

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



Université El-Hadj Lakhdar - Batna
Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle
Laboratoire de Recherche en Prévention Industrielle (LRPI)



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTÈRE

EN HYGIÈNE ET SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Option : Gestion du Risque

Par

Nouhed ACHOURI

Ingénieur en Hygiène et Sécurité Industrielle

Thème :

APPORT DE LA LOGIQUE FLOUE Á L'ANALYSE DE CRITICITÉ DES RISQUES INDUSTRIELS

Soutenu le 27 octobre 2009 devant le jury d'examen :

M.	Mébarek DJEBABRA,	Professeur à l'Univ. de Batna	Président
M.	Rachid NAIT-SAID,	Maître de Conférences à l'Univ. de Batna	Rapporteur
M.	Rachid SMAIL,	Maître de Conférences à l'Univ. de Batna	Examineur
M.	Kheireddine CHAFAA,	Maître de Conférences à l'Univ. de Biskra	Examineur
M ^{me}	Nouara OUAZRAOUI,	Maître Assistante Classe A à l'Univ. de Batna	Membre Invité

DÉDICACE

À mes parents qui m'ont donné leur soutien sans faille depuis toujours. Le plus beau résultat au cours de mes années d'étude a été obtenu grâce à eux ; leur contribution secrète à tous mes succès a été la plus essentielle.

À ma sœur ARIDJ qui a toujours été à mes côtés pour partager des instants parfois difficiles, mais souvent merveilleux.

À tous mes frères et sœurs, particulièrement, à mon cher NIZAR et ma chère AFAF.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus sincère reconnaissance et toute ma sympathie à mon promoteur, Monsieur R. NAIT-SAID, qui a dirigé ce travail. Il a su me guider habilement dans un sujet riche tout en m'accordant sa confiance. Je lui témoigne toute ma gratitude pour l'éclairage extérieur et plein d'intérêt, qu'il m'a apporté lors de nos discussions. Ses conseils avisés et la pertinence de ses analyses ont permis de faire avancer ce travail avec une grande efficacité ; son approche des questions scientifiques restera pour moi un exemple ; ses compétences et son enthousiasme scientifique ont été des sources permanentes de soutien et de motivation.

Il me tient à cœur d'insister sur l'extrême gentillesse et le sens aigu du savoir-faire de mon enseignante, Madame N. OUAZRAOUI, qui ont rendu notre relation si agréable et détendue. Je la remercie très chaleureusement.

Mes remerciements très particuliers s'adressent à mon enseignant, Monsieur M. SAMAI, pour tout ce qu'il m'a apporté lors de l'élaboration de mon mémoire d'ingénieur. Son goût profond pour une science claire et rigoureuse et son dynamisme m'ont beaucoup marqué.

Si je garde un excellent souvenir de la période d'étude, c'est aussi grâce à mes collègues, Mademoiselle L. CHERGUI et Monsieur M. BOURARECHE. Qu'ils soient remerciés de leur aide et de leur bonne humeur.

Que Monsieur R. SAL et les ingénieurs, I. SELLAMI, C. REZIM, B. RABEH, S. SEKIOU et O. SAADOUN, trouvent ici mes vifs remerciements pour leur contribution dans la partie expérimentale.

Un grand merci à tous les thésards post-graduation de la promotion 2006. Nos discussions drôles et animées lors de pauses-café, dans un couloir ou un bureau, participent grandement au beau souvenir que je conserve de cette période.

Je tiens à remercier Monsieur M. DJEBABRA, Professeur à l'université de Batna, pour avoir accepté la présidence de mon jury d'examen; Monsieur R. SMAIL, Maître de Conférences à l'université de Batna ; Monsieur K. CHAFAA, Maître de Conférences à l'université de Biskra et Madame N. OUAZRAOUI, Maître Assistante classe A à l'université de Batna, pour avoir bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail et de participer à ce jury.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
ACRONYMES	viii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
CHAPITRE I : <u>ÉVALUATION DE LA CRITICITE DES RISQUES INDUSTRIELS</u>	04
I.1 INTRODUCTION	04
I.2 LE RISQUE : CONCEPTS GÉNÉRAUX	04
I.2.1 Notion de danger.....	04
I.2.2 Notion de risque.....	05
I.2.3 Notion d'accident.....	06
I.2.4 Notion de sécurité.....	06
I.2.5 Classification des risques.....	06
I.2.6 Gestion du risque.....	07
I.2.6.1 Analyse du risque.....	08
I.2.6.2 Évaluation du risque.....	08
I.2.6.3 Réduction du risque.....	08
I.3 ACCEPTABILITÉ ET CRITÈRES D'ACCEPTABILITÉ DU RISQUE	09
I.3.1 Notion l'acceptabilité du risque.....	09
I.3.2 Risque acceptable.....	09
I.3.3 Critères d'acceptabilité du risque.....	10
I.3.3.1 Critères d'acceptabilité et Objectifs de sécurité.....	10
I.3.3.2 Types de critères.....	12
I.4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ	12
I.4.1 Évaluation Qualitative.....	13
I.4.2 Évaluation Semi-Quantitative.....	14
I.4.3 Évaluation Quantitative.....	16
I.5 MATRICE DE CRITICITÉ: ÉTAT DE L'ART	17
I.5.1 Présentation de la matrice de criticité.....	17
I.5.2 Critères relatifs à l'étude de la matrices de criticité.....	19
I.5.2.1 Critères relatifs à l'échelle de gravité.....	19
I.5.2.2 Critères relatifs à l'échelle de fréquence.....	20
I.5.2.3 Critères relatifs à l'échelle de criticité.....	21

I.5.3 Exemples de matrices de criticité.....	21
I.5.3.1 Matrice de criticité utilisée par Total-Fina-Elf.....	21
I.5.3.2 Matrice de criticité utilisée par Shell.....	22
I.5.3.3 Matrice de criticité utilisée par Aventis.....	23
I.5.3.4 Matrice de criticité utilisée par Rhodia.....	24
I.5.3.5 Matrice de criticité utilisée par HSE.....	25
I.5.3.6 Diagramme d'évaluation de la criticité utilisé par OFEFP.....	25
I.5.4 Synthèse de l'analyse des matrices de criticités.....	28
I.6 CONCLUSION.....	29
CHAPITRE II : <u>ANALYSE DE LA CRITICITÉ DANS UN ENVIRONNEMENT</u> <u>INCERTAIN</u>.....	30
II.1 INTRODUCTION.....	30
II.2 REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES IMPARFAITES.....	30
II.2.1 Formes d'imperfection des connaissances.....	30
II.2.2 Esquisse des théories de représentation des connaissances imparfaites.....	31
II.3 THÉORIE DES ENSEMBLES FLOUS.....	31
II.3.1 Notion d'ensemble flou.....	32
II.3.2 Propriétés d'un ensemble flou.....	33
II.3.3 Fonctions d'appartenance.....	35
II.3.4 Opérations sur les ensembles flous.....	37
II.3.5 Notion de variable linguistique.....	37
II.3.6 Relations floues.....	38
II.3.7 Implication floue.....	38
II.3.8 Modus Ponens Généralisé (MPG).....	39
II.3.9 Système d'inférence de Mamdani.....	39
II.3.9.1 A propos des systèmes d'inférence.....	39
II.3.9.2 Méthodologie du système d'inférence de Mamdani.....	40
II.4 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE DANS L'ANALYSE DE CRITICITÉ.....	41
II.4.1 Application de la logique floue dans l'AMDEC.....	41
II.4.2 Utilisation du graphe de risque flou pour la détermination du SIL.....	42
II.5 CONCLUSION.....	43

CHAPITRE III : <u>APPROCHE FLOUE D'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES RISQUES</u>	44
III.1 INTRODUCTION	44
III.2 PRÉSENTATION DE L'APPROCHE FLOUE PROPOSÉE	44
III.3 CONCLUSION	45
 CHAPITRE IV : <u>ÉVALUATION FLOUE DE LA CRITICITÉ DES RISQUES D'UN SYSTÈME OPERATIONNEL</u>	 46
IV.1 INTRODUCTION	46
IV.2 PRÉSENTATION DU PROCESSUS	46
IV.3 SCÉNARIOS RETENUS POUR L'ÉTUDE	48
IV.4 PRÉSENTATION DE LA GRILLE DE CRITICITÉ	48
IV.4.1 Échelle de gravité.....	48
IV.4.2 Échelle de fréquence.....	49
IV.4.3 Échelle de criticité.....	49
IV.5 ÉVALUATION FLOUE DE LA CRITICITÉ DES SCÉNARIOS RETENUS	50
IV.5.1 Établissement des échelles floues.....	50
IV.5.1.1 Échelle de gravité.....	50
IV.5.1.2 Échelle de fréquence.....	50
IV.5.1.3 Échelle de criticité.....	50
IV.5.2 Établissement des règles floues.....	51
IV.5.3 Fuzzification des données de scénarios.....	51
IV.5.4 Résultats et discussion.....	51
IV.6 CONCLUSION	52
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 53
RÉFÉRENCES	54

LISTE DES FIGURES

I.1	Caractérisation du risque.....	5
I.2	Processus de gestion du risque.....	7
I.3	Principe ALARP.....	10
I.4	Critère de Farmer.....	11
I.5	Classification générale des méthodes d'évaluation de la criticité des risques.....	13
I.6	Graphe de risque.....	14
I.7	Exemple (2) de matrice de criticité.....	17
I.8	Matrice de classification des risques utilisée par Total-Fina-Elf.....	21
I.9	Matrice de criticité de Shell.....	22
I.10	Grille de criticité d'Aventis.....	23
I.11	Grille utilisée par Rhodia pour la cotation du risque.....	24
I.12	Grille de criticité du HSE.....	25
I.13	Diagramme Probabilité-Ampleur utilisé par l'OFEFP.....	26
II.1	L'ensemble flou « conduite confortable ».....	32
II.2	Support, Hauteur et Noyau d'un ensemble flou.....	33
II.3	Présentation de quelques fonctions d'appartenance.....	34
II.4	Illustration de quelques opérations sur les ensembles flous.....	36
II.5	Illustration de la propriété du tiers-exclu.....	37
II.6	Représentation de la variable linguistique « confort ».....	37
II.7	Organigramme du SIF.....	40
III.1	Procédure globale d'évaluation de la criticité à base de règles floues.....	45
VI.1	Schéma du processus d'extraction des gaz légers.....	47
VI.2	Architecture du four rebouilleur H-101.....	47
VI.3	Matrice de criticité utilisée par l'entreprise SH DP HRM.....	48
VI.4	Fonctions d'appartenance générées pour la fréquence, la gravité et la criticité....	51

LISTE DES TABLEAUX

I.1	Recueil des plus graves accidents industriels survenus dans le monde.....	6
I.2	Critères d'évaluation des paramètres du <i>RPN</i>	15
I.3	Présentation des mesures du risque.....	16
I.4	Exemple de matrice de criticité.....	17
I.5	Exemple d'échelle de gravité.....	18
I.6	Exemple de caractérisation de la fréquence.....	18
I.7	Synthèse de l'analyse de l'échelle de gravité.....	27
I.8	Synthèse de l'analyse de l'échelle de fréquence.....	27
I.9	Synthèse de l'analyse de l'échelle de criticité.....	28
VI.3	Échelle de gravité.....	49
VI.4	Échelle de fréquence.....	49
VI.6	Échelle de criticité.....	49
VI.9	Comparaison des résultats de l'évaluation de la criticité des scénarios.....	51

ACRONYMES

AQR	Analyse Quantitative des Risque
ADD	Arbre De Défaillance
ADE	Arbre Des Evénements
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
F	Fréquence
G	Gravité
HAZOP	HAZards and OPerability studies
HSE	Health and Safety Executive
IEC	International Electrotechnical Comission
IPL	Indépendant Protection Layers
ISO	International Organization for Standardization
LOPA	Layers Of Protection Analysis
MCC	Matrice de Criticité Conventionnelle
MCF	Matrice de Criticité Floue
MPG	Modus Ponens Généralisé
MPP3	Module Process Plant 3
MISO	Multiple Inputs and Single Output
OFEFP	Office Fédéral suisse d'Environnement, des Forêts et du Paysage
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series
R	Risque
RPN	Risk Priority Number
RRF	Risk Reduction Factor
SIL	Safety Integrity Level
SIF	Systèmes d'Inférence Floue
SIS	Système Instrumenté de Sécurité

INTRODUCTION GÉNÉRALE

● PROBLÉMATIQUE

Dans une société de plus en plus sensible aux notions de sécurité et de développement durable, les entreprises ont le souci d'éviter les dangers pouvant induire incendies, explosions et autres accidents sources de dommages pour les personnes, les biens et l'environnement. La prévention de ces dommages requière une maîtrise des risques inhérents à l'activité de l'entreprise.

Un risque n'étant pas la résultante d'une cause unique mais de l'interaction de plusieurs situations. De ce fait, un processus décisionnel global en matière de gestion de risques s'impose [SAN 00]. Ce processus, qu'est itératif, a pour objectif d'identifier, évaluer, neutraliser et manager les événements non souhaités qui peuvent être générés par le système ou par son environnement [PER 92].

L'évaluation des risques industriels, étape incontournable dans ce processus, est une procédure fondée sur l'analyse des risques pour décider si un risque tolérable est atteint ou non [ISO 99]. Elle s'effectue souvent de manière semi-quantitative à partir d'un niveau de probabilité qu'un dommage survienne et de son niveau de gravité, et doit être réalisée afin de hiérarchiser les risques identifiés et de les comparer à un niveau de sécurité prédéfini. Bien entendu, l'acceptation de ce risque est conditionnée par la définition préalable des critères d'acceptabilité du risque. Par conséquent, la finesse dans l'appréciation des grandeurs du risque dépend en partie, de ces critères.

L'évaluation de la criticité du risque se définit, donc, par une opération de comparaison impliquant la définition des échelles de cotation des grandeurs du risques en terme de fréquence (F) et de gravité (G) ainsi qu'une structure de combinaison de ces dernières explicitant les critères d'acceptabilité retenus pour l'évaluation.

En pratique, la criticité des risques est décrite de manière schématique soit par une courbe appelée courbe de Farmer soit par une grille appelée grille ou matrice de criticité .

S'agissant de la grille de criticité, l'évaluation peut être qualitative pour une description qualitative des paramètres F et G ou semi-quantitative dans le cas de matrices étalonnées.

L'échelle de gravité comporte un certain nombre de niveaux définis en fonction des conséquences d'une situation dangereuse sur les personnes, les biens et l'environnement. De même, un certain nombre de niveaux est fixé pour la fréquence. Le positionnement dans la grille permet de visualiser la criticité des situations dangereuses pour juger de l'acceptabilité (ou non) du risque et de décider les mesures d'amélioration à apporter pour le réduire. Il permet de discerner parmi les situations positionnées, celles qui nécessitent une amélioration en priorité.

La matrice de criticité, qui doit servir d'outil d'aide à la décision dans la démarche de démonstration de la sécurité, constitue un outil standard qui relie les conséquences d'un événement et sa fréquence. Ceci explique sa large utilisation dans divers secteurs industriels.

Nous pouvons cependant nous interroger sur certains aspects de cette méthode. Trois principaux problèmes sont à soulever :

- Le premier concerne le processus de cotation des échelles de fréquence, de gravité et de criticité. Il est constaté que les catégories de ces échelles sont définies de manière franche en leur associant un classement numérique ordinaire, ce qui ne s'accorde pas avec la nature incertaine et imprécise de l'information sur la fréquence et la gravité des situations réelles, particulièrement en présence d'événements rares ou de systèmes nouveaux en phase de conception. De plus, cette cotation, néglige les effets de confusion entre catégories (i.e., chevauchement des intervalles) qui reflète le raisonnement humain ;
- Le second est dû à la discontinuité des échelles utilisées qui se traduit par des difficultés d'interprétation des résultats de l'évaluation ;
- Le dernier est imputable à la règle de croisement de l'information sur les paramètres F et G pour agréger un score de la criticité (indice de risque). Le produit $R = F \times G$ est couramment utilisé, mais sa signification est fortement contestée pour des échelles ordinales.

La théorie des ensembles flous due à L.A Zadah [ZAD 65] semble offrir un cadre très adéquat pour l'évaluation de la criticité des risques. Un nombre d'études ont tenté d'introduire des modèles flous à des méthodes d'évaluation qualitatives telles que le graphe de risque [NAI 09], ou semi-quantitatives, notamment le RPN (Risk Priority Number) [PEL 94] et [SHA 05] ; et l'analyse des couches de protection (LOPA) [MAR 08].

L'évaluation floue de la criticité permet la manipulation directe des mesures sous forme d'ensembles flous, ce qui permet à l'analyste d'utiliser des représentations naturelles et informatives des jugements d'experts [FRE 82]. Sur la base de cette connaissance, bien que qualitative et imprécise, on peut entreprendre des actions correctives permettant la maîtrise des risques [MAH 02] et [XU 02].

• OBJECTIF DU MEMOIRE

Ce travail s'inscrit dans une perspective d'amélioration des grilles de criticité conventionnelles pour une meilleure maîtrise des risques industriels. Dans cet objectif, il vise à proposer une approche floue d'évaluation de la criticité, laquelle s'articule autour des concepts d'ensemble flou [ZAD 65] et de variable linguistique [ZAD 75].

L'approche développée dans le cadre de ce travail s'appuie sur un système d'inférence à base de règles floues. Partant d'une représentation floue avec des valeurs linguistiques des échelles de fréquence, de gravité et de risques, nous avons construit une base de règles floues. En utilisant les opérations de la logique floue, les données de fréquence et de gravité peuvent être évaluées au niveau du système d'inférence floue pour déterminer un indice de criticité du risque.

• ORGANISATION DU MÉMOIRE

Le présent mémoire comporte quatre chapitres traitant les différents aspects théoriques sous-jacents lesquels seront consolidés par une application de mise en œuvre.

- Le premier chapitre présentera, dans un premier temps, les différents concepts liés à l'évaluation de la criticité des risques en partant de certaines définitions générales. Il présentera ensuite les formes

d'évaluation de la criticité en s'intéressant particulièrement à la grille de criticité qui s'insère à la fois parmi les méthodes qualitatives et semi-quantitatives.

- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons d'abord les fondements théoriques de l'évaluation de la criticité à base de règles floues. Il sera ensuite question d'examiner quelques approches floues qui ont été développées dans le cadre de l'évaluation des risques.
- Le troisième chapitre présentera l'approche de la matrice de criticité floue basée sur un système d'inférence flou, développée dans le cadre du présent travail.
- Afin de valider l'approche proposée dans le chapitre précédant, le quatrième chapitre sera consacré à présenter une application d'évaluation de la criticité des risques inhérents à un système industriel opérationnel.

Enfin, le présent mémoire sera clôturé par une conclusion générale résumant le travail accompli et les perspectives envisagées.

ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES RISQUES INDUSTRIELS

I.1 INTRODUCTION

L'évaluation du risque désigne une procédure fondée sur l'analyse du risque. Il s'agit d'estimer les risques en vue de les hiérarchiser et de les comparer à un niveau jugé acceptable [ISO 99].

Bien entendu, l'acceptation de ce risque est subordonnée à la définition préalable de critères d'acceptabilité du risque. Ainsi, la finesse dans l'estimation des grandeurs du risque dépend en partie de ces critères.

Cette évaluation revient à coter chaque situation dangereuse identifiée, à la fois par rapport à la gravité de ses conséquences et par rapport à sa fréquence d'occurrence. Ça suppose qu'il faut définir des échelles de cotation du risque en terme de fréquence et de gravité ainsi qu'une grille de criticité permettant la combinaison de ces deux paramètres et explicitant les critères d'acceptabilité retenus pour l'évaluation du risque.

Le présent chapitre traitera le problème d'évaluation de la criticité des risques. Nous nous intéressons aux méthodes d'évaluation qualitatives et semi-quantitatives et plus particulièrement à la matrice de criticité des risques, ses avantages et ses limites. Dans ce sens, nous proposons un état de l'art des matrices de criticité utilisées dans différents secteurs d'activité.

Mais avant d'entamer cette thématique, nous commençons par présenter les définitions relatives aux notions-clés de danger, de risque, de sécurité, de gestion et d'acceptabilité du risque.

I.2 LE RISQUE : CONCEPTS GÉNÉRAUX

I.2.1 Notion de danger

Selon Desroches [DES 95] et la norme IEC 61508 [IEC 98], le danger désigne une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux personnes, aux biens (détérioration ou destruction) ou à l'environnement. Les dangers peuvent avoir une incidence directe sur les personnes, par des blessures physiques ou des troubles de la santé, ou indirecte, au travers de dégâts subis par les biens ou l'environnement.

Le référentiel OHSAS 18001 [OHS 99] définit le danger comme étant une source ou 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.

Soulignons que de nombreux termes sont employés, selon les normes ou les auteurs, autour de la notion de danger et la rendent ambiguë. De plus, les dictionnaires associent souvent le terme danger au terme risque. En effet, plusieurs dictionnaires proposent le terme risque comme synonyme du terme danger, ce qui explique le fait qu'un grand nombre de personnes utilisent indifféremment ces termes. Même les documents et les textes officiels confondent danger et risque.

I.2.2 Notion de risque

La perception des dommages potentiels liés à une situation dangereuse se rapporte à la notion de risque. Le terme risque a plusieurs significations. De même, les risques peuvent être de nature très variée et beaucoup de classifications ont été proposées.

Les définitions du risque à deux dimensions sont assez proches. Selon Villemeur [VIL 98], le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.

Et selon OHSAS 18001 [OHS 99], un risque est la combinaison de la probabilité et de la (des) conséquence (s) de la survenue.

Cependant, il existe des définitions légèrement plus complexes dans lesquelles apparaît une troisième dimension : l'acceptabilité du risque, seuil en dessous duquel on accepte l'existence du danger bien que sa gravité et sa probabilité d'occurrence ne soient pas nulles.

Dans la suite du présent travail, le terme risque est lié sans ambiguïté aux risques encourus dans la conduite des systèmes.

Qualitativement, le risque se caractérise par :

- L'ampleur des dommages, suite à un événement redouté, selon un critère de gravité (critique, marginal, mineur, insignifiant, etc.). Ce critère tient compte de l'appréciation des conséquences en terme de pertes humaines (blessures, mort) ou en termes de pertes économiques (coût liés aux dégradations, etc.) ;
- Le caractère incertain lié à l'apparition d'un événement redouté (fréquent, rare, improbable, etc.) provoquant le dommage à partir d'une situation dangereuse déterminée.

Selon Gouriveau [GOU 03], le risque peut être défini par l'association d'événements causes et conséquences d'une situation donnée. Les événements-causes peuvent être caractérisés par leur occurrence (P) et les événements-effets par leur impact (I) (voir figure I.1). La corrélation de ces grandeurs permet de construire un indicateur de risque $R = f(\text{Occurrence}, \text{Impact})$.

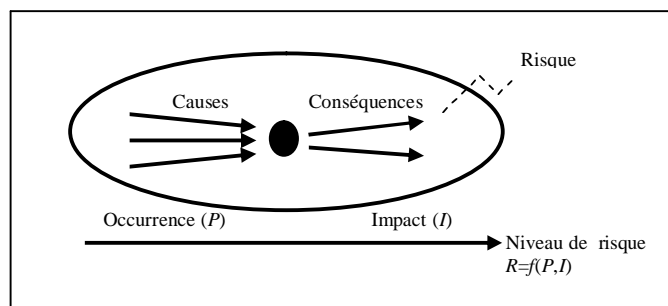


Fig. I.1 — Caractérisation du risque [GOU 03].

I.2.3 Notion d'accident

Selon OHSAS 18001 [OHS 99], l'accident est un événement imprévu entraînant la mort, une détérioration de la santé, des lésions, des dommages ou autres pertes.

Le tableau I.1 présente un recueil des plus importants accidents industriels survenus dans le monde entre 1960 et 2001.

Accident	Type d'accident	Victimes et dégâts
Feyzin - France (1966)	Incendie d'une industrie de stockage pétrochimique	18 morts
Flixborough - Grande - Bretagne (1974)	Explosion sur un site industriel	28 morts
Seveso - Italie (1976)	Fuite de dioxine d'une usine chimique	37 000 personnes touchées
Bhopal - Inde (1984)	Fuite d'un gaz toxique	2 500 morts et 250 000 blessés
Mexico - Mexique (1984)	Explosion d'une citerne de pétrole liquéfié	500 morts et 7 000 blessés
Tchernobyl - Ukraine (1986)	Explosion d'une centrale nucléaire	plus de 15 000 morts
La Mède - France (1992)	Explosion dans une raffinerie	6 morts et 7 blessés
Toulouse - France (2001)	Explosion d'un site industriel	30 morts et plus de 2 000 blessés

Tab. I.1 — Recueil des plus graves accidents industriels survenus dans le monde entre 1960 et 2001 [MIN 07].

L'ampleur et la fréquence de ces accidents ont suscité de nombreux efforts sur les études de risques afin de mieux les prévenir, les prévoir et les gérer.

I.2.4 Notion de sécurité

La sécurité est souvent définie par rapport à son contraire : elle serait l'absence de danger, d'accident ou de sinistre.

Selon [DES 03], la sécurité concerne la non occurrence d'événements pouvant diminuer ou porter atteinte à l'intégrité du système, pendant toute la durée de l'activité du système, que celle-ci soit réussie, dégradée ou ait échoué.

Et suivant le guide ISO/CEI 73 [ISO 02] élaboré par l'ISO sur la terminologie du management du risque, la sécurité est l'absence de risque inacceptable, de blessure ou d'atteinte à la santé des personnes, directement ou indirectement, résultant d'un dommage au matériel ou à l'environnement.

I.2.5 Classification des risques

Dans la littérature, on trouve plusieurs classifications des risques. Selon Tanzi [TAN 03], l'analyse des risques permet de les classer en cinq grandes familles :

- § les risques naturels : inondation, feu de forêt, avalanche, tempête, séisme, etc. ;
- § les risques technologiques : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaires, biologiques, ruptures de barrage, etc., les risques de transports collectifs (personnes, matières dangereuses) sont aussi considérés comme des risques technologiques ;
- § les risques de la vie quotidienne : accidents domestiques, accidents de la route, etc. ;
- § les risques liés aux conflits.

Une des classifications les plus répandues est de classer les risques en deux catégories : les risques naturels et les risques liés à l'activité humaine. Selon cette classification, les risques peuvent être

naturels dans le sens où ils ont trait à un événement sans cause humaine directe avérée. Les causes directes supposées ou indirectes ne doivent pas modifier cette distinction.

Les risques liés à l'activité humaine recouvrent un ensemble de catégories de risques divers :

- les risques techniques, technologiques, industriels et nucléaires ;
- les risques liés aux transports ;
- les risques sanitaires ;
- les risques économiques, financiers, managériaux ;
- les risques médiatiques ;
- les risques professionnels.

I.2.6 Gestion du risque

La gestion des risques est une opération commune à tout type d'activité. Les objectifs visés peuvent concerner par exemple :

- le gain de rentabilité et de productivité ;
- la gestion des coûts et des délais ;
- la qualité d'un produit...

La gestion du risque peut être définie comme l'ensemble des activités coordonnées en vue de réduire le risque à un niveau jugé tolérable ou acceptable. Cette définition, cohérente avec les concepts présentés dans les guides ISO/CEI 51 et 73 [ISO 99], s'appuie, ainsi, sur un critère d'acceptabilité du risque.

De manière classique, la gestion du risque est un processus itératif qui inclut notamment les phases suivantes (voir figure I.2):

- Appréciation du risque (analyse et évaluation du risque) ;
- Acceptation du risque ;
- Maîtrise ou réduction du risque.

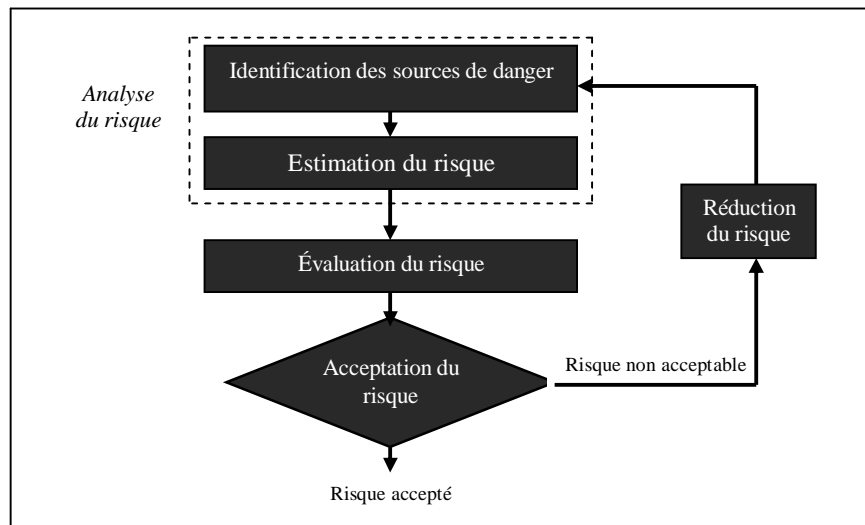


Fig. I.2 — Processus de gestion du risque [ISO 99].

Signalons que lorsque la gestion des risques s'applique à un système complexe mobilisant plusieurs acteurs, ce processus doit s'accompagner d'une étape de communication. Cette dernière peut concerner les dangers identifiés ou les mesures prises pour la maîtrise des risques associés.

1.2.6.1 Analyse du risque

L'analyse du risque est définie dans le guide ISO/CEI 51 [ISO 99] comme : « *l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux et estimer le risque* ».

L'analyse des risques vise tout d'abord à identifier les sources de danger et les situations associées qui peuvent conduire à des dommages sur les personnes, l'environnement ou les biens.

Dans un second temps, l'analyse des risques permet de mettre en lumière les barrières de sécurité existantes en vue de prévenir l'apparition d'une situation dangereuse (barrières de prévention) ou d'en limiter les conséquences (barrières de protection).

Consécutivement à cette identification, il s'agit d'estimer les risques en vue de les hiérarchiser et de pouvoir les comparer ultérieurement à un niveau de risque jugé acceptable.

1.2.6.2 Évaluation du risque

L'évaluation du risque désigne une procédure fondée sur l'analyse du risque pour décider si le risque tolérable est atteint [ISO 99]. En pratique, cette phase peut être accompagnée d'une quantification détaillée et précise (par opposition à l'estimation des risques qui reste très simplifiée) des grandeurs qui caractérisent le risque.

Comme précisé précédemment, ce processus peut être plus ou moins complexe selon les critères retenus pour définir l'acceptation du risque.

1.2.6.3 Réduction du risque

La réduction du risque (ou maîtrise du risque) désigne l'ensemble des actions ou dispositions entreprises en vue de diminuer la probabilité ou la gravité des dommages associés à un risque particulier [ISO 99]. De telles mesures doivent être envisagées dès lors que le risque considéré est jugé inacceptable.

De manière très générale, les mesures de maîtrise du risque concernent :

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

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

I.3 ACCEPTABILITÉ ET CRITÈRES D'ACCEPTABILITÉ DU RISQUE

I.3.1 Notion l'acceptabilité du risque

D'après [MER 04], la notion d'acceptabilité permet de distinguer ce qui peut être, dans les pertes occasionnées par la manifestation d'un aléa, perçu comme tolérable par les parties prenantes. Cette notion peut évoluer avec le temps suivant la progression de l'information de même que la culture du risque.

Cette notion, définie à travers un ensemble de critères « critères d'acceptabilité » (appelés aussi « niveaux du risque ou niveaux d'intolérabilité ») et rendue opérationnelle au niveau de la grille de criticité, permet d'améliorer, de réviser ou de proposer des mesures de réduction du risque et de ce fait, de reconsidérer les pratiques d'analyse et d'évaluation des risques.

Notons que l'acceptabilité concerne le risque et non la gravité du dommage ou sa probabilité d'occurrence considérées séparément. Ces définitions soulignent également le fait que l'acceptabilité dépend de valeurs courantes de notre société souvent fondées sur des données associées aux phénomènes naturels. Ainsi, nous acceptons de prendre le risque de mourir en prenant l'avion si la probabilité de ce décès par cette cause est identique (voire inférieure) à la probabilité de décès induit par un séisme ou une crise cardiaque (pour un corps sain) [BEU 06].

I.3.2 Risque acceptable

La notion de risque acceptable est essentielle pour caractériser la confiance attribuée à un système. En effet, si nous admettons souvent comme potentiels des dommages sévères, seule leur faible probabilité d'occurrence nous les fait accepter [LAM 06]. Par exemple, nous continuons à prendre l'avion malgré les accidents possibles du fait que la probabilité d'un écrasement conduisant aux décès des passagers est extrêmement faible. Nous établissons généralement cet arbitrage en fonction des risques que nous encourent par ailleurs, comme ceux induits par des phénomènes naturels : tremblements de terre, avalanches, inondations, etc.

Selon OHSAS 18001 [OHS 99], le risque acceptable est un risque qui a été réduit à un niveau tolérable pour un organisme en regard de ses obligations légales et de sa propre politique de santé et de sécurité au travail. Selon le guide ISO/IEC 51 [ISO 99], le risque acceptable est un risque accepté dans un certain contexte et fondé sur les valeurs admises par la société.

Le terme « risque acceptable » peut prendre des significations différentes. Ainsi dans les deux pays précurseurs en la matière, l'Angleterre avec le Health and Safety Executive (HSE) [HSE 95, 99] et les Pays-Bas avec le Netherlands Ministry of Spatial Planning, Housing and the Environment (VROM) [VRO 91], cette tendance est claire. Pour le premier, le risque acceptable est celui qui est « négligeable ». Le risque « tolérable » n'est pas négligeable, mais les gens sont prêts à faire avec s'ils leur procure des bénéfices et s'ils ont confiance en son contrôle. Dans ce cas, les limites maximales de risques admises par les normes de sécurité sont basées sur le risque tolérable en insistant sur le fait que des mesures « raisonnables » et/ou « praticables » doivent être mises en place pour réduire le risque jusqu'à obtention d'un risque « négligeable » ; au-delà de ce seuil, il n'y a aucune obligation de prendre des mesures pour réduire encore le risque. Pour le second, le ministère de l'environnement a établi une série de limites de risque « acceptable » et « négligeable » selon les circonstances. Ainsi, les risques au-dessus de la limite acceptable sont interdits et il convient de les réduire jusqu'à la limite du risque négligeable. Dans ce cas, le niveau du risque considéré comme « négligeable » est fixé à 100 fois inférieur à la limite acceptable. Selon la Direction Générale française de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF), cette approche prend sa justification par la présence d'incertitudes associées à l'évaluation des risques et aux conséquences possibles de l'exposition cumulative à différents risques.

Les approches du HSE et du VROM restent très similaires et sont toutes deux basées sur le principe « As Low As Reasonably Achievable » (ALARA) et « As Low As Reasonably Practicable » (ALARP) développées au niveau international dans le domaine nucléaire (figure I.3).

Notons que la limite maximale du risque acceptable est estimée à des valeurs différentes pour le HSE et le VROM : 10^{-4} par an pour le public habitant dans le voisinage du site industriel pour le premier et 10^{-6} par an pour le second [MER 04].

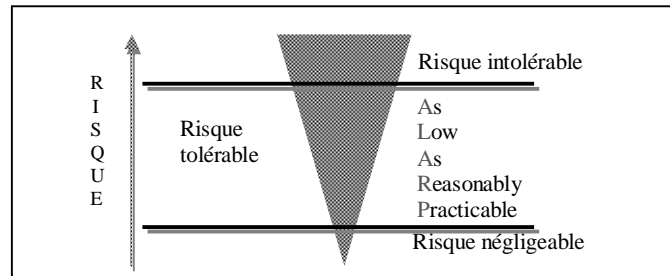


Fig. I.3 — Principe ALARP [HOU 00].

I.3.3 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.

A ce propos, la définition du risque acceptable donnée dans le guide ISO/CEI 51 [ISO 99], laisse transparaître la difficulté de retenir des critères objectifs et forfaitaires pour l'acceptation du risque.

I.3.3.1 Critères d'acceptabilité et Objectifs de sécurité

La définition des critères d'acceptabilité du risque est une étape cruciale et bien souvent délicate. Il est entendu que ces critères sont fonction du contexte de l'établissement concerné et des objectifs poursuivis dans la gestion des risques.

Ainsi, avant d'entreprendre un programme d'élaboration et éventuellement de démonstration de sécurité, il importe de fixer les objectifs de ce programme le plus clairement possible. Cette démarche exige que le problème ait été convenablement défini et délimité [LIE 76].

Quand on parle de l'analyse de sécurité d'un système, il est toujours difficile de délimiter exactement l'étude. Dans quelle intention d'abord mène-t-on cette analyse ?

- S'agit-il de minimiser la probabilité ou la gravité des événements portant atteinte à la sécurité ?
- S'agit-il de parvenir à une meilleure optimisation économique ?
- S'agit-il d'évaluer une solution technique, ou de comparer plusieurs dispositifs ?
- S'agit-il de démontrer la conformité à des règlements ou de normes officiels, ou à des spécifications imposées par le client ?

Et surtout,

- Quelle étendue doit-on donner à l'étude ?

Voici, à titre d'exemple, quelques unes des questions préliminaires posées dans le cas d'analyse de sécurité d'une centrale nucléaire :

- Jusqu'où faut-il aller dans la recherche des événements portant atteinte à la sécurité ?
 - Faut-il inclure les typhons, les tremblements de terre, l'écrasement d'un gros avion porteur sur la centrale, etc. ?
 - Faut-il inclure dans l'analyse les problèmes soulevés par la pollution ?
 - Faut-il tenir compte des actions humaines néfastes à la sécurité des systèmes ?
- A partir de quelle gravité, les accidents doivent-ils être pris en considération ? Si on choisit un critère relatif au nombre de jours d'arrêt de travail, encore convient-il de fixer le seuil acceptable ?

Il existe plusieurs conceptions générales susceptibles d'inspirer le choix de ces critères. Citons par exemple celles exprimées par Chauncey Starr [LIE 76] et Farmer [FAR 67].

‡ *Critère de Chauncey Starr*

Pour déterminer le niveau de risque acceptable, on serait tenté d'utiliser une approche économique en optimisant le rapport entre l'utilité sociale de telle évolution technologique et le coût, direct et indirect, que la communauté est obligée de consentir pour réaliser ce progrès. Dans le coût indirect interviennent de multiples éléments, tels que les problèmes d'environnement et de pollution, les retombées sur le marché de l'emploi, l'impact des changements sur le psychisme des individus, la qualité de la vie familiale, et naturellement les conséquences des accidents. Il est rare que le compromis entre l'utilité et le coût ait pu être déterminé au terme d'un raisonnement global dans l'intérêt d'une communauté ; il résulte le plus souvent d'un grand nombre de micro-optimisations fondées sur des intérêts particuliers plutôt que sur l'intérêt général. Aussi, est-il difficile de dire, dans l'absolu, où se situe le compromis optimal pour la communauté ; on doit alors se contenter de rechercher, à partir des données disponibles, quel est le niveau de risque traditionnellement acceptable. En d'autres termes, la question peut être ainsi posée : quel accroissement du taux de mortalité par accident peut-on accepter pour un progrès qui entraîne un accroissement de x % du revenu national par tête ? Encore cette formulation est-elle trop restrictive puisque elle identifie la mesure de l'utilité sociale au revenu national par tête sans tenir compte des autres paramètres qui peuvent jouer sur la qualité de la vie ? [LIE 76]. Chauncey Starr a tenté d'établir une corrélation entre la probabilité d'accidents mortels par heure d'exposition au risque et l'utilité sociale. En examinant les taux d'accidents dans diverses industries d'extraction (carrières, mines de charbon, mines de métaux), Chauncey Starr est arrivé à la conclusion que le risque acceptable est sensiblement proportionnel au cube de l'utilité [CHA 69].

‡ *Critère de Farmer*

Un autre type d'approche a été utilisé par Farmer [FAR 67] sur l'idée que chaque événement est caractérisé par sa probabilité et son coût (exprimé par exemple, en dollars). Il existerait dans le plan Probabilité-Coût une frontière séparant une zone inacceptable d'une zone acceptable. En coordonnées logarithmiques, cette fonction serait une droite de pente -1.5. Ainsi apparaît la conception qu'il existe une probabilité maximale admissible fonction décroissante de la gravité (figure I.4).

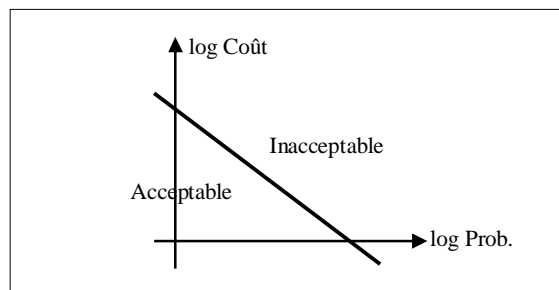


Fig. I.4 — Critère de Farmer [FAR 67].

I.3.3.2 Types de critères

Selon [CCP 01], il existe quatre catégories principales de critères d'acceptabilité des risques, en l'occurrence :

- Les critères définis par les matrices fréquence/conséquence ;
- Les critères qui spécifient le risque maximum tolérable (Ex., mortalité ou perte en dollars) par scénario ;
- Les critères qui spécifient le nombre maximum de barrières de sécurité pour un scénario quelconque ;
- Les critères qui spécifient le risque cumulatif maximum pour un processus ou pour une zone géographique.

Dans l'analyse quantitative des risques, les critères d'acceptabilité peuvent prendre la forme de valeurs absolues ou de trois zones [AVE 98] :

‡ Les valeurs absolues

- La probabilité p de certains événements ne doit pas excéder un certain nombre p_0 (Ex., la probabilité de mort d'un travailleur dans un accident doit être inférieure à 10^{-3} /an) ;
- Le nombre de morts par 100 millions heures d'exposition au risque ne doit pas atteindre un certain nombre m_0 .

‡ Les trois zones (régions)

Le niveau de risque est représenté selon trois domaines :

- Domaine où le risque est si bas qu'il est considéré *négligeable* ;
- Domaine où le risque est si élevé qu'il est considéré *intolérable* ;
- Une zone intermédiaire où le risque est *tolérable* et doit être réduit à un niveau aussi bas que raisonnablement praticable « ALARP ».

Quels que soient les critères d'acceptation retenus, il est indispensable qu'ils soient connus et explicites préalablement à toute phase d'analyse des risques.

I.4 MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ

Deux formes d'évaluation de la criticité peuvent être rencontrées : évaluation subjective/objective et évaluation qualitative/quantitative.

L'évaluation subjective est effectuée par jugements d'experts en s'appuyant sur leur expérience et leurs connaissances. Quant à l'évaluation objective, elle est strictement tirée des études techniques (essentiellement par des statistiques) d'évènements qui se sont déjà produits (enquêtes, expérimentation).

S'agissant de la deuxième forme, l'évaluation de la criticité peut être effectuée de trois manières [DZI 06] : (voir figure I.5)

- Qualitativement ;
- Semi-quantitativement ; ou
- Quantitativement.

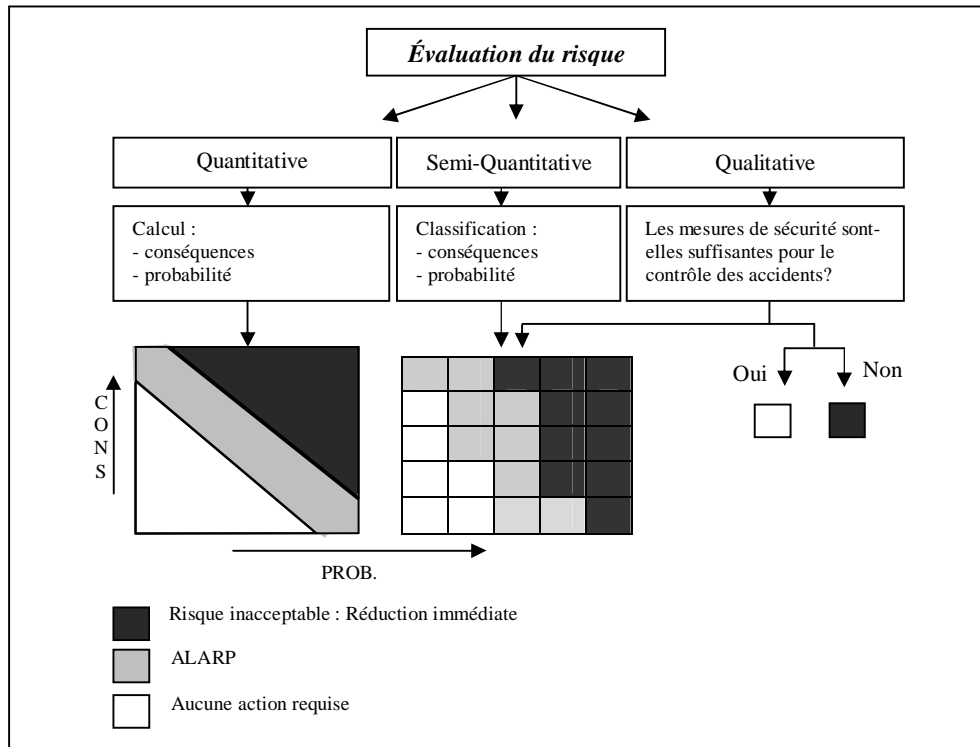


Fig. I.5 — Classification générale des méthodes d'évaluation de la criticité des risques [DZI 06].

I.4.1 Évaluation Qualitative

L'évaluation qualitative de la criticité consiste à utiliser un système de classement qualitatif qui vise à caractériser les risques, sur la base des questionnaires, d'avis d'expert, d'échelles descriptives ou numériques pour décrire l'intensité des conséquences potentielles et la vraisemblance que ces conséquences se produisent. Les méthodes qualitatives sont basées sur un jugement de conformité. Elles sont, en effet, utilisées dans la vérification de la concordance du niveau de sécurité avec les spécifications des règlements et des normes. Ces règles font référence à des dispositifs indépendants qui représentent les exigences minimales devant être satisfaites pour atteindre un certain niveau de sécurité acceptable [DZI 06].

Il s'agit par exemple des grilles de criticité à description qualitative et de méthodes qui permettent d'allouer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL : Safety Integrity Level) à partir de la connaissance des risques associés au procédé. La méthode la plus utilisée est le *Graphe de risque* décrit dans la norme IEC 61508 [IEC 98].

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

La fréquence de l'événement dangereux f est supposée être le résultat des trois facteurs suivants :

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

Finalement, nous obtenons les quatre paramètres de risque suivants :

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

En combinant ces paramètres, on obtient le graphe de risque dont un exemple est présenté sur la figure I.6.

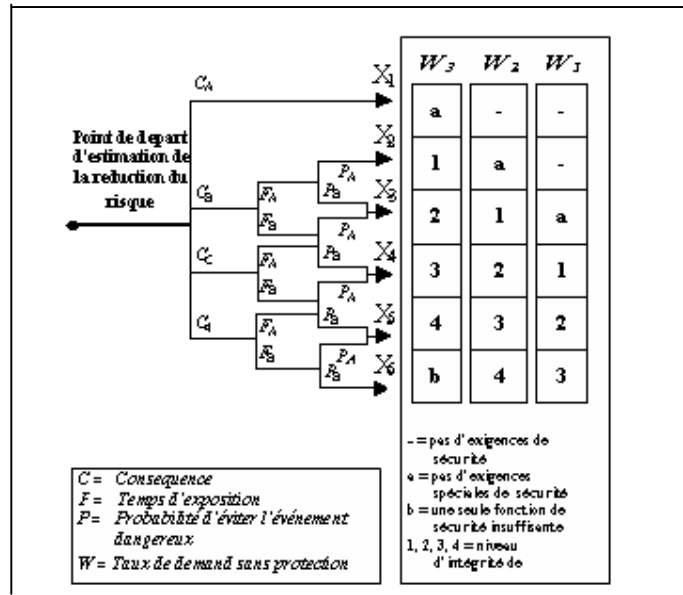


Fig. I.6 — Graphe de risque [IEC 98].

Ce graphe s'explique de la manière suivante : L'utilisation des paramètres de risque C, F et P aboutit à un certain nombre de sorties (X₁, X₂, ..., X_n). Chaque sortie est consignée dans une des trois échelles (W₁, W₂ et W₃). Chaque échelle indique le SIL nécessaire que doit satisfaire le système. La mise en correspondance avec W₁, W₂ ou W₃ permet de réaliser la contribution d'autres mesures de réduction du risque. Le décalage dans les échelles W₁, W₂ et W₃ est nécessaire pour avoir trois niveaux différents de réduction des risques. Le graphe est composé de l'échelle W₃, qui fournit la réduction minimale du risque grâce à des mesures spécifiques, c'est-à-dire la plus forte probabilité de l'apparition d'un événement non désiré. L'échelle W₂ caractérise une contribution moyenne et l'échelle W₁ caractérise une contribution maximale. La sortie finale du graphe de risque donne le SIL du Système Instrumenté de Sécurité (SIS) et correspond à une mesure de la réduction nécessaire du risque pour le système.

I.4.2 Évaluation Semi-Quantitative

L'évaluation Semi-Quantitative de la criticité s'applique à la catégorisation des paramètres de risque (la fréquence et la gravité), et le 'score' final du risque est obtenu moyennant différentes méthodes [MAR 08].

L'approche d'évaluation de la criticité est dite semi-quantitative, dans le sens où les probabilités de défaillance et les conséquences qui en découleraient sont classées dans des catégories dont les critères sont exposés à l'exploitant [HOU 00].

Cette approche peut être utilisée pour évaluer les risques liés aux processus [MOO 97], et permet de décrire la manière dont se développe un scénario d'accident. Elle comprend les étapes suivantes [SAL 08] :

- § Identifier les scénarios d'accident ;
- § Identifier les événements de base pour chaque scénario. Les événements de base ayant causé des défaillances ou débouché vers un succès de la sécurité du système sont pris en compte ;
- § Associer à chaque scénario sa probabilité d'occurrence correspondante ;
- § Estimer la probabilité (catégorie approximative d'occurrence) ;
- § Effectuer l'analyse des conséquences ;
- § Associer à chaque conséquence son taux de gravité ;
- § Évaluer la criticité du risque comme étant la combinaison de la fréquence et de la gravité.

La méthode la plus répandue est *la matrice de criticité*. Une présentation détaillée de la matrice de criticité et des pratiques qui en découlent fera l'objet de la section suivante.

Citons également la méthode *RPN* (Risk Priority Number), qui est une partie intégrante de l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), appliquée dans le secteur automobile et initialement développée par Ford Motor Company [FMC 88].

Le *RPN* est utilisé pour évaluer la criticité les modes de défaillances d'un système en vue d'entreprendre des mesures correctives visant à réduire les effets de ceux jugés critiques. La méthode utilise les paramètres suivants :

- sa fréquence d'occurrence (*O*);
- la gravité de ses effets (*S*) ; et
- la probabilité qu'il sera détecté au cours du prochain test (*D*).

Chaque paramètre est représenté sur une échelle de 1 à 10 avec cinq niveaux pour la gravité et la fréquence et six niveaux pour la détectabilité ; à chaque classe est attribuée une description qualitative et/ou quantitative. Ainsi le *RPN* (donné par la relation : $RPN = O \times S \times D$) sera coté sur une échelle de 1 à 1000. Les modes de défaillance ayant les valeurs du *RPN* les plus élevées seront considérés comme les plus critiques [BOW 03].

Classe	Fréquence d'occurrence	Description Qualitative	Description Quantitative
1	Rare	Défaillance improbable	< 1 dans 10^6 ans
2	Faible	Relativement, peu de défaillances	1 dans 20 000 ans
3			1 dans 4 000 ans
4	Modérée	Défaillances occasionnelles	1 dans ans 1000 ans
5			1 dans 400 ans
6			1 dans 80 ans
7	Elevée	Défaillances répétées	1 dans 40 ans
8			1 dans 20 ans
9	Très élevée	Défaillance presque inévitable	1 dans 8 ans
10			>1 dans 2 ans

Tab. I.2 — Critères d'évaluation des paramètres du *RPN* : exemple du paramètre (*O*).

Ce tableau montre les critères d'évaluation utilisés pour caractériser le paramètre (*O*) et les termes linguistiques correspondants.

I.4.3 Évaluation Quantitative

L'évaluation quantitative de la criticité repose sur un modèle mathématique qui conduit à une valeur numérique de criticité basé sur des valeurs numériques des probabilités, de la vulnérabilité et des conséquences pouvant correspondre au coût monétaire, au taux de mortalité ou d'invalidité, au taux de dégagement d'un produit dangereux, ... [CCP 00]. C'est une tâche complexe, une série d'analyses et de calculs qui usent de divers modèles de simulation, particulièrement dans l'analyse des effets physiques, ce qui exige un software spécial (PHAST, SAFETI, ALOHA, ...) [DZI 05].

Dans une évaluation quantitative sont évalués les dommages causés sur les personnes à l'aide de deux métriques *le risque individuel* et *le risque sociétal* [HOU 00]:

Les résultats issus de l'analyse quantitative doivent être représentés d'une façon relativement facile à comprendre et à utiliser. La présentation du risque réduit le volume d'information à une forme 'gérable', le résultat final peut être une valeur unique (indice du risque), une forme graphique (courbes, contours,...) (voir tableau I.3):

¡ *Indice du risque*

Peut être une valeur unique ou une tabulation de nombres. Certains indices sont des valeurs relatives sans aucune spécification de l'unité de mesure, leur signification dépend du contexte de la méthodologie de calcul.

¡ *Mesure du risque individuel*

C'est la mesure de la probabilité qu'une personne exposée de façon permanente au danger soit tuée. Il peut prendre la forme d'une valeur unique, d'une table de nombres, comme il peut être représenté sur une carte de localisation géographique par des courbes d'iso-risque individuel (contours).

¡ *Mesure du risque sociétal*

C'est la mesure de la probabilité qu'un groupe de personnes situées dans la zone d'effet d'un accident soit tué. Il peut prendre la forme d'une valeur unique, d'un ensemble nombres tabulés ou d'un graphe d'estimation du risque. Généralement, le risque sociétal est représenté à l'aide de courbes dites *F/N* (*F* : Fréquence par an, *N* : Nombre de morts).

<i>Mesure du risque</i>	<i>Format de présentation</i>
	Indices
. Indice équivalent du coût social (ESCI)	. Valeur numérique
. Taux de mortalité d'accident (FAR)	. Estimation de mort/ 10 ⁸ heures d'exposition
. Indice du danger individuel (IHI)	. Estimation du pic du risque individuel ou du FAR
. Taux moyen de mort (ARD)	. Nombre représentant le IHI par unité de temps
. Indice de mortalité (MI)	. Valeur singulière représentant la conséquence
	Risque individuel
. Contour de risque individuel (IRC)	. Lignes de contour connectant les points qui correspondent à des niveaux du risque égaux
. Profil de risque individuel (IRP)	. Graphe de risque individuel
. Risque individuel maximum (MIR)	. Valeur numérique du risque individuel correspondant à une personne exposée au risque le plus élevé
. Risque individuel moyen (AIR) (risque - population exposée)	. Valeur numérique du risque moyen pour une personne dans une population exposée
. Risque individuel moyen (AIR) (risque -totalité de la population)	. Valeur numérique du risque moyen pour une personne dans une population prédéterminée qu'ils soient les membres de cette population exposés ou non au danger
	Risque sociétal
. Courbe du risque sociétal (SRC) (courbe F/N)	. Graphe de la probabilité cumulative ou de la fréquence des événements causant N morts ou N blessures
. Risque sociétal moyen (ASR)	. Un autre terme de l'ARD

Tab. I.3 — Présentation des mesures du risque [CCP 00].

I.5 MATRICE DE CRITICITÉ : ÉTAT DE L'ART

I.5.1 Présentation de la matrice de criticité

Il est nécessaire de faire apparaître clairement, lors d'une évaluation des risques, l'ensemble des scénarios étudiés, en précisant pour chacun, la probabilité ou fréquence d'occurrence et la gravité potentielle de ses conséquences. Pour y parvenir, les *matrices* ou *grilles de criticité*, intégrant ces deux dimensions, sont utilisées dans un souci de clarté. Cette grille est un outil d'aide à la décision pour [MER 04] :

- la hiérarchisation des scénarios pouvant mener à un accident majeur ;
- la définition de mesures de réduction des risques à la source ; et
- l'élaboration des plans de prévention et de protection.

<i>Fréquence d'événement</i>	<i>Gravité du dommage</i>				
	Catastrophique	Majeure	Mineure	Minime	Négligeable
Fréquent	H	H	H	H	I
Probable	H	H	H	I	I
Occasionnel	H	H	I	I	L
Rare	H	I	I	L	T
Improbable	I	I	L	T	T
Invraisemblable	I	L	T	T	T

Tab. I.4 — Exemple de matrice de criticité [GUI 03].

Le tableau I.4 représente un exemple de table d'estimation du risque. La lettre H (High) représente le risque élevé, la lettre I (Intermediate) représente le risque intermédiaire, la lettre L (Low) représente le risque faible et la lettre T (Trivial) représente le risque insignifiant. Les couples (fréquence, gravité) résultant en un risque élevé (H) sont mis en valeur car ils représentent les risques les moins tolérables. Il est clair qu'un risque de niveau H fera sans aucun doute l'objet d'un travail de réduction.

		<i>CONSEQUENCE</i>				
		(1)	(2)	(3)	(4)	
<i>FREQUENCE</i>	(1)	1	2	3	4	□ Risque faible
	(2)	2	4	6	8	■ Risque moyen
	(3)	3	6	9	12	■ Risque élevé
	(4)	4	8	12	16	
	(5)	5	10	15	20	

Fig. I.7 — Exemple (2) de matrice de criticité.

La figure I.7 montre un autre exemple de matrice de criticité des risques, où l'axe horizontal, relatif à la gravité, comporte quatre catégories de conséquences :

- 1 : Conséquences mineures ;
- 2 : Conséquences significatives ;
- 3 : Conséquences critiques ;
- 4 : Conséquences catastrophiques.

La gravité peut être définie sur une échelle telle que celle figurant sur le tableau I.5.

Niveau	Description qualitative	Signification
1	Mineure	Ni dégradation sensible des performances du système, ni interruption de la mission, ni blessures de personnes, ni endommagement notable des biens ou du système
2	Significative	Dégradation sensible des performances du système avec possibilité d'interruption de la mission, mais sans blessures de personnes, ni endommagement notable des biens ou du système
3	Critique	Blessures de personnes et/ou endommagement notable des performances du système
4	Catastrophique	Destruction du système et/ou plusieurs cas de blessures graves et/ou de mort de personnes

Tab. I.5 — Exemple d'échelle de gravité [LIE 76].

L'axe vertical comporte cinq niveaux de fréquence:

- 1 : Extrêmement rare ;
- 2 : Rare ;
- 3 : Occasionnel ;
- 4 : Fréquent ;
- 5 : Très fréquent.

Sachant que la fréquence est l'inverse d'un temps ou d'un nombre d'occurrence par unité de temps, sa caractérisation dépend fortement de la nature et de la quantité de données disponibles. Le tableau I.6 donne un exemple de catégorisation de la fréquence.

Approche qualitative (peu de données)	Approche quantitative ou semi-quantitative (plus de données)	Au niveau de la grille de criticité
Extrêmement rare	10^{-n1} (*)	1
Rare	10^{-n2}	2
Occasionnel	10^{-n3}	3
Fréquent	10^{-n4}	4
Très fréquent	10^{-n5}	5

(*) avec $n1 > n2 > n3 > n4 > n5$

Tab. I.6 — Exemple de caractérisation de la fréquence.

A chaque case de la grille correspond un nombre caractérisant le risque. Ce nombre prend la valeur de deux chiffres qui représentent le couple (fréquence, gravité). La matrice comprend trois zones :

- Zone du risque faible (en blanc) ;
- Zone du risque moyen (en gris) ;
- Zone du risque élevé (en noir).

La matrice de criticité n'est pas complète si le risque jugé acceptable n'est pas séparé de celui jugé inacceptable.

La construction de la matrice de criticité comprend les étapes suivantes :

1. Caractérisation de la gravité, de la fréquence et du risque et définition des échelles de cotation ;
2. Définition des critères d'acceptabilité du risque ;
3. Représentation graphique de la matrice.

Pour un établissement, la catégorisation de la gravité et de la fréquence dépend du type d'activité ou des caractéristiques des processus impliqués. En général, et selon la norme MIL-SDT-882D [MIL 91], la fréquence est caractérisée selon cinq catégories et la gravité selon six catégories. Ainsi, une matrice de 24 cellules est construite. Parfois, particulièrement pour des jugements 'simples' du risque, les matrices de taille 3 x 3 et 5 x 5 peuvent être utilisées.

La relation entre les catégories de gravité, de fréquence et du risque est représentée par un ensemble de règles issues de l'engineering du risque (critères d'acceptabilité du risque).

I.5.2 Critères relatifs à l'étude des grilles de criticité

L'étude des grilles de criticité porte sur les échelles de gravité, de fréquence et de criticité correspondantes. A cet effet, Un certain nombre de critères est retenu pour l'analyse de chaque échelle [ROY 00], [BOW 03] et [MER 04] :

I.5.2.1 Critères relatifs à l'échelle de gravité

Cinq critères sont retenus pour l'étude de l'échelle de gravité :

- (1) *Nature de l'échelle* : Une échelle peut se présenter sous différentes formes :
 - Echelle *ordinale* : L'écart qui sépare deux échelons n'a pas de signification. Ceci est notamment le cas :
 - de l'échelle verbale.
 - de l'échelle numérique : Cette échelle est aussi appelée « échelle qualitative ».
 - Echelle *quantitative* (ou *de rapport*) : Celle-ci est numérique et ses échelons sont définis par référence à une unité clairement identifiée. Ceci dans le but de donner sens, d'une part, à l'absence de quantité (échelon zéro) et, d'autre part, au rapport entre deux échelons quelconques comme étant égal au rapport des nombres qui les caractérisent.
 - Echelle *d'intervalle* : Elle se trouve entre les deux cas extrêmes ci-dessus. Avec ce type d'échelle, le rapport entre les différences des nombres associés à deux couples d'échelons distincts est significatif, le rapport des nombres qui caractérisent deux échelons peut, lui, ne pas l'être. Exemple : Evaluation d'une température en degré Celsius ou Fahrenheit.
- (2) *Nombre d'échelons* : On entend donner, à travers ce critère, des indications sur la distribution des échelons.
- (3) *Conséquences agrégées ou distinguées* : Par agrégation on entend le passage d'une évaluation distinguée des conséquences (conséquence sur les personnes, conséquence sur les biens, etc.) à une évaluation globale des conséquences, c'est à dire, sur une seule échelle. Notons que s'il n'y a qu'une conséquence prise en compte dans le cadre de cette échelle de gravité, l'agrégation n'a pas lieu d'être. Lorsque les conséquences sont agrégées, la pratique d'agrégation utilisée est la « règle du max. ». Cette règle consiste à prendre la note la plus haute répertoriée sur l'une des échelles de

gravité (/ cible). Ainsi, si un scénario d'accident occasionne des conséquences de gravité 1 sur les personnes, 2 sur l'environnement et 3 sur le médiatique, la gravité globale sur le scénario est 3.

- (4) *Niveaux de l'analyse* (systèmes étudiés) : A chaque grille de criticité son « sujet d'étude » de risque. Certaines s'intéressent à l'installation et étudient les différents scénarios d'accidents potentiels, d'autres s'intéressent à l'entreprise dans sa globalité et étudient les risques associés au choix d'une stratégie ou le risque projet. D'autres adoptent une démarche système et étudient les scénarios d'accidents associés.
- (5) *Nature de l'information utilisée* : Le choix de la nature de l'échelle de gravité utilisée dans la composition d'une grille de criticité est fonction de la nature et la quantité d'information et de données disponibles. Ainsi, on peut se retrouver avec une dominance d'information quantitative (mesures, etc.), ou une dominance d'information qualitative (description, témoignage, etc.), ou un mélange des deux.

1.5.2.2 Critères relatifs à l'échelle de fréquence

Six critères sont retenus pour l'étude de l'échelle de fréquence d'occurrence :

- (1) *Désignation* : Vocabulaire utilisé pour désigner l'échelle : Probabilité, fréquence.
- (2) *Approche d'évaluation de la probabilité* : La démarche d'évaluation de la probabilité d'occurrence dépend fortement de la quantité, de la nature de l'information et des données à disposition. Deux grands types de démarche sont utilisés : Analyse statistique ou expertise (directe, indirecte).
 - Lorsque les données utilisées font référence à des événements passés ou à un existant et que les informations se présentent sous la forme d'une quantité suffisante, alors la probabilité d'occurrence est souvent déterminées sur la base de démarches statistiques. Dans ce cas, la probabilité (par rapport à l'historique) est réduite au calcul d'une fréquence.
 - Lorsque les données utilisées ne sont pas suffisantes, ne se prêtent pas à des manipulations statistiques, ou font référence à un événement « potentiel », les démarches les plus souvent utilisées sont basées sur l'expertise. Cette dernière est soit directe, soit indirecte avec l'utilisation d'approches : multicritère, par barrières, etc. Même si à l'issue de la démarche de calcul, le résultat est présenté sous une forme $10^{-n}/\text{an}$, ce type de probabilité n'est pas comparable ou n'a pas la même signification que le résultat du point précédent. On utilise ici une « probabilité subjective » car il n'y a pas de statistique historique pleinement exploitable.
- (3) *Lieu de référence d'occurrence de l'événement* : Le référentiel « spatiale et organisationnelle » influence fortement la quantité d'information à disposition et la signification de la probabilité calculée. Il est bien évident que si la source d'information s'étend au-delà du système étudié, la chance d'avoir une quantité d'information importante s'en trouve accrue ; et la probabilité d'occurrence calculée peut être « surévaluée ».
- (4) *Nature de l'échelle agrégée* : Type d'échelle de probabilité d'occurrence : qualitative, semi quantitative et quantitative.
- (5) *Nombre d'échelons* : On entend donner, à travers ce critère, des indications sur la distribution des échelons.
- (6) *Logique d'évaluation* : La manière dont la probabilité d'occurrence est obtenue est selon les cas rencontrés soit : Non explicitée ; directe (critères) ou indirecte (par barrières).

I.5.2.3 Critères relatifs à l'échelle des niveaux de criticité (cases de la grille de criticité)

Six critères sont retenus pour l'étude de l'échelle de criticité :

- (1) *Signification de la case* : La lecture de la case (niveau de criticité) dépend de la signification et la technique utilisée pour obtenir un niveau de probabilité et un niveau de gravité.
- (2) *Catégories de risque* : Lorsqu'un niveau de criticité est indiqué dans la case de la grille (ce qui n'est pas forcément le cas), les niveaux de risque peuvent varier, d'une grille à l'autre.
- (3) *Evaluation attribuée à la case (G, P)* : Il peut s'agir d'une note, d'un couple (G, F), ou d'une case vide).
- (4) *Règle d'agrégation* : Lorsqu'un niveau de criticité est attribué à la case, les règles d'agrégation entre le niveau de fréquence F et le niveau de gravité G sont : l'addition ($F + G$) et la multiplication ($F \times G$).
- (5) *Règle de passage du risque acceptable au non acceptable* : Une fois le scénario d'accident positionné sur la grille et renseigné sur la base d'un niveau de criticité, il devient nécessaire d'identifier si le risque est jugé acceptable ou non.
- (6) *Mesures suite à l'estimation du niveau de risque* : Le jugement sur l'acceptabilité du risque se fait normalement dans la perspective de choix de mesures de réduction du risque. (Sécurité (audit), comprendre l'événement, avis, amélioration, etc.).

I.5.3 Exemples de matrices de criticité

Dans le but d'identifier des éléments structurants pour les matrices de criticité et d'acceptabilité des risques, nous avons examiné un ensemble de grilles utilisées dans différents domaines et dans différents pays afin de voir, au travers les critères suscités, les points de convergence ou de divergence des différentes grilles de criticité [MER 04].

Notre choix a porté sur cinq grilles dont les échelles sont soit qualitatives ou semi-quantitatives. Un exemple d'échelles quantitatives, celles utilisées par l'Office Fédéral suisse d'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP) est inséré, à titre indicatif, à la fin de cette section.

1.5.3.1 Matrice de criticité utilisée par le groupe pétrolier Total-Fina-Elf

La notation Total-Fina-Elf est la résultante de deux rapprochements successifs : de Total avec la société pétrolière belge PetroFina, qui a donné naissance à Total-Fina, puis de Total-Fina avec Elf Aquitaine, qui a engendré le groupe Total-Fina-Elf.



Fig. I.8 — Matrice de classification des risques utilisée par Total-Fina-Elf.

L'approche d'évaluation adoptée par Total-Fina-Elf consiste en l'utilisation d'une grille de criticité qui offre la possibilité d'utiliser 6 niveaux de gravité et 5 niveaux de probabilité :

Gravité : Les niveaux sont :

- § niveau 0 : conséquences nulles ;
- § niveau 1 : conséquences mineures ;
- § niveau 2 : conséquences significatives ;
- § niveau 3 : conséquences critiques (blessures limitées à l'unité) ;
- § niveau 4 : conséquences catastrophiques (effets létaux limités à l'établissement) ;
- § niveau 5 : conséquences catastrophiques (blessures hors établissement).

Les trois premiers niveaux correspondent à des dégradations sensibles de l'équipement source.

Probabilité : Les niveaux sont :

- § niveau 1 : scénario très peu probable ;
- § niveau 2 : scénario extrêmement rare ;
- § niveau 3 : scénario rare ;
- § niveau 4 : scénario possible mais peu fréquent ;
- § niveau 5 : scénario fréquent.

La probabilité est issue de données statistiques sur les incidents et accidents, qui peuvent permettre de connaître les causes de défaillance mais ne sont pas toujours très adaptées au contexte d'utilisation (selon l'ancienneté et un certain nombre de paramètres d'influence). L'impact de l'établissement sur l'environnement (au sens large) est également étudié.

Le niveau de criticité est défini à partir du couple (niveau de gravité, niveau de probabilité) et est identifié dans la matrice de classification présentée sur la figure I.8 :

1.5.3.2 Matrice de criticité utilisée par le groupe pétrolier anglo-néerlandais Shell

Shell est un groupe mondial spécialisé en énergie et en produits pétrochimiques opérant dans plus de 130 pays et territoires.

Conséquences					Augmentation de la probabilité				
Sévérité	Personnes	Biens	Environnement	Image	A	B	C	D	E
					Pas d'accident connu dans l'industrie	L'incident est arrivé dans l'industrie du Pétrole	L'incident est arrivé dans le Groupe	L'incident est arrivé plusieurs fois par an dans la Cie	L'incident est arrivé plusieurs fois par an sur le Site
0	Pas de blessés	Pas de dommages	Pas d'impact	Pas d'impact	Amélioration continue				Intolérable
1	Blessures légères	Dommmages légers	Faible impact	Faible impact					
2	Blessures mineures	Dommmages légers	Impact mineur	Impact limité					
3	Blessures graves	Dommmages localisés	Impact localisé	Impact considérable					
4	Un décès	Dommmages importants	Impact important	National majeur					
5	Plusieurs décès	Dommmages énormes	Impact majeur	International majeur					

Zone de risque nécessitant des mesures de réduction

Fig. I.9 — Matrice de criticité de Shell.

- Chacune des trois zones identifiées dans cette grille est sujette à des analyses particulières. Ainsi :
- § en zone « d'amélioration continue », les mesures appliquées sont : le management par supervision, mise en place de procédures et compétence;
 - § en « zone de risque nécessitant des mesures de réduction », il est nécessaire de démontrer la gestion des dangers et des conséquences ou de mettre en place une analyse complémentaire ;
 - § en zones « intolérable », il est nécessaire d'effectuer des analyses complémentaires du type HAZOP, HRA,

1.5.3.3 Matrice de criticité utilisée par groupe pharmaceutique Aventis

Aventis est un groupe pharmaceutique européen né en 1999. La grille Aventis (voir figure I.10) est utilisée dans le but de définir des plans d'action et d'améliorer le management des risques. Elle comporte trois niveaux de risque :

- § acceptable (vert) ;
- § améliorable (jaune) ;
- § indésirable (rouge).

P	PROBABILITES		Cotation niveau de gravité					Protection
	Qualitative	Ordre de grandeur						
4	Tres probable	$f < 10^{-1}$	4	8	12	16	20	Prévention
3	Probable	$10^{-2} < f \leq 10^{-1}$	3	6	9	12	15	
2	Improbable	$10^{-3} < f \leq 10^{-2}$	2	4	6	8	10	
1	Tres improbable	$10^{-4} < f \leq 10^{-3}$	1	2	3	4	5	
Conséquences			1	2	3	4	5	
Santé des personnes		Atteinte légère Premiers soins Infirmierie	Effets irréversibles sans conséquence sur la santé AA<3 jours ou ASA	Effets irréversibles sans conséquence sur la santé : brûlure grave handicap permanent, maladie professionnelle	Effets multiples et irréversibles sur la santé au niveau du site	Effets multiples et réversibles sur la santé de personnes à l'extérieur du site		
Environnement		Pollution négligeable rapidement maîtrisée avec les moyens de l'atelier	Pollution plus importante nécessitant l'appui du centre de secours ou la déviation vers les égouts	A court terme, pollution induisant des effets réversibles sur l'environnement	A long terme, pollution induisant des effets partiellement irréversibles	A long terme, pollution induisant des effets irréversibles		
% de réduction de marge			$\leq 10^{-3}$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-1}$	≤ 1	> 1	
Image		Attention locale des médias	Attention locale	Vive émotion locale ; intérêt national	Vive émotion locale ; intérêt international	Vive émotion internationale		
			En général, pas d'effet au-delà des limites du site		Effets probables à l'extérieur			

Fig. I.10 — Matrice de criticité utilisée par Aventis.

Les conclusions données lors de l'utilisation de cette grille passent par une validation d'experts. Pour les scénarios dont les gravités sont de l'ordre de 4 ou 5 dans la matrice de criticité et où le risque en zones jaune ou rouge, il est nécessaire d'établir des « fiches de risque ». Pour cela, une approche par barrière est utilisée. Dans ce cas est effectuée une évaluation de l'impact des :

- § moyens de prévention sur la probabilité de l'événement ;
- § moyens de protection sur la gravité des conséquences.

1.5.3.4 Matrice de criticité utilisée par le groupe chimique Rhodia

Rhodia est un groupe français présent dans de nombreux domaines de la chimie. Ce groupe est né de la filialisation de la branche chimique du groupe Rhône-Poulenc avant sa fusion dans Aventis. Rhodia utilise des critères de sélection pour l'analyse de risque. Ainsi, la gravité et la probabilité sont définies à partir des critères suivants :

Gravité : les critères sont :

- § danger des produits x quantité de produits ;
- § danger de la réaction x quantité de mélange réactionnel ;
- § conditions opératoires (pression et température).

Probabilité : les critères sont :

- § nouveauté de l'installation. Ce critère est défini à partir : du produit et du procédé et de la durée d'exploitation ;
- § complexité de l'installation. Elle est estimée à partir : de la pression, de la température, de la formation, de l'assistance, etc.


PROBABILITE 						
Qualificatif	Fréquence par an	Niveau	Niveau de risque			
			1 = Indésirable	2 = Améliorable	3 = Acceptable	
Très probable 1 par an	$> 10^{-1}$	1	3	2	1	1
Probable 1 par 10 ² ans	10^{-3} à 10^{-1}	2	3	3	2	1
Improbable 1 par 10 ⁴ ans	10^{-5} à 10^{-3}	3	3	3	3	2
Extrêmement improbable 1 par 10 ⁶ ans	$< 10^{-5}$	4	3	3	3	3
GRAVITE Conséquences Humaines Conséquences Environnementales			L Légère	M Moyenne	H Haute	C Catastrophique
			1 accident cat. 2 ou 10 accidents cat. 3	1 accident cat. 1 ou 10 accidents cat. 2	1 mort 2 ou 10 accidents cat. 1	Supérieur à 10 morts
			Atteinte interne à l'atelier et Frais de remédiation supérieurs à 100 kE	Atteinte interne au site et Frais de remédiation supérieurs à 1 ME	Atteinte réversible externe au site et Frais de remédiation supérieurs à 10 ME	Atteinte irréversible à l'extérieur du site et Frais de remédiation supérieurs à 100 ME

Fig. I.11 — Grille utilisée par Rhodia pour la cotation du risque.

Le fait d'expliciter les critères d'évaluation permet de définir et de sélectionner des zones de risque homogène. Les barrières de sécurité « couches de protection » sont prises en compte dans cette analyse.

1.5.3.5 Matrice de criticité utilisée par le HSE

La grille de criticité du HSE se présente de la manière suivante :

Probabilité		Gravité			
(1) Extrêmement imp.	2	3	4	5	
(2) Très improbable	3	4	5	6	
(3) Improbable	4	5	6	7	
(4) Possible mais...	5	6	7	8	
(5) Probable dans la..	6	7	8	9	
		(1) Rejet négligeable	(2) Rejet faible	(3) Rejet moyen	(4) Rejet fort

Fig. I.12 — Grille de criticité du HSE.

La gravité des conséquences est évaluée de manière quantitative, à partir de l'évaluation du rejet en NH₃, et présentée de manière qualitative. Quatre catégories sont définies :

- § rejet négligeable : < 0,5 t NH₃ ;
- § rejet faible : 0,5 – 5 t NH₃ ;
- § rejet moyen : 5 – 50 t NH₃ ;
- § rejet fort : > 50 t NH₃ .

Les classes de probabilités sont estimées en 10⁻ⁿ /an pour coter la fréquence des événements recensés suite à la phase d'identification des dangers. Cinq classes sont identifiées :

- § extrêmement improbable dans la durée de vie de l'installation : < 10⁻⁵ /an ;
- § très improbable dans la durée de vie de l'installation : entre 10⁻⁵ et 10⁻⁴ / an ;
- § improbable dans la durée de vie de l'installation : entre 10⁻⁴ et 10⁻³ / an ;
- § possible dans la durée de vie de l'installation : entre 10⁻³ et 10⁻² /an ;
- § probable dans la durée de vie de l'installation : > 10⁻²/an.

Les cotations en gravité (1 à 4) et fréquence (1 à 5) sont additionnées entre elles pour obtenir la criticité de l'événement. Sont exclus tous les scénarios dont le score est inférieur à 3. Les scénarios avec un score = 3 sont tous sélectionnés et traités de la même manière.

1.5.3.6 Diagramme d'évaluation de la criticité utilisé par l'OFEFP

Le risque et son acceptabilité sont évalués en reportant en ordonnées la probabilité d'occurrence, et en abscisses l'ampleur possible des dommages résultant d'accidents majeurs. Le but de l'OFEFP est d'établir un cadastre fédéral des risques.

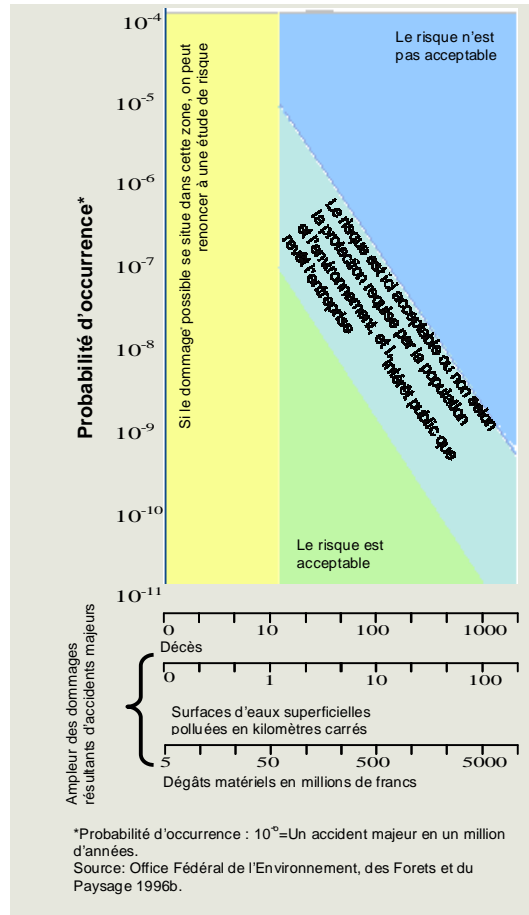


Fig. I.13 — Diagramme Probabilité-Ampleur utilisé par l'OFEFP.

Cette grille comporte quatre niveaux d'acceptabilité du risque :

- § zone en jaune : si les dommages possibles se situent dans cette zone, on peut renoncer à une étude de risque ;
- § zone en vert : risque acceptable ;
- § zone en bleu clair : risque acceptable selon la protection requise par la population, l'environnement, et l'intérêt public que revêt l'entreprise ;
- § zone en bleu foncé : risque inacceptable.

I.5.4 Synthèse de l'analyse des matrices de criticité examinées

Les tableaux I.7, I.8 et I.9 présentent les résultats de l'analyse des échelles correspondant aux grilles de criticité étudiées [MER 04].

	<u>Total - FINA -ELF</u>	<u>SHELL</u>	<u>AVENTIS</u>	<u>RHODIA</u>	<u>HSE</u>	<u>OFEFP</u>
CRITERES <u>Nature de l'échelle agrégée</u>	Qualitative	Qualitative	Qualitative	Qualitative	Qualitative	Quantitative
<u>Nombre d'échelons</u>	6(de 0 à 5)	6(de 0 à 5)	5(de 1 à 5)	4(L, M, H, C)	4 (rejet négl., faible, moyen, fort)	Nb. Morts, Km ² , millions de francs
<u>Type de conséquences</u>	Personnes	Personnes Matériel Environnement Réputation	Santé, Personnes Environnement Image	Humaine, Environnementale	Cons. estimées à partir du rejet (t NH ₃)	Personnes Environnement (eau) Matériel
<u>Conséquences agrégées ou distinguées</u>	-	Distinguées	Distinguées	Distinguées	-	Distinguées
<u>Logique d'agrégation des Cons.</u>	-	Non agrégée Par acteur	Max.	Max.	-	Max.
<u>Niveau d'analyse</u>	Installation (scénario)	Installation (scénario)	Installation (scénario)	Installation (scénario)	Installation (scénario)	Installation (scénario)
<u>Nature de l'information étudiée</u>	Qualitative	Qualitative et Quantitative	Qualitative	Qualitative et Quantitative	Qualitative	Quantitative

Tab. I.7 — Synthèse de l'analyse de l'échelle de gravité.

	<u>Total - FINA -ELF</u>	<u>SHELL</u>	<u>AVENTIS</u>	<u>RHODIA</u>	<u>HSE</u>	<u>OFEFP</u>
CRITERES <u>Désignation</u>	Probabilité	Probabilité	Probabilité	Probabilité	Probabilité	Probabilité d'occurrence
<u>Approche d'évaluation - probabilité</u>	Expertise (multi - paramétrique)	Historique (fréquence)	Fréquence	Fréquence	Fréquence annuelle	Probabilité (accidents majeurs /n années)
<u>Lieu de référence d'occurrence - événement</u>	Equipement	Industrie Compagnie Site	Atelier	Appareil	Installation	Site
<u>Nombre d'échelons</u>	5(de 1 à 5)	5(de A à E)	Qualitatif 4 (de 1 à 4), Quantitatif (par an) 3 seuils : 10 ⁻¹ , 10 ⁻³ , 10 ⁻⁵	Qualitatif : 4 (de 4 à 1), Quantitatif : (par an) 3 seuils : 10 ⁻¹ , 10 ⁻³ , 10 ⁻⁵	5	Echelle continue de 10 ⁻¹¹ à 10 ⁻⁴ avec un pas de 10
<u>Nature de l'échelle</u>	Qualitative	Qualitative	Quantitative et qualitative	Quantitative et qualitative	2 possibilités : 1. Quantitative 2. Qualitative	Quantitative
<u>Logique d'évaluation</u>	Directe (12 paramètres)	Directe (critères ?)	Directe (par rapport au nombre de causes)	Directe (critères ?+ prise en compte des barrières de sécurité)	Directe (étude statistique ?)	Directe (étude statistique)

Tab. I.8 — Synthèse de l'analyse de l'échelle de fréquence.

	<u>Total - FINA -ELF</u>	<u>SHELL</u>	<u>AVENTIS</u>	<u>RHODIA</u>	<u>HSE</u>	<u>OFEFP</u>
<u>Signification de la case</u>	Scénario très peu probable, etc. dont les conséquences sont de nature x à tel niveau (unité, entreprise)	Événement qui s'est ou se produira...et dont les conséquences sont...	Scénario qui peut arriver x fois par an et dont la gravité est sur les personnes, l'environnement et l'image	Scénario qui peut arriver x fois par an et dont les conséquences sur les personnes et l'environnement peuvent aller du léger au catastrophique	Scénario dont l'occurrence est possible (probable, etc.)dans la vie de l'installation et dont les conséquences dépendent du niveau de rejet (t NH ₃)	Accident dont la probabilité d'occurrence est de 10 ⁿ et dont l'ampleur des conséquences attendues est de x morts, y millions de francs et z km ²
<u>Niveau du risque</u>	–	–	–	–	8 niveaux de risque	Pas de niveaux de risque
<u>Évaluation attribuée à la case (G, F)</u>	30 cases (de 1 à 55)	Pas d'évaluation (couleur)	13 valeurs (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 20)	3 valeurs (de 1 à 3)	Note (entre 2 et 9)	Pas d'évaluation (couleur)
<u>Règle de d'agrégation</u>	Non explicitée (non nécessaire)	Non explicitée	Règle de multiplication $R = F \times G$	Non explicitée	Addition (G+F)	Non explicitée
<u>Règle de passage du risque acceptable au non-acceptable</u>	Selon les trois niveaux de risque (vert, orange, rouge)	Dépend de 3 niveaux de risque : rouge, jaune et bleu	Dépend du niveau de risque : Vert : acceptable Jaune : améliorabile Rouge : indésirable	1 : indésirable 2 : améliorabile 3 : acceptable	Explicitées : scénarios dont la note est ≥ 3 sont traités de la même manière	4 situations (voir grille)
<u>Mesures suite à l'estimation du niveau de risque</u>	Non explicitées	Pour chaque niveau de risque : bleu : amélioration continue, jaune : réduction continue, rouge : intolérable	Tester la 'solidité' des barrières et les améliorer Définir des plans d'action Améliorer le management des risques	Non explicitées	Traitement des scénarios dont la case est grise	Mise en place des mesures de sécurité par les autorités compétentes dans le cas où le risque n'est pas acceptable

CRITERES

Tab. I.9 — Synthèse de l'analyse de l'échelle des niveaux de criticité.

L'analyse des grilles de criticité montre une grande diversité de pratique. Ceci s'est traduit par l'absence d'échelles ou de métriques communes :

- § A l'exception de quelques grilles, les critères restent tout de même très qualitatifs et peuvent induire à des différences notables d'appréciation.
- § On constate que le sens des termes employés pour définir chaque classe varie sensiblement d'une grille à l'autre.

j Conclusion quant à l'échelle de gravité

On a pu constater que :

- § Les conséquences les plus souvent prises en compte sont celles sur : les personnes, les biens, le matériel, l'environnement, et la réputation de l'entreprise.
- § Les échelles de gravité répertoriées présentent, quand elles sont de nature qualitative, un nombre d'échelons s'étalant entre 3 et 6.
- § Aucune précision n'est donnée sur la manière de déterminer un niveau qualitatif. Autrement dit, il n'existe pas de critères affichés d'évaluation de la gravité selon les différents aspects. A titre d'exemple : le niveau de gravité / environnement = Effet important (2) est très subjectif. Il manque ainsi des critères plus explicites pour déterminer les niveaux de gravité.
- § La présence de deux pratiques : des échelles où les conséquences sont distinguées (non agrégées) et des échelles de gravité où les conséquences sont agrégées. Notons que s'il n'y a qu'une conséquence prise en compte dans le cadre de cette échelle de gravité, l'agrégation n'a pas lieu d'être (voir tableau I.7).

j Conclusion quant à l'échelle de fréquence

On a pu constater :

- § L'utilisation de méthodes différentes d'estimation de la probabilité : fréquence d'occurrence, possibilité, etc.
- § L'utilisation de référentiels événementiels, temporels, décisionnels et spatiaux, différents.
- § Que la probabilité est souvent estimée de manière relative et non absolue.
- § Que les échelles de probabilité d'occurrence examinées présentent, quand elles sont de nature qualitative ou semi-quantitative, un nombre d'échelon s'étalant entre 3 et 6. Notons que l'une des seules échelles purement quantitatives est celle de la grille de criticité OFEFP. Ceci s'explique par l'effort important entrepris pour disposer d'un maximum de données quantifiables.

j Conclusion quant à l'échelle des niveaux de criticité et d'acceptabilité

Le niveau de criticité (de risque) est le résultat d'agrégation des deux dimensions gravité, et probabilité d'occurrence. On constate que :

- § Le niveau de risque peut prendre des significations différentes d'une grille à l'autre selon la méthode ou l'approche utilisée pour déterminer l'une des deux dimensions gravité et probabilité. Ainsi, un niveau de criticité obtenu avec une grille « A » et un autre obtenu avec une grille « B » n'ont pas forcément la même signification et les mêmes implications en terme de mesures.
- § Les classes de cotation choisies peuvent sensiblement varier entre les organismes.

I.6 CONCLUSION

Dans le présent chapitre, nous avons présenté le cadre général de notre travail, à savoir, l'évaluation des risques. Nous avons d'abord repris les notions-clés telles que le danger, le risque, la sécurité et l'accident et nous avons introduit la notion d'acceptabilité des risques.

Ensuite nous avons présenté les différentes approches d'évaluation de la criticité et d'acceptabilité. Nous nous sommes concentrés principalement sur la matrice de criticité et d'acceptabilité laquelle s'intègre dans le cadre des méthodes qualitatives et semi-quantitatives.

ANALYSE DE LA CRITICITÉ DANS UN ENVIRONNEMENT INCERTAIN

II.1 INTRODUCTION

La matrice de criticité constitue un outil standard qui permet la combinaison des conséquences d'un événement avec leurs fréquences dans le processus d'analyse de la criticité des risques. Cependant, les connaissances dont nous disposons concernant la probabilité d'occurrence des événements et la gravité de leurs conséquences, sont généralement imparfaites.

La validité des résultats de l'évaluation dépend de la prise en compte totale ou partielle de l'imperfection des connaissances utilisées. Cela exige des méthodes qui permettent la modélisation et la manipulation de ces imperfections. À cet égard, plusieurs théories de représentation des connaissances imparfaites ont été développées : la théorie des probabilités, la théorie des ensembles flous, la théorie des possibilités et la théorie de l'évidence.

Nous nous sommes fixé comme objectif dans le cadre du présent chapitre, de montrer l'intérêt de la théorie des ensembles flous dans l'évaluation de la criticité des risques en présence d'informations incertaines.

II.2 REPRÉSENTATION DES CONNAISSANCES IMPARFAITES

II.2.1 Formes d'imperfection des connaissances

Les connaissances dont nous disposons sur un système quelconque, pris au sens d'un ensemble d'éléments en relation les uns avec les autres et interférant avec leur environnement, sont en général imparfaites [BOU 95].

Dans la littérature, nous distinguons principalement deux sortes d'imperfection de connaissances [DUB 94] : *l'incertitude* et *l'imprécision*. Les connaissances sont incertaines quand nous avons un doute sur leur validité. Si nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement, elles sont alors imprécises. Bouchon-Meunier [BOU 95] considère que l'imperfection dans les connaissances peut être divisée en trois formes principales :

- § Les incertitudes qui représentent un doute sur la validité d'une connaissance ;
- § Les imprécisions qui correspondent à une difficulté dans l'énoncé ou dans l'obtention de la connaissance. Ces imprécisions sont aussi appelées « incertitudes du type épistémique »;
- § Les incomplétudes qui sont des absences totales ou partielles de connaissances sur certaines caractéristiques du système.

En anglais, nous employons souvent le terme "Uncertainty" pour désigner les connaissances imparfaites en général, alors que le terme "Imprecision" utilisé pour désigner les connaissances imprécises est rarement cité. Ces deux formes d'imperfection sont souvent intimement mêlées, mais n'ont cependant pas présenté la même importance dans les préoccupations scientifiques.

II.2.2 Esquisse des théories de représentation des connaissances imparfaites

En ce qui concerne l'incertain, il a d'abord été abordé par la notion de probabilité dès le XVII^{me} siècle par Pascal et Fermat [KOL 60]. La théorie des probabilités fournit une structure mathématique pour l'étude des phénomènes qui présentent des incertitudes aléatoires. Le problème de l'imprécision a été traité par le calcul d'erreurs, restreint aux imprécisions de caractère numérique. En 1965, Lotfi Zadeh [ZAD 65], professeur à l'université de Berkley en Californie, a introduit la notion de sous-ensemble flou (en anglais "Fuzzy set") dans une généralisation de la théorie classique des ensembles. Il a ensuite introduit, à partir de 1978 [ZAD 78], la théorie des possibilités qui a été développée par Dubois et Prade [DUB 88]; elle permet de traiter les incertitudes sur les connaissances. L'association de la théorie des possibilités à la théorie des ensembles flous permet le traitement des connaissances à la fois imprécises et incertaines. La théorie des fonctions de croyances permet aussi de traiter ces deux types d'imperfections [DEM 67], elle est basée sur la modélisation et la quantification de la crédibilité attribuée à des faits. Elle définit le degré avec lequel un événement est crédible ou plausible.

La théorie des probabilités qu'a bénéficié de quatre siècles de travaux et reposant donc sur des fondements mathématiques et une expérience solides, constitue le plus ancien formalisme permettant de traiter les incertitudes dans les connaissances imparfaites. C'est 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 [BAU 05].

Nous allons introduire dans ce qui suit, la notion des ensembles flous qui permet de traiter, de façon souple, l'aspect imprécis et vague des connaissances imparfaites.

II.3 THÉORIE DES ENSEMBLES FLOUS

Dans cette section, nous présentons succinctement les concepts fondamentaux de la logique floue qui sont en relation avec les travaux du présent mémoire. Pour plus de détails, on pourra consulter, avec profit, entre autres, les références [BOU 95], [DUB 80], [KAU 77], [ZAD 65], [ZAD 75], [ZAD 78] et [ZAD 92].

II.3.1 Notion d'ensemble flou

Le concept d'ensemble flou [ZAD 65] a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre (de la classe blanche à la classe noir, par exemple) et permettre l'appartenance partielle à chacune d'elles (avec un fort degré à la classe blanche et un faible degré à la classe noir dans le cas du gris clair, par exemple). La définition de l'ensemble flou répond au besoin de représenter des connaissances imprécises telles que celles exprimées en langage naturel (i.e., linguistique) par un voyageur (ex., le trajet est long, le train est rapide, ...). Le caractère graduel des ensembles flous est basé sur l'idée que, plus en se rapproche de la caractérisation typique d'une classe, plus l'appartenance à cette classe est forte (ex., 20 ans caractérise bien la jeunesse, 60 ans ne caractérise plus cette classe d'âge).

Le concept d'ensemble flou permet de traiter :

- des classes aux limites mal définies (catégories d'appréciation perçue par un observateur) ;
- des classes intermédiaires entre le tout et le rien (ex., "presque certain") ;
- le passage progressif d'une classe à une autre (ex., du "petit" au "grand", du "faible" au "fort") ;
- des valeurs approximatives (ex., "autour de 13 de moyenne", "environ 5m de distance").

i Définition

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

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \tag{II.1}$$

i Exemple

Soit à apprécier le confort lié à la conduite d'une voiture qui circule sur une autoroute. Ce confort est vu sous l'angle de la vitesse variant entre 30 et 130 km/h. En termes de la théorie des ensembles flous, la caractérisation « conduite confortable » peut être décrite par un ensemble flou défini sur un univers de vitesses. À ces dernières seront affectés des scores selon la compatibilité avec cette caractérisation. Supposons qu'un conducteur cote la conduite confortable (CC) comme suit :

Vitesse (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Degré de confort	0	0.2	0.4	0.5	0.8	1	0.9	0.4	0.3	0.2	0

Ces résultats montrent que les vitesses faibles (≤ 60 km/h) et les vitesses élevées (≥ 80 km/h) sont désagréables et confèrent une conduite inconfortable ; la conduite 80 km/h correspond à une conduite hautement confortable. Les valeurs des différents degrés de confort sont en fait les valeurs de la fonction d'appartenance $\mu_{cc}(v)$ de l'ensemble flou CC (Fig. II.1).

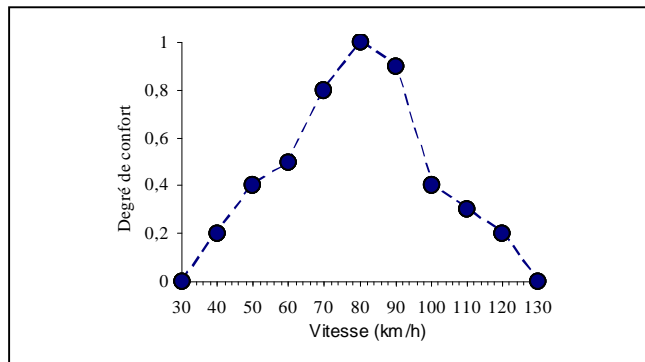


Fig. II.1 — L'ensemble flou « conduite confortable ».

II.3.2 Propriétés d'un ensemble flou

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

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

$$supp(A) = \{x \in U / f_A(x) \neq 0\}. \quad (II.2)$$

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

$$h(A) = \sup_{x \in X} f_A(x). \quad (II.3)$$

§ Ensemble flou *normalisé* : l'ensemble flou A de U est dit normalisé si sa hauteur $h(A)$ est égale à 1.

§ *Noyau* d'un ensemble flou : le noyau de l'ensemble flou normalisé A , noté $noy(A)$, est l'ensemble des éléments de U pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1.

$$noy(A) = \{x \in U / f_A(x) = 1\}. \quad (II.4)$$

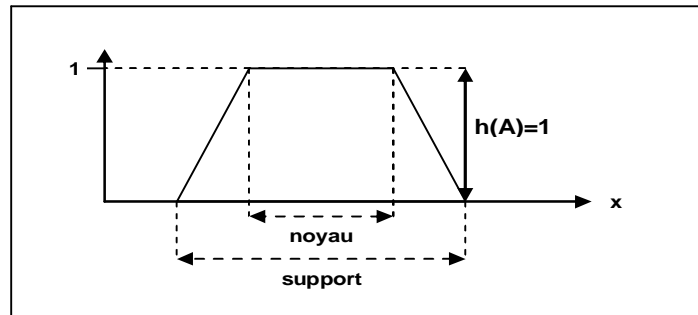


Fig. II.2 — Support, Hauteur et Noyau d'un ensemble flou.

II.3.3 Fonctions d'appartenance

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

- La fonction d'appartenance Triangulaire (générale et symétrique) ;
- La fonction d'appartenance Singleton (gauche et droite) ;
- La fonction d'appartenance Gamma (générale et linéaire) ;
- La fonction d'appartenance Trapézoïdale (gauche et droite) ;
- La fonction d'appartenance Gaussienne (gauche et droite ou pseudo exponentielle).

Les fonctions d'appartenance les plus répandues sont illustrées par la figure II.3.

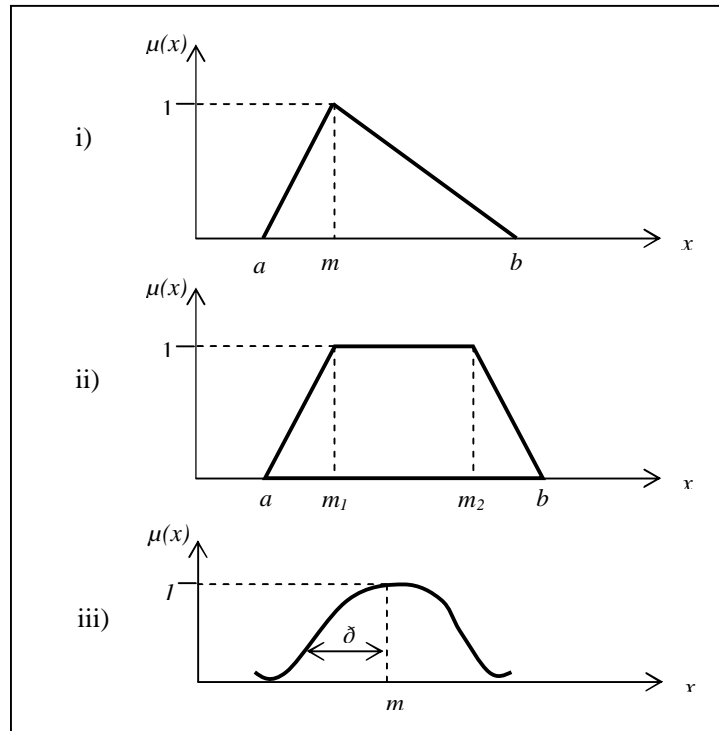


Fig. II.3 — Présentation de quelques fonctions d'appartenance :

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

§ La fonction d'appartenance Triangulaire de la figure (II.3.i) est exprimée comme suit:

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \frac{(x-a)}{(m-a)}; a \leq x \leq m, \\ &= 1; x = m, \\ &= \frac{b-x}{b-m}; m < x \leq b. \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

§ La fonction d'appartenance Trapézoïdale de la figure (II.3.ii) est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned} \mu(x) &= \frac{(x-a)}{(m_1-a)}; a \leq x < m_1, \\ &= 1; m_1 \leq x \leq m_2, \\ &= \frac{b-x}{b-m_2}; m_2 < x \leq b. \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

§ La fonction d'appartenance Gaussienne de la figure (II.3.iii) est exprimée comme suit :

$$\mu(x) = \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2s^2}\right\} \quad (\text{II.7})$$

II.3.4 Opérations sur les ensembles flous

La théorie des ensembles flous propose plusieurs opérateurs ensemblistes. Les principaux opérateurs et relations flous sont présentés ci-dessous [ZAD 65].

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

$$\forall x \in U \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (\text{II.8})$$

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

$$\forall x \in U \quad \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\text{II.9})$$

iii. Complémentation : On dit que A et B sont complémentaires, et on note $A = \bar{B}$ ou $\bar{A} = B$, si et seulement si :

$$\forall x \in U \quad \mu_B(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II.10})$$

iv. Intersection : On définit l'intersection de A et B , et on note $A \cap B$, par le plus grand ensemble flou de contenu à la fois dans A et B , c'est-à-dire :

$$\forall x \in U \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.11})$$

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

$$\forall x \in U \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.12})$$

Toutes ces opérations sont des extensions des opérations ensemblistes usuelles avec lesquelles elles coïncident si les ensembles considérés sont des ensembles usuels. Les extensions de ces opérations aux ensembles flous ne sont pas uniques [KAU 77].

La figure II.4 illustre les opérations d'intersection, de réunion et de complémentation.

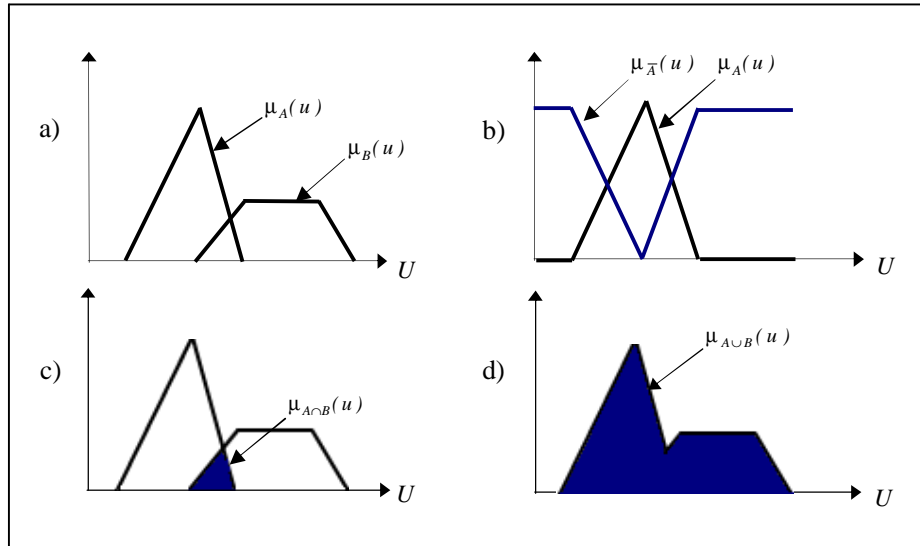


Fig. II.4 — Illustration de quelques opérations sur les ensembles flous:

- a) Ensembles flous A et B
- b) \bar{A}
- c) $A \cap B$
- d) $A \cup B$.

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

a) Commutativité :

$$\begin{aligned} A \text{ I } B &= B \text{ I } A \\ A \text{ U } B &= B \text{ U } A \end{aligned} \quad (\text{II.13})$$

b) Associativité :

$$\begin{aligned} A \text{ I } (B \text{ I } C) &= (A \text{ I } B) \text{ I } C \\ A \text{ U } (B \text{ U } C) &= (A \text{ U } B) \text{ U } C \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

c) Distributivité :

$$\begin{aligned} A \text{ I } (B \text{ U } C) &= (A \text{ I } B) \text{ U } (A \text{ I } C) \\ A \text{ U } (B \text{ I } C) &= (A \text{ U } B) \text{ I } (A \text{ U } C) \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

d) Involution :

$$\overline{\overline{A}} = A \quad (\text{II.16})$$

e) Lois de De Morgan :

$$\begin{aligned} \overline{A \text{ I } B} &= \overline{A} \text{ U } \overline{B} \\ \overline{A \text{ U } B} &= \overline{A} \text{ I } \overline{B} \end{aligned} \quad (\text{II.17})$$

Le tiers-exclu n'étant pas vérifié par les ensembles flous (Fig. II.5) :

$$\begin{aligned} A \text{ I } \overline{A} &\neq f \\ A \text{ U } \overline{A} &\neq 1_U \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

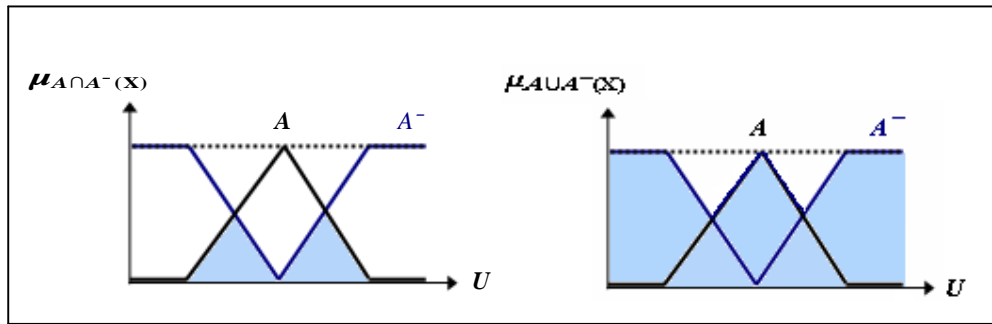


Fig. II.5 — Illustration de la propriété du tiers-exclu:

II.3.5 Notion de variable linguistique

Le concept de variable linguistique [ZAD 75] est utilisé dans la caractérisation des phénomènes qui sont si complexes ou si mal définis qu'ils ne peuvent pas être décrits par des termes quantitatifs conventionnels. Ainsi, les valeurs de la variable linguistique sont des termes linguistiques du langage naturel, lesquelles sont modélisées par des ensembles flous.

Plus spécifiquement, ces derniers représentent des restrictions sur les valeurs de la variable linguistique et peuvent être vus comme résumant les différentes catégories d'éléments d'un univers de discours (i.e., l'ensemble référentiel). D'une manière générale, une variable linguistique est caractérisée par un 5-uplet $(L, T(L), Gr, Mr)$ où :

- L est le nom de la variable linguistique ;
- $T(L)$ est l'ensemble des termes, i.e., les noms des variables linguistiques de L , dont chacune d'elles représente un ensemble flou défini sur un univers U ;
- Gr est une règle syntaxique, généralement de la forme d'une grammaire, utilisée pour générer les noms des valeurs de L ;
- Mr est une règle sémantique qui associe à chaque nom un sens $Mr(X)$ qui est un ensemble flou de U .

Exemple

Reprenons l'exemple de la sous-section II.3.1 et supposons que le « confort » est une variable linguistique L . Il en ressort que :

- l'ensemble des termes est $T(L) = \{\text{inconfortable}_-, \text{confortable}, \text{inconfortable}_+\}$. Chacun des qualificatifs représente une valeur linguistique de L décrite par un ensemble flou dans un référentiel de vitesses $U = [30, 130]$ (km/h) ;
- la règle sémantique Mr associe la valeur « inconfortable » aux vitesses inférieures à 60 km/h et supérieures à 100 km/h et la valeur « confortable » aux vitesses comprises entre 70 et 90 km/h, selon des ensembles flous trapézoïdaux (un choix issu d'une expertise). La représentation de la variable « confort » est visualisée sur la figure suivante :

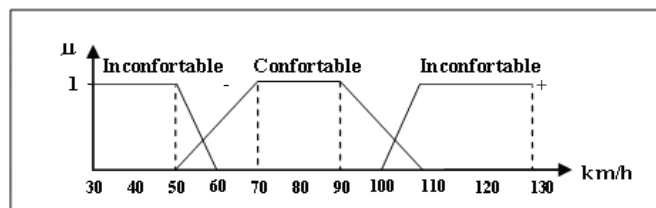


Fig. II.6 — Représentation de la variable linguistique « confort ».

II.3.6 Relations floues

Parmi les concepts flous les plus importants du point de vue application, les relations binaires floues qui généralisent la notion de relation classiquement définie sur les ensembles. Elles mettent en évidence des liaisons imprécises ou graduelles entre les éléments d'un même ensemble [ZAD 75].

i Définition

Soit $U \times V$ le produit cartésien de deux référentiels U et V . On appelle relation binaire floue entre U et V , un ensemble flou R de $U \times V$, de fonction d'appartenance $\mu_R(x,y)$ prenant ces valeurs dans l'intervalle $[0,1]$.

Si U et V sont finis, $\mu_R(x, y)$ peut être représentée par une matrice floue ou par son graphe associé. Si $U = V$, R est une relation floue définie entre les éléments d'un même référentiel.

i Exemple

Soit $U = \{1, 2, 3\}$ un ensemble. On définit la relation "approximativement égal" par :

$$1/(1,1) + 1/(2,2) + 1/(3,3) + 0.8/(1,2) + 0.8/(2,3) + 0.8/(2,1) + 0.8/(3,2) + 0.3/(1,3) + 0.3/(3,1)$$

La fonction d'appartenance μ_R de cette relation est définie par:

$$\begin{aligned} \mu_R(x, y) &= 1 && \text{si } x=y \\ \mu_R(x, y) &= 0.8 && \text{si } |x-y| = 1 \\ \mu_R(x, y) &= 0.3 && \text{si } |x-y| = 2 \end{aligned}$$

Cette relation peut être représentée sous forme matricielle :

	U	1	2	3
U	$\mu_{R(x,y)}$	1	0.8	0.3
1		1	0.8	0.3
2		0.8	1	0.8
3		0.3	0.8	1

II.3.7 Implication floue

Une expression conditionnelle du type « Si X est A Alors Y est B », où A et B sont des ensembles flous sur les univers U et respectivement V , est une relation floue R sur le produit cartésien $U \times V$ qui est appelée « Règle floue ». X et Y étant les variables linguistiques décrites respectivement par A et B , et R est caractérisée par une fonction d'appartenance $\mu_R(x, y)$.

Une règle floue est basée sur la notion d'implication floue. Ainsi, la règle « Si X est A Alors Y est B » peut s'écrire comme « (x, y) est $A \rightarrow B$ », où $A \rightarrow B$ est une implication floue se caractérisant par la valeur de vérité $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$, qui n'est que $\mu_R(x, y)$, soit :

$$\mu_R(x, y) = \mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \Phi(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Où Φ est un opérateur d'implication floue spécifique. Il existe de nombreux opérateurs en logique floue. L'opérateur de Mamdani [Mam 75] est le plus utilisé dans les applications pratiques et est exprimé par une conjonction qu'est le minimum, soit :

$$\Phi(m_A(x), m_B(y)) = \min(m_A(x), m_B(y)) \quad (\text{II.19})$$

II.3.8 Modus Ponens Généralisé (MPG)

Le but du raisonnement approximatif est de construire un processus déductif ayant pour objectif la détermination de conclusions précises ou imprécises à partir de faits imprécis et d'un ensemble de règles floues. Un tel processus est très adéquat pour la description qualitative du comportement des systèmes.

Un cas particulier de ce raisonnement est le MPG dont le mécanisme d'inférence est :

$$\begin{array}{c} \text{Si } X \text{ est } A \text{ alors } Y \text{ est } B \\ \\ X \text{ est } A' \\ \hline Y \text{ est } B' \end{array}$$

Les valeurs de Y sur V sont données par la projection de $R = A' \cap (A \rightarrow B)$ sur V , soit, en passant aux fonctions d'appartenance :

$$\forall y \in V, m_{B'}(y) = \sup_{x \in U} \min(m_{A'}(x), m_{A \rightarrow B}(x, y)) \quad (\text{II.20})$$

Si A' est un singleton flou, i.e., $A' = \{x_0\}$ avec $\mu_{A'}(x) = 1$ pour $x = x_0$ et 0 ailleurs, alors B' est donné par l'expression réduite :

$$m_{B'}(y) = m_{A \rightarrow B}(x_0, y)$$

D'où, avec l'opérateur de Mamdani :

$$m_{B'}(y) = m_{A \rightarrow B}(x_0, y) \quad (\text{II.21})$$

II.3.9 Système d'inférence de Mamdani

II.3.9.1 A propos des systèmes d'inférence

A l'opposé des méthodes quantitatives qui requièrent des équations pour modéliser les comportements des systèmes réels, la logique floue, elle, peut caractériser ces comportements moyennant le concept de variable linguistique et les règles floues grâce au concept d'ensemble flou et aux techniques d'inférence floue.

Les systèmes d'inférence floue ont fait preuve de nombreuses applications et dans plusieurs domaines tels que le contrôle automatique, le traitement de données, l'analyse de décision, les systèmes experts, et les études de sécurité [NAI 09].

Parmi ces systèmes d'inférence, celui proposé par Mamdani et Assilian [MAM 75] est le plus rencontré dans la résolution des problèmes à base de règles floues. Basée sur une technique simple utilisant l'inférence max-min, la méthode de Mamdani a été introduite avec succès dans plusieurs champs d'application allant des processus de contrôle jusqu'au diagnostic médical.

La méthodologie générale des Systèmes d'Inférence Floue (SIF) est donnée par la figure II.7.

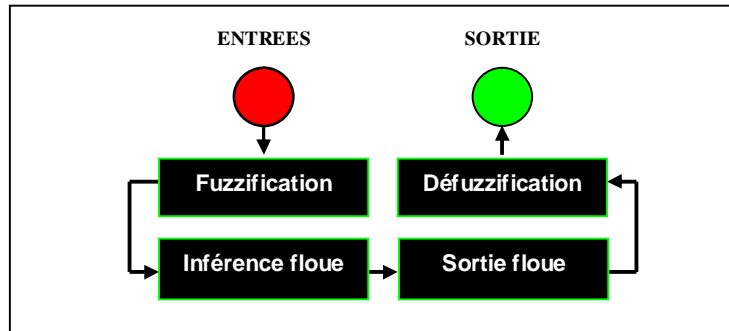


Fig. II.7 — Organigramme du SIF.

II.3.9.2 Méthodologie du système d'inférence de Mamdani

Le système d'inférence de Mamdani peut être décrit comme suit [MAM 75]:

Supposons une base de règles constituée de n Si/Alors règles floues avec des entrées multiples et une sortie unique (Multiple Inputs and Single Output : MISO). Chaque règle R_i ($i = 1, \dots, n$) est donc de la forme :

$$R_i: \text{si } X_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et } \dots \text{ et } X_m \text{ est } A_{im} \text{ alors } Y \text{ est } B_i; \quad (\text{II.22})$$

Où les X_j , ($j=1, \dots, m$) et Y sont des variables linguistiques définies respectivement sur les univers $U = U_1 \times \dots \times U_m$ et V . Les ensembles flous A_{ij} sont des éléments de la partition linguistique T_j de U_j (univers de la variable X_j).

Pour un vecteur ordinaire d'entrée $u^0 = (u_1^0, \dots, u_m^0)$, la valeur de la sortie est déterminée suivant les trois étapes suivantes :

1 Fuzzification

La fuzzification est l'opération qui consiste à convertir une donnée d'entrée ordinaire u_j^0 en sa représentation symbolique, c'est-à-dire l'ensemble flou A_{ij}^* utilisant la partition floue T_j de U_j , par calcul du degré d'appartenance $\mu_{A_{ij}}(u_j^0)$ de u_j^0 pour chaque A_{ij} . Ensuite le degré $\alpha_i = \min \mu_{A_{ij}}(u_j^0)$ est calculé pour chaque règle R_i .

1 Inférence floue

Le moteur d'inférence transforme les ensembles flous d'entrée (issus de l'opération de fuzzification) en des ensembles flous de sortie en utilisant la base de règles linguistiques et les opérations d'implication floue.

La sortie floue est obtenue par la méthode d'inférence max-min selon les sous-étapes suivantes :

(i) Repérage du niveau d'activation de chaque règle : La valeur de vérité attribuée à l'"antécédent" (prémisse) de chaque règle R_i est calculée puis appliquée à la partie "conclusion" de cette règle. Le calcul se fait comme suit :

$$a_i = \min_j \mu_{A_j}(u_j^0) \quad (\text{II.23})$$

(ii) Inférencement : Dans l'étape d'inférence, la sortie B_i de chaque règle R_i est calculée à l'aide de l'opérateur de conjonction (min) (voir équation II.24), d'où $B_i' = a_i \wedge B_i$ est donné par :

$$u_{B_i'}(v) = \min(a_i, \mu_{B_i}(v)) \quad (\text{II.24})$$

(iii) Agrégation : Pour obtenir la sortie globale du système, les sorties propres à chaque règle sont combinées à l'aide de l'opérateur union. Ainsi, $B' = \bigcup_i B_i' = \bigcup a_i \wedge B_i$, avec la fonction d'appartenance :

$$u_{B'}(v) = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{B_i'}(v) \quad (\text{II.25})$$

i Défuzzification

L'étape de défuzzification permet de transformer la sortie floue en une valeur numérique v^0 représentative de Y dans B' . Différents algorithmes de défuzzification ont été développés et il n'y a pas un algorithme meilleur pour toutes les applications, cependant, la méthode de « la moyenne des maximums » et la méthode du « centre de gravité » sont le plus fréquemment utilisées. Selon cette dernière, la valeur représentative est donnée par :

$$v^0 = \frac{\int_{v \in V} \mu_{B'}(v) \cdot v \cdot dv}{\int_{v \in V} \mu_{B'}(v) \cdot dv} \quad (\text{II.26})$$

II.4 APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE DANS L'ANALYSE DE CRITICITÉ DES RISQUES

Dans Cette section, nous présentons quelques travaux ayant eu pour objectif de mettre en évidence l'intérêt du recours à la logique floue pour résoudre les problèmes liés à l'analyse de la criticité du risque en présence de connaissances imparfaites.

II.4.1 Application de la logique floue dans l'AMDEC

Les premiers travaux sur l'évaluation floue de la criticité des risques sont dus à E. Peláez et J. B. Bowles, [PEL 94] et [BOW 95]. Dans ces travaux, une nouvelle technique d'analyse basée sur la logique floue, a été proposée.

Rappelons que l'analyse de Criticité qui est le processus complémentaire de l'AMDE, permet de soumettre les modes de défaillance d'un composant aux actions correctives selon un ordre de priorité, i.e., niveau de criticité.

Traditionnellement, l'analyse de criticité s'effectue par :

- le développement d'un *RPN*; ou
- le calcul du nombre de criticité.

Selon les auteurs, la méthode *RPN* (voir chapitre I, section I.4) est sujette à un certain nombre d'inconvénients touchant à la fois la méthode de calcul et la manière d'interprétation des résultats. En effet, dans le calcul du *RPN*, un mode de défaillance ayant une gravité très élevée, un faible taux de défaillance et une détectabilité très élevée (soient respectivement de 9, 3 et 2) donne un *RPN* de (54) inférieur à un *RPN* de (120) caractérisant un mode de défaillance avec des paramètres "modérés" (soient respectivement de 4, 5 et 6), alors qu'en réalité, le premier doit avoir un degré de priorité plus élevé quant aux actions correctives !

Un deuxième problème que soulève le travail à propos de la précision de l'approche : il suppose que même si l'évaluation de la criticité se fait quantitativement, le fait qu'elle dépend des jugements qualitatifs, des taux de défaillances prévisibles et d'autres facteurs, rend l'évaluation moins précise qu'elle semble l'être.

Ces travaux ont proposé, pour répondre à ces problèmes, un modèle flou d'analyse de criticité. La procédure proposée est similaire à celle utilisée dans les systèmes experts et les systèmes de contrôle flous [LEE 90] et [PEL 94]. L'analyse utilise les variables linguistiques pour décrire les inputs du système (gravité, fréquence et détectabilité). Ces variables (entrées) sont fuzzifiées à l'aide des fonctions d'appartenance pour déterminer le degré d'appartenance dans chaque classe.

Les entrées floues résultantes sont ensuite évaluées moyennant la base de règles linguistiques adoptée et les opérations de la logique floue pour produire une classification de la criticité du mode de défaillance (après avoir introduit les données de fréquence, de gravité et de détectabilité correspondant au mode de défaillance étudié), et un degré d'appartenance associé dans la classe de risque. Notons qu'une échelle à six niveaux de risque a été choisie pour caractériser la criticité des modes de défaillance.

La sortie floue est ensuite défuzzifiée par la méthode de la moyenne des maximums pour donner le degré de priorité du mode de défaillance considéré.

D'après les auteurs, cette approche présente les avantages suivants :

- Elle permet à l'analyste d'évaluer le risque associé au mode de défaillance de façon "naturelle" c'est-à-dire directement à partir des variables linguistiques habituellement employées dans le processus d'évaluation ;
- Les informations vagues, ambiguës, qualitatives ainsi que les données quantitatives peuvent être utilisées et traitées de manière souple et cohérente.
- Elle donne plus de flexibilité à la méthode de combinaison des variables du *RPN*.

II.4.2 Utilisation du graphe de risque flou pour la détermination du « SIL »

Dans un travail récent, R. Nait-Saïd et al. [NAI 09], ont soulevé les difficultés liées à l'application du graphe de risque conventionnel (voir chapitre I, section I.4) et ont 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 les auteurs, 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 C, F, P et W, 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 terme de probabilités et taux exprimant les paramètres C, F, P, W et le SIL ; le problème de rigidité des intervalles ordinaires utilisés pour la représentation quantitative des paramètres leur est imputable.

Les défauts recensés sont à l'origine des incohérences des résultats et éventuellement du conservatisme, lequel peut se traduire par une sur-estimation du SIL.

Compte tenu des insuffisances constatées sur le graphe de risque conventionnel, on a développé un graphe de risque étalonné plus flexible qui use d'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).

Tout en en se situant par rapport aux techniques existantes, les auteurs ont pu conclure que :

- La technique d'inférence floue appliquée au graphe conventionnel lui confère l'aptitude de traiter les informations imprécises et approximatives ;
- Le graphe flou proposé peut être aisément adapté, avec l'avantage de préserver les quatre paramètres du graphe traditionnel ;
- Le résultat final donné par ce nouveau graphe se prête à être comparable à ceux obtenus par les méthodes semi-quantitatives et quantitatives telles que l'Arbre De Défaillance (ADD), l'analyse des couches de protection (LOPA) et l'Analyse Quantitative du Risque (AQR).

L'analyse de la Criticité comme complément d'une AMDE ou d'une HAZOP (HAZards and OPERability studies) a fait l'objet d'autres travaux tels que ceux de Xu et al. [XU 02], de R. K. Sharma et al. [SHA 05] et de C. Dong [DON 07] avec bien sûr, des objectifs différents et orientations différentes selon la problématique de chaque étude.

D'autres applications de la logique floue dans l'analyse de criticité des risques ont été faites. Citons par exemple, l'étude des couches de protection *Fuzzy LOPA* (Layers Of Protection Analysis) qui a été menée par A. S. Markowski [MAR 07] dans l'objectif d'évaluer des risques encourus par les pipelines.

II.5 CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, on peut conclure que l'analyse rigoureuse de criticité du risque doit prendre en compte les incertitudes et imprécisions entachant les données concernant les paramètres du risque.

Pour ce, la logique floue semble être un outil très adéquat pour la représentation et le traitement de données imparfaites. En effet, les résultats issus des modèles flous développés en matière d'analyse de criticité de risque sont très encourageants.

Le chapitre suivant sera consacré à une approche floue de la grille de criticité développée dans le cadre du présent travail.

APPROCHE FLOUE D'ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES RISQUES

III.1 INTRODUCTION

L'évaluation des risques s'effectue souvent de manière semi-quantitative à partir du niveau de probabilité qu'un dommage survienne et de son niveau de gravité. La criticité résultante est décrite schématiquement soit par la courbe de Farmer soit par la grille de criticité. Ces deux représentations graphiques permettent de mettre en évidence la frontière entre la zone du risque acceptable et celle du risque non acceptable.

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

La logique floue semble offrir un cadre très adéquat pour l'évaluation de la criticité, dans lequel puissent être traitées des imprécisions, des incertitudes, des connaissances quantitatives et des connaissances exprimées symboliquement par des qualifications en langage naturel [BOU 95].

Le présent chapitre s'insère dans ce contexte et a pour objectif de proposer une approche d'évaluation de la criticité du risque basée sur un système d'inférence floue.

III.2 STRUCTURE DE LA MATRICE DE CRITICITÉ FLOUE

L'évaluation floue de la criticité présente l'avantage de permettre la manipulation des mesures sous forme d'ensembles flous, ce qui permet à l'analyste d'utiliser des représentations naturelles et informatives des jugements d'experts [FRE 82]. Sur la base de cette connaissance incertaine et/ou imprécise, on peut entreprendre des actions correctives permettant la maîtrise des risques [MAH 02] et [XU 02]. Dans ce sens, plusieurs études ont développé des modèles flous pour évaluer la criticité des risques (voir chapitre II, section I.4).

Dans notre travail, nous avons tenté d'améliorer les matrices de criticité conventionnelles (MCC) en les décrivant par un système d'inférence flou.

La relation $\text{Risque} = \text{Fréquence} * \text{Gravité}$, où (*) est généralement le produit, est transformée en une règle du type : « Si Fréquence est A et Gravité est B alors Risque est C », où A , B et C sont des descripteurs qualitatifs.

Le modèle flou développé est une matrice de criticité floue (MCF) qui sera exploitée dans le cadre d'une approche d'analyse des risques à base de scénarios (Scenario-based risk analysis approach).

La structure globale du modèle de la MCF proposée est illustrée dans la figure III.1.

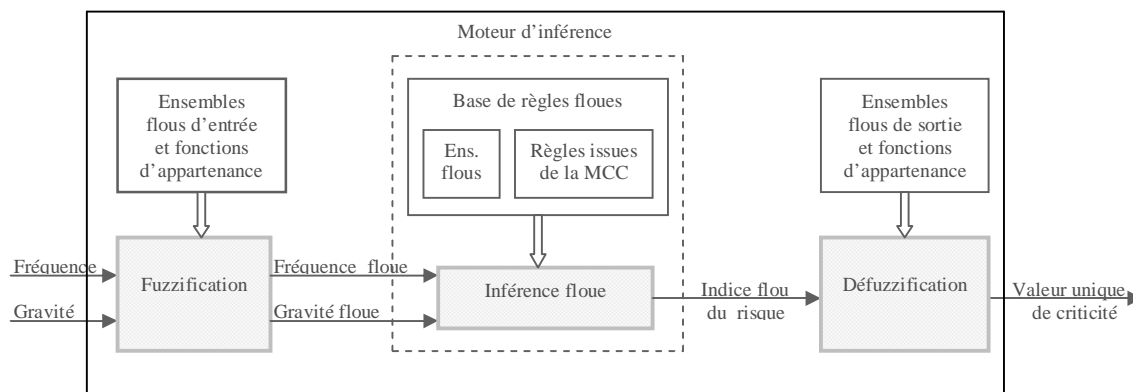


Fig. III.1 — Procédure globale d'évaluation de la criticité à base de règles floues.

La mise en oeuvre de la MCF fait apparaître trois grands modules :

- Le premier module traite les entrées du système (valeurs de F et de G). On définit tout d'abord un univers de discours, un partitionnement de cet univers en classes pour chaque entrée, et des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées. La première étape, appelée fuzzification, consiste à attribuer à la valeur réelle (donnée du scénario) de chaque entrée sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définies, donc à transformer l'entrée réelle en un ensemble flou;
- Le deuxième module est constitué d'une base de règles et d'un moteur d'inférence permettant le calcul; il consiste en l'application de règles;
- Le troisième module décrit l'étape de défuzzification qui permet de passer d'un degré d'appartenance de la criticité du scénario à la détermination de la valeur précise à donner à cette criticité.

III.3 CONCLUSION

En se basant sur le SIF, nous avons proposé une approche floue d'évaluation de la criticité des risques, en l'occurrence, la matrice de criticité floue que nous estimons prometteuse et capable de représenter et traiter, avec souplesse, la connaissance relative à la matrice de criticité conventionnelle.

Afin de tester l'approche proposée, nous consacrerons le prochain chapitre à une étude expérimentale portant sur un procédé industriel pour pouvoir affirmer qu'elle peut constituer une alternative aux pratiques classiques d'évaluation de la criticité des risques industriels.

ÉVALUATION FLOUE DE LA CRITICITÉ DES RISQUES D'UN SYSTÈME OPERATIONNEL

IV.1. INTRODUCTION

L'amélioration continue de la sécurité est une préoccupation majeure pour les entreprises à haut risque. Ainsi, font-ils l'inventaire des risques inhérents à l'activité de l'entreprise et à son environnement, établissent-ils les mécanismes qui peuvent conduire au déclenchement d'accidents et estiment-ils leurs conséquences et la fréquence à laquelle ils sont susceptibles de survenir. Une fois le niveau de risque évalué en utilisant une méthode d'évaluation telle que la grille de criticité, l'entreprise cherchera à le ramener à un seuil acceptable. Les dispositions à mettre en oeuvre pour réduire les risques sont nombreuses et variées et dépendent des résultats de l'évaluation.

La grille de criticité conventionnelle présente des inconvénients concernant la qualité des échelles ainsi qu'un certain nombre de problèmes d'ordre méthodologique. En outre, les données nécessaires à l'évaluation d'un risque en terme de fréquence et de gravité sont entachées d'imprécision et d'incertitude et ne se présentent pas toujours en quantité suffisante, ne se prêtant pas donc à des manipulations quantitatives. Ceci peut affecter la qualité d'évaluation en donnant des résultats erronés sur le niveau de criticité du risque, ce qui peut ramener l'entreprise à décider des mesures correctives non appropriées pour sa gestion.

Afin de démontrer l'intérêt de l'approche proposée dans le chapitre précédent dans la résolution de ces problèmes, nous avons mené une étude de cas sur un système opérationnel au sein de la société SONATRACH.

Après une brève description du système et des scénarios retenus dans l'étude, nous commençons, dans ce chapitre, par présenter la grille de criticité utilisée par l'entreprise en question.

Partant des données de cette grille, nous établirons les échelles floues ainsi que la base de règles floues. Les scénarios identifiés seront évalués moyennant un système d'inférence floue dont la sortie est une valeur de criticité.

IV.2 PRÉSENTATION DU PROCESSUS

L'installation prise en référence pour la présente étude étant un four rebouilleur du module MPP3 (Module Process Plant 3) au sein de la raffinerie d'hydrocarbures SH DP HRM du site industriel Hassi R'Mel situé au sud du pays à 550 km de la capitale.

Dans une unité pétrolière, le rôle du four est d'apporter la chaleur nécessaire au réchauffement des fluides en les portant à des niveaux de température élevés. Le four rebouilleur H-101 est destiné au

réchauffement du condensât ; un mélange d'hydrocarbures liquides contenant des traces de gaz légers (gaz de vente) principalement composés d'éthane et de méthane.

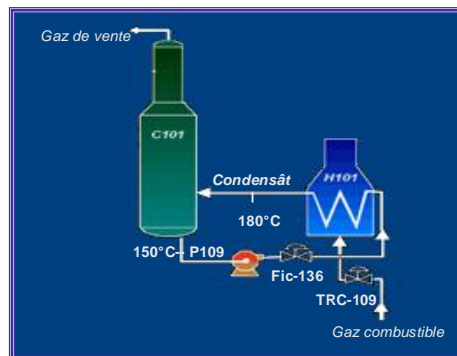


Fig. IV.1 — Schéma du processus d'extraction des gaz légers.

Dans le module MPP3, le condensât du fond de la colonne C-101 passe, à travers les pompes, dans le four à 150°C. Le fluide sortant porté à 180°C est renvoyé à la colonne comme reflux chaud afin d'extraire les gaz de vente (voir figure IV.1).

Le four est composé :

- D'une zone de radiation (chambre de combustion) intérieurement garnie par un matériau réfractaire isolant. Dans cette chambre se trouvent des tubes exposés à la flamme et recevant par rayonnement la chaleur dégagée des produits en combustion ;
- D'une zone de convection (éventuellement garnie) installée à la sortie des fumées de la chambre de combustion et constituée d'un faisceau tubulaire placé perpendiculairement à la direction des fumées ;
- De deux cheminées ;
- D'accessoires : Portes d'accès, portes d'explosion, thermo-couples et diverses connexions nécessaires au fonctionnement du four.

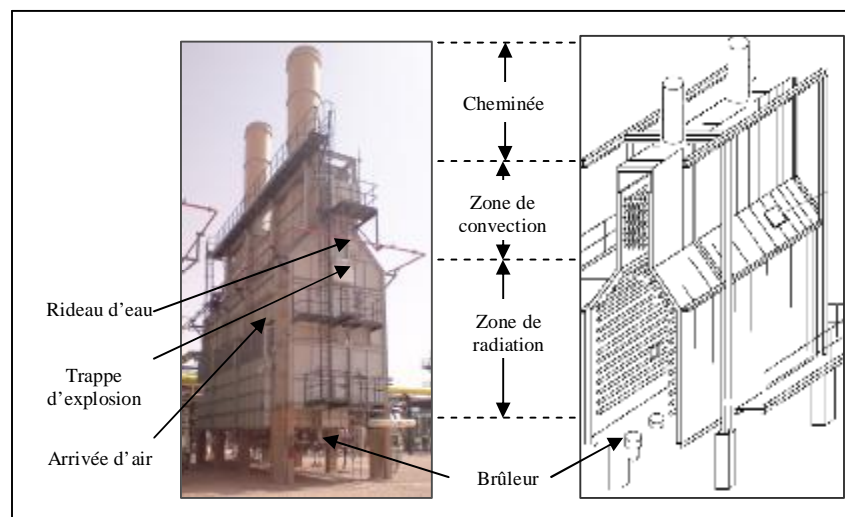


Fig. IV.2 — Architecture du four rebouilleur H-101.

IV.3 SCÉNARIOS RETENUS POUR L'ÉTUDE

Afin de développer les scénarios d'accidents potentiels que peut présenter le four rebouilleur, nous procédons à une analyse inductive par la méthode HAZOP qui utilise les schémas de circulation du fluide pour étudier les causes possibles d'une dérive du procédé et déterminer ses conséquences.

La fréquence des scénarios suscités sera exprimée par une probabilité calculée selon une approche « barrières » en utilisant la méthode Arbre D'Événements (ADE). Cette méthode est basée sur une analyse descendante de la séquence accidentelle (des causes vers les conséquences). Il s'agit à partir des événements initiateurs, d'identifier les combinaisons et enchaînements d'événements pouvant mener à l'accident.

L'ADE permet d'apprécier la probabilité des scénarios accidentels identifiés. Partant de la fréquence d'apparition des événements initiateurs (dérive d'un paramètre, facteur externe ou autres), la méthode prend en compte la probabilité de succès ou d'échec des barrières de sécurité prévues pour limiter les conséquences de ces événements initiateurs. La probabilité de succès ou d'échec dépend du comportement des opérateurs et de la fiabilité des systèmes déduite de l'expérience acquise en exploitation. On calcule alors la probabilité que chaque scénario accidentel conduise aux conséquences redoutées. Notons que les fréquences d'occurrence des différents événements initiateurs et couches de protections sont des valeurs tirées de la littérature [CCP 01], [IEC 03], [ICS 06] et [SON 08].

Examinons la méthode d'évaluation des risques appliquée au niveau de l'entreprise de référence.

IV.4 PRÉSENTATION DE LA GRILLE DE CRITICITÉ

L'entreprise SH DP HRM utilise pour l'évaluation de la criticité et de l'acceptabilité des risques, une approche qualitative utilisant la grille suivante :

		FREQUENCE			
		Improbable (1)	Rare (2)	Occasionnel (3)	Fréquent (4)
CONSEQUENCE	Négligeable (1)	1	2	3	4
	Marginale (2)	2	4	6	8
	Critique (3)	3	6	9	12
	Catastrophique(4)	4	8	12	16

Fig. IV.3 — Matrice de criticité utilisée par l'entreprise SH DP HRM [SON 08].

Les échelles de gravité, de fréquence et de criticité auxquelles nous nous référons dans la suite, se présentent de la manière suivante :

IV.4.1 Échelle de gravité

La gravité est estimée sur la base des conséquences d'un scénario donné à partir d'une échelle ordinale à quatre niveaux (de 1 à 4).

Niv.	Conséquence	Signification
1	Négligeable	Blessures superficielles Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 10%
2	Marginale	Blessures mineures Dégradation de la capacité de l'installation à moins de 50%
3	Critique	Blessures graves Arrêt de l'unité
4	Catastrophique	Mort Arrêt de l'usine

Tab. IV.1 — Échelle de gravité.

Le choix des conséquences à étudier est fonction de la méthodologie d'évaluation des risques adoptée par l'entreprise et des ressources qu'elle doit mettre en place pour affiner l'analyse [CCP 01]. Ainsi, cette échelle de gravité prend en compte les conséquences sur :

- § Les personnes : Blessure, Mort ;
- § La performance (perte de production): Dégradation de la capacité de l'installation, arrêt de l'unité ou l'usine).

IV.4.2 Échelle de fréquence

La probabilité d'occurrence est envisagée à travers quatre niveaux et évaluée sur la base d'une fréquence cotée en 10^{-n} /an.

Niv.	Désignation	Description qualitative
1	Improbable	Improbable de se produire au cours de la vie de l'installation
2	Rare	Peut se produire une fois au cours de la vie de l'installation
3	Occasionnel	Peut se produire plus d'une fois au cours de la vie de l'installation
4	Fréquent	Peut se produire plusieurs fois au cours de la vie de l'installation

Tab. IV.2 — Échelle de fréquence.

Les classes de probabilité d'occurrence figurant sur l'échelle sont définies qualitativement et quantitativement, avec une désignation linguistique pour chaque classe et un classement ordinaire numérique de 1 à 4.

IV.4.3 Échelle de criticité

L'évaluation du risque est effectuée par le produit des niveaux de gravité par ceux de fréquence. Ainsi, à chaque case de la grille correspond un nombre caractérisant la criticité du risque, ce nombre varie entre 1 (risque minimum acceptable) et 16 (risque maximum acceptable).

Niv.	Conséquences	Signification	Score
1	Acceptable	Aucune mesure requise	1, 2, 3
2	Tolérable	Actions basées sur le principe ALARP	3, 4, 6
3	Inacceptable	Réduction immédiate (mesures de prévention et/ou de protection)	8, 9, 12, 16

Tab. IV.3 — Échelle de criticité.

Ce tableau montre que la criticité est cotée sur une échelle ordinale en trois niveaux qualitatifs :

Une zone de risques sérieux des nombres (3, 4 et 6) entre les deux zones extrêmes (zone verte des niveaux faibles et zone rouge des niveaux élevés) est prise en compte par la grille. Ainsi, la règle de passage du risque acceptable au risque non acceptable dépend de trois niveaux (vert, jaune et rouge).

Les critères d'acceptabilité du risque fixés par l'entreprise sont définis en fonction de sa gravité et de sa fréquence sachant que dans ce cas, la première prévaut sur la deuxième. La règle retenue pour la mise en place des dispositions ayant pour but d'éviter les incidents et accidents ou de limiter leurs conséquences est : plus les conséquences d'un accident sont graves, plus sa probabilité doit être rendue faible. Une manière de lire ces critères est la suivante :

- tout scénario dont les conséquences sont catastrophiques doit être improbable ;
- tout scénario dont les conséquences sont critiques doit être rare ;
- tout scénario dont les conséquences sont marginales ne doit pas être fréquent.

IV.5 ÉVALUATION FLOUE DE LA CRITICITÉ DES SCÉNARIOS RETENUS

IV.5.1 Établissement des échelles floues

IV.5.1.1 Échelle de gravité

L'échelle floue de gravité comprend quatre ensembles flous, à savoir, *négligeable*, *marginale*, *critique* et *catastrophique* définis sur un espace de gravité de 1 à 4. La figure (IV.4.a) montre un exemple d'échelle qu'on peut proposer pour la mesure du paramètre gravité.

IV.5.1.2 Échelle de fréquence

Comme le montre la figure (IV.4. b), la fréquence est représentée par quatre ensembles flous : *improbable*, *rare*, *occasionnel* et *fréquent* définis sur un espace de probabilités de valeurs entre 10^{-7} /an et 1/an.

IV.5.1.3 Échelle de criticité

La criticité du risque comme variable unique de sortie est définie sur un univers de discours de valeurs entre 0 et 4. Trois ensembles flous sont compris dans l'échelle : *acceptable*, *tolérable* et *inacceptable* (figure (IV.4. c)).

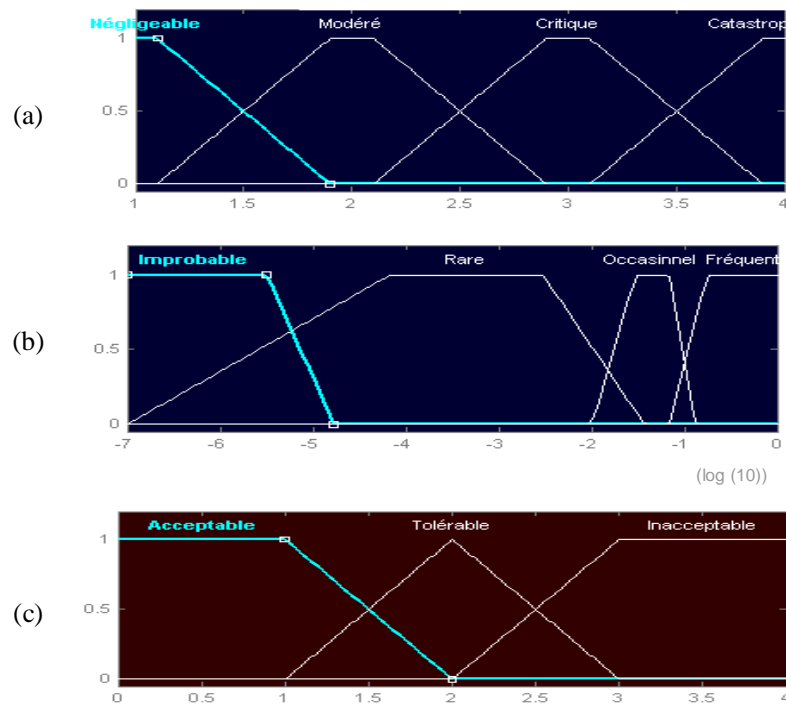


Fig. IV.4 — Fonction d'appartenance générées pour : (a) la fréquence, (b) la gravité et (c) la criticité.

IV.5.2 Établissement des règles floues

Après avoir établi les échelles floues, les ensembles flous correspondants seront associés aux prémisses et aux conclusions des règles pour construire la base de règles floues.

IV.5.3 Fuzzification des données de scénarios

Les données d'entrée (en terme de fréquence gravité de scénarios retenus) seront introduites au système d'inférence floue de Mamdani pour fuzzification où sera fait, de manière automatique, l'ensemble d'opérations d'inférence.

IV.5.4 Résultats et discussion

Un récapitulatif de résultats de l'évaluation est représenté sur le tableau IV.4.

Scénario	Entrées		Sortie (Indice de criticité)	
	<i>F</i>	<i>G</i>	MCC	MCF
Scénario 1	6,60E-07	3.50	T (2)	2.46 (T-0.54, NA-0.46)
Scénario 2	3,20E-06	3.50	T (2)	2.64 (T-0.36, NA-0.64)
Scénario 3	1,00E-05	3.50	T (2)	2.64 (T-0.36, NA-0.64)
Scénario 4	1,00E-04	3.50	NA (3)	2.64 (T-0.36, NA-0.64)

Tab. IV.4 — Comparaison des résultats de l'évaluation de la criticité des scénarios

La comparaison des résultats des deux approches d'évaluation de la criticité, i.e., la MCC et la MCF, est faite en posant l'indice flou, qui représente la valeur la plus proche de l'état réel, comme étant l'indice de référence.

IV.6 CONCLUSION

L'objet de ce chapitre était de montrer l'opportunité de l'approche proposée dans l'évaluation de la criticité et de l'acceptabilité des risques industriels, en permettant d'une part, une prise en compte des aspects imprécis et incertains des jugements d'experts et d'autre part, une meilleure caractérisation des situations de danger.

Une application à un système opérationnel a servi de support à l'illustration du système d'inférence floue. Les résultats de l'étude pratique valident la méthodologie que nous avons proposée et montrent son importance pour l'évaluation de la criticité et l'acceptabilité des risques liés au processus étudié en particulier et des risques industriels en général.

L'évaluation de la criticité des risques à base de règles floues comme alternative de la matrice conventionnelle de criticité présente plusieurs avantages. En effet, elle permet :

- d'éviter l'opération de multiplication des paramètres du risque dont la signification est fortement contestée pour des échelles ordinales, et de donner une structure plus flexible pour combiner ces paramètres;
- d'utiliser des variables linguistiques associées à des intervalles flous à la place de nombres uniques généralement incompatibles avec l'imprécision de la perception humaine ;
- d'utiliser des échelles floues continues, ce qui éliminera le problème d'interprétation des résultats.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'idée de développer une approche d'évaluation de la criticité dans le cadre de la théorie des ensembles flous est née de la nécessité de se rapprocher davantage des situations réelles de danger en tenant compte de l'expertise. Les modèles flous ont la capacité de caractériser le raisonnement humain et delà, ils sont aptes à formaliser la représentation des connaissances imparfaites.

● TRAVAIL RÉALISÉ

Notre travail a la prétention d'avoir abordé divers aspects de l'évaluation de la criticité des risques et d'avoir tenté de développer un modèle simple et performant emprunté à la logique floue. Les concepts d'ensemble flou, de variable linguistique et de règle floue issus de cette logique nous ont permis de prendre en compte :

- Le problème de représentation des données relatives aux paramètres du risque, en l'occurrence la fréquence et la gravité. En effet, les échelles floues ont la capacité de décrire la continuité des catégories avec une transition progressive de l'une à l'autre ;
- Le problème de caractérisation du risque : au lieu d'une catégorie de risque, c'est plutôt un indice de risque pouvant appartenir à plus d'une catégorie avec des degrés d'appartenances différents.

La matrice de criticité floue proposée est basée sur un système d'inférence à base de règles floues. Appliquée à l'évaluation de la criticité des risques, la matrice floue constitue un complément de la matrice conventionnelle qui sert de table de décision pour la première. La matrice floue est dotée d'une flexibilité qui lui permet de traiter un grand nombre d'incidents ou d'accidents. La fréquence d'entrée appliquée au système d'inférence est soit une donnée d'expertise, soit le résultat d'un modèle d'analyse des risques tels que l'arbre de défaillances et l'arbre d'événement. La gravité est une donnée d'expertise sur la base de l'historique du système et des systèmes similaires.

Les résultats de l'étude de criticité des risques inhérents à un système « four rebouilleur » montrent que le modèle flou développé offre la possibilité de préserver l'information figurant sur la grille (en terme d'échelles) mais avec l'opportunité de pouvoir manipuler et traiter les données incertaines et imprécises relatives au système, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives.

Le modèle flou proposé présente un avantage très clair par rapport à la matrice conventionnelle, celui de permettre une prise de décision sur la base d'un indice de risque précis et par conséquent, de mener à bien une démarche de réduction des risques dans le cadre d'un investissement rationnel.

● PERSPECTIVES

La gravité des conséquences est un problème qui mérite d'être examiné avec plus de détail sur deux plans : (1) Les critères qui définissent réellement la gravité, à savoir l'atteinte à l'homme, la dégradation de l'installation et la dégradation de l'environnement, (2) L'estimation de ces critères sur une échelle floue ordinale ou quantitative. Il serait peut être intéressant de traiter la gravité dans un système d'inférence flou séparé dont la sortie est un indice de gravité qui sera appliqué à la matrice de risque floue.

RÉFÉRENCES

- [AVE 98] T. Aven, R. Bitbalo, « On risk assessment in the petroleum activities on the Norwegian and UK continental shelves », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 61, pp. 21-29, 1998.
- [BAU 05] C. Baudrit, « Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués », Université de Toulouse III Paul Sabatier, France, 2005.
- [BEU 06] J. Beugin, « Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé », PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2006.
- [BOU 95] B. Bouchon - Meunier, « La logique floue et ses applications - Vie artificielle », Ed. Addison - Wesley France, Paris, 1995.
- [BOW 95] J. B. Bowles and C. E. Peláez, « Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis », *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 50, no. 2, pp. 203–213, 1995.
- [BOW 03] J. B. Bowles, « An assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis » *Proceeding of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 380-386, 2003.
- [CAD 98] B. Cadet, « Psychologie cognitive », In Press Editions, Paris, 1998.
- [CCP 00] Guidelines for Chemical Process Safety Quantitative Risk , second edition, American Institute of Chemical Engineers, New York, 2000.
- [CCP 01] Center for Chemical Process Safety, « Layer of Protection Analysis—Simplified Process Risk Assessment », American Institute of Chemical Engineers, New York, 2001.
- [CHA 69] S. Chauncey, « Social benefit versus technological risk - What is our society willing to pay for safety ? », *Science*, vol. 165. Septembre 1969.
- [DEM 67] A. P. Dempster, « Upper and lower probabilities induced by multivalued mapping », *Annals of mathematical statistics*, no. 39, pp. 325-339, 1967.
- [DES 95] A. Desroches, « Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité », Lavoisier, France, 1995.
- [DES 03] A. Desroches, A. Leroy, and F. Vallée, « La gestion des risques : principes et pratiques », Lavoisier, France, 2003.
- [DON 07] C. Dong, « Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation », *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 24, no. 9, pp. 958-971, 2007.

- [DUB 80] D. Dubois and H. Prade, « Fuzzy sets and systems: Theorie and applications », Academic Press, New York, 1980.
- [DUB 87] D. Dubois et H. Prade, « Théorie des possibilités: Applications à la représentation des connaissances en informatique », Paris, Edition Masson, 1987.
- [DUB 88] D. Dubois and H. Prade, « Possibility theory : An approach to computerized processing of uncertainty », Plenum Press, 1988.
- [DUB 93] P. Dubiez, D.Bennacuer, « La gestion des risques industriels – Etat de l’art », Direction des Etudes de Recherche, Electricité De France, Août, 1993.
- [DUB 94] D. Dubois et H. Prade, « La fusion d’informations imprécises », Traitement du Signal, pp. 447–458, 1994.
- [DZI 06] 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.
- [FAR 67] F. R. Farmer, « Siting criteria : a new approach », Atom, 128 : pp. 152–166, 1967.
- [FMC 88] Potential Failure Mode and Effects Analysis In Design (Design FMEA) and For Manufacturing and Assembly Processes (Process FMEA) Instruction Manual, Ford Motor Company, Dearborn, Michigan, 1988.
- [FRE 82] C. Freska, «Linguistic description of human judgments in experts systems and in the "Soft" sciences». In: M. M. Gupta and E. Sanchez (Eds), Approximate reasoning in decision analysis, North-Holland Publishing Company, pp. 297-305. 1982.
- [GOU 03] R. 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.
- [GUI 03] J. Guiochet, « Maîtrise de la sécurité des systèmes de la robotique de service », PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2003.
- [HOU 00] D. Hourtoulou, « ASSURANCE - ASSESSMENT OF THE UNCERTAINTIES IN RISK ANALYSIS OF CHEMICAL ESTABLISHMENTS, Cases study », Rapport INERIS-DRA 25 472, pp. 71, 2000.
- [HSE 95] Health and Safety Executive (HSE), « Generic Terms and Concepts in the Assessment and Regulation of Industrial Risks », Discussion Document, HMSO, London, 1995.
- [HSE 99] Health and Safety Executive (HSE) », Reducing Risk, Protecting People », Discussion Document. HMSO, London, 1999.
- [ICS 06] 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, 2006.
- [IEC 98] IEC 61508, « Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety related systems », International Electro-technical Commission (IEC), 1998.
- [IEC 03] IEC 61511, « Functional safety- Safety instrumented systems for the process industry sector », Parts 1-3, International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.
- [ISO 99] ISO, « Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes », Organisation internationale de normalisation, 1999.
- [ISO 02] ISO, « Management du risque : Vocabulaire, Principes directeurs pour l’utilisation dans les normes », Organisation internationale de normalisation, 2002.

- [KAU 77] A. Kaufmann, « Introduction à la théorie des sous ensembles flous à l'usage des ingénieurs, Tome I : Eléments théoriques de base », 2^{ème} édition, Ed. Masson, Paris, 1977.
- [KOL 60] A. N. Kolmogorov, « Foundations of the theory of probability », Chelsea Pub. Co ; 2nd edition, 1960.
- [LAM 06] P. Lamy, E. Levrat, and J-J. Pâques, « Méthodes d'estimation des risques machines : analyse bibliographique », In Lambda Mu, Lille, France, 2006.
- [LEE 90] C.C. Lee, « Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller », IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, pp. 404-435, 1990.
- [LIE 76] C. Lievens, « Sécurité des systèmes », Cepadues-éditions. 1976.
- [MAH 02] C. Hicks F.E. and A.R. Fayek, « Forecasting ice jam risk at fort mcmurray, AB, using fuzzy logic », Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice Dunedin, New Zealand, p. 112-118, 2002.
- [MAM 75] E. H. Mamdani and S. Assilian, « An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller », International Journal of Man-Machine Studies, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [MAR 07] A. S. Markowski, « Piping Risk Assessment (pfLOPA) », Process and Ecological Safety Division TU Lodz, pp. 1-38, 2007.
- [MAR 08] A. S. Markowski, M. Mannan, « Fuzzy Risk Matrix », Journal of Hazardous Materials, 2008.
- [MER 04] M. M. Merad, « Analyse de l'état de l'art sur les grilles de criticité », rapport INERIS-DRA638, 16 Mars 2004.
- [MIL 91] US Department of Defense, « System Safety Program Requirements », DC-US Department of Defense, MIL-STD-882C, 1991.
- [MIN 07] Ministère de l'écologie, « Les risques majeurs », Prime.net, 2007.
- [MOO 97] L. Moore, K. B. Grimavaru, and P. Stavrianidis, « Performance based safety standards : An integrated safety assessment program », Instrumentation Society of America, Tech. Rep., 1997.
- [NAI 09] R. Nait-Saïd, F. Zidani and N. Ouzraoui, « Modified risk graph method using fuzzy rule-based approach », Journal of Hazardous Materials, vol. 164, no. 2-3, pp. 651-658, 2009.
- [OFF 04] Office des Nations Unies pour la réduction des risques naturels, « Terminology: basic terms of disaster risk reduction », Annexe 1, ISDR, 2004.
- [OHS 99] OHSAS 18001, Système de management de la santé et de la sécurité au travail-Spécification -BSI, AFNOR, 1999.
- [PEL 94] C.E. Peláez and J.B. Bowles, « Using fuzzy logic for system criticality analysis », In Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Anaheim, California, pp. 449-455, January 24-27 1994.
- [PER 92] Perilhon P., Méthode organisée systématique d'analyse des risques, Document CEA-ISTN, 1992.
- [ROY 00] B. Roy, « Bulletin du Groupe de Travail Européen -Aide Multicritère à la Décision », Supplément no. 1, Un glossaire d'Aide à la Décision, Série 3, no. 1, 2000.

- [SAN 00] Santé Canada, « Cadre décisionnel du Santé Canada pour la détermination, l'évaluation et la gestion des risques pour la santé », Ottawa, 2000.
- [SAL 08] M. Sallak, C.Simon, and J. F. Aubry, « A fuzzy probabilistic approach for determining safety integrity level », IEEE Transactions on fuzzy systems, vol. 16, no. 1, pp. 239-248, 2008.
- [SHA 05] R. K. Sharma, D. Kumar and P. Kumar, « Systemic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modeling », International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 22, no 9, pp. 986-1004, 2005.
- [SON 08] SONATRACH, Document SONATRACH DP HRM, 2008.
- [TAN 03] T. Tanzi and F. Delmer, « Ingénierie du risque », Lavoisier, France, 2003.
- [VIL 98] A. Villemeur, « Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels », Eyrolles, 1998.
- [VRO 91] VROM, « Premises for Risk Management : Risk Limits in the Context of Environmental Policy - Annex to the Dutch National Environmental Policy Plan "Kiezen of Verliezen" (to choose ou to lose) »Second Chamber of the States General, 1988-89 session 21137, no. 1-2, Directorate General for Environmental Protection at the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, 1991.
- [XU 02] K. Xu, L. C. Tang, M. Xie, S. L. Ho, and M. L. Zhu, « Fuzzy assessment of FMEA for engine systems », Reliability Engineering & System Safety, vol. 75, no. 1, pp. 17–29, 2002.
- [ZAD 65] L. Zadeh, « Fuzzy sets », Information and Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [ZAD 75] L. Zadeh, « The concept of a linguistique variable an dits application to approximate reasoning—I—II », Information Sciences, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 301-357, 1975.
- [ZAD 78] L. Zadeh, « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility », Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, pp. 3–28, 1978.
- [ZAD 92] L.A., Zadeh, « The calculus of fuzzy if/then rules », AI Expert, vol. 7, pp.23-27, 1992.