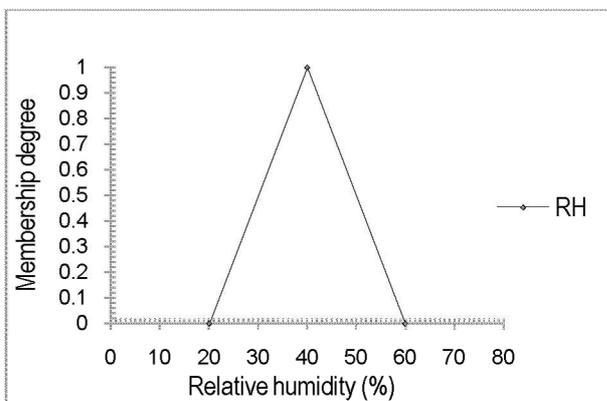


Figure 4.5 - Nombre flou de l'humidité relative

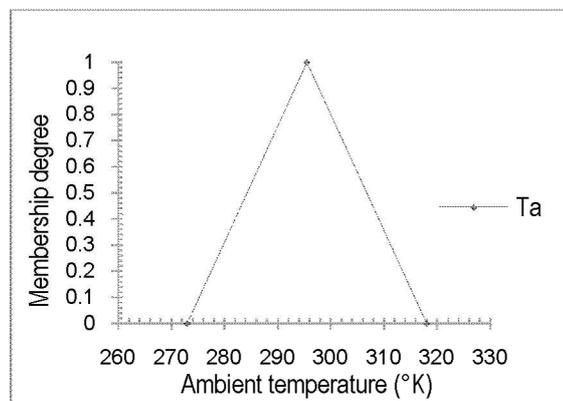


Figure 4.6 - Nombre flou de la température

La détermination de la probabilité floue des effets létaux est faite selon la méthodologie décrite en chapitre 2 (§ 2.5.2) à l'aide des équations du modèle physique et de vulnérabilité du phénomène BLEVE, citées en chapitre 3 (§ 3.2.5.2). Parmi ces équations, on retrouve les deux équations suivantes :

$$\tilde{P}_w = 1013.25 (\tilde{RH}) \exp\left(14.4114 - \frac{5328}{\tilde{T}_a}\right) \quad (4.1)$$

Où : \tilde{P}_w est la pression partielle floue de vapeur d'eau dans l'air (N/m²), \tilde{RH} est l'hygrométrie floue (humidité relative en %) et \tilde{T}_a est la température ambiante floue (°K).

$$\tilde{P}_{Fi} = 0.5 \left[1 + \frac{\tilde{Y} - 5}{|\tilde{Y} - 5|} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{|\tilde{Y} - 5|}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (4.2)$$

Où : \tilde{P}_{Fi} est la probabilité floue des effets létaux et \tilde{Y} est la variable probit floue.

La figure (4.7) montre la probabilité floue des effets létaux.

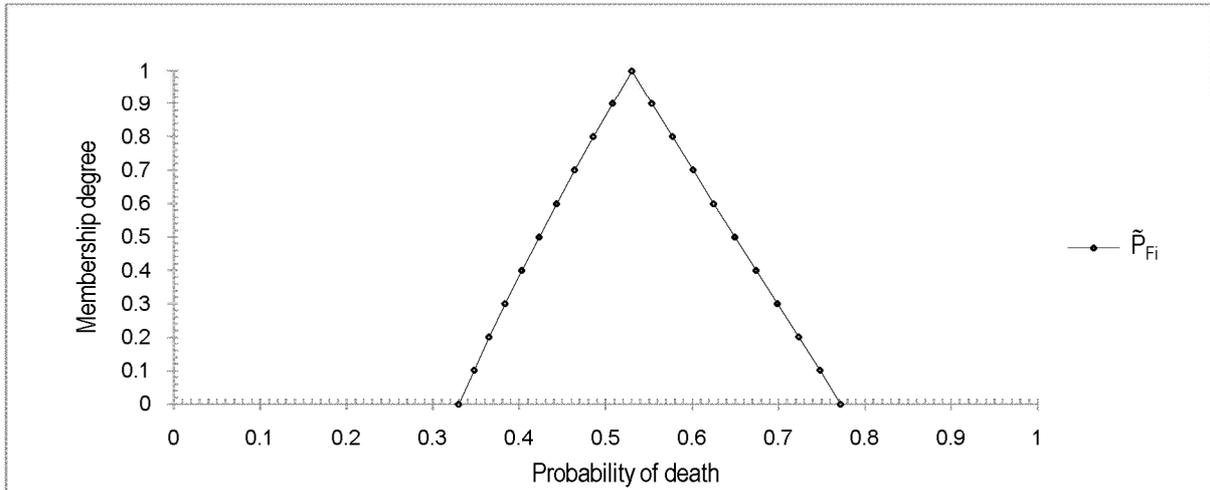


Figure 4.7 - Probabilité floue des effets létaux (décès)

Ainsi, nous pouvons bien constater que la probabilité de fatalité issue d'une QRA classique (cas du BLEVE, la probabilité de fatalité unique : 0.53) appartient au sens ensembliste à la probabilité de fatalité floue (cas du BLEVE, le support de la probabilité de fatalité floue : [0.33 , 0.77]).

4.2.3. Evaluation de l'indice de risque flou

En se basant sur les résultats issus des modèles d'évaluation de la fréquence de la conséquence (§ 4.2.1) et de l'effet de la conséquence du scénario BLEVE (§ 4.2.2), et au moyen de l'équation (2.39), nous procédons au calcul de l'indice de risque flou en multipliant la fréquence floue de la conséquence \tilde{f}_{Ci} et la probabilité floue des effets létaux \tilde{P}_{Fi} . Le résultat de ce calcul est représenté graphiquement par la figure (4.8).

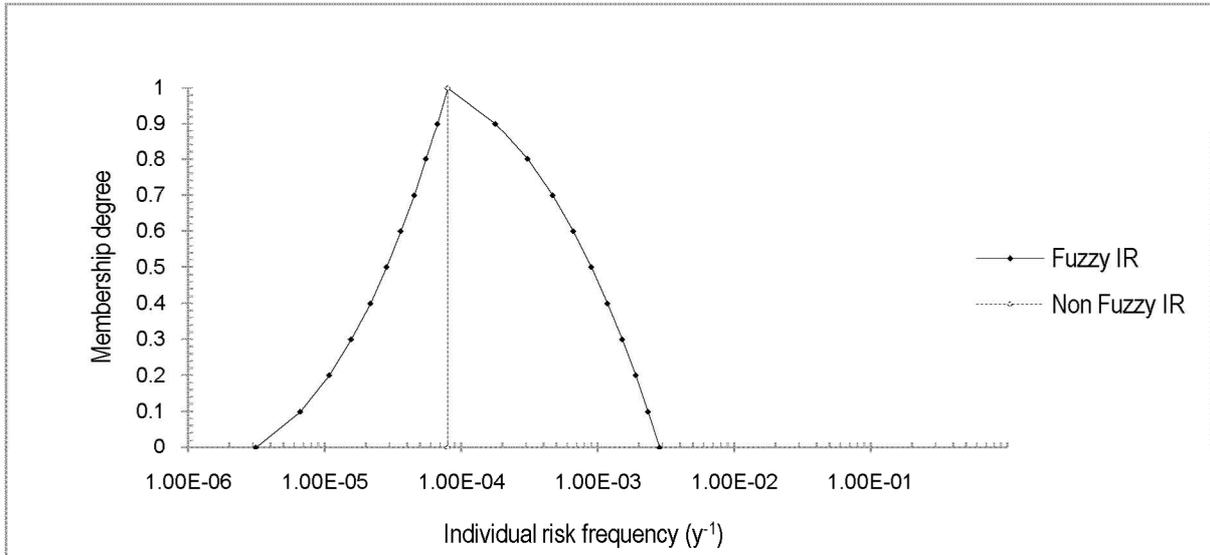


Figure 4.8 - Indices de risque flou et conventionnel relatifs au scénario du BLEVE

L'indice de risque conventionnel (une valeur hypothétique) est encadré par l'indice de risque flou. Il représente d'ailleurs la valeur modale de celui-ci. Un tel résultat ne peut être considéré comme une simple coïncidence, mais c'est plutôt une concrétisation de la faisabilité du modèle flou. En effet, en faisant passer en revue les équations impliquées dans le modèle de conséquences (§ 3.2.5.2), on peut constater qu'il s'agit de fonctions monotones (croissantes ou décroissantes). D'où la possibilité de passer aux opérations étendues sur les α -coupes (intervalles de niveau α) en inversant bien sûr les bornes en cas de fonctions décroissantes.

4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de répondre au problème des incertitudes relatives aux paramètres des scénarios d'accidents, en l'occurrence les fréquences des événements initiateurs, les probabilités de défaillance des barrières, les probabilités d'ignition et les paramètres physiques (l'humidité relative et la température ambiante) dans le cadre d'une analyse quantitative des risques (QRA).

Le fait de considérer des nombres flous caractérisant des distributions de possibilités révèle deux importants avantages :

- Relativiser les valeurs des intervalles de confiance aux bornes fixes en considérant des appartenances graduelles,
- Réduire l'incertitude relative aux intervalles de confiance larges par des valeurs modales représentant le maximum de présomption.

Le modèle flou proposé répond convenablement à la problématique des données imprécises et incertaines. Les quantités floues obtenues encadrent les valeurs uniques des différents paramètres (fréquence des conséquences, probabilité de fatalité et indice de risque) prises comme valeurs de référence.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire 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. Connue comme approche rigoureuse et largement utilisée dans les industries des procédés pétrochimiques, l'analyse QRA (Quantitative Risk Analysis) a été choisie pour servir de cadre méthodologique pour notre travail.

- **Travail réalisé**

Le problème des incertitudes relatives aux paramètres du risque demeure à nos jours un souci majeur pour les décideurs et les analystes. Il était question donc d'apporter des éléments de réponse à un tel problème dans le cadre d'une analyse quantitative des risques (QRA).

En effet, partant du modèle d'une QRA classique nous avons fait intervenir le concept de variable floue (caractérisée par un nombre flou) pour pouvoir tenir compte des incertitudes et/ou imprécisions liées aux différents paramètres de calcul de l'indice de risque individuel. Ainsi, on est passé d'un indice de risque conventionnel vers un indice de risque flou, en passant tout d'abord par une fuzzification de la fréquence du scénario d'accident et de la probabilité de fatalité.

Le modèle "QRA floue" proposé utilise les équations de calcul d'une QRA conventionnelle, mais placées dans un environnement flou se caractérisant par des données imparfaites issues d'une expertise ou de la littérature.

Pour la validation du modèle de la QRA floue, nous avons procédé par comparaison avec une QRA classique, en prenant les données utilisées par cette dernière comme valeurs de référence qu'on a qualifiées d'hypothétiques.

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 , $\alpha \in [0, 1]$).

- **Perspectives**

Le travail du présent mémoire devrait être considéré comme un premier pas dans l'amélioration de l'approche QRA conventionnelle. D'autres aspects importants peuvent faire l'objet de développements futurs, selon un modèle flou ou possibiliste. L'évaluation de l'indice du risque flou (risque individuel) par rapport aux critères d'acceptabilité, est un sujet qui mérite d'être étudié. De même, le développement d'un software permettant de visualiser les contours de risque flous est un travail important à envisager dans des études futures.

[ARAMIS, 2004] Projet européen "Accidental risk assessment methodology for industries in the framework of Seveso II directive" (site internet : aramis.jrc.it).

[Bouchon-Meunier, 1995] Bernadette Bouchon-Meunier. Logique floue et ses applications. Addison Wesley, Paris, 1995.

[Bourekda, 2008] A. Bourekda. Prévention des Risques Professionnels d'une démarche réactive à une démarche proactive "Changement de perspective dans la mesure de performance". Centre d'Études Supérieures Industrielles, 2008.

[Casal, 2008] Joaquim Casal. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. Industrial Safety Series, vol. 8, Elsevier Science, 2008.

[CCPS, 1989] CCPS. Guidelines for process equipment reliability data with data tables. AIChE, New York, 1989.

[CCPS, 1994] CCPS. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. AIChE, New York, 1994.

[CCPS, 1999] CCPS. Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases. AIChE, New York, 1999.

[CCPS, 2000] CCPS. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd ed. AIChE, New York, 2000.

[CCPS, 2001] CCPS. Layers of Protection Analysis : Simplified Process Risk Assessment. AIChE New York, 2001.

[CCPS, 2009] CCPS. Guidelines for Developing Quantitative Safety Risk Criteria. AIChE, New York, 2009.

[CFBP, 2011] CFBP. Propriétés des GPL. Comité Français du Butane et du Propane (sur le site www.cfbp.fr).

[Cheremisinoff, 2000] Nicholas P. Cheremisinoff. Handbook of Hazardous Chemical Properties. Butterworth-Heinemann, 2000.

[Chin et al., 2008] Kwai-Sang Chin, Allen Chan, Jian-Bo Yang. Development of a fuzzy FMEA based product design system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 36, pp. 633-649, 2008.

[Desroches, 1995] Alain Desroches. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Lavoisier, France, 1995.

[DNV, 2006] DNV Software. PHAST & SAFETI User's Manual, version 6.51. Det Norske Veritas, London, 2006.

[Dubois & Prade, 1987] Didier Dubois, Henri Prade. The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 24, pp. 279–300, 1987.

[Dubois & Prade, 1988] Didier Dubois, Henri Prade. *Possibility theory*. Plenum Press, New York, 1988.

[Dumitrescu et al., 2002] M. Dumitrescu, A. P. Ulmeanu, T. Munteanu. Fuzzy logic system for fuzzy event tree computing. *First International IEEE Symposium "Intelligent Systems"*, vol.1, pp. 125-129, 2002.

[Dziubiński et al., 2006] M. Dziubiński, M. Frątczak, A. S. Markowski. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, pp. 399-408, 2006.

[EPA, 1999] CEPPO. Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. Environmental Protection Agency, 1999.

[Farmer, 1967] F. Reg Farmer. Siting Criteria : A New Approach. *Proceedings of the IAEA symposium on nuclear siting*, IAEA, pp. 303-329, 1967.

[Gouriveau, 2003] Rafael Gouriveau. *Analyse de risques, formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.

[Griot et Ayrat, 2002] Chloé Griot et Pierre-Alain Ayrat. *Terminologie en science du risque*. Groupe des Ecoles des Mines, 2002.

[HSE, 1992] HMSO. *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*. Health and Safety Executive (HSE), London, 1992.

[ICSI, 2009] Groupe de travail ICSI. *Fréquence des événements initiateurs d'accidents et disponibilité des barrières de protection et de prévention*. Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle, 2009.

[IEC 61508, 1998] IEC 61508. *Functional safety of electric/electronic/programmable electronic systems*. International Electrotechnical Commission (IEC), 1998.

[IEC 61511, 2003] IEC 61511. *Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector*. International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.

[IEC 61882, 2001] IEC 61882. *Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) - guide d'application*. International Electrotechnical Commission (IEC), 2001.

[INERIS DRA-006, 2002] INERIS DRA-006. *Le BLEVE, Phénoménologie et modélisation des effets thermiques*. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2002.

[INERIS DRA-35, 2003] INERIS DRA-35. *Méthodes d'analyse des risque générer par une installation industrielle*. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2003.

[INERIS DRA-41, 2004] INERIS DRA-41. Appui technique pour la mise en œuvre des PPRT. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, 2004.

[ISO/CEI 51, 1999] ISO/CEI. Aspects liés à la sécurité - Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation, 1999.

[ISO/CEI 73, 2002] ISO/CEI. Management du risque - Vocabulaire - Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. Organisation internationale de normalisation, 2002.

[Kaufmann, 1977] Arnold Kaufmann. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs. Masson, Paris, 1977.

[Kirchsteiger, 1999] Christian Kirchsteiger. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 12, pp. 399-419, 1999.

[Lai et al., 1988] F. S. Lai, S. Sheno, L. T. Fan. Fuzzy fault tree analysis theory and applications. *Engineering risk and hazard assessment (CRC Press)*, vol. 1, pp. 139-167, Florida, 1988.

[Lee's, 2005] Sam Mannan. *Lee's Loss Prevention in the Process Industries*, 3rd ed. Elsevier, 2005.

[Liang & Wang, 1993] Gin-Shuh Liang, Mao-Jiun J. Wang. Fuzzy fault-tree analysis using failure possibility. *Microelectronics Reliability*, vol. 33, pp. 583-597, 1993.

[Markowski et al., 2010] Adam S. Markowski, M. Sam Mannan, Agata Kotynia (Bigoszezewska), Dorota Siuta. Uncertainty aspects in process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, pp. 446-454, 2010.

[Marszal & Scharpf, 2002] Edward M. Marszal, Eric William Scharpf. Safety Integrity Level Selection : Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis. *International Society of Automation (ISA)*, 2002.

[Markowski & Mannan, 2008] Adam S. Markowski, M. Sam Mannan. Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 159, pp. 152-157, 2008.

[Markowski & Mannan, 2009] Adam S. Markowski, M. Sam Mannan. Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 22, pp. 921-927, 2009.

[Markowski et al., 2010] Adam S. Markowski, M. Sam Mannan, Agata Kotynia (Bigoszezewska), Dorota Siuta. Uncertainty aspects in process safety analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, pp. 446-454, 2010.

[MEDD, 2004] MEDD. Guide technique relatif aux valeurs de référence de seuils d'effets des phénomènes accidentels des installations classées. Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), France, 2004.

[Nait-Said et al., 2009] R. Nait-Said, F. Zidani, N. Ouzraoui. Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, pp. 651-658, 2009.

- [OREDA, 2002] SINTEF. Offshore Reliability Data Handbook (OREDA), 4th ed. DNV Technica, Norway, 2002.
- [Ronza, 2007] Andrea Ronza. Contributions to the risk assessment of major accidents in port areas. PhD thesis, UPC, Barcelona, 2007.
- [Ruegg, 1985] Alan Ruegg. Probabilités et statistique. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 1985.
- [Roberts, 1982] A. F. Roberts. Thermal Radiation from Releases of LPG from Pressurised Storage. Fire Safety Journal, vol. 4, pp. 197-212, 1982.
- [Sallak, 2007] M. Sallak. Evaluation des paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2007.
- [Sellami et al., 2010] Ilyas Sellami, Rachid Nait-Said, Nouara Ouazraoui, Mouloud Bourareche. Quantitative Risk Assessment of LPG Storage Vessels Using an Integrated Computer Package. ISHC5, 5th International Symposium on Hydrocarbons & Chemistry, Algiers, 2010.
- [Shafer, 1976] Glenn Shafer. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976.
- [Sharma et al., 2005] Rajiv Kumar Sharma, Dinesh Kumar, Pradeep Kumar. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modeling. International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 22, pp. 986-1004, 2005.
- [Simon et al. 2007] C. Simon, M. Sallak, J. F. Aubry. SIL allocation of SIS by aggregation of experts opinions. Safety and Reliability Conference (ESREL), Stavanger, Norway, 2007.
- [Singer, 1990] D. Singer. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis. Fuzzy Sets and Systems, vol. 34, pp. 145-155, 1990.
- [Soman & Misra, 1993] K. P. Soman, K. B. Misra. Fuzzy fault tree analysis using resolution identity and extension principle. International Journal of Fuzzy Mathematics, vol. 1, pp. 193-212, 1993.
- [SONATRACH, 2008] Document SONATRACH DP HRM. Direction Régionale HRM, Division Production, SONATRACH, 2008.
- [SONATRACH, 2010] SONATRACH. Rapport Etude de dangers. Direction Régionale HRM, Division Production, SONATRACH, 2010.
- [SONATRACH, 2011] SONATRACH. Rapport d'Audit Environnemental. Direction Régionale HRM, Division Production, SONATRACH, 2011.
- [Tanaka et al., 1983] Hideo Tanaka, L. T. Fan, F. S. Lai, K. Toguchi. Fault-Tree Analysis by Fuzzy Probability. IEEE Transactions on Reliability, vol. 32, pp. 453-457, 1983.
- [Théberge, 2000] Marie-Claude Théberge. Analyse de risques d'accidents technologiques majeurs. Ministère de l'Environnement, Québec, 2000.

- [TNO, 1992] Committee for the Prevention of Disasters. Methods for the determination of possible damage (Green Book), CPR 16E. The Hague, 1992.
- [TNO, 1997] Committee for the Prevention of Disasters. Methods for determining and processing probabilities (Red Book), CPR 12E. The Hague, 1997.
- [TNO, 1999] Committee for the Prevention of Disasters. Guidelines for Quantitative Risk Analysis (Purple Book), CPR 18E. The Hague, 1999.
- [TNO, 2005] Committee for the Prevention of Disasters. Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow Book), CPR 14E. The Hague, 2005.
- [Villemeur, 1988] Alain Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, n° 67, Eyrolles, Paris, 1988.
- [Zadeh, 1965] Lotfi Askar Zadeh. Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [Zadeh, 1975] Lotfi Askar Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, parts I. Information Sciences, vol. 8, pp. 199-249, 1975.
- [Zadeh, 1978] Lotfi Askar Zadeh. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Probability. Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, pp. 3-28, 1978.
- [Zimmermann, 1983] Hans Jurgen Zimmermann. Using fuzzy sets in operational research. European Journal of Operational Research, vol. 13, pp. 201-216, 1983.
- [Zouhal, 1997] Lalla Merieme Zouhal. Contribution à l'application de la théorie des fonctions de croyance en reconnaissance des formes. PhD thesis, Université de Compiègne, France, 1997.

Résumé : L'analyse quantitative des risques (Quantitative Risk Analysis : QRA) est une approche rigoureuse et avancée visant une industrie plus sûre et se révèle indispensable et nécessaire pour une bonne estimation et maîtrise des risques. Cette approche consiste principalement à identifier les scénarios d'accidents potentiels ou représentatifs, à estimer leur fréquence et analyser leurs conséquences. La finalité étant d'estimer les risques individuel et sociétal et par suite appliquer les mesures qui répondent convenablement à cette estimation. La QRA est basée sur des modèles mathématiques issus de la logique binaire : les états de défaillance et de fonctionnement des composants sont précisément distingués, les taux de défaillance sont à valeurs précises et par conséquent, une valeur unique d'estimation du risque est obtenue. Cette valeur est souvent assez conservatrice, car elle est basée sur le principe du "cas le plus défavorable". Cependant, la variabilité des taux de défaillance et des paramètres physiques ainsi que les différentes suppositions sur les modèles mathématiques utilisés sont souvent incertains et de nature subjective. Ainsi, dans une QRA, chaque étape qu'elle soit qualitative ou quantitative est une source potentielle d'incertitudes. Le présent travail veut apporter des éléments de réponse à la problématique des incertitudes inhérentes à une QRA, en s'aidant des outils de la théorie des ensembles flous et celle de possibilité.

Mots-clés : Analyse quantitative des risques (QRA), Risques individuel et sociétal, Incertitudes, Théorie des ensembles flous.

التحليل الكمي للمخاطر الصناعية : مساهمة تقنيات المنطق الغامض

ملخص : يعتبر التحليل الكمي للمخاطر (Quantitative Risk Analysis : QRA) مقارنة صارمة ومتقدمة تهدف إلى جعل البيئة الصناعية أكثر أماناً، كما أنها تعد ضرورة لا غنى عنها من أجل التقييم والتحكم الجيد في المخاطر. تعتمد هذه المقاربة أساساً على تحديد سيناريوهات الحوادث الصناعية المحتملة وتقدير تردداتها وتحليل نتائجها، وذلك بغية تقدير المخاطر الفردية والاجتماعية، مما يسمح باتخاذ الاحتياطات والتدابير اللازمة التي تتلاءم وتستجيب بشكل كاف لهذه التقديرات. يستند التحليل الكمي للمخاطر على نماذج رياضية مستمدة من المنطق الكلاسيكي (الثنائي)، من ذلك حالات عطب وتشغيل مكونات الأجهزة والتي تتمايز على وجه التحديد، فكثيراً ما نجد مثلاً أن معدلات العطب هي قيم محددة وبالتالي نحصل في النهاية على قيمة واحدة لتقدير المخاطر. هذه القيمة غالباً ما تكون متحفظة جداً، لأنها تحسب اعتماداً على مبدأ "أسوأ الحالات". ومع ذلك، فإن تعدد معدلات العطب والمتغيرات الفيزيائية والفرضيات المختلفة بشأن النماذج الرياضية المستخدمة، في كثير من الأحيان ما تكون عرضة للارتيابات وذات طبيعة ذاتية (غير موضوعية). كذلك، في التحليل الكمي للمخاطر، تعتبر كل مرحلة من مراحلها - سواء كانت كمية أو نوعية - مصدراً محتملاً للارتيابات. في هذه المذكرة، نحاول تقديم إجابات لإشكالية الارتيابات في التحليل الكمي للمخاطر باستعمال أدوات نظرية المجموعات الغامضة.

كلمات دلالية : التحليل الكمي للمخاطر (QRA)، المخاطر الفردية والاجتماعية، الارتيابات، نظرية المجموعات الغامضة.