TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures

Liste des tableaux

ACRONYMES

AdD	Arbre de Défaillance
AdE	Arbre d'événement
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
APD	Analyse Préliminaire de dangers
APR	Analyse Préliminaire des Risques
BPCS	Basic Process Control System
CA	Critère d'acceptabilité
CCF	Common Cause Failure
CCPS	Center for Chemical Process Safety
DCS	Distributed Control System
EUC	Equipment Under Control
FC	Fail Closed
FI	Flow Indicator
FICA	Flow Indicator Controller Alarm
FO	Fail Open
FRA	Flow Recorder Alarm
FZ	Flow Emergency Shutdown
HAZID	Hazards Identification
HAZOP	Hazard and Operability Study
IPL	Independent Protection Layer
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
ISO	International Standard Organisation
LOPA	Layers of Protection Analysis

NC	Niveau de Confiance
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PA	Pressure Alarm
PCV	Pressure Controller Valve
PFD	Probability of Failure on Demand
PHA	Process Hazard Analysis
PIA	Pressure Indicator Alarm
PLC	Programmable Logic Controller
PZ	Pressure Emergency Shutdown
TOR	Tout ou Rien
SdF	Sûreté de Fonctionnement
SIF	Safety Instrumented Function
SIL	Safety Integrity Level
SIS	Safety Instrumented System
TI	Temperature Indicator
TRA	Temperature Recorder Alarm
TRCA	Temperature Recorder Controller Alarm
TZ	Temperature Emergency Shutdown
XP	Exploitation

INTRODUCTION

1 Problématique

Actuellement, le monde industriel est devenu plus sensible à la maîtrise des accidents majeurs à cause des conséquences graves et même catastrophiques matérielles, humaines et environnementales. Pour cela des efforts considérables sont fournis en matière de gestion des risques afin de prévenir ces accidents.

L'analyse et l'évaluation des risques industriels exigent la disposition de certaines données et informations sur les différents composants du système étudié et donc, sur les différents paramètres caractérisant les risques. A cet égard, l'application des méthodes d'analyse et d'évaluation des risques est souvent difficile car faute de données correctes, elle est utilisée hors de son domaine de validité.

Dans certains cas, les données peuvent être disponibles et connues avec précision en se référant au retour d'expérience. Cependant, ces données ne sont pas toujours adaptées pour l'analyse d'événements rares et souvent complexes tels que, les accidents majeurs pour lesquels les données statistiques ne sont pas satisfaisantes. Les banques de données [OREDA, 2002; Exida, 2005; CCPS, 1991; CCPS, 2000] et les jugements d'experts sont une autre source fournissant des données utilisées par les méthodes d'analyse des risques, mais qui sont aussi entachées d'incertitude et d'imprécision. Les approches, floue et possibiliste [Zadeh, 1965; Zadeh, 1978] peuvent offrir un cadre très adéquat pour la représentation et le traitement de ces aspects incertains et/ou imprécis.

2 Objectif

Ce mémoire aborde la problématique de la prise en compte des incertitudes relatives aux données utilisées dans l'évaluation des paramètres des risques et des performances des barrières de sécurité, particulièrement les couches de protection indépendantes, pour une bonne évaluation semi-quantitative des risques industriels dans le cadre de la méthode d'analyse des couches de protection (LOPA).

L'objectif de ce mémoire étant d'introduire une approche floue de LOPA permettant le traitement flou des données utilisées par LOPA conventionnelle afin d'augmenter ses performances en terme d'analyse et de réduction des risques. Cette approche consiste à modéliser les imprécisions et/ou incertitudes des fréquences des événements initiateurs, des probabilités de défaillance à la demande des couches de protection indépendantes par des intervalles ou nombres flous et par conséquent, déterminer les fréquences floues des conséquences réduites de ces scénarios en utilisant des techniques de calcul floues.

2 Organisation du mémoire

Le présent mémoire est subdivisé en deux parties :

- **Une partie théorique comportant trois chapitres:**

- **Le premier chapitre** intitulé « analyse des risques industriels » 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 LOPA.

- **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. Enfin, nous présentons quelques approches d'application de la théorie des ensembles flous à l'analyse et l'évaluation des risques.

- **Le troisième chapitre** est consacré à l'approche floue développée dans le cadre de notre travail. Nous présenterons la méthodologie générale avec une modélisation floue des données incertaines et/ou imprécises des paramètres d'entrée d'une LOPA conventionnelle.

➢ **Une partie expérimentale comportant deux chapitres:**

- **Le quatrième chapitre** est consacré à la présentation du système "Four Rebouilleur" H-101 de traitement de gaz (SONATRACH, Hassi R'Mel) qui a fait l'objet de notre une étude de cas, et à l'identification des risques inhérents à ce système. Une collecte et adaptation de données fréquentielles et probabilistes sont entreprises dans un but de se rapprocher du système réel et de son environnement. Ces données utilisées par LOPA conventionnelle nous ont servis pour la validation de "LOPA floue".
- **Le cinquième chapitre** présentera la mise en œuvre de l'approche "LOPA floue" avec une comparaison avec les résultats de LOPA conventionnelle.

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

CHAPITRE I

ANALYSE DES RISQUES INDUSTRIELS

I.1. Introduction

Actuellement les industries sont confrontées à des problèmes industriels majeurs qui menacent leur pérennité et remettent en cause leurs objectifs. Devant ce défi, les industries doivent défendre leur existence en instaurant une stratégie de gestion des risques et en mettant en place des méthodes d'analyse et d'évaluation de ces risques et ce, pour garantir que leurs installations fonctionnent dans toute sécurité. Dans sa première étape la gestion des risques consiste à analyser les risques endogènes et exogènes inhérents aux systèmes industriels en commençant par l'identification des dangers potentiels existants puis l'estimation des risques associés en termes d'occurrence et de gravité. La deuxième étape consiste à évaluer ces risques par rapport à des critères d'acceptabilité du risque. Enfin, si le risque est jugé inacceptable, de nouvelles mesures et barrières de sécurité seront mises en œuvre afin de maîtriser ces risques.

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 maîtrise du risque. Ensuite, nous allons aborder quelques méthodes d'analyse des risques, en décrivant brièvement leurs principes de déroulement et la méthode LOPA (Layers Of Protection Analysis) fera l'objet d'une présentation détaillée.

I.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.

I.2.1. Notion de danger

Le terme « danger » est défini dans la directive 96/82 /CEI [ISO, 1999] comme une *propriété intrinsèque d'une substance dangereuse où d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement.*

Le même terme est défini selon le référentiel OHSAS 18001[OHSAS18001, 1999] comme une *source où une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments.*

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

Notons que ces définitions de danger et autres qui sont proposées par d'autres normes et auteurs, malgré leur vocabulaire différent mais elles portent le même sens.

I.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 multimédia [Griot et Ayral, 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 qu'un risque est majeur, acceptable, inacceptable…etc.

I.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 de 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 où inacceptable.

A l'issue d'un tel résultat qu'on décide de l'opportunité des mesures nécessaires pour maîtriser ce risque.

I.3. Processus de gestion des risques

Bien qu'il existe des différences importantes sur les termes liés à la gestion des risques, la définition de processus de gestion des risques est relativement identique dans tous les référentiels et normes [ISO, 1999 ; OHSAS18001, 1999; IEC 61511, 2003].Dans le cadre de la gestion des risques, l'analyse et l'évaluation des risques peuvent être menées, selon la qualité de l'information et de données recueillies sur le système par plusieurs façons, qualitative, semi-quantitative où quantitative. Dans ce qui suit et pour chaque approche, nous présentons quelques méthodes.

Dans les guides ISO/CEI 51 et 73 [ISO, 1999], la gestion des risques est définie comme *l'ensemble des activités coordonnées, menées en revue 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 (Fig.I.1):

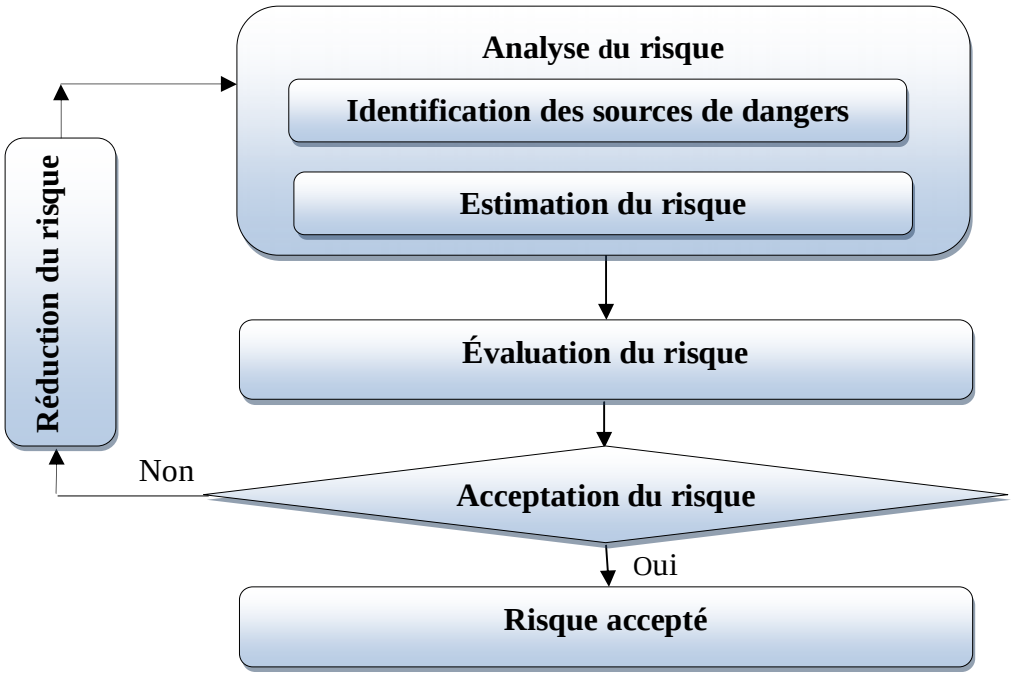

Fig. I.1- Processus de gestion des risques [ISO, 1999].

I.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. 2003]. Citons par exemple HAZID (Hazards 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 effectué. 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.

I.3.2. Évaluation du risque

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

I.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 et le risque estimé qu'on juge de l'acceptabilité ou la non acceptabilité du risque [ISO, 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.

I.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 (réduction potentielle de danger, atténuation des conséquences) et à diminuer la probabilité d'occurrence par la mise en place de barrières visant à prévenir les accidents [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, 2003].

I.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
- Méthodes quantitatives

I.4.1. Méthodes qualitatives

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toutes autres analyses. 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 nombreuses outils d'analyse et d'évaluation des risques à caractère qualitatif existent citons:

I.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:

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 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.

I.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 [INERIS, 2003; CEI 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, 2003]. Ces derniers peuvent subir des contraintes intrinsèques ou extrinsèques qui vont rendre anormal le fonctionnement du système.

Citons par exemple:

- Augmentation / diminution de débit.
- Diminution / élévation de la température ou de pression.
- Dépassement du temps…etc.

Ces variations (dérives potentiels) 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.

Dans notre étude de cas, cette méthode sera appliquée dans un but d'identification des différents scénarios d'accidents.

I.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 à 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 nombreuses méthodes et outils d'analyse et d'évaluation à caractère semi-quantitatif ont été développés. Dans ce qui suit on présentera certaines méthodes parmi les plus utilisées dans l'évaluation des risques.

I.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 PRETECTION ANALYSIS" (analyse des couches de protection). Cette méthode fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes et des procédés industriels chimiques, pétrochimiques et nucléaires [IEC61511, 2003]. Cette méthode sera reprise en détails dans ce qui suit.

I.4.2.2. Graphe de risque étalonné

Le graphe de risque étalonné est une méthode semi-quantitative utilisée en sûreté de fonctionnement et appliquée largement dans de nombreux domaines, pétrolier, chimique, nucléaire…etc. [IEC61511, 2003].

Cette méthode à pour but de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité(SIL) d'une fonction instrumentée de sécurité caractérisant un système instrumenté de sécurité (SIS) [IEC61511, 2003] en se basant sur l'équation de risque:

$$R = f * C \qquad (I.1)$$

Où :

R : *Risque en l'absence de systèmes de sécurité,*

f : *Fréquence d'occurrence de* l'événement *dangereux,*

C : *Conséquence de l'événement dangereux,*

Il est supposé que la fréquence de l'événement dangereux définie en fonction de:

- *La fréquence et durée d'exposition dans une zone industrielle (F),*
- *La possibilité d'éviter l'événement dangereux (P),*
- *La probabilité que l'événement dangereux se produise en l'absence des systèmes relatifs à la sécurité (W).*

Et par conséquent le risque est défini en fonction de quatre paramètres qui sont : *C, F, P, W*. Tous ces paramètres doivent être identifiés et estimés en leurs affectant des valeurs numériques. L'affectation de ces valeurs est faite de sorte qu'une fois les valeurs sont combinées l'évaluation est classée par ordre de l'importance de risque. Tous ces paramètres seront combinés ensemble et représentés par un diagramme appelé graphe de risque étalonné (Fig. I.2).

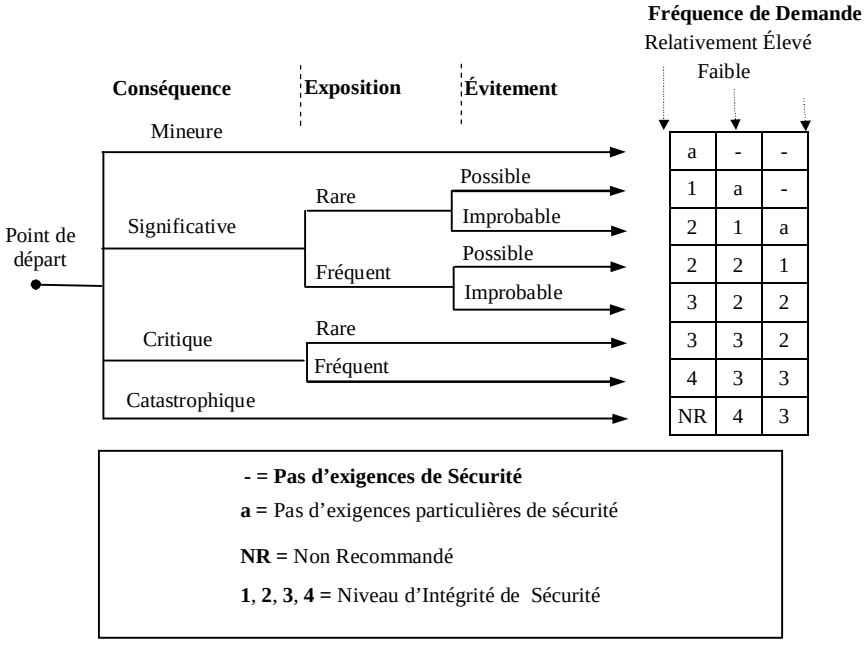

Fig. I.2- Graphe de risque avec une description qualitative

I.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.

Nous présentons deux méthodes quantitatives parmi les plus utilisées, en l'occurrence l'arbre des événements et l'arbre de défaillances.

I.4.3.1. Arbre des événements (AdE)

L'arbre des événements est une méthode déductive [Villemeur, 1988] qui consiste à partir de l'événement initiateur conduisant à un événement indésirable 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 il est montré dans la figure (I.3), L'AdE construit permet temporellement d'identifier les différentes séquences d'événements susceptibles de conduire ou non à des conséquences aux limites et les chemins les plus dangereux conduisant à des conséquences catastrophiques sont ensuite analysés en détail.

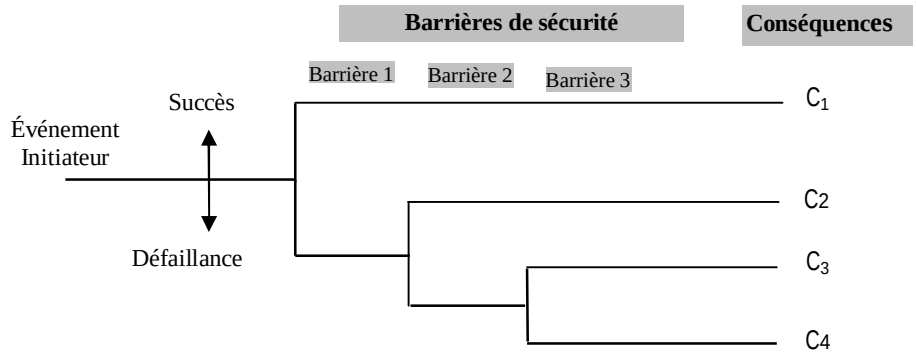

Fig. I.3- Schéma d'un AdE avec des barrières de sécurité.

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

Les étapes de la méthode sont:

- Définition de l'élément initiateur.
- Identification des barrières de sécurité et leurs fonctions.

- Construction de l'arbre.
- Traitement de l'arbre.

L'AdE sert le support pour LOPA. Pour ce, nous ferons appel à cette méthode pour représenter les scenarios d'accidents.

I.4.3.2. Arbre de défaillances (AdD)

L'arbre de défaillances, appelé également arbre des causes, arbre des défauts où encore arbre des fautes, est une méthode purement quantitative qui est utilisée largement dans le domaine de la sûreté de fonctionnement [Villemeur, 1988].

C'est une démarche d'analyse arborescente et probabiliste [Desroches, 1995]. Partant d'un événement indésirable bien défini, il s'agit d'identifier les combinaisons d'événements (événements intermédiaires et élémentaires) pouvant conduire à la réalisation de cet événement. Tous les événements identifiés doivent être représentés et hiérarchisés graphiquement sous forme d'un arbre en commençant par représenter au sommet l'événement indésirable puis les événements intermédiaires et élémentaires. Tous ces événements sont liés par des portes logiques caractérisant la logique de défaillance du système.

Les étapes de cette méthode sont les suivantes:

- La définition de l'événement indésirable (événement de sommet)
- Recensement de tous les événements intermédiaires et élémentaires
- La construction de l'arbre (du sommet vers la base)
- Traitement de l'arbre

Dans le domaine d'analyse et d'évaluation des risques ces méthodes et autres ont des avantages et des limites, l'application de l'une de ces méthodes présentées est fonction des objectifs de l'étude.

I.4.4. Méthodologie d'analyse des risques retenue

L'analyse des couches de protection est une méthode simplifiée d'évaluation des risques [Arthur et al. 1998 ; IEC61511, 2003] d'usage très générale, couramment utilisée pour l'identification et la maîtrise des risques à toutes les phases, de conception et d'exploitation des installations et des projets industriels. Elle présente l'avantage d'être menée dans des délais courts et avec des coûts moindres. De plus l'exactitude des données quantitatives n'est pas exigée et des ordres des grandeurs sont suffisants.

I.4.4.1. Principe de la méthode LOPA

L'analyse des couches de protection est une méthode semi-quantitative orientée barrières [CCPS, 2001], qui est destinée à la maîtrise des risques d'accidents majeurs. Généralement, le principe de cette méthode consiste en premier lieu à identifier les différents scénarios d'accidents d'une installation.

En effet, il s'agit à partir d'un événement redouté défini à priori par une analyse qualitative des risques du type HAZOP, AMDE [IEC61511, 2003], de déterminer l'enchaînement des événements pouvant conduire à cet événement. Il s'agit ensuite d'évaluer la robustesse des couches de protection mises en place selon une approche semi-quantitative. Cette dernière permet d'évaluer la probabilité de défaillance à la demande (PFD) de chaque couche de protection.

Une fois les événements initiateurs sont identifiés et leurs fréquences d'occurrence sont ajustées, LOPA permet la détermination de la fréquence de réalisation de chaque scénario d'accident par multiplier la fréquence d'occurrence de cet événement initiateur par le produit des PFD des couches de protection existantes. Une fois le scénario d'accident est estimé en terme de fréquence de la conséquence, il reste à décider si ce scénario d'accident est acceptable ou non. Cette décision sera prise au travers d'une évaluation de ce risque par rapport aux critères d'acceptabilité arrêtés au début d'analyse.

I.4.4.2. Déroulement de la méthode LOPA

La démarche généralement retenue [CCPS, 2001; Chunyang et al, 2008] pour réaliser une analyse par la méthode LOPA est la suivante:

- Comme tout outil d'analyse des risques, l'établissement des critères d'acceptabilité et de sélection des scénarios d'accidents à évaluer se révèle indispensable et préalable.
- Développement des scénarios d'accidents.
- Identification des fréquences des événements initiateurs.
- Identification des couches de protection indépendantes et leurs probabilités de défaillances à la demande.
- Détermination des fréquences des scénarios d'accidents.
- Évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères d'acceptabilité du risque.

I.4.4.3. Étapes de la méthode LOPA

Généralement la méthode LOPA peut être décomposée en six principales étapes:

a) Étape 1 : Établissement des critères d'acceptabilité et de sélection scénarios d'accidents

Cette étape est préalable à l'analyse des risques, elle fournit un moyen de limiter la durée de l'étude en ne considérant que les scénarios significatifs en termes de conséquences. L'établissement des critères d'acceptabilité est fait en fonction du contexte de chaque établissement /entreprise concerné et aussi des objectifs poursuivis dans chaque démarche de gestion des risques. Quelques soient les critères d'acceptabilité retenus, il est indispensable qu'ils soient connus préalablement avant toute phase d'analyse des risques industriels [Marszal and Scharpf, 2001]. L'estimation des conséquences des risques permet l'identification des scénarios d'accidents les plus importants. Pour les scénarios jugés inacceptables, une évaluation plus fine de gravité demeure indispensable. Quelque soit la méthode d'estimation des conséquences retenue [CCPS, 2001; Marszal and Scharpf, 2001], le choix de telle méthode se fait en fonction des données disponibles et aussi la nature des accidents existants.

b) Étape 2 : Développement des scénarios d'accidents

Pour LOPA, le développement des scénarios d'accident est une étape principale qui devra être conçue attentivement afin d'aboutir à une bonne maîtrise de ces scénarios.
L'application préalable des méthodes d'analyse des risques (HAZOP, AMDE) permet d'identifier les causes, les conséquences et les différentes barrières de prévention et de protection.

Rappelons que l'efficacité de la méthode LOPA demeure en premier lieu dans son application minutieuse et dans son détail présenté dans le développement des scénarios d'accident, ces derniers doivent être développés et choisis correctement afin d'aboutir à une maîtrise des risques.

c) Étape 3 : Identification des fréquences des événements initiateurs

L'identification des fréquences des événements initiateurs est une étape importante qui aidera à l'estimation des fréquences des scénarios d'accidents [IEC61511, 2003].

Dans cette étape, il est important de recenser systématiquement l'ensemble des causes « événements initiateurs » pouvant être à l'origine des scénarios d'accidents.
Le tableau (I.2) donne une liste d'événements initiateurs retenus à titre indicatif.

Événements initiateurs externes		**Défaillances inhérentes aux équipements du système**		**Défaillances humaines**
Phénomènes naturels	Autres événements sociétaux et industriels	Défaillances de système de Contrôle	Défaillances mécaniques	-Tout type d'erreur ou d'omission -Non respect des procédures de travail -Méconnaissance de travail -Fausses décisions
-Tremblement de terre -Tornades -Inondations	-Sabotage -Actes de terrorisme -Accidents majeurs des systèmes avoisinants.	-Défaillance au niveau du système électrique. -Défaillances des vannes.	-Défauts de conception et/ou de fabrication -Corrosion	

Tab. I.1 - Types d'événements initiateurs [CCPS, 2001].

L'estimation des événements initiateurs se fait en leur affectant des fréquences de réalisation. Pour pouvoir estimer ces événements initiateurs en terme de fréquence.

d) Étape 4 : Identification des couches de protection indépendantes

LOPA est une méthode semi quantitative orientée barrières [CCPS, 2001] qui exige dans sa démarche une identification et une évaluation des couches de protection indépendantes mises en place dans un système industriel afin de pouvoir maîtriser les risques d'accidents inhérents à ce système. Comme toute barrière de sécurité, une couche de protection (IPL) peut être un élément, un système, un appareil, une action ou une procédure destinée à exécuter une certaine fonction de sécurité afin de prévenir un scénario d'accident et /ou réduire ses effets [Chunyang et al, 2008]. Cette barrière de sécurité possède un mode de fonctionnement à la sollicitation spécifique par rapport aux autres barrières de sécurité.

i) Efficacité

Pour une IPL, son efficacité réside dans sa capacité à remplir une fonction de sécurité qui lui est confiée pendant une durée donnée et dans des conditions de fonctionnement bien

déterminées. Cette efficacité s'exprime généralement en un certain pourcentage d'accomplissement de la fonction définie [INERIS, 2004], qui varie pendant la durée de la sollicitation de la barrière de sécurité, elle s'évalue par rapport au principe de dimensionnement adapté et aussi de résistance aux différentes contraintes spécifiques. L'efficacité d'une IPL dépend de son temps de réponse et de son niveau de confiance.

ii) Indépendance

Une barrière de sécurité est qualifiée IPL, si son fonctionnement ne dépend pas ni de fonctionnement des autres barrières de sécurité ni de fonctionnement du système lui-même. Cette propriété d'indépendance permettra à une IPL de remplir sa fonction de sécurité indépendamment de toute cause ou défaillance commune. La détermination des modes de défaillances communs permet de juger lesquelles de barrières de sécurité sont des IPL.

iii) Testabilité

Une IPL doit être conçue pour permettre périodiquement de s'assurer par test de leur efficacité. Pratiquement ces tests doivent être effectués afin de contrôler et de vérifier les performances des IPL (temps de réponse et niveau de confiance).

La figure (I.7) montre généralement les différents types des IPL qui se trouvent dans la majorité des systèmes et des installations industrielles surtout chimiques et pétrochimiques.

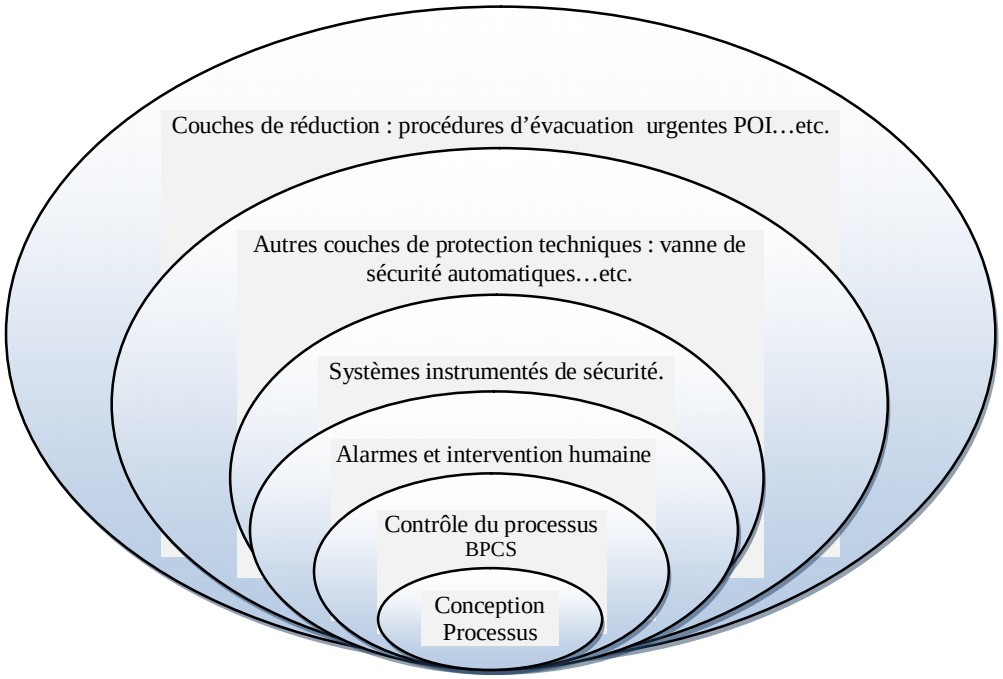

Fig. I.4- Couches de réduction de risques [CCPS, 2001]

Notons que ces barrières de sécurité peuvent être retenues comme étant IPL pour certains scénarios d'accidents comme elles ne peuvent pas l'être. Cela est jugé à travers leur environnement et leurs modes de fonctionnement.

- ***Évaluation des couches de protection indépendantes***

Dans la méthode LOPA [CCPS, 2001], l'évaluation des IPL est une étape importante qui sert à déterminer leur efficacité à réduire la fréquence des conséquences engendrées.

e) Étape 5 : Détermination des fréquences des scénarios d'accidents

La détermination des fréquences des scénarios d'accidents est une étape clé qui sert à évaluer les conséquences des scénarios d'accidents en termes de leurs probabilités d'occurrence et leurs conséquences engendrées. La fréquence d'un scénario d'accident est donnée par l'équation suivante [CCPS, 2001]:

$$f_i^c = f_i^I \cdot \prod_{j=1}^{J} PFD_{ij} \cdot \qquad \text{(I.2)}$$

Où:

f_i^c : *Fréquence de la conséquence C pour l'événement initiateur i.*

f_i^I : *Fréquence de l'événement initiateur.*

PFD_{ij} *: Probabilité de défaillance à la demande de la* $i^{ème}$ *IPL qui oppose la survenance de la conséquence.*

Cette procédure de calcul des fréquences de multiples scénarios d'accidents nous aidera surtout à établir la comparaison par rapport aux critères d'acceptabilité élaborés préalablement et aussi de juger si ces risques sont acceptables ou non.

f) Étape 6 : Évaluation des risques par rapport aux critères d'acceptabilité

Cette étape consiste à évaluer les scénarios d'accidents estimés par rapport aux critères d'acceptabilité qui ont été fixés au préalable afin de s'assurer que les scénarios sont acceptables. Si ces scénarios d'accidents sont inacceptables des recommandations et des couches de protection doivent être implémentées afin de maîtriser et les ramener à un niveau jugé tolérable.

I.5.5. Avantages et limites de la méthode LOPA

LOPA présente les avantages suivants [CCPS, 2000; IEC61511, 2003]:

- LOPA est un outil performant et efficace d'évaluation des risques et des mesures de réduction de ces risques.
  - LOPA est un outil praticable et flexible permettant de déterminer la réduction apportée par chaque mesure de réduction (IPL) en lui attribuant des probabilités de défaillance à la demande(PFD).

Cependant LOPA présente des limites [CCPS, 2000; IEC 61511,2003 ; Markowski, 2007]:

- LOPA est un outil qui ne peut pas être appliqué pour tous les scénarios d'accidents surtout ceux qui présentent des combinaisons de défaillances.
- En pratique, il est souvent difficile de résumer une probabilité de défaillance en seule valeur numérique.

I.6. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation de notre cadre de travail. Après avoir présenter 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.

CHAPITRE II

PRISE EN COMPTE DES DONNÉES INCERTAINES DANS L'ANALYSE DES RISQUES

II.1. Introduction

Pour une bonne maîtrise des risques, l'analyse des risques peut devenir rigoureuse en terme de qualité d'informations et de données. On a qu'à imaginer les efforts et analyses profondes pour obtenir des modélisations fines et complètes des systèmes étudiés.

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 défaillances des composants des systèmes et des barrières de sécurité par les différentes approches de traitement de l'information incertaine.

II.2. 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 solides.

Notre présentation se limitera à quelques définitions et propriétés, aux avantages et limites du modèle probabiliste dans le domaine de l'analyse des risques.

II.2.1. Définition et propriétés

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:

$$P : S(\Omega) \rightarrow [0,1] \quad \text{(II.1)}$$

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

$$P(\Phi) = 0 \leq P(E) \leq P(\Omega) = 1 \quad \text{(II.2)}$$

$$\forall A, B \in S(\Omega), \text{ si } A \cap B = \Phi \quad P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad \text{(II.3)}$$

L'axiome d'additivité (II.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 (II.2) et (II.3) les deux propriétés suivantes:

- Propriété 1

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

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad \text{(II.4)}$$

- Propriété 2

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

$$p : \Omega \rightarrow [0, 1] \quad \text{(II.5)}$$

Où: $\sum w_i \in \Omega \; p(w_i) = 1$

La distribution de probabilité p est définie à partir de la mesure de probabilité P par $P(w_i) = P(\{w_i\})$.

On obtient alors:

$$\forall A, B \in S(\Omega) \quad P(A) = \sum_{wi \in A} P(wi) \quad \text{(II.6)}$$

II.2.2. Limitations 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:

$$\forall wi \in \Omega, \; p(wi) = \frac{1}{|\Omega|} \quad \text{(II.7)}$$

II. 3. La théorie des ensembles flous

La théorie des ensembles flous date depuis 1965. Elle 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].

II.3.1. Concepts de base des mathématiques floues

a) Ensemble flou

Soit X un ensemble référentiel et soit x un élément de X. On appelle un « Ensemble Flou » [Zadeh, 65] $\tilde{A}$ de U un sous-ensemble de E caractérisé par une fonction $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs dans l'intervalle [0, 1]. Cette fonction dite «d'appartenance», 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, $\tilde{A}$ peut s'écrire comme :

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x)) / x \in E\} \qquad \text{(II.8)}$$

b) Nombre flou/ Intervalle flou

On appelle «nombre flou» tout ensemble flou $\tilde{A}$ de référentiel l'ensemble R des nombres réels et possédant les deux propriétés suivantes [Dubois et Prade, 1988](Fig. II.1):

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

Un intervalle flou généralise un nombre flou sous forme d'intervalle (Fig. II.2). La représentation paramétrique d'un intervalle flou s'écrit :

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

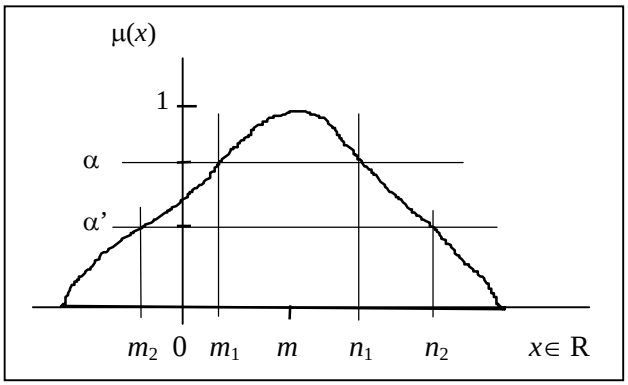

Fig. II.1- Exemple d'un nombre flou.

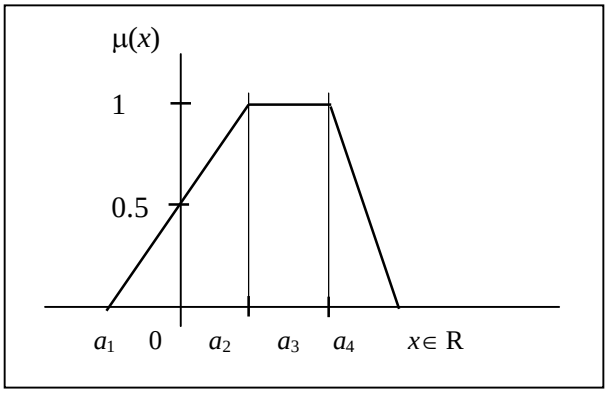

Fig. II.2 - Intervalle flou trapézoïdal.

II.3.2. Caractéristiques d'un ensemble flou

Un ensemble flou est caractérisé par:

a) Support

Un support d'un ensemble flou noté supp (*A*), est défini comme l'ensemble classique des éléments ayant un degré d'appartenance non nul.

$$\text{supp } A = \{ x \in X,\ \mu_A(x) > 0 \} \qquad \text{(II.9)}$$

b) Noyau

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

$$\text{noy}(A) = \{ x \in X, \mu_A(x) = 1 \} \qquad \text{(II.10)}$$

c) Hauteur

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

$$h(A) = sup\ \mu_A(x) \tag{II.11}$$

II.3.3. 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 défini par:

$$\forall x \in X,\ \mu_{A\cup B}(x) = max\left(\mu_A(x)\ ,\ \mu_B(x)\right) \tag{II.12}$$

b) Intersection

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

$$\forall x \in X,\ \mu_{A\cap B}(x) = \min\left(\mu_A(x)\ ,\ \mu_B(x)\right) \tag{II.13}$$

c) Inclusion

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

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in X,\ \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \tag{II.14}$$

d) Complémentation

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

$$\forall x \in X,\ \mu_A(x) = 1 - \mu_B(x) \tag{II.15}$$

e) Egalité

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

$$A = B \Leftrightarrow \forall x \in X,\ \mu_A(x) = \mu_B(x) \tag{II.16}$$

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.

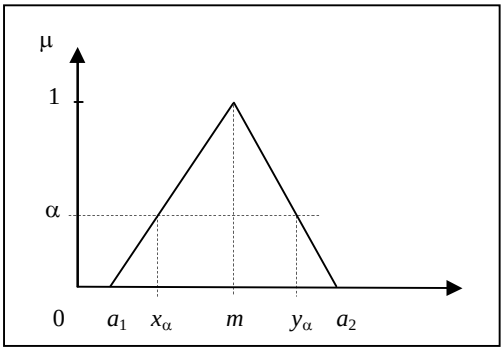

Fig. II.3- Nombre flou triangulaire.

II.3.4. 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:

$$A_{\propto}=[a^{-}_{\propto}, a^{+}_{\propto}] \subset R^{+} \quad \text{(II.17)}$$

$$B_{\propto}=[b^{-}_{\propto}, b^{+}_{\propto}] \subset R^{+} \quad \text{(II.18)}$$

On définie les opérations arithmétiques suivantes:

a) Addition

La somme $A+B$ peut être calculée comme suit:

$$(A+B)_{\alpha}=[a^{-}_{\propto}+b^{-}_{\propto}, a^{+}_{\propto}+b^{+}_{\propto}],\ \forall \alpha \in [0,1] \quad \text{(II.19)}$$

b) Soustraction

La différence $A–B$ est donnée par:

$$(A-B)_{\alpha}=[a^{-}_{\propto}-b^{+}_{\propto},\ a^{+}_{\propto}-b^{-}_{\propto}],\ si\ \ b^{+}_{\propto} \leq a^{-}_{\propto}\ \forall \alpha \in [0,1] \quad \text{(II.20)}$$

c) Multiplication

Le produit A . B est donné par:

$$(A.B)_{\alpha} = [\min(a_{\alpha}^{-} . b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{-} . b_{\alpha}^{+}, a_{\alpha}^{+} . b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} . b_{\alpha}^{+}),$$

$$\max(a_{\alpha}^{-} . b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{-} . b_{\alpha}^{+}, a_{\alpha}^{+} . b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} . b_{\alpha}^{+})]$$

$$= [a_{\alpha}^{-} . b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} . b_{\alpha}^{+}], \forall \alpha \in [0,1] \quad \text{(II.21)}$$

d) Division

Le rapport A / B est calculé comme suit:

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

$$\max(a_{\alpha}^{-} / b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{-} / b_{\alpha}^{+}, a_{\alpha}^{+} / b_{\alpha}^{-}, a_{\alpha}^{+} / b_{\alpha}^{+})]$$

$$= [a_{\alpha}^{-} / b_{\alpha}^{+}, a_{\alpha}^{+} / b_{\alpha}^{-}], \forall \alpha \in [0,1] \quad \text{(II.22)}$$

II.4. Théorie des possibilités

La théorie des possibilités [Zadeh, 1978] constitue le seul 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 et Prade, 1988].

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.

Distribution de possibilité

Une distribution de possibilité peut être vue comme la fonction d'appartenance de l'ensemble flou des éléments possibles.

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

c) Mesure de possibilité

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

$$- \Pi(\Omega) = 1 \quad \text{(II.23)}$$

$$- \Pi(\Phi) = 0 \quad \text{(II.24)}$$

Cette mesure permet d'évaluer à quel point la réalisation d'un événement est possible [Bouchon-meunier, 1995], si cet événement est possible de se réaliser la mesure de 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:

$$\max(\Pi(A), \Pi(\overline{A})) = 1 \qquad \text{(II.25)}$$

d) 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 possède des propriétés spécifiques par rapport de 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:

$$\Pi(A) = 1 - N(\overline{A}) \qquad \text{(II.26)}$$

$$N(A) > 0 \Rightarrow N(A) = 1 \qquad \text{(II.27)}$$

$$\Pi(A) < 1 \Rightarrow N(A) = 0 \qquad \text{(II.28)}$$

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 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].

II.7. 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. 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.

II.7.1. 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'élaboration de l'AMDE floue consiste à traiter ce type d'information de façon plus normale et objective en introduisant la notion des ensembles flous.

L'AMDE floue consiste d'utiliser les variables linguistiques pour décrire la gravité, la probabilité d'occurrence et la non détection de chaque mode de défaillance [Chan et al, 2007].

II.7.2. Arbre de défaillances

L'arbre de défaillances comme nous avons signalé auparavant 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 sureté de fonctionnement et d'analyse des risques des systèmes étudiés le permet d'être assujetti 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]. 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 and 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 and Misra, 1993].

II.7.3. 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 sont pas similaires et souvent inexistantes.

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 floues 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.

II.7.4. Analyse des couches de protection

LOPA fournit un outil efficace pour l'analyse et l'évaluation des risques des scénarios d'accidents. Cet outil semi-quantitatif d'analyse des risques est aussi confronté à des données et informations imparfaites, chose qui rend son application inconsistante.

Dans ce contexte, Markowski [Markowski, 2007], a développé une approche de LOPA floue qui tient en faveur l'aspect incertain et imprécis que présente la méthode LOPA classique. LOPA floue proposée par Markowski consiste à élaborer des modèles flous à partir des paramètres d'entrée de LOPA classique.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, après avoir discuté les différentes approches de traitement de l'incertitude des données, en l'occurrence:

a) la théorie des probabilités.
b) la théorie des ensembles flous.
c) la théorie des possibilités.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une approche floue de LOPA, développée dans le cadre du présent travail.

CHAPITRE III

ANALYSE FLOUE DU RISQUE : VERS UNE LOPA FLOUE

III.1. Introduction

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

Et malgré que ces données sont établies par des experts avec leurs jugements pertinents et fournies aussi par des banques de données spécialisées, une inévitable subjectivité et incertitude dans l'évaluation des différents paramètres des scénarios d'accidents.

Toujours dans le domaine d'analyse des risques, les descriptions linguistiques utilisées pour évaluer la gravité des conséquences voire les risques vagues par essence et fournies par des experts, sont aussi un autre exemple de données difficilement analysables de façon ordinaire et classique. Pour ces raisons et d'autres il apparaît intéressant de faire appel à des modèles de représentation sous forme d'ensembles flous et possibilistes. Ceci pour une bonne prise en compte de ces problèmes.

Dans ce qui suit, nous présentons une approche floue de LOPA tenant compte des données incertaines et/ou imprécises. Une des représentations possibilistes des données par des intervalles flous est proposée.

III.2. Présentation de la méthodologie générale

L'inconvénient que présentaient les méthodes de sûreté de fonctionnement et particulièrement la méthode LOPA [CCPS, 2001] est en termes d'imperfection des données et de manque de robustesse dans les résultats finaux.

Cette subjectivité est à l'origine de plusieurs facteurs notamment, le nombre élevé de composants dans le système étudié et aussi les connexions et interactions structurelles et

les dépendances de fonctionnement entre ces composants y compris les conditions d'exploitation et même les facteurs environnementaux influençant sur l'état et le fonctionnement du système.

Tous ces facteurs gênants la crédibilité et la perfection des données et les résultats d'étude de sécurité contribuent au développement d'une nouvelle approche floue d'évaluation des risques en introduisant la notion des ensembles flous [Zadeh, 1975]. Dans ce contexte, Markowski [Markowski, 2007], a développé un modèle de LOPA floue qui permet d'évaluer le risque des pipes et traiter les incertitudes des données utilisées par LOPA classique.

III.3. Présentation de l'approche développée

La procédure de développement de LOPA Floue consiste à utiliser les partitions floues pour décrire les paramètres des scénarios de LOPA. Comme le montre la figure (III.1), Chaque valeur utilisée par la méthode LOPA est convertie à un intervalle flou . La fréquence de la conséquence réduite est calculée par multiplication étendue selon la méthode des α-coupes. Les résultats sont des valeurs numériques de la fréquence de la conséquence réduite qui sont calculées par défuzzification de la fréquence floue.

III.4. Etapes de l'approche développée

III.4.1. Etape de fuzzification

La première étape de l'approche "LOPA Floue" proposée consiste à transformer les intervalles de confiance issus de la littérature ou de banques de données [OREDA, 2002; ICSI, 2006] en intervalles flous (Fuzzification). La transformation est faite en utilisant une échelle floue comme développée dans [Nait-Said et al, 2009].

L'intérêt de cette étape est qu'elle permet de déterminer les fonctions d'appartenance des variables linguistiques. Ces fonctions peuvent être représentées sous différentes formes (triangulaire, gaussienne, trapézoïdale, etc.).

Selon le type de fonction d'appartenance, différents types d'ensembles flous seront obtenus. Lotfi Zadeh [Zadeh.1975] a proposé une série de fonctions d'appartenance qui pourraient être classées en deux types de formes, celles qui sont composées de lignes droites " linéaires" et les formes gaussiennes "courbées".

III.4.2. Détermination de la fréquence floue de la conséquence réduite

La deuxième étape de cette approche consiste à calculer l'intervalle flou de la fréquence de la conséquence réduite à partir des intervalles flous de la fréquence d'événement initiateur et les probabilités de défaillance à la demande des couches de protection indépendantes. Le calcul de la fréquence floue de la conséquence réduite est fait en utilisant l'équation (III.3):

$$\tilde{f}_i^{\,C} = \tilde{f}_i^{\,I} \times \prod_{j=1}^{J} P\tilde{F}D_{ij} \qquad \text{(III.1)}$$

Où:

$\tilde{f}_i^{C}$ est la fréquence floue de la conséquence C d'événement initiateur i; $\tilde{f}_i^{I}$ est la fréquence floue de l'événement initiateur i.

$P\tilde{F}D_{ij}$ est la probabilité de défaillance à la demande de la j^{éme} IPL qui protège contre la conséquence *C*.

L'utilisation de la méthode des α-coupes permet de simplifier les calculs par la décomposition de la fonction d'appartenance en des intervalles flous en fonction de α-

coupes ($0 \leq \alpha \leq 1$) [Zadeh, 1975]. Le découpage est fait en utilisant la méthode des α-coupes:

$$\tilde{f}_i^C = \bigcup_{\alpha=0}^{1} f_{i\alpha}^C = \bigcup_{\alpha=0}^{1} f_{i\alpha} . \prod_{j=1}^{j} \bigcup_{\alpha=0}^{1} PFD_{\alpha ij} \qquad \text{(III.2)}$$

III.4.3. Défuzzification de la fréquence floue de la conséquence réduite

La dernière étape de l'approche consiste à défuzzifier la fréquence floue de la conséquence réduite afin d'obtenir une valeur précise de la fréquence de la conséquence réduite.

Plusieurs méthodes de défuzzification sont proposées dans la littérature [Runkler, 1997]. La méthode du centre de gravité est la plus communément utilisée:

$$f^0 = \frac{\sum_{\alpha} \mu_{\tilde{f}_i^C}(f).f}{\sum_{\alpha} \mu_{\tilde{f}_i^C}(f)} \qquad \text{(III.3)}$$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'éclaircir le contexte et la problématique de la gestion des risques industriels. Ensuite nous avons discuté le problème de données imprécises et incertaines qui demeure durant l'analyse et l'évaluation des risques. Nous avons proposé une nouvelle approche floue "LOPA Floue" permettant la gestion de l'imprécis et de l'incertain des données utilisées par la méthode LOPA en fournissant des représentations concises de données incertaines et imprécises.

Dans ce qui suit, nous présenterons un problème réel qui s'agit d'une application de la méthode LOPA décrite dans le chapitre (I. section. I.4.4) sur un système industriel (Four rebouilleur H-101) toute en essayant d'intégrer dans cette méthode d'analyse des risques notre approche floue développée.

CHAPITRE IV

IDENTIFICATION DES RISQUES AU NIVEAU DU FOUR REBOUILLEUR (H-101)

IV.1. Introduction

L'analyse et l'évaluation des risques par la méthode LOPA exige la présence de certaines données et informations sur les différents paramètres d'évaluation des risques telles que, les fréquences d'événements initiateurs, fréquences des conséquences réduites et aussi les probabilités de défaillances des différentes couches de protection 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. 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 LOPA.

Par l'approche "LOPA floue" présentée dans le chapitre (III), nous avons tenté de répondre à un tel problème en menant une étude de cas réel sur un système industriel opérationnel qui est un four rebouilleur (Fig. IV.1).

IV.2. Présentation du système "Four Rebouilleur"

Vu l'importance de la partie "Identification des risques", le présent chapitre sera consacré à la description technique et fonctionnelle du système "Four rebouilleur" et à l'analyse des différents scénarios d'accidents.

Fig. IV.1- Four Rebouilleur H-101[SONATRACH, 2008]

Le système Four rebouilleur H-101 comprend:

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

Le rôle principal du Four rebouilleur est de produire des gaz combustibles légers (gaz de vente) qui sont essentiellement des composés du méthane et d'éthane, le processus de production de ces gaz est représenté dans la figure (IV.2). Le condensât du fond de la colonne C-101, est envoyé au moyen des pompes P-101 A/B, au four rebouilleur H-101 à 150°C pour réchauffage puis le fluide sortant du rebouilleur chauffé à 180 °C est renvoyé vers la colonne comme reflux chaud afin d'extraire les gaz légers (gaz de vente).

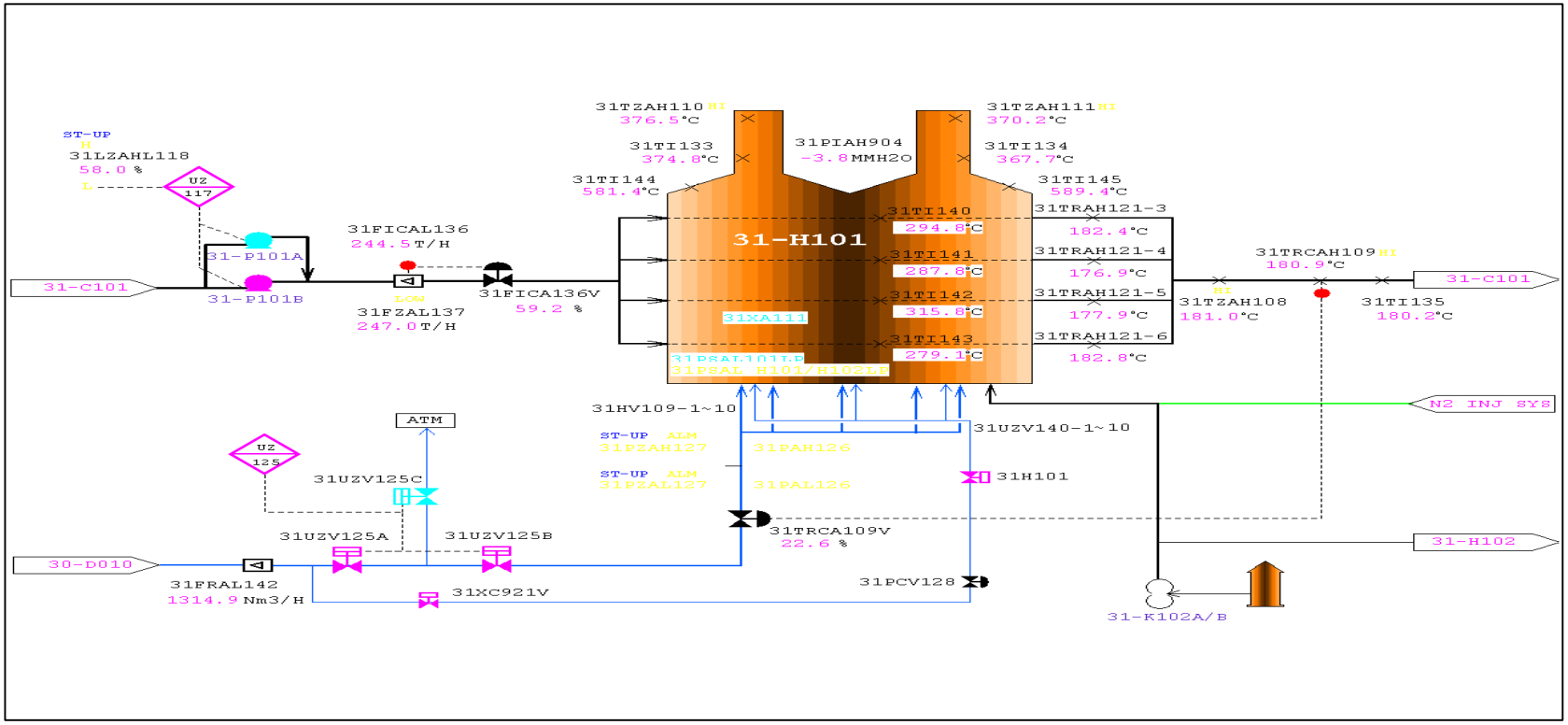

Fig. IV. 2 - Schéma de canalisation et d'instrumentation du Four rebouilleur H-101

IV.3. Analyse structurelle, fonctionnelle du système "Four rebouilleur H-101"

L'analyse structurelle, fonctionnelle et temporelle est une étape importante permettant de comprendre davantage le système "Four rebouilleur", ses différents sous-systèmes et composants sont présentés comme suit:

Le sous-système et sa fonction

SS1 : Circuit d'alimentation
[Alimentation du four rebouilleur]

SS2 : Sous-système de tirage
[Assure l'arrivée et la circulation d'air]

SS3 : Sous-système de contrôle
[contrôle des paramètres du procédé]

SS4 : Trappe d'explosion
[s'ouvre en cas de montée en pression dans la chambre de combustion]

SS5 : Sous-système de prévention
[Assure la sécurité du procédé]

SS6 : Sous-système de protection
[Maîtriser le feu]

IV.4. Élaboration d'une étude HAZOP sur le système "Four Rebouilleur"

L'intérêt de l'application de la méthode HAZOP est qu'elle fournit une étude de base permettant de recenser les différentes causes et conséquences des scénarios d'accidents. Elle permet aussi d'envisager les différentes barrières de sécurité pouvant empêcher ces accidents. Toutes ces informations seront utilisées dans LOPA.

Le tableau de HAZOP (IV.2) montre ces différentes causes et conséquences et barrières de sécurités existantes au niveau du four rebouilleur H-101.

SYSTEME ÉTUDIE : Four Rebouilleur H-101									
N°	**Mot-guide**	**Élément**	**Déviation**	**Causes possibles**	**Conséquences**	**Protections**	**Commentaires**	**Mesures à prendre**	**Responsable des mesures**
1	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de condensât	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne FICA-136V	Pas du liquide dans H-101, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- Opérateurs - FICAL-136 - FZL-137			
				Mauvais fonctionnement de FICA-136V	Pas du liquide dans H-101, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FICAL-136 - FZL-137			
				Mauvaise manipulation sur l'une des vannes.	Pas de débit dans l'un des pass du H-101, température élevée, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FI-138 - TRAH-121-3 - FICAL-136 - FZL-137			

Tab. IV.1 - Feuille de présentation HAZOP

SYSTEME ÉTUDIE : Four Rebouilleur H-101									
N⁰	**Mot-guide**	**Élément**	**Déviation**	**Causes possibles**	**Conséquences**	**Protections**	**Commentaires**	**Mesures à prendre**	**Responsable des mesures**
2	PLUS	Température de condensât	Plus de température	Mauvais fonctionnement de la vanne TRCA-109V, combustion importante dans H-101	Température élevée à la sortie du H-101, endommagement possible du serpentin	- TI-135 - TRAH-121-3~6 - TRCAH-109 - TZH-108			
3	MOINS	Température de condensât	Moins de température	Mauvais fonctionnement de TRCA-109V, faible combustion dans H-101	Basse température à la sortie de H-10, passage possible de produit en OFF-SPEC	- TI-135		Envisager l'installation d'une alarme de basse température du condensât en sortie.	

Tab. IV.1 - Feuille de présentation HAZOP (suite)

SYSTEM ÉTUDIE : Four Rebouilleur H-101									
N°	**Mot-guide**	**Élément**	**Déviation**	**Causes possibles**	**Conséquences**	**Protections**	**Commentaires**	**Mesures à prendre**	**Responsable des mesures**
4	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvais fonctionnement des vannes.	Pas de fuel gaz pour H-101, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - FRAL-142 - TRCA-109			
				Mauvais fonctionnement de la vanne.	Pas de fuel gaz pour H-101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142			
					Dégagement de fuel gaz en atmosphère, explosion possible & arrêt d'unité	- TRCA-109			

Tab. IV.1 - Feuille de présentation HAZOP (suite)

SYSTEME ÉTUDIE : Four Rebouilleur H-101									
N°	**Mot-guide**	**Élément**	**Déviation**	**Causes possibles**	**Conséquences**	**Protections**	**Commentaires**	**Mesures à prendre**	**Responsable des mesures**
4	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne manuelle à l'entrée/sortie de TRCA-109V	Pas de fuel gaz pour H-101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC	- Opérateurs (locaux) - PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142 - TRCA-109			
				Mauvais fonctionnement de TRCA-109V.	Pas de fuel gaz pour H-101, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142			

Tab. IV.1 - Feuille de présentation HAZOP (suite).

IV.5. Application de la méthode LOPA au Four rebouilleur

IV.5.1. Étape 1: Établissement des critères d'acceptabilité

Dans notre cas, l'évaluation d'acceptabilité de la gravité des conséquences des scénarios d'accidents et des fréquences des conséquences réduites sera faite par référence à la grille de criticité suivante (Fig. IV.3).

Gravité \ Probabilité	1 : Improbable Improbable de se produire durant la durée de vie de l'installation.	2 : Rare Peut se produire une fois durant la durée de vie de l'installation.	3 : Occasionnel Peut se produire plus qu'une fois durant la durée de vie de l'installation.	4 : Fréquent Peut se produire plusieurs fois durant la durée de vie de l'installation
1 : Négligeable • Blessures superficielles ; • Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 10%.	Faible	Faible	Faible	Modéré
2 : Modérée • Blessures mineures ; • Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 50%.	Faible	Modéré	Modéré	Élevé
3 : Critique • Blessures graves ; • Arrêt de l'unité (train).	Modéré	Modéré	Élevé	Élevé
4 : Catastrophique • La mort ; • Arrêt de l'usine (module).	Modéré	Élevé	Élevé	Élevé

Fig. IV.3 - Grille de criticité adoptée par SH DP HRM [SONATRACH, 2008]

IV.5.2. Étape 2 : Analyse des scénarios

La méthode LOPA s'inspire les différents éléments de ses scénarios à partir des résultats fournis par l'HAZOP (Tab. IV.1).

Les scénarios retenus sont:

- Endommagement du serpentin (incendie) & arrêt d'unité.
- Endommagement du serpentin (incendie) & arrêt d'unité.
- Formation d'un nuage gazeux en atmosphère.
- Combustion incomplète, pression élevée dans H-101, explosion possible.

Ces scénarios ayant tous une gravité égale à 4 ont pour les événements suivants:

- Défaillance de la vanne FICA-136V.
- Mauvaise manipulation sur l'une des vannes à l'entrée de H-101.
- Ouverture intempestive de la vanne UZ-125C.
- Défaillance de la vanne HXC-907V/908V.

En comparant les degrés de gravité estimés par rapport à ceux de la grille de criticité, nous pouvons constater que les quatre scénarios établis sont catastrophiques.

IV.5.3. Étape 3: Estimation des fréquences des événements initiateurs

Les fréquences d'occurrence des événements initiateurs présentées sont tirées de la littérature [ICSI, 2006 ; CCPS, 2001].

La fréquence du scénario 1 est de 1,00E-01.
La fréquence du scénario 1 est de 3,16E-02.
La fréquence du scénario 1 est de 2,24E-02.
La fréquence du scénario 1 est de 1,00E-01.

IV.5.4. Étape 4: Identification des couches de protection indépendantes

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

L'identification des couches de protection indépendantes est faite en basant sur certains critères spécifiques présentés en détails dans le chapitre (I. Section. I.4.4.3). Les couches de protection indépendantes retenues dans notre étude sont les suivantes:

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

Les probabilités de défaillance à la demande de ces couches de protection sont données par le tableau (IV.2).

IPL	PFD
Alarme & opérateur	1,00E-01
SIS	3,16E-04
Trappe	3,16E-03

Tab. IV.2 - Probabilités de défaillance à la demande des IPLs.

À noter que ces probabilités sont estimées en se référant à plusieurs sources telles que, la norme IEC 61511 [IEC61511 ,2003], un ouvrage référence du Centre of Chemical Process Safety [CCPS, 2001] et des données fournies par le concepteur du système [Sonatrach, 2008].

IV.5.5. Etape 5: Identification des scénarios d'accidents et détermination de leurs fréquences

IV.5.5.1.Élaboration des scénarios

Les scénarios d'accidents issus de LOPA sont représentés par des Arbres d'Événements (AdE) (voir Chap. I. Section I.4.4.3). Le choix de ce modèle nous permet de représenter clairement l'enchainement des événements, en précisant leurs fréquences et par conséquent la fréquence des scénarios correspondants.

IV.5.5.2.*Calcul de la fréquence de la conséquence réduite de chaque scénario d'accident*

La fréquence des conséquences réduites des scénarios d'accidents 1, 2 et 4, est calculée en utilisant l'équation I.2 (chap. I). Les opérations du calcul sont comme suit:

Scénario 1 : f_i^c = ***3,16E-06 /an.***

Scénario 2 : f_i^c = ***9,99E-07/an.***

Scénario 3 : f_i^c = ***2,12E-07 /an.***

Scénario 4 : f_i^c = ***3,16E-05 /an.***

IV.5.6. Etape 6: Évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères d'acceptabilité

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

IV.5.7. Discussion des résultats et conclusion

La représentation des scénarios les plus défavorables par LOPA fournit un calcul simple des fréquences des conséquences réduites. Les résultats en terme de réduction du risque d'accidents reste incontestable.

D'où tout l'intérêt de l'approche floue proposée dans le chapitre (III), et dont l'application fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE V

APPLICATION DE L'APPROCHE FLOUE DE LOPA AU SYSTEME FOUR REBOUILLEUR

V.1. Introduction

Le présent chapitre sera consacré à l'application de l'approche floue de LOPA proposée en chapitre (III) au système "Four rebouilleur". En considérant les données du chapitre (IV) comme référentielles, on montrera la faisabilité et l'intérêt particulier de LOPA floue.

V.2. Application da l'approche floue de LOPA

Reprenons les données et résultats de référence utilisés par LOPA conventionnelle, lesquelles sont représentés sous forme des valeurs uniques et regroupés dans le tableau (V.1).

Scénario 1	f_i^c = ***3,16E 06 /an.***
Scénario 2	f_i^c = ***9,99E 07/an.***
Scénario 3	f_i^c = ***2,12E 07 /an.***
Scénario 4	f_i^c = ***3,16E 05 /an.***

V.1 Valeurs des fréquences des conséquences réduites des scénarios

V.3. Détermination de la fréquence de la conséquence réduite

La détermination de la fréquence de la conséquence réduite est faite selon la méthodologie décrite en chapitre (III. Section.III.4.2). on procèdera par comparaison avec les données et résultats de l'approche floue proposée.

V.3.1. Fuzzification des intervalles de confiance

Nous transformons les intervalles de confiance des fréquences des événements initiateurs, des probabilités de défaillance à la demande des différentes IPLs (Fig. V.1) en des intervalles flous en utilisant la méthode proposée par [Naît-Saïd et al, 2009]. La représentation graphique de ces résultats est donnée par la figure (V.1).

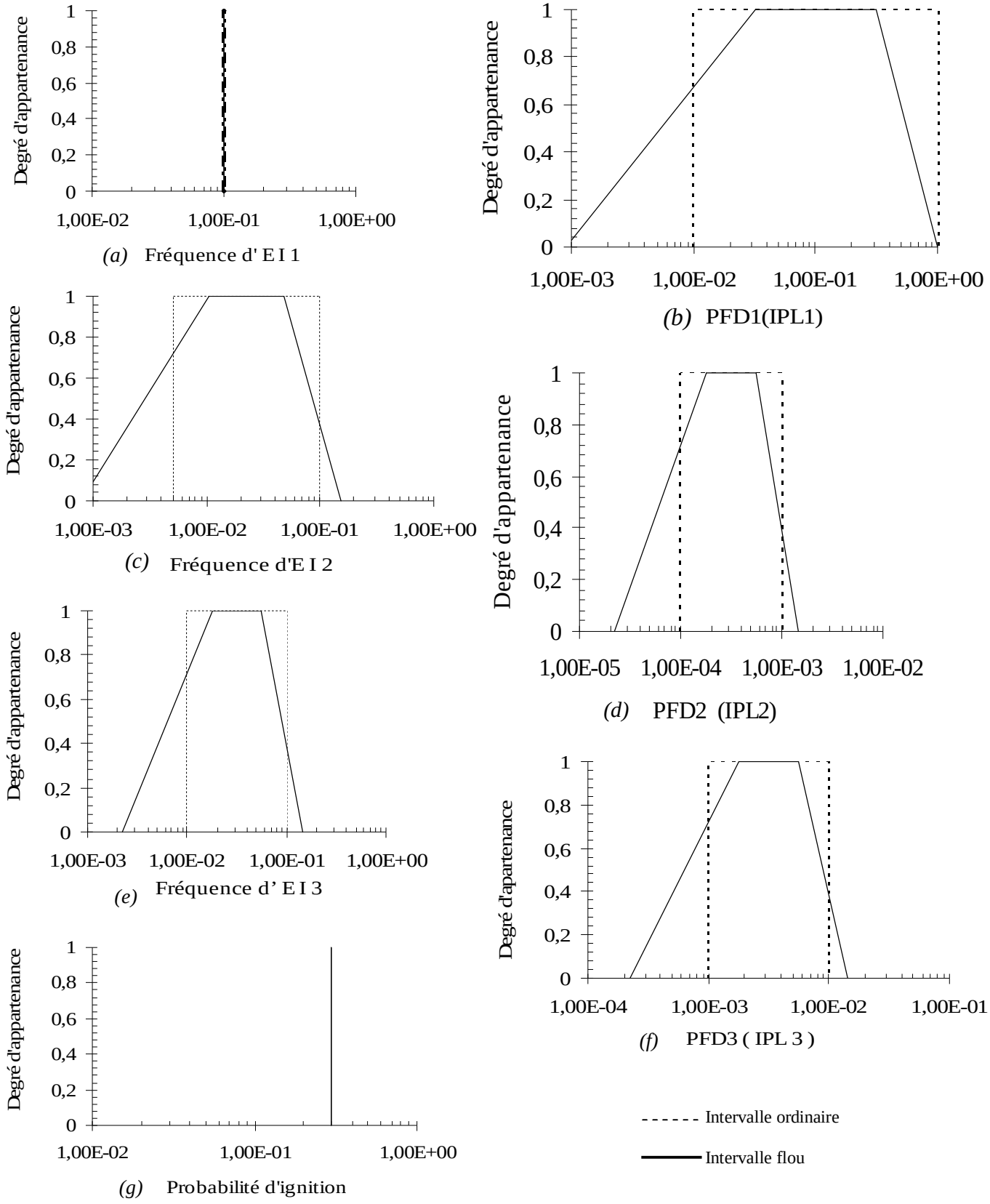

Fig. V.1 - Représentation graphique des intervalles flous des paramètres d'entrée.

V.3.2. Calcul de la fréquence floue de la conséquence réduite

Les fréquences de la conséquence réduite des scénarios d'accidents sont calculées en utilisant l'équation (III.3), en multipliant les intervalles flous des paramètres d'entrée à savoir la fréquence d'EI, les PFD des IPLs. En se référant à l'équation (III.1), la multiplication est effectuée par α-coupes.

Les graphes de ces fréquences sont donnés par la figure (V.2).

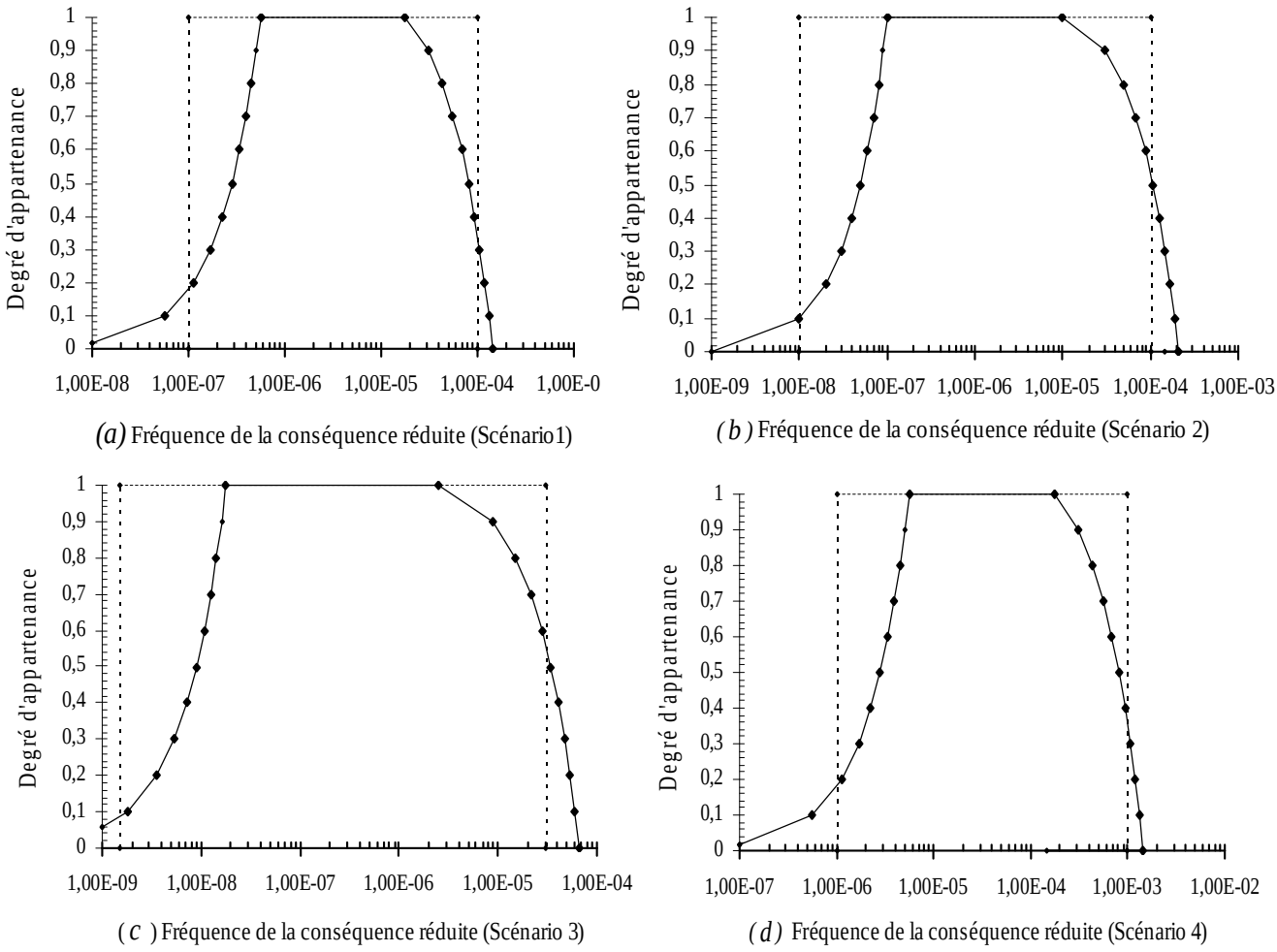

Fig.V.2 - Représentation graphique de la fréquence de la conséquence réduite.

II. 3.3. Défuzzification de la fréquence floue de la conséquence réduite

La dernière étape du modèle proposé permet d'obtenir une valeur unique de la fréquence de la conséquence réduite qui sera utilisée dans la prise de décision. Les résultats obtenus par cette étape sont donnés par le tableau (V. 3).

La défuzzification da la fréquence floue est effectuée à l’aide de l’équation (III. 3) de la méthode du centre de gravité.

V.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tenté de répondre au problème des incertitudes relatives aux éléments du scénario d'un accident, à savoir la fréquence de l'EI et les PFD des IPL, dans le cadre d'une analyse des couches de protection (LOPA).

CONCLUSION GENERALE

Durant la réalisation travail il était question de répondre convenablement à la problématique de représentation et de traitement des incertitudes relatives aux données utilisées le plus souvent par les méthodes semi-quantitatives d'analyse et d'évaluation des risques industriels. Connue comme méthode simplifiée et largement utilisée dans les industries pétrochimiques.

- **Travail réalisé**

Deux parties ont fait l'objet du présent mémoire : la première est une partie théorique qui consiste dans un premier temps en une recherche sur la démarche globale de gestion des risques et les principales méthodes qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives appliquées dans cette démarche. Le but était de définir le cadre du présent travail, la méthode d'analyse des couches de protection (LOPA) constituant ce cadre a été présentée d'une manière détaillée.

Dans le cadre de la méthode LOPA, un aspect important concernant les données quantitatives est celui de l'incertitude et l'imprécision. Nous avons présenté quelques théories de traitement de cet aspect telles que, la théorie des probabilités, la théorie des ensembles flous et celle des possibilités.

Dans ce contexte, une approche floue de LOPA "LOPA floue" est proposée pour une bonne prise en compte des données imparfaites utilisées par LOPA conventionnelle, pour évaluer les différents paramètres des scénarios d'accidents telles que, les fréquences des événements initiateurs et les probabilités de défaillance des couches de protection indépendantes.

La seconde partie de ce mémoire est consacrée à une application de "LOPA floue" à un système opérationnel qui est four rebouilleur. Nous avons procédé dans un premier temps à une description technique et fonctionnelle du four rebouilleur et à une

identification des risques inhérents à ce système par application de la méthode HAZOP (Hazards and Operability Study). Puis dans un second temps (dernier chapitre), nous avons appliqué le modèle flou développé au système "Four rebouilleur". Partant des résultats de LOPA conventionnelle.

- **Perspectives**

Le travail du présent mémoire devrait être considéré comme un premier pas dans l'amélioration de LOPA conventionnelle. D'autres aspects importants peuvent faire l'objet de développements futurs, selon un modèle flou ou possibiliste. L'analyse de l'efficacité des couches de protection indépendantes en fonction des fréquences des conséquences réduites est un sujet qui mérite d'être traité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arthur M. Dowell III, Layer of protection analysis for determining safety integrity level, *ISA Transactions*, vol. 37, No. 3, pp. 155-165, 1998.

- Baron.J.H, Rivera.S.S., Using fuzzy Arithmetic in Containment Event Trees. 22–25, aout 1999.

- Bezdek, Nikhil .R, Pal. N.R and James C., "Measuring Fuzzy Uncertainty. *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol.2, NO.2, Mai 1994.

- Bouchon-Meunier, La logique floue et ses applications. Amsterdam: Ed.Addison-Wesley. p.84-92. 1995

- Bowles J.B. and Pelaez C.E., Application of Fuzzy logic to Reliability Engineering, *Proceeding of the IEEE*, vol. 83, No. 3, March 1995.

- Braglia.M and Frosolini.M, fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis, *International journal of quality reliability management*, vol.20 No.4, 2003.

- CCPS. Guidelines for process equipement reliability data with data tables. Center for Chemical Process Safety of the American institute of chemical engineers, New York 1991.

- CCPS, Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, Center for Chemical Process Safety of the American Institute for Chemical Engineers, New York 2000.

- CCPS, Layer Of Protection Analysis, simplified process assessment, Center for Chemical Process Safety of the American Institute for Chemical Engineers, New York, 2001.

- CEI 61882, Études de danger et d'exploitabilité (Études HAZOP) – guide d'application 2001.

- Chan A., Jian-Bo Yang and Kwai-Sang Chin., Development of fuzzy FMEA based product design system. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. November 2005.

- Chun M.H. and AHN K., Assessment of the potential applicability of fuzzy set theory to accident progression event trees with phenomenological uncertainties, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 37, pp. 237-252, 1992.

- Chunyang Wei, William J. Rogers, S.Sam Mannan, Layer of protection analysis for relative chemical risk assessment", Journal of Hazardous Material, 159, 2008.

- Desroches A. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Lavoisier, France, 1995.

- Dubois. D and Prade. H, The mean value of a fuzzy number, *Fuzzy Sets and Syst.*, vol.24, pp. 279-300, 1987.

- Dubois. D and Prade. H, possibility theory. Plenum Press, New –York, 1988.

- Dubois. D and Prade. H, Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. Comput. Intell., 4 :244–264, 1988.

- Dubois and H. Prade, possibility theory and its applications: a retrospective view, Fuzzy Systems, vol 1, 25-28 May, 2003.

- Dumitrescu .M, Munteanu. A. Ulmeanu. P. Fuzzy Logic System for Fuzzy Event Tree Computing. First international IEEE symposium 'intelligent systems'. September 2002.

- Exida. Safety Equipment Reliability Handbook, 2nd Edition. 2005.

- Gouriveau. R, 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. C et Ayral. P.A, Terminologie en Science du Risque. 2002

- Gulland W.G., Methods of determining safety integrity level (SIL) requirements-Pros and Con, *Proc. of the 12th Annual Safety-Critical Systems Symp.*, February 17-19, 2004, pp. 105-122.

- ICSI, Groupe de travail " Fréquence des événements initiateurs et disponibilité des barrières de protection et de prévention, Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle version du 11 juillet 2006.

- IEC 61511 Standard, Functional safety-Safety instrumented systems for the process industry sector-, Parts 1-3, First edition, 2003.

- INERIS, Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle. *Mai 2003.*

- INERIS, *ARAMIS* Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs, rapport final, *Septembre* 2004.

- ISO, Aspects liés à la sécurité: Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation Internationale de normalisation, 1999.

- ISO, Management du risque: Vocabulaire, Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes. Organisation Internationale de normalisation, 2002.

- Kandel and Avni. E, Engineering risk and hazard Assessment, vol. I, *CRCPress, Inc. Florida*, 1988.

- Kaufmann A., "Introduction à la théorie des sous ensembles flous à l'usage des ingénieurs", tomes 1 et 4, 1977.

- Kenarangui R., Event tree Analysis by fuzzy probability, *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 40, No. 1, 1991.

- Kirchsteiger C. On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis, Journal of Loss Prevention in the Process Industrials 12.PP 399-419.1999.

- Kirkwood and Tibbs B., Developments in SIL determination, *Comput. & Cont. Eng. Journal*. vol. 16, pp. 21-27, 2005.

- Kumar. D, Kumar. P and kumar. R. S, Systemic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic medelling. International Journal of Quality and Reliability Management. Vol.22 No.9 .2005

- Lai. F.S., Shenoi S., and Fan. L.T, Fuzzy Fault Tree Analysis: Theory and Application, In "Engineering risk and hazard Assessment", vol. I, CRC Press, Inc. Florida, (Eds) A. Kandel and E. Avni, pp.117-137, 1988.

- Liang. G-S and Wang M-J. J, Fuzzy fault-tree analysis using failure possibility. Micro-electronics and Reliability, 33 :583–597, 1993.

- Markowski A.S., Piping Risk Assessment (pfLOPA), *ELSEDIMA RO*, 15-16 May, 2007.

- Marszal E. M. and Scharpf E.W., Safety integrity level selection, systematic methods including Layer Of Protection Analysis, *The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, Edition, 2001.

- Nait-Said, F. Zidani and N. Ouzraoui, Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach, *Journal of Hazardous Materials (Elsevier)*,Vol. 164, No. 2-3, pp.651-658, 2009.

- OHSAS18001, Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail - Specification -. BSI, Afnor, 1999.

- OREDA. Offshore reliability data handbook, 4th Edition. 2002.

- Paul Gruhn, P.E, CFSE and Harry Cheddil, P.E, CFSE, "Safety instrumented system: Design, Analysis, and Justification, 2nd edition, ISA, 2006.

- Rivera, S.S. and Baron, J.H., Using Fuzzy Arithmetic in Containment event trees, *International Conference on Probabilistic Safety Assessment*, Wshington, USA, 1999.

- Ruegg A. Probabilités et statistique. Lausanne, Presse Polytechniques Romandes, 1985.

- Runkler. A. T, Selection of appropriate défuzzification methods using application specific properties, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 5, NO.1, February, 1997.

- Sallak M., Evaluation des paramètres de fiabilité en présence d'incertitudes et assistance à la conception: Application aux systèmes instruments de sécurité, Thèse de doctorat présentée à Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.

- Sandri S.A., Dubois D. and H.W. Kalfsbeek, Elicitation, Assessment, and pooling of expert judgments using possibility theory, *IEEE Tran. On Fuzzy Syst.*, vol. 3, No. 3, pp.313-335, 1995.

- Shafer. G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton University Press, 1976.

- Sharma. J and K.V. Venkateswaran. A direct method for maximizing the system reliability. IEEE Transactions on Reliability, 20 :256–259, 1971.

- Simon C., Sallak. M and Aubry J.F., SIL allocation of SIS by aggregation of experts' opinions, *Safety and Reliability Conference*, June 25-27, Stavanger (Norway), 2007.

- Singer. D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis. Fuzzy Sets and Systems, 34:145–155, 1990.

- Soman. K.P and K.B. Misra. Fuzzy fault tree analysis using resolution identity. 1, page 193, 1993.

- SONATRACH. Document SONATRACH DP HRM. 2008.

- Tanaka, L. T. Fan, F. S. Lai, and K. Toguchi. Fault tree analysis by fuzzy probability. IEEE Transactions on Reliability, 32 :453–457, 1983.

- Villemeur A, Sureté de fonctionnement des systèmes industriels. Eyrolles, 1988.

- Zadeh. L.A, Fuzzy sets, *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.

- Zadeh. L.A., The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Parts I and II, *Information Sciences*, vol. 8, pp. 199-249, 301-357, 1975.

- Zadeh. L.A., Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, 1 :3–28, 1978.

- Zimmermann. H.J, Using fuzzy sets in operational research. European Journal of Operational Research, 13 :201–216, 1983.

- Zouhal. L. Contribution à l'application de la théorie des fonctions de croyance en reconnaissance des formes. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, France, 1997.