

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 des Risques

Par

SIMOHAMMED Antar

Ingénieur d'état en Hygiène et Sécurité Industrielle

Thème :

**Propagation d'incertitude et analyse de sensibilité dans
l'évaluation des performances des systèmes instrumentés
de sécurité à l'aide de l'outil SIMLAB.**

Soutenu le 17 Mars 2015 devant le jury d'examen :

Mr.	TAMRABET Abdallah	Professeur à l'université de Batna	Président
Mme.	BAHMED Lylia	Professeur à l'université de Batna	Rapporteur
Mr.	INNAL Fares	Maître de Conférences A à l'Univ. de Batna	Co-rapporteur
Mr.	NAIT-SAID Rachid	Professeur à l'université de Batna	Examineur
Mr.	KORICHI Mourad	Maître de Conférences A à l'Univ. de Ouargla	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes parents et à toute la famille...

Antar.

Remerciements :

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectuée au sein du laboratoire de recherche en Prévention, Industrielle (LRPI) de l'institut d'Hygiène et Sécurité industrielle.

Mes remerciements vont particulièrement à Madame BAHMED Lylia, Professeure à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, d'avoir accepté de diriger ce travail, pour son soutien permanent, son aide constante et ses encouragements incondtionnés durant tout ce travail.

Je remercie aussi et profondément Monsieur INNAL Fares, Maître de conférence «A» à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, d'avoir accepté de co-diriger ce travail avec autant d'efforts, d'attention et de patience jusqu'à son achèvement.

Je présent mes vifs remerciements aux membres du jury de soutenance de ce mémoire de Magister, à savoir :

- Monsieur TAMRABET Abdullah, Professeur à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

- Messieurs NAIT SAID Rachid, Professeur à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna et KORICHI Mourad, Maître de conférence «A» de l'Université de Ouargla, d'avoir accepté d'évaluer ce manuscrit.

J'exprime, également, ma profonde gratitude à Madame OUZRAOUI Noura, Maître de conférences «A» à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna, et CHEBILA Mourad, étudiant en poste doctorat LMD à l'Institut d'Hygiène et Sécurité Industrielle de l'Université Hadj Lakhdar de Batna pour leurs aides précieuses et pour leurs conseils et soutien morale tout le long de la réalisation de ce travail.

Je tiens aussi à adresser mes chaleureux remerciements aux personnel de l'association British Petroleum, Statoil Hydro et Sonatrch d'In Amenas et notamment messieurs :

- CHERBAL Yazid : DCS ENG*
- ZIANI Faycel : Exp ENG*
- Harald Edvard Opsvik Ziel : Senior HSE Adv*
- Debola Adeyemo: Process Safety Engineer*

In fine, je présente mes profonds remerciements à mes frères et sœurs de promotions de magistère (Hafed, yassine, Hfeid, Liela, ...) ainsi mes collègues au sein de l'OOC (Nounou, Tayeb & Nouphe) pour leurs soutiens.

Dédicace	1
Remerciements	2
Abréviations, acronymes	6
Liste des figures	7
Liste des tableaux	8
Introduction	9
Problématique.....	9
Objectif	9
Organisation du mémoire	10

Chapitre 1 : Terminologie relative à la sécurité fonctionnelle

Introduction	11
1. Termes et définitions	11
1.1 Notion de danger	11
1.2 Notion de risque	11
1.3 Sécurité fonctionnelle	13
1.4 Systèmes E/E/EP relatifs aux applications de sécurité	13
2. Normes relatives à la sécurité fonctionnelle	14
2.1 Norme CEI 61508 et ses normes filles	14
2.2 Limites de la norme IEC 61508	18
2.3 Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)	18
2.3.1 Définition d'un SIS	18
2.3.2 Intégrité de sécurité	19
2.3.3 Modes de fonctionnement d'un SIS et mesures cibles de défaillances	20
3. Allocation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL requis)	20
3.1 Risque tolérable et principe ALARP	21
3.2 Méthodes qualitatives	22
3.2.1 Le graphe de risque conventionnel	22
3.2.2 Matrice de gravité (matrice de risque, matrice des couches de protection)	23
3.3 Méthodes quantitatives	23
Conclusion	26

Chapitre 2 : Traitement des incertitudes dans l'évaluation des risques

Introduction	28
2.1 Terminologie des informations imparfaites	28
2.1.1 Introduction	28
2.1.2 Notions d'incertitude	28
a. Les incertitudes aléatoires	29
b. Les incertitudes épistémiques	29
2.1.3 Représentations numériques de connaissances imparfaites	30
2.1.4 Niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques	31

2.2 Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis	33
2.2.1 Méthode de Monte Carlo	33
2.2.1.1 Définition	33
2.2.1.2 Nombre d'essai de la méthode de Monte Carlo	33
2.2.1.3 Description de la méthode	33
2.2.2 L'incertitude statistique dans la méthode de Monte Carlo	34
2.2.3 Analyse de sensibilité	36
2.2.3.1 Méthodes de criblage ou « screening »	37
2.2.3.2 Méthodes d'analyse de sensibilité locale	37
2.2.3.3 L'analyse de sensibilité globale	37
2.2.3.4 Indices de sensibilité	38
a. L'indice de sensibilité du 1er ordre	38
b. L'indice de sensibilité de 2 ^{ème} ordre	38
c. Indice de sensibilité total	38
2.2.3.5 Indicateurs classiques d'analyses de sensibilité	38
a. Analyse de régression	39
b. Mesures de corrélation	40
2.2.3.6 Méthodes d'estimation des indices de sensibilité globale	40
a. Méthode de Sobol	41
b. Méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)	41
2.2.2 Théorie des sous ensembles flous (Fuzzy Logic)	42
2.2.3 Théorie des fonctions de croyance (DST)	43
2.3 Procédure de calcul de la fréquence d'accident via la méthode Nœud Papillon.....	44
Conclusion	46
 Chapitre 3 : Application sur un système opérationnel	
Introduction	47
3.1 Traitement de l'incertitude via SIMLAB	47
3.1.1 Construction du nœud de papillon du système SBS.....	48
3.1.2 Calcul de la fréquence d'ENS du Système SBS	49
3.1.3 Analyse de sensibilité	51
3.1.4 Traitement de l'incertitude par Grif Software	52
a. Calcul de la fréquence moyenne sans incertitude	52
b. Calcul de la fréquence moyenne avec incertitude	52
c. Analyse de sensibilité	53
Indicateur 1	53
Indicateur 2 : <i>One at a Time</i>	54
Indicateur 3	55
d. Conclusion	55
3.2 Description du système de séparation des produits (Débutaniseur)	56
3.2.1 Description	56
3.2.2 Systèmes de Contrôle	56
3.2.3 Systèmes de Protection.....	57
3.3 Analyse des barrières de sécurité du système	58

3.5 Traitement de l'incertitude du système : dubitaniseur (01-V-231)	67
3.5.1 Calcul de la fréquence moyenne sans incertitude.....	67
3.5.2 Calcul de la fréquence moyenne avec incertitude	67
3.5.3 Analyse de sensibilité.....	68
Indicateur 1	68
Indicateur 2	69
Indicateur 3 (One at a Time)	71
Indicateur 4	72
Indicateur 5	73
 Conclusion.....	 75
 Conclusion générale et perspectives	 76
Annexes	77
Bibliographie	86
Résumé	95

Abréviations

Abréviations, acronymes

AdD	Arbre de défaillance
AdE	Arbre des événements
ATS	Automatic Train Stop
AS	Analyse de Sensibilité
APR	Analyse Préliminaire de Risques
BPCS	Base Process Control System
CCF	Common Cause Failure
CEI	Commission internationale d'électronique
CMS	Control Monitoring System
CIF	Critical Importance Factor
DCC	Défaillance de causes communes
DST	Dempester Shafer Theory
E/E/EP	Electrique / Electronique / Electronique programmable
ESD	Emergency Shutdown
ESDV	Emergency Shutdown Valve
ENS	Evénement Non Souhaité
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
FIC	Flow Indicator Controller
GRIF	Graphique Interactifs pour la fiabilité
GPL	Gaz Pétrolier Liquéfiée
HAZOP	Hazards and operability studies
IPL	Independent Protection Layers
LE	Level Emitter
LS	Logic Solver
LOPA	Layers Of Protection Analysis
LIC	Level Indicator Controller
LICV	Level Indicator Controller Valve
LT	Level Transmitter
OAT	One at a Time
PLC	Unité logique (Panel Logic)
PC	Pressure Controller
PT	Pressure Transmitter
PCC	Partial Correlation Coefficients
PRCC	Partial Rank Correlation Coefficients
PCV	Pressure Controller Valve
PFD	Probability of Failure on Demand
PFD _{avg}	Probability of Failure on Demand moyenne
PFH	Probability of Failure per hour
S	Sensors
SV	Solenoid Valve
SFF	Safe Failure Fraction
SIS	Système Instrumenté de Sécurité
SIL	Safety Integrity Level
SRC	Standardized Regression Coefficients
SIMLAB	Simulation Laboratory for Uncertainty and Sensitivity Analysis
TIC	Temperature Indicator Controller
TT	Temperature Transmitter

Listes des figures

Figure 1.1 L'espace du risque.	12
Figure 1.2 : Relation entre les notions de danger et de risque	12
Figure 1.3 : CEI 61508 et ses déclinaisons par secteur d'application	14
Figure 1.4 : Cycle de vie de sécurité globale	16
Figure 1.5 : Concept de risque et d'intégrité de sécurité	17
Figure 1.6 : Allocation des prescriptions de sécurité aux systèmes de sécurité E/E/PE (SIS), systèmes de sécurité basés sur une autre technologie et dispositifs externes de réduction de risque	17
Figure 1.7 : Système instrumenté de sécurité (SIS ou SRS E/E/PE)	19
Figure 1.8 : Principe ALARP	21
Figure 1.9 : Schéma général du graphe de risque	23
Figure 1.10 : Exemple de matrice de gravité (principes généraux)	23
Figure 1.11 : Concept d'analyse par couches de protection (LOPA)	25
Figure 2.1 : Niveau de traitements des incertitudes	32
Figure 2.2 : les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo	34
Figure 2.3 : Démarche d'analyse de sensibilité	36
Figure 2.4: Exemple d'un nombre flou.	43
Figure 2.5 : Intervalle flou trapézoïdal.	43
Figure 2.6 : Exemple d'un schéma de nœud de papillon.	44
Figure 3.1 Schéma de la chaudière.	47
Figure 3.2a : AdD du LA1	49
Figure 3.2b : AdD du LA2	49
Figure 3.2c : AdD du LA3	49
Figure 3.2d : AdE du SBS	49
Figure 3.2 : Nœud de papillon du système SBS	49
Figure 3.3 : Fonction densité de Probabilité de l'ENS.....	50
Figure 3.4a. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de β_{LE}	51
Figure 3.4b. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LICV}	51
Figure 3.4c. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{PCV}	51
Figure 3.4d. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{SV}	51
Figure 3.4e. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{PC}	52
Figure 3.4f. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LIC}	52
Figure 3.4g. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LT}	52
Figure 3.4h. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LE}	52
Figure 3.4 : Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de $\lambda_{LE}, \lambda_{LIC}, \lambda_{LICV}, \lambda_{LT}, \lambda_{PC}, \lambda_{SV}$ $, \lambda_{PCV}$ et β_{LE}	52
Figure 3.5 : w_{OE3}^{avg} calculé à l'aide de Grif	53
Figure 3.6 : CIF de chaque composant en fonction de t (SBS).....	54
Figure 3.7 : Ordre d'importance des composants du SBS	55
Figure 3.8 : Schéma détaillé du débutaniseur	56
Figure 3.9 : Arbre de défaillance de l'événement : perte de confinement	65
Figure 3.10 : w_{avg} obtenue par Grif	68
Figure 3.11 : Ordre d'importance des composants de base du débutaniseur	69
Figure 3.12 : Variation des CIF avec et sans incertitude (01-V -231)	70
Figure 3.13a : w_{avg_Syst} et w_{avg_OAT}	72
Figure 3.13b : Taux de déférence entre w_{avg_Syst} et w_{avg_OAT}	72

Figure 3.14 : Ordre d'importance des éléments élémentaires de débutaniseur 73
Figure 3.15 : Ecart d'intervalle entre w_{avg_OAT} et w_{avg} 74
Figure A.1 : Fenêtre principale du soft SimLab 78
Figure A.2 : Fenêtre principale du soft Grif 78

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) en fonction des mesures cibles de défaillances 20
Tableau 1.2 : Exemple de tableau LOPA 25
Tableau 2.1 : Caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques 30
Tableau 3.1: donnée de λ et β du système SBS 49
Tableau 3.2: donnée de μ et σ du système SBS 50
Tableau 3.3: Indice de sensibilité total PRCC, FAST et SOBOL 51
Tableau 3.4 : CIF moyen de l'ENS avec incertitude (SBS) 53
Tableau 3.6 : Ecart entre w_{avg} et $w_{avg/OAT}$ (SBS) 54
Tableau 3.7 : CIF Moyen de chaque composant du SBS (OAT). 55
Tableau 3.8 : Feuille de présentation HAZOP 59
Tableau 3.9 : donnée de fiabilistes du système 01-V-231. 67
Tableau 3.10: CIF moyen des composant du débutaniseur (avec incertitude) 69
Tableau 3.11 : variation des CIF avec et sans incertitude (01-V-231) 70
Tableau 3.12 : Ecart entre W_{avg_OAT} et W_{avg_ENS} 71
Tableau 3.13 : Ordre d'importance des éléments élémentaires par CIF Moyen et OAT 73
Tableau 3.14 : Ecart d'intervalle entre W_{avg_OAT} et W_{avg} 74

Problématique

La maîtrise des risques générés par les installations industrielles modernes ne pourrait être garantie sans l'usage des systèmes instrumentés de sécurité (SIS). L'objectif assigné à ce type de systèmes est la détection de situations dangereuses, menant à un accident majeur, et activer ensuite des réactions nécessaires à la mise en sécurité de l'installation surveillée.

Vérifier l'aptitude d'un système instrumenté de sécurité à exécuter correctement ses fonctions constitue une étape combien importante pour la validation de ce dernier. A ce titre, plusieurs documents normatifs ont été élaborés afin de guider les fabricants et utilisateurs potentiels des SIS dans leur démarche de validation. Parmi celles-ci, la norme CEI 61508 représente le document normatif central pour la conception et l'exploitation des SIS [CEI 61508, 2000]. Elle met en œuvre, en tant que cadre technique, un modèle de cycle de vie de sécurité global et adopte le concept de niveau d'intégrité de sécurité (SIL : Safety Integrity Level) qui spécifie les exigences (qualitatives et quantitatives) sur la fonction de sécurité. Les exigences quantitatives d'intégrité de sécurité (intégrité de sécurité du matériel) doivent être traduites en mesures cibles de défaillances.

Le problème qui se pose dans l'évaluation de ces paramètres est la fiabilité des différentes données s'y associant : taux de défaillance, couverture de diagnostic, proportion de défaillance de cause commune, ... En effet, ces paramètres sont généralement entachés d'incertitudes, d'autant plus que les SIS sont des plus fiables et produisent donc un faible retour d'expérience [Sallak, et al., 2008]. De ce fait, toute évaluation quantitative sans prise en compte d'incertitude, ou une prise non adéquate, pourrait fortement induire un niveau de sécurité erroné. Ce constat est très dangereux, car le processus de prise de décision qui en découle serait lui-même erroné.

Pour traiter ces incertitudes, la CEI 61508 propose une approche qualitative fondée sur le concept de proposition de défaillance en sécurité : SFF (Safe failure Fraction) ; cependant ce concept était démontré comme totalement inefficace [Innal, 2008]. Pour y remédier, nous proposons de mettre à profit une analyse de type Monte Carlo pour caractériser les incertitudes liées aux calculs de fréquence d'accidents majeurs.

Objectif du mémoire

Le but essentiel de ce travail est la propagation de l'incertitude et l'analyse de sensibilité dans l'évaluation des fréquences d'accidents majeurs.

Ce travail consiste en premier lieu à étudier le principe de la propagation de l'incertitude via la technique de Monte-Carlo, qui sera explicité à l'aide de deux systèmes où les données de fiabilités sont représentées à l'aide de distributions de

probabilité. Ensuite, une analyse de sensibilité sera effectuée pour identifier les paramètres qui contribuent le plus à l'incertitude des indicateurs de performances.

Organisation du mémoire

Le présent mémoire est scindé en trois chapitres :

- ✓ Au niveau du *premier chapitre* seront présentés, dans un premier temps, quelques concepts et définitions liés à la démarche d'analyse des risques. Nous évoquerons ensuite l'organisation de la norme CEI 61508 qui constitue, rappelons-le, le document de référence pour la mise en œuvre des SIS. Enfin, nous définirons les méthodes qualitatives et quantitatives d'analyse des risques.
- ✓ Le *deuxième chapitre* est d'abord consacré à une étude bibliographique ayant pour objet d'établir un état de l'art relatif aux notions d'incertitudes, ce chapitre est fondée sur trois parties : la première consiste à présenter les notions d'incertitudes épistémiques et stochastiques et aussi les niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques. Dans la deuxième partie nous présentons les Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis comme Monte Carlo, Fuzzy Logic et DSP. Cependant dans la dernière partie nous expliquons la procédure de calcul de la fréquence d'accident utilisé dans notre mémoire.
- ✓ Une approche de traitement des incertitudes et analyse de sensibilité sera détaillée au cours du *troisième et dernier chapitre*. Dans ce cadre, un exemple illustratif est traité pour valider l'approche d'analyse d'incertitude par Grif. Pour ce faire, nous explicitons le système choisi pour cette étude puis où une analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle afin d'identifier les scénarios d'accident sera effectuée pour le système (HAZOP, AdD). Finalement, une analyse de propagation d'incertitude et de sensibilité sera réalisée via le logiciel Grif.

In fine ce mémoire sera clos par une conclusion générale résumant le travail réalisé et donnant les perspectives de recherche envisagées.

Introduction

Les installations industrielles peuvent présenter des risques pour les personnes, les biens et l'environnement. Donc, de divers dispositifs de sécurités doivent être mises en œuvre. Ces types de sécurité utilisent des moyens contribuant soit à la prévention soit à la protection afin de minimiser les conséquences d'un dysfonctionnement. Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) sont utilisés en général comme moyens de prévention pour réaliser des Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) afin de mettre le procédé surveillé dans une position de repli de sécurité.

Dans ce chapitre, nous procédons à clarifier certains termes et concepts de base tels que danger, risque, sécurité, sécurité fonctionnelle, ... Par la suite, nous citons les principales normes de sécurité utilisées pour concevoir les systèmes de protection. La définition des SIS et les paramètres caractéristiques (taux de défaillance, défaillance de cause commune,...) qui interviennent dans l'évaluation de ses performances en fonction des événements rencontrés (défaillance, test) sont détaillés.

1. Termes et définitions

1.1 Notion de danger

La norme IEC 61508 [IEC61508, 1998] définit le danger comme : « *une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes* ».

Selon le référentiel OHSAS 18001 [OHSAS18001, 1999] : « *un danger est un 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* ». Les dangers liés à un système sont inhérents au fonctionnement ou au dysfonctionnement du système, soit extérieur au système.

Selon Mazouni [Mazouni, 2008] : « *le danger se définit comme une propriété intrinsèque inhérente à un type d'entité ou un type d'événement qui a la potentialité de provoquer un dommage* ».

La définition du mot danger que proposait par la 3SF [3SF, 1974] pour un système donné: « *Le danger inhérent à un système est défini par le répertoire (la liste) des événements redoutés qu'il est susceptible d'engendrer* ». La nature qualitative et descriptive du danger apparaît clairement dans cette définition.

1.2 Notion de risque

Selon Villemeur [Villemeur, 1998] : « *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.* »

Le risque peut être considéré comme une certaine quantification du danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement redouté à une estimation de la gravité de ses conséquences [Innal, 2008]. Le risque donne une mesure de la combinaison de deux facteurs qui sont la gravité d'un danger (ou sa conséquence) et la fréquence d'occurrence. Sa réduction peut être obtenue par la prévention (réduction de la fréquence d'occurrence) ou la protection (réduction de la gravité).

Le risque est caractérisé d'une part par l'ampleur des dommages, suite à l'occurrence d'un événement redouté, selon un critère de gravité, et d'autre part par son caractère incertain lié à l'apparition de l'événement redouté provoquant le dommage à partir d'une situation critique ou dangereuse [Mkhida, 2008].

Cependant, il existe de nombreuses définitions pour caractériser le sens du mot risque, la définition suivante est celle que l'on rencontre souvent : « la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et la gravité de ce dernier » [ISO, 1999].

Le terme combinaison est généralement matérialisé par une opération de multiplication, se qui nous permet la formulation suivante : $Risque (R) = Probabilité (P) \times Gravité (G)$. La représentation graphique de cette relation est une droite ou une courbe décroissante. Elle dérive de la courbe dite de *Farmer* [LIEVENS, 1976] et permet d'illustrer la partition de l'espace du risque en deux sous-ensembles disjoints, correspondant respectivement au domaine du risque acceptable et à celui du risque inacceptable (figure 1.2).

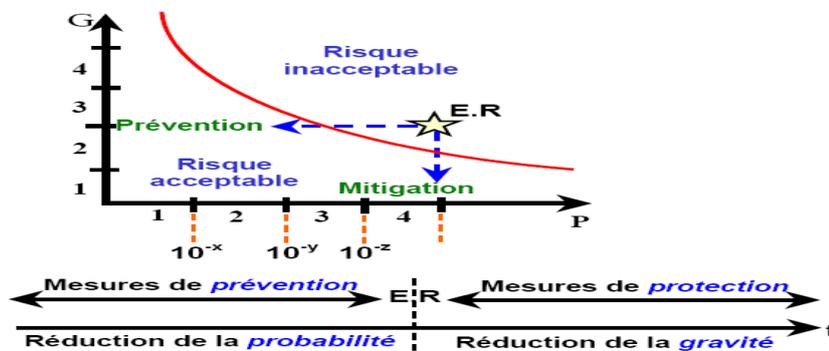


Figure 1.1 : L'espace du risque.

La figure suivante permet de bien apprécier l'interaction entre les notions de danger et de risque (émergence de la notion de situation dangereuse).

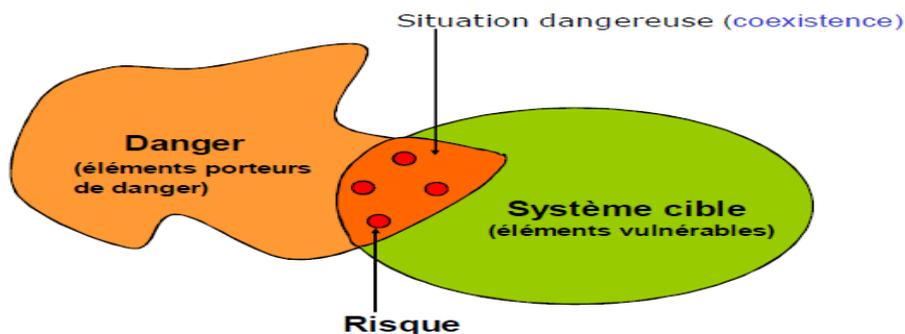


Figure 1.2 : Relation entre les notions de danger et de risque

En outre, la notion de risque industriel majeur est tout événement accidentel mettant en jeu des produits ou des procédés dangereux employés au sein d'un site industriel. Il est généralement caractérisé par [Ouddai, 2013]:

- Une gravité potentielle importante,
- Une probabilité d'occurrence faible ;
- Une cinétique rapide ;
- Des dommages potentiels humains et/ou matériels importants.

1.3 Sécurité fonctionnelle

La sécurité fonctionnelle a pour objet de contrôler les risques inacceptables qui pourraient provoquer des accidents dangereux. Elle couvre les systèmes mettant en œuvre des solutions de protection appliquées dans plusieurs domaines : mécanique, électrique, électronique, hydraulique, optique, . . .

La sécurité fonctionnelle, selon la norme IEC 61508 [IEC61508, 1998], « *est un sous ensemble de la sécurité globale qui se rapporte au système commandé et qui dépend du bon fonctionnement des systèmes relatifs à la sécurité basée sur une autre technologie et des dispositifs externes de réduction de risque.* »

Selon la norme IEC 61511 [IEC 61511, 2001], la sécurité fonctionnelle *est un sous-ensemble de la sécurité globale qui se rapporte à un système de commande de processus de base (BPCS, Base Process Control System) et qui dépend du fonctionnement correct du système instrumenté de sécurité et d'autres couches de protection.*

1.4 Systèmes E/E/EP relatifs aux applications de sécurité

Les systèmes de sécurité sont définis en termes d'absence de risque inacceptable de blessure ou de préjudice à la santé des personnes et à la dégradation de l'environnement.

Les dommages aux personnes peuvent être directs ou indirects, comme des dommages aux biens ou à l'environnement par exemple [HADDAD, 2013]. Certains systèmes peuvent être principalement conçus pour se prémunir contre des pannes ayant des implications économiques majeures. Ceci signifie que dans l'esprit, à objectifs techniques comparables ou identiques, il n'y a pas une grande différence entre un système de sécurité et un système de contrôle.

Un système E/E/EP (électrique/électronique/électronique programmable) relatif aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité, c'est-à-dire, depuis le capteur, en passant par l'unité logique de traitement, jusqu'à l'élément final (la partie actionneur), tout en tenant compte des actions de l'opérateur du système.

La norme IEC 61508 [IEC 61508, 1998] peut être utilisée pour développer n'importe quel système E/E/EP comportant des fonctions critiques, telles que la protection des équipements, des biens ou de l'environnement.

2. Normes relatives à la sécurité fonctionnelle

La norme internationale de sécurité IEC 61508 est une des dernières normes dédiées à la sécurité fonctionnelle. Elle est devenue avec ses normes filles les plus récentes et les plus connues des acteurs de la sécurité dans les secteurs industriels.

2.1 Norme CEI 61508 et ses normes filles

La norme IEC 61508 [IEC 61508, 1998] est un ensemble de règles et de recommandations permettant l'amélioration de la sécurité par l'utilisation des systèmes électriques, électroniques programmables E/E/EP. Cette norme propose une démarche opérationnelle permettant de mettre en place un système E/E/EP à partir de l'étude des exigences de sécurité issues notamment d'une analyse des risques. L'avantage de cette norme est qu'elle propose des moyens de justification sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit en fonction du niveau de sécurité que l'on souhaite atteindre.

La norme IEC 61508 [IEC 61508, 1998] se compose de sept volets comme suit :

- 61508-1 présente les définitions des prescriptions générales.
- 61508-2 traite les prescriptions spécifiques aspect matériel des systèmes E/E/EP.
- 61508-3 dédiée à la présentation des prescriptions spécifiques, aspect logiciel, des Systèmes E/E/EP. Elle est développée dans la troisième partie de la norme.
- 61508-4 présente les définitions et les abréviations utilisées.
- 61508-5 donne des exemples de méthode pour la détermination des niveaux d'intégrité de sécurité.
- 61508-6 fournit les guides d'application des parties 2 et 3 de la norme.
- 61508-7 présente les techniques et les mesures recommandées lors de la validation des systèmes E/E/EP.

La complexité de la norme IEC 61508 [IEC 61508, 1998] a conduit ses concepteurs à développer des normes relatives à des secteurs bien précis (ex : machines, processus industriels, ferroviaire, centrales nucléaires . . .). La figure 1.4 montre la norme IEC 61508 générique ainsi que ses normes filles selon le secteur d'activité concerné. Elle influence le développement des systèmes E/E/EP et les produits concernés par la sécurité dans tous les secteurs [Sallak, 2007].

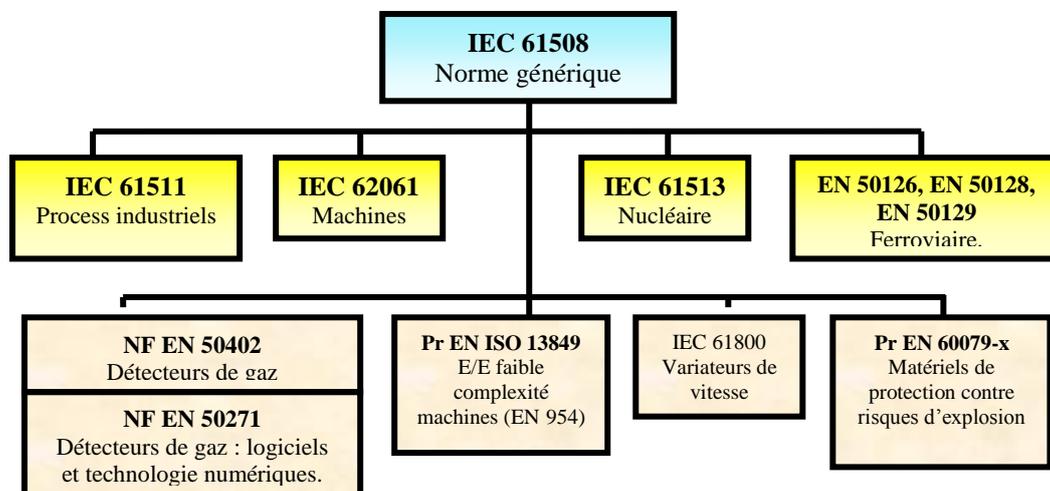


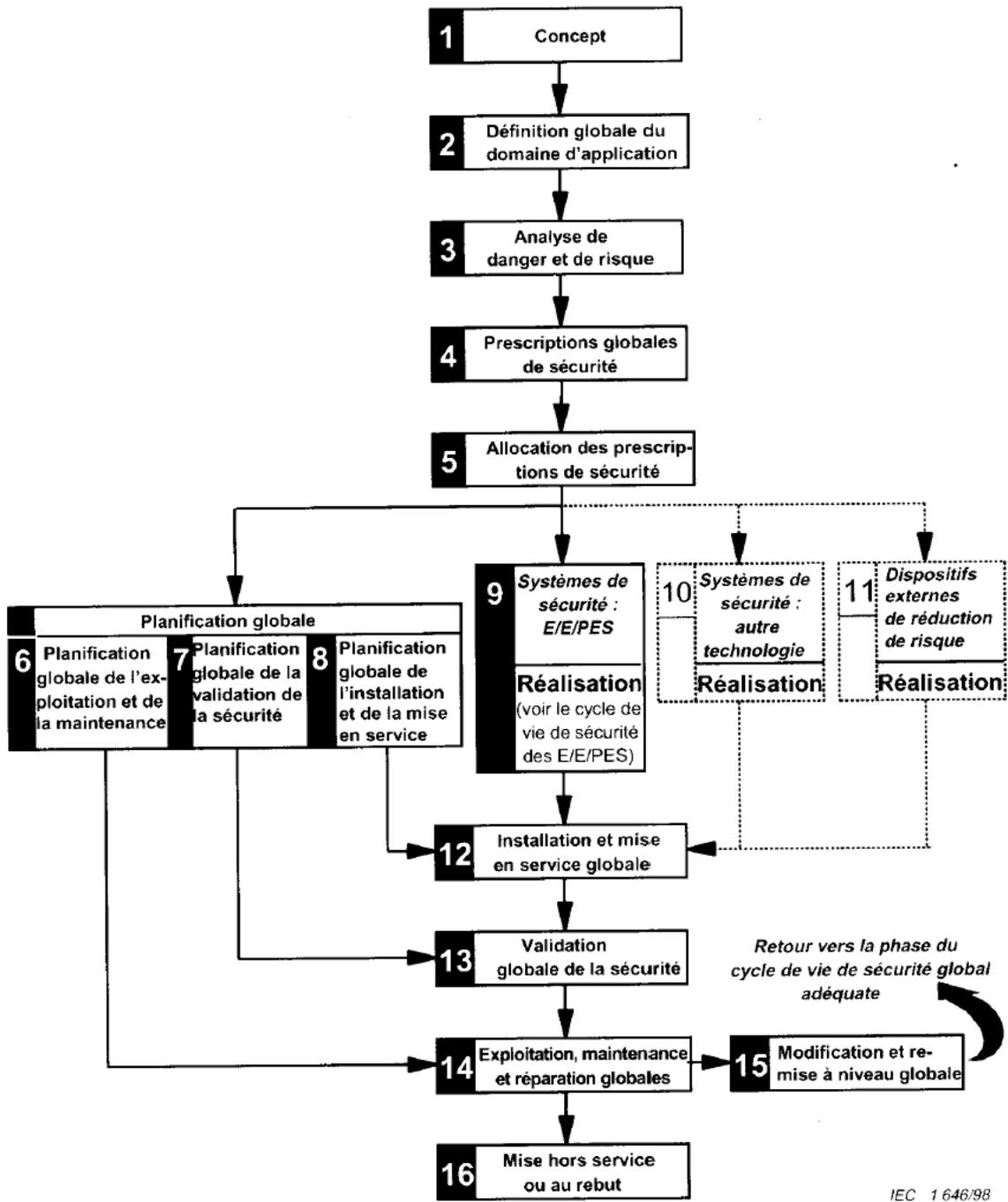
Figure 1.3 : CEI 61508 et ses déclinaisons par secteur d'application

Le principe fédérateur de cette norme est fondé sur le modèle de *cycle de vie globale de sécurité*, depuis la spécification, en passant par la conception, l'installation, l'exploitation et la maintenance, jusqu'à la mise hors service des *SIS*, comme montré à la figure 1.5. Le cycle de vie fournit un guide complet pour l'établissement des caractéristiques et spécifications relatives aux fonctions de sécurité allouées aux *SIS*.

Globalement, trois grandes parties dans le cycle de vie global de sécurité peuvent être distinguées :

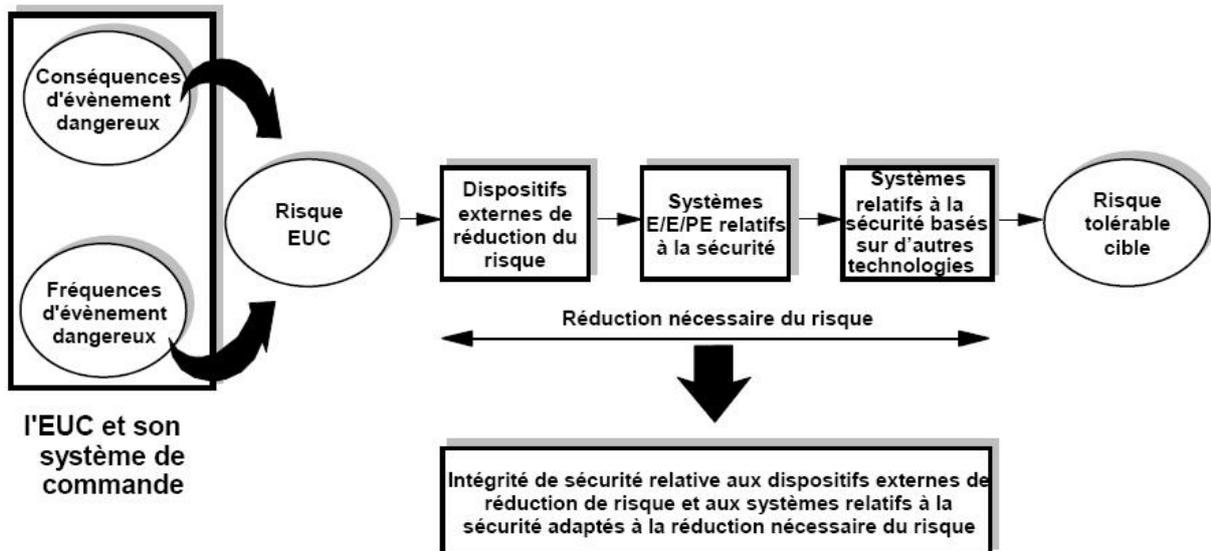
- Les premières étapes se basent sur une *analyse de risques* pendant laquelle l'ensemble des situations dangereuses (scénarios d'accident) est établi, en termes de gravité et de probabilité (fréquence) d'occurrence, afin d'en comparer la criticité à une valeur limite constituant l'objectif de sécurité à atteindre. Si cette criticité excède la valeur-seuil précitée, il sera alors nécessaire de la réduire. L'ampleur de cette réduction donne lieu à la définition de prescriptions globales de sécurité (phase 4) en termes de fonctions de sécurité et de prescriptions d'intégrité de sécurité qui sont ensuite déclinées en prescriptions particulières de sécurité (phase 5) allouées aux différents moyens de réduction de risques (voir figure 1.4). Pour les *SIS*, ces prescriptions sont établies en termes de niveaux d'intégrité de sécurité (*SIL requis*) (voir figure 1.5). Plus la réduction de risque à réaliser est importante, plus le *SIL* est élevé. Ce constat souligne l'importance et le rôle capital que joue l'analyse de risques dans l'ensemble du cycle de vie. Nous allons plus loin donner quelques méthodes de détermination du *SIL requis*, telles décrites dans les références [CEI 61508-5, 1998] et [CEI 61511-1, 2003].
- Puis vient le cycle de vie inhérent au développement des moyens de réduction de risques (*SIS*, systèmes relatifs à la sécurité basés sur d'autres technologies, moyens externes de réduction de risques) : phases 9, 10 et 11 (voir la figure 1.4). La CEI 61508 ne considère que les spécifications relatives au développement des systèmes instrumentés de sécurité (phase 9).
- Ces deux premières parties sont complétées par les phases d'installation et de validation globale de la sécurité, de fonctionnement et de modifications éventuelles, avec, le cas échéant, un retour à la phase adéquate du cycle de vie.

Il convient de noter que CEI 61508 recommande l'adoption et la mise en application du cycle de vie de sécurité dans le système de management de la sécurité (*SMS*) de l'établissement concerné.



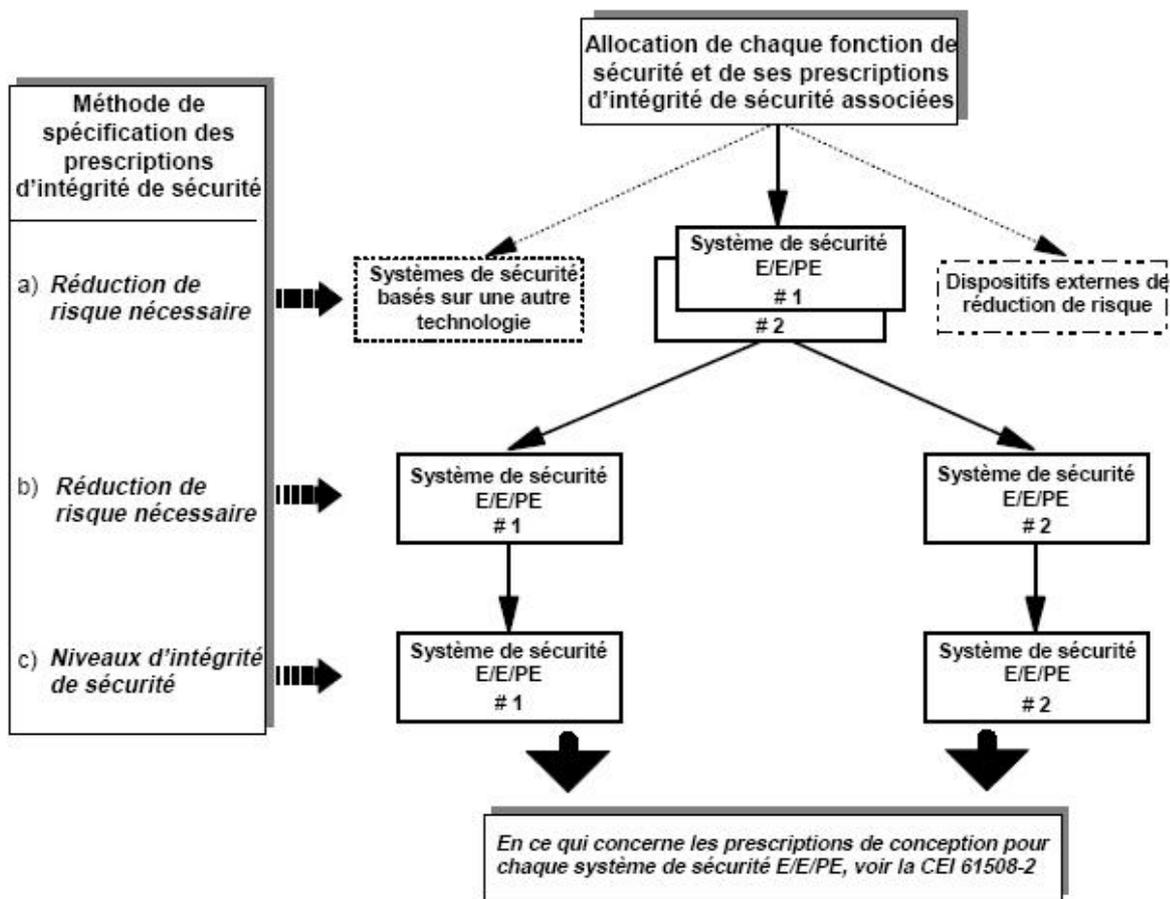
IEC 1646/98

Figure 1.4 : Cycle de vie de sécurité globale [IEC 61508-1, 2003]



IEC 1 662/98

Figure 1.5 : Concept de risque et d'intégrité de sécurité



IEC 1 650/98

Figure 1.6 : Allocation des prescriptions de sécurité aux systèmes de sécurité E/E/PE (SIS), systèmes de sécurité basés sur une autre technologie et dispositifs externes de réduction de risque.

2.2 Limites de la norme IEC 61508

Les limites de la norme IEC 61508 sont liées à la complexité et à la difficulté de son utilisation [Mechri, 2011]. Plusieurs utilisateurs de l'IEC 61508 ont mentionné la nécessité d'être guidés, tant que ses notions paraient complexes, et difficiles à mettre en œuvre.

Beaucoup de prescriptions ne sont pas assignées à une certaine gamme des niveaux d'intégrité de sécurité ou à la complexité de la conception. Ceci rend la norme difficile à utiliser pour de petits projets et rend la gestion de la sécurité fonctionnelle trop chère pour des petites et moyennes entreprises.

La norme IEC 61508 [IEC 61508, 1998] définit l'intégrité de sécurité comme propriété de l'installation complète de sécurité, du capteur à l'actionneur. En outre, les parties 2 et 3 de cette norme entrent dans le détail dans ; la conception et validation des systèmes E/E/EP de sécurité.

Pour réaliser la fonction de sécurité, l'utilisateur met en œuvre plusieurs sous systèmes: capteur, unité de traitement, actionneur. Dans chacun des sous-systèmes, des composants peuvent être mis en redondance. La PFD_{avg} de l'ensemble doit être calculée à partir des caractéristiques des composants et des architectures du système de sécurité [Sallak, 2007].

Rappelons également que les données des entrées spécifiées dans la norme sont bien souvent difficiles à obtenir et sont souvent des approximations (taux de couverture de diagnostic, modes communs de défaillances, . . .). La PFD_{avg} devrait être aussi renommée, car sa dénomination prête à confusion. Il ne s'agit nullement d'une défaillance à la sollicitation classique, mais d'une indisponibilité moyenne sur un intervalle de temps spécifié [Innal, 2008], [Signoret, et al. 2007].

2.3 Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)

Les systèmes instrumentés de sécurité contribuent, avec les autres niveaux de protection, à la réduction du risque afin d'atteindre le niveau de risque tolérable. Ils constituent, probablement, l'une des mesures de réduction de risque les plus importantes. Sont exposés ci-après la définition et les modes de fonctionnement de ces systèmes.

2.3.1 Définition d'un SIS

Un SIS, aussi appelé boucle de sécurité, est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) assurant la mise en état de sécurité des procédés lorsque des conditions prédéterminées sont atteintes.

Pour la norme CEI 61508 [IEC 61508-4, 2002] définit les SIS comme suit : « *un système E/E/PE (électrique/électronique/électronique programmable) relatifs aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité* ».

La norme CEI 61511 [CEI 61511, 2003] définit, quant à elle, les systèmes instrumentés de sécurité comme « *système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité. Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unité loriquet(s) et d'élément(s) terminal (aux)* ».

L'architecture type d'un SIS est donnée à la figure 1.8. Voici un descriptif succinct de chacune de ses parties :

- Sous-système « *Eléments d'entrée (S : Sensors)* » : constitué d'un ensemble d'éléments d'entrée (capteurs, détecteurs) qui surveillent l'évolution des paramètres représentatifs du comportement de l'EUC (température, pression, débit, niveau...).
- Sous-système « *Unité logique (LS : Logic Solver)* » : comprend un ensemble d'éléments logiques (PLC, API) qui récoltent l'information en provenance du sous-système S et réalisent le processus de prise de décision qui s'achève éventuellement, si l'un des paramètres dévie au-delà d'une valeur-seuil, par l'activation du sous-système FE.
- Sous-système « *Eléments Finaux (FE)* » : agit directement (vanne d'arrêt d'urgence) ou indirectement (vanne solénoïdes, alarme) sur le procédé pour neutraliser sa dérive en le mettant, en général, dans un état sûr.

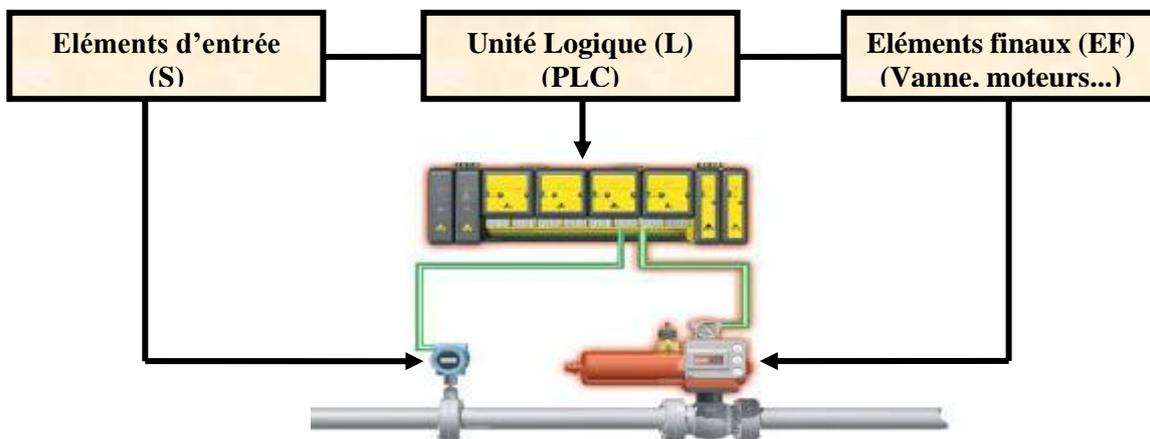


Figure 1.7 : Système instrumenté de sécurité (SIS ou SRS E/E/PE)

Les systèmes suivants en sont des exemples :

- Système d'arrêt d'urgence (*ESD : Emergency Shutdown Systems*), utilisé, par exemple, dans les industries chimique et pétrochimique.
- Système d'arrêt automatique de train (*ATS : Automatic Train Stop*), utilisé dans le domaine ferroviaire.
- Système de freinage de l'automobile.
- Air-bag.
- Système de détection de surface d'un avion.
- Equipements médicaux critiques de traitement et de surveillance.

2.3.2 Intégrité de sécurité

La référence [CEI 61508-4, 2002] la définit comme suit : «*probabilité pour qu'un système relatif à la sécurité (SRS) exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et pour une période de temps spécifiée*». Elle indique également que cette définition est centrée sur la fiabilité des SRS dans l'exécution de leurs fonctions de sécurité.

Cette même référence, précise que l'intégrité de sécurité comprend l'intégrité de sécurité du matériel ainsi que l'intégrité de sécurité systématique. Elles sont définies ci-après.

- *Intégrité de sécurité du matériel* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité liée aux défaillances aléatoires du matériel en mode de défaillance dangereux.
- *Intégrité de sécurité systématique* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité qui se rapporte aux défaillances systématiques dans un mode de défaillance dangereux, en précisant que l'intégrité systématique ne peut normalement, ou précisément, être quantifiée, mais simplement considérée d'un point de vu qualitatif.

Les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux SIS sont spécifiées en termes de niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) : niveau discret parmi quatre possibles, le *SIL 4* possède le plus haut degré d'intégrité de sécurité. Sa détermination dépend du mode de fonctionnement du SIS.

2.3.3 Modes de fonctionnement d'un SIS et mesures cibles de défaillances

Une fois le risque tolérable défini et la réduction nécessaire du risque estimée, les exigences d'intégrité de sécurité affectées au SIS, pour chaque fonction de sécurité, doivent être spécifiées (en termes de *SIL*) en fonction des mesures cibles de défaillances (voir tableau 1.1). La notion de mesure cible de défaillances est désignée en matière de probabilité de défaillance dangereuse. Sa vocation diffère selon le mode de fonctionnement du système instrumenté de sécurité [CEI 61508-1, 2000] :

- *Probabilité moyenne de défaillance* lors de l'exécution sur demande de la fonction spécifiée (PFD_{moy}), en mode demande faible. Ce mode de fonctionnement correspond à une fréquence de sollicitation de la SIS inférieure ou égale à 1 an^{-1} et également inférieure ou égale au double de la fréquence des tests périodiques auxquels il est soumis [CEI 61508-4, 2002].
- *Probabilité d'une défaillance dangereuse par heure (PFH)*, en mode demande élevée ou en mode continu. Ce second mode correspond à une fréquence de sollicitation du SIS supérieure à 1 an^{-1} ou supérieure au double de la fréquence des tests périodiques mentionnés précédemment [CEI 61508-4, 2002].

Les valeurs numériques des mesures cibles de défaillances, en fonction du mode d'opération du SIS, correspondantes aux niveaux d'intégrité de sécurité sont présentées au tableau 1.1.

Niveau d'intégrité de sécurité <i>SIL</i>	Mode de fonctionnement à faible sollicitation (PFD_{moy})	Mode de fonction normale à forte sollicitation (PFH)
4	$\geq 10^{-5}$ à $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ à $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-4}$ à $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ à $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-3}$ à $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ à $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-2}$ à $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ à $< 10^{-5}$

Tableau 1.1 : Niveaux d'intégrité de sécurité (*SIL*) en fonction des mesures cibles de défaillances

3. Allocation du niveau d'intégrité de sécurité (*SIL* requis)

Cette allocation est conduite selon certaines méthodes permettant de définir le niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) requis pour une fonction de sécurité. C'est le *SIL* qui doit être atteint par un SIS afin de réaliser la réduction nécessaire du niveau de risque [Haddad, 2013]. La section suivante donne un aperçu des méthodes, telles que présentées dans les normes CEI 61508 et CEI 61511, de détermination du niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) correspondant à un phénomène

dangereux spécifié (scénario d'accident) lors de la phase d'analyse des risques. Elles sont plus ou moins adaptées en fonction du niveau de détail des analyses de risques réalisées (type et détail des informations disponibles). La CEI 61508, dans sa partie 5, et la CEI 61511 décrivent deux types de méthodes : qualitatives et quantitatives.

3.1 Risque tolérable et principe ALARP

Selon OHSAS 18001 [OHSAS, 1999], 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.

Un risque est ALARP « *As Low As Reasonably Achievable* » si le coût de sa réduction est manifestement disproportionné par rapport à l'amélioration qui en résulte.

Pour être plus précis, et comme indiqué sur la figure 1.9, le risque n'y est tolérable que :

- si toute réduction supplémentaire du risque est incompatible ou si son coût est manifestement disproportionné vis-à-vis de l'amélioration qu'il permet d'obtenir ;
- si la société tire un avantage de l'activité, compte tenu du risque associé.

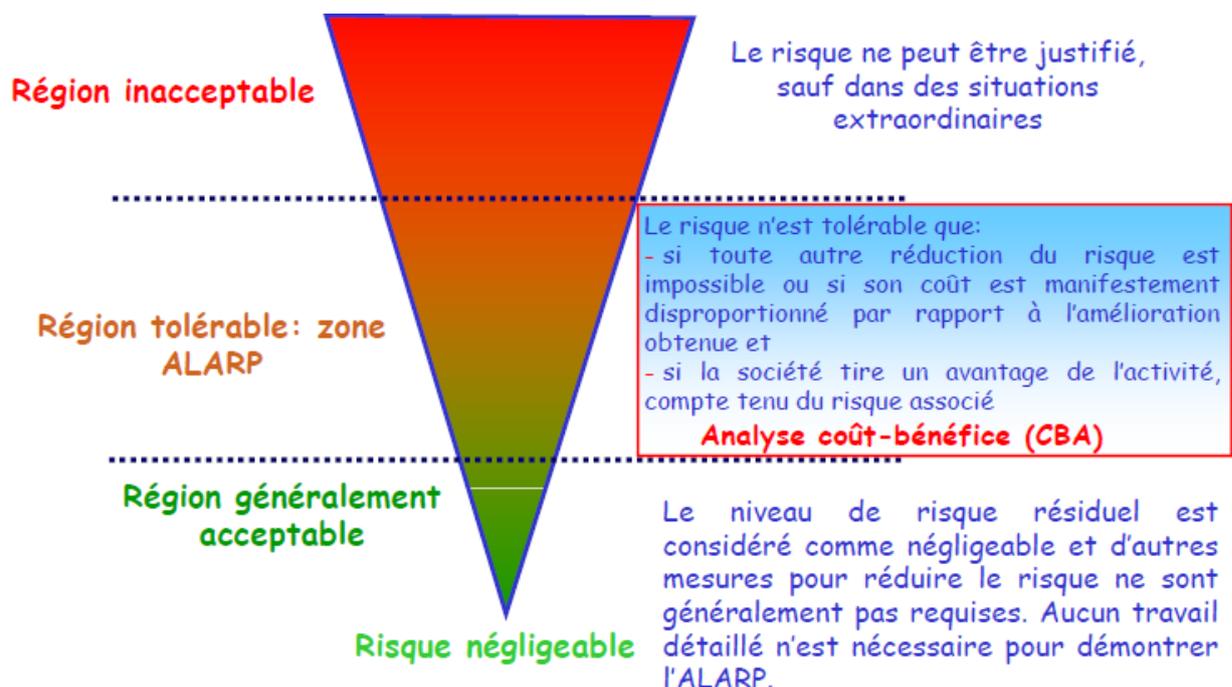


Figure 1.8 : Principe ALARP

Pour pouvoir appliquer la démarche ALARP qui, rappelons-le, concerne le risque et non l'une ou l'autre de ses deux composantes, il est nécessaire d'établir plusieurs (en général 3 ou 4) classes de risque et de faire correspondre à chacune d'elles une des trois zones du modèle ALARP (Annexe 1&2). Ces classes rendent compte en fait de la criticité des événements redoutés propres au type de procédé étudié. L'accord précité ne survient en général qu'après que le qualificatif ordinal attribué à chaque classe de conséquences (ex : négligeable à catastrophique) et à chaque classe de fréquences (exp : événement redouté invraisemblable à fortement probable) ait été illustré par un exemple concret ou un jeu de valeurs numériques adaptés au secteur industriel concerné. On pourrait, par exemple, concevoir que « conséquences

catastrophiques » correspondre à la mort d'une ou plusieurs personnes ou à la perte totale de l'outil de production, et que l'événement redouté « peu probable » corresponde à une fréquence annuelle d'occurrence comprise entre 1.10^{-4} et 1.10^{-3} [Innal, 2008].

Conformément au principe ALARP, le niveau « peu probable » est retenu, ce qui conduit à une fréquence annuelle d'occurrence comprise entre 1.10^{-4} et 1.10^{-3} , selon nos conventions. La valeur finalement choisie au sein de cet intervalle détermine alors la fréquence annuelle d'occurrence de l'événement correspondant au risque tolérable.

3.2 Méthodes qualitatives

La norme CEI 61508 reconnaît qu'une approche quantitative pour déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) d'une fonction instrumentée de sécurité (SIF) n'est pas toujours possible et qu'une approche alternative pourrait parfois être appropriée. Cette alternative consiste en un jugement *qualitatif*. Quand une méthode qualitative est adoptée, un certain nombre de paramètres de simplification doivent être introduits. Ils permettent de qualifier le phénomène dangereux (accident) en fonction des connaissances disponibles. Les normes CEI 61508 et 61511 présentent deux méthodes qualitatives.

3.2.1 Le graphe de risque conventionnel

Cette méthode a été introduite par la norme allemande DIN V 19250 [DIN V 19250,1994], afin de pouvoir exprimer le risque sous forme de classes. La démarche est fondée sur l'équation caractérisant le risque (R) sans considérer les moyens instrumentés de sécurité : $R = f \cdot C$, où f et C sont respectivement la fréquence et la conséquence de l'événement dangereux en l'absence de SIS [Mechri et al., 2011].

La méthode du graphe de risque conventionnel analyse quatre facteurs de risque relatifs aux dangers et partagés en catégories selon leur importance [Ouzraoui, et al., 2014]:

- La conséquence d'un événement dangereux (C) ;
- La fréquence et le temps d'exposition au danger (F) ;
- La possibilité d'évitement du danger (P),
- La probabilité d'apparition d'un accident (W).

La structure du graphe de risque dépend du domaine d'activité, d'où l'emploi de différents graphes dans les normes. La prise en compte de dégâts matériels et de dommages causés à l'environnement nécessite l'utilisation de graphes additionnels.

La combinaison des quatre paramètres précédents (C, F, P, W) peut ramener à une configuration comparable à celle présentée à la figure 1.9 [CEI 61508-5, 1998].

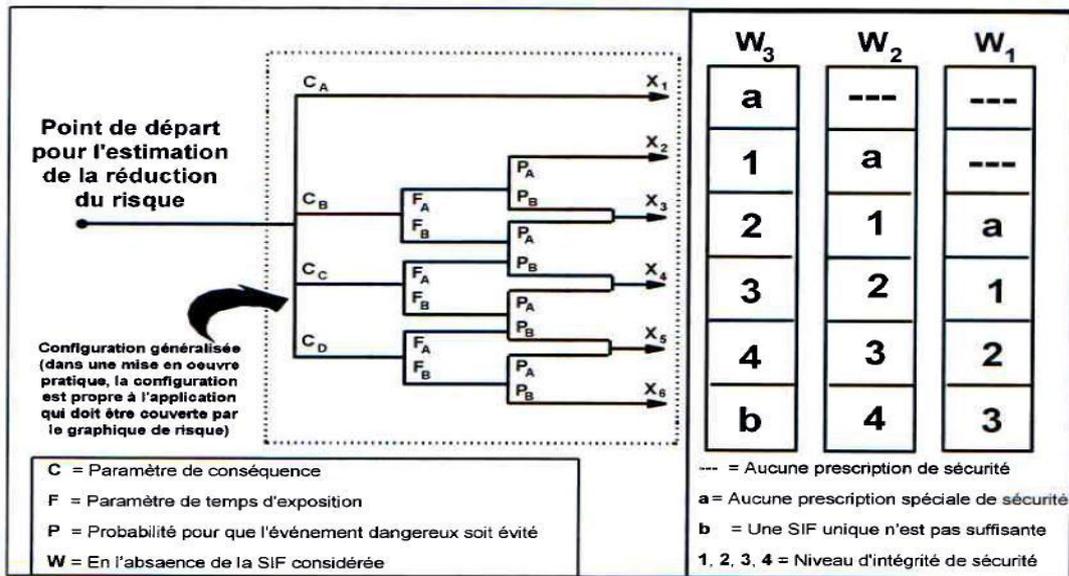


Figure 1.9 : Schéma général du graphe de risque conventionnel

3.2.2 Matrice de gravité (matrice de risque, matrice des couches de protection)

Cette méthode est similaire à la précédente. Elle est utilisée lorsque la fréquence du risque ne peut être quantifiée d'une manière précise. L'analyse débute toujours par l'identification des dangers et leur estimation (fréquence et gravité). Après avoir identifié les différentes couches de protection (chaque couche de protection doit réaliser une réduction d'un ordre de grandeur de SIL (un facteur de 10), la nécessité d'une couche de protection SIS supplémentaire peut être établie en comparant le risque résiduel au niveau de sécurité cible. Ainsi le niveau d'intégrité de sécurité du SIS peut être déterminé. Cette méthode suppose l'indépendance des couches de protection. Ces considérations conduisent à la matrice de gravité tridimensionnelle illustrée à la figure 1.10 [CEI 61508-5, 1998].

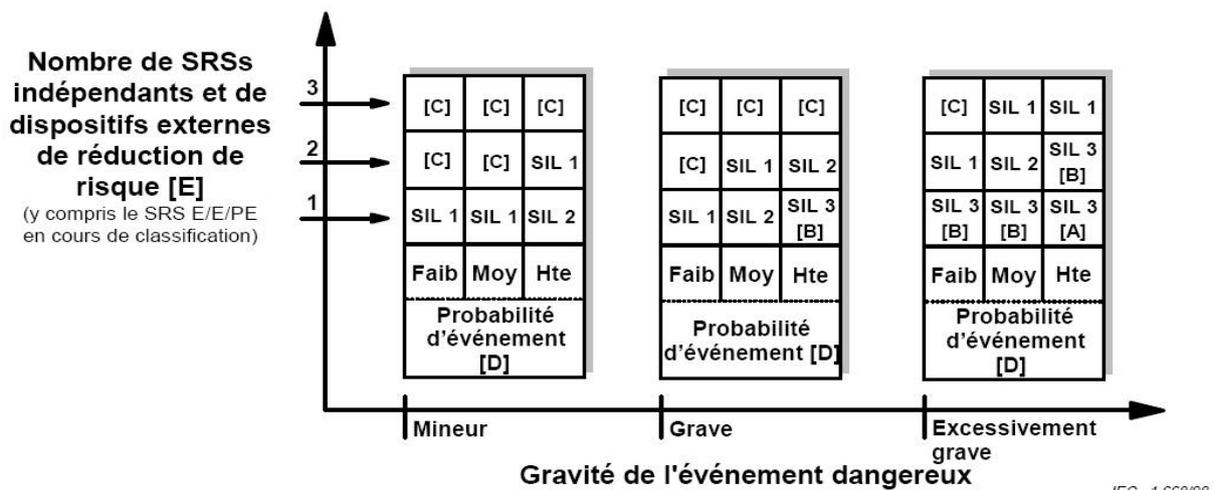


Figure 1.10: Exemple de matrice de gravité (principes généraux)

Avec :

- ✓ [A] Un SRS E/E/PE SIL3 n'apporte pas une réduction suffisante de risque à ce niveau de risque. Des mesures supplémentaires de réduction de risque sont nécessaires.

- ✓ [B] Un SRS E/E/PE SIL3 peut ne pas apporter une réduction suffisante de risque à ce niveau de risque. L'analyse des risques et des dangers est requise pour déterminer si des mesures supplémentaires de réduction de risque sont Nécessaires.
- ✓ [C] Un SRS E/E/PE n'est probablement pas nécessaire.
- ✓ [D] La probabilité d'événement est la probabilité que l'événement dangereux survienne sans système relatif à la sécurité ou sans dispositif externe de réduction de risque.
- ✓ [E] La probabilité d'événement et le nombre total de couches de protection indépendantes sont définis en relation avec l'application spécifique.

3.3 Méthodes quantitatives

Ces méthodes sont les plus rigoureuses et les plus précises. L'estimation quantitative de la fréquence de l'événement dangereux (redouté) en constitue la base. La mise en œuvre d'une méthode quantitative nécessite les éléments suivants :

- La mesure cible de sécurité (fréquence tolérable d'accident : F_t) doit être spécifiée de façon numérique (par exemple, une conséquence donnée ne devrait pas se produire avec une fréquence supérieure à 1/10000 ans).
- La réduction du risque peut être définie numériquement. Ceci suppose la disponibilité des données numériques suivantes :
 - La fréquence de l'événement initiateur : F_{ei} . Elle peut être obtenue en utilisant le retour d'expérience, le jugement d'expert ou encore en utilisant des méthodes de prédiction appropriées (Arbre de défaillances –AdD-, Chaînes de Markov, etc).
 - Les probabilités de défaillances des couches de protection.

La méthode quantitative la plus utilisée pour l'allocation des niveaux d'intégrité de sécurité est celle fondée sur principe d'analyse par couches de protection (*LOPA : Layers Of Protection Analysis*), voir figure 1.11 [CEI 61511, 2003] [CCPS, 2001]. Elle a été développée à la fin des années 1990 par le CCPS (*Centre for Chemical Process Safety*) [CCPS, 2001]. Cette méthode intègre toutes les couches de protection de l'installation, tant organisationnelles que techniques. Elle évalue la réduction du risque en analysant la contribution des différentes couches [LANTERNIER ET ADJADJ, 2008]. Son principe, rappelons-le, est d'estimer le risque résiduel, exprimé en fréquence d'accident, en quantifiant la fréquence de l'événement initiateur et les probabilités (moyennes) de défaillance sur demande de chaque couche.

Ces couches peuvent être de prévention (diminution de la fréquence de l'occurrence de l'évènement dangereux) ou de protection (réduire les impacts de l'évènement dangereux). Une condition majeure qui doit être satisfaite est l'indépendance des différentes couches de protection (*IPL : Independant Protection Layers*). Le tableau 1.2 illustre un exemple de format de la feuille de calcul que l'on peut utiliser lors d'une étude *LOPA*.



Figure 1.11 : Concept d'analyse par couches de protection (LOPA)

N°	1	2	3	4	COUCHES DE PROTECTION					8	9	10	11
					5	6	7	8	9				
Description de l'évènement à impact F.3 F.14.1	Degré de gravité F.4 F.14.1	Cause initiatrice F.5 F.14.2	Probabilité d'occurrence d'une cause initiatrice F.6 F.14.3	Conception générale du procédé F.14.4	BPCS F.14.5	Alarmes, etc. F.14.6	Atténuation supplémentaire, accès limité, F.8 F.14.7	IPL Digos d'atténuation supplémentaire, détente F.9 F.14.8	Probabilité intermédiaire d'occurrence d'évènement F.10 F.14.9	Niveau d'intégrité d'une SIF F.11 F.14.10	Probabilité d'évènement atténué F.12 F.14.10	Notes	
1	Incendie dû à une rupture de la colonne de distillation	S	Perte d'eau de refroidissement	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	PRV 01	10 ⁻⁷	10 ⁻²	10 ⁻⁹	Une pression élevée a provoqué une rupture de colonne
2	Incendie dû à une rupture de la colonne de distillation	S	Défaillance de la boucle de régulation de la vapeur	0,1	0,1	0,1	0,1	01	PRV 01	10 ⁻⁸	10 ⁻²	10 ⁻⁹	Idem ci-dessus
NOTE Degré de gravité E = Très grave; S = Grave; M = Mineur. Les valeurs des probabilités d'occurrence sont des évènements par année, d'autres valeurs numériques sont des probabilités de défaillance sur sollicitation moyenne.													

Tableau 1.2 : Exemple de tableau LOPA

La fréquence de l'évènement redouté (scénario d'accident : colonne n°10 du tableau 1.2) s'obtient en multipliant la fréquence de l'évènement initiateur et les probabilités moyennes de défaillance à la demande ($PF_{D_{moy}}$) de chaque *IPL* s'opposant à cet même évènement.

$$f^C = f^{IE} \times \prod PFD_{moy}^i \quad (1.1)$$

Avec :

f^c : fréquence de réalisation de la conséquence C ,

f^{IE} : fréquence de l'événement initiateur,

PFD_{moy} : Probabilité moyenne de défaillance sur demande de la barrière i . L'équipe LOPA doit déterminer cette quantité pour chaque barrière considérée.

La réduction du risque assignée à la fonction de sécurité du SIS s'obtient en comparant la fréquence de l'événement redouté à l'objectif de sécurité (fréquence tolérable : f_i).

$$PFD_{moy}^{SIS} \leq \frac{f_i}{f^{IE} \times \prod_{i \neq SIS} PFD_{moy}^i} \quad (1.2)$$

La quantité correspondante au membre droit de l'inégalité (1.2) représente la probabilité moyenne de défaillance maximale que le SIS pourrait avoir, tel que la réduction de risque nécessaire soit réalisée. La lecture de cette quantité dans le tableau 1.1 permet de définir le SIL correspondant.

L'inégalité (1.2) telle que écrite n'est valable que pour le mode de fonctionnement faible demande. Pour le mode de fonctionnement demande élevée ou continu, il serait nécessaire de dimensionner la fréquence de l'événement initiateur qui représente, dans ce cas de figure, la PFH du SIS :

$$PFH_{SIS} \leq \frac{f_i}{\prod_{i \neq SIS} PFD_{moy}^i} \quad (1.3)$$

Il est important de noter que dans le cas où des relations de dépendance existent entre les différentes barrières, il serait plus convenable d'utiliser des approches de modélisation plus appropriées (arbre des défaillances, chaînes de Markov, Réseaux de Petri, ...).

Conclusion

La norme IEC 61508 est la norme de référence pour la spécification et la conception des SIS. Sa déclinaison sectorielle dans le domaine du process industriel est destinée aux concepteurs et utilisateurs de ce domaine [IEC61511, 2000]. Ces normes de sécurité fonctionnelle introduisent une approche probabiliste pour l'évaluation quantitative de la performance du SIS et la qualification de cette performance par des niveaux de sécurité référencés (Tableau 1.1) [Mechri, 2011].

L'introduction de probabilité dans la mesure de niveau d'intégrité a entraîné la mise en place de nouveaux concepts tels que les notions de calculs de probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation PFD_{avg} ou de défaillance par unité de temps.

La performance ainsi calculée permet alors de qualifier le niveau SIL du SIS selon les niveaux définis par la norme qui en sont l'un des points clés. Cette évaluation s'apparente à un calcul d'indisponibilité de la fonction de sécurité.

Introduction

Pour une bonne maîtrise des risques générés par les installations industrielles moderne, l'analyse des risques peut devenir rigoureuse en termes de qualité d'informations et de données.

Cependant, les études d'indisponibilité des systèmes, les connaissances manipulées concernant les paramètres de défaillances des composants sont généralement imparfaites [Mechri, 2011] [Utkin et al, 2007] [Sallak, 2007].

L'incertitude sur des paramètres peut avoir deux origines [Baudrit, et al., 2007], la première source d'incertitude provient du caractère aléatoire de l'information qui est dû à une variabilité naturelle résultant de phénomènes stochastiques. On parle alors d'incertitudes de variabilité ou d'incertitudes stochastiques [Sandri, 1991]. La seconde source d'incertitude est liée au caractère imprécis et incomplet de l'information en raison d'un manque de connaissance. On parle alors d'incertitudes épistémiques. [Baudrit, 2005].

La complexité de système augmente l'incertitude, puisque les modèles théoriques et empiriques ne prennent pas en considération certains phénomènes pertinents, y compris leurs régimes, les mécanismes et les valeurs des paramètres, et peuvent être basés sur un large éventail d'hypothèses sujettes à l'incertitude. En outre, les conditions de fonctionnement et l'exploitation des systèmes changent constamment [Ouzraoui, 2014]. Dans ce cadre, l'incertitude a surtout été appréhendée dans un cadre purement probabiliste [Lannoy, 2010]. Cela revient à supposer que la connaissance sur les paramètres des modèles est toujours de nature aléatoire (variabilité). Cette approche consiste à représenter les paramètres incertains par des distributions de probabilité uniques et à transmettre l'incertitude relative à ces paramètres sur celle du risque encouru par la cible, en appliquant en général la technique de Monte Carlo. [Baudrit, 2005] Si cette approche est bien connue, toute la difficulté tient à une définition cohérente des distributions de probabilité affectées aux paramètres par rapport à la connaissance disponible.

L'information dont on dispose réellement est souvent plus riche qu'un intervalle mais moins riche qu'une distribution de probabilité. En pratique, l'information de nature aléatoire est traitée de manière rigoureuse par les distributions de probabilité classiques. Celle de nature imprécise est traitée de manière rigoureuse par des familles de distributions de probabilité définies au moyen de paires de probabilités cumulées hautes et basses ou, à l'aide de théories plus récentes, au moyen de distributions de possibilité (aussi appelées intervalles fous) ou encore au moyen d'intervalles aléatoires utilisant les fonctions de croyance de Dempster-Shafer.

Dans le cadre de ce travail; on s'intéresse au traitement des incertitudes épistémiques à l'aide d'analyse par la méthode de Monte Carlo.

2.1 Terminologie des informations imparfaites

2.1.1 Introduction

Les natures de l'imperfection de l'information sont divisées en trois types:

- a. *L'incertitude* concerne un doute sur la validité d'une connaissance ou le résultat d'un manque de connaissances. Celle-ci peut provenir d'une fiabilité relative de l'intermédiaire d'observation, peu sûr de lui ou susceptible de commettre des erreurs ou de donner intentionnellement des informations erronées, ou encore d'une difficulté dans l'obtention ou la vérification de la connaissance [Bouchon-Meunier, 1995].
- b. *L'imprécision* correspond à une difficulté dans l'énoncé de la connaissance, soit parce que les valeurs numériques des connaissances sont mal connues, soit parce que les termes du langage naturel sont utilisés pour qualifier une caractéristique du système de façon vague [Helton et Oberkampf, 2004].
- c. *L'incomplétude* présente une absence de connaissances sur les paramètres caractéristiques du système. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements ou à un problème au moment de la mesure de la connaissance [Dubois et Prade, 1994], [Dubois et al., 2004].

2.1.2 Notions d'incertitude

Différentes méthodes de classification des incertitudes et de leurs sources sont proposées. La distinction la plus courante étant de diviser les incertitudes en deux types : incertitude aléatoire et incertitude épistémique. Le premier étant irréductible et dû à la variabilité naturelle des phénomènes aléatoires. Le deuxième est dû à un manque de connaissances qui peut être réduit en faisant davantage d'efforts (recueil de données, consultation d'experts, essais accélérés, etc.).

L'objectif principal des études de fiabilité est de prédire, avec un certain degré de confiance, le comportement des défaillances d'une entité (composant/système) en fonction du temps [Aguirre et al., 2013]. Pour ce faire, les fiabilistes considèrent qu'il y a une variabilité naturelle dans le comportement des défaillances, c'est-à-dire, que la défaillance d'une entité est un phénomène purement aléatoire. Par conséquent, même si l'instant de défaillance d'une entité quelconque sera toujours inconnu, nous sommes capables d'attribuer une distribution de probabilité à la durée de vie de l'entité si nous maîtrisons la variabilité naturelle du phénomène de défaillance de l'entité. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible car souvent nous ne maîtrisons pas le caractère aléatoire des défaillances des entités.

Dans les analyses de risque, nous retrouvons une situation similaire. La différence réside dans le fait que dans l'analyse de risque nous nous intéressons à plusieurs facteurs alors que dans les analyses de fiabilité on s'intéresse uniquement aux phénomènes de défaillance et de réparation [Nozer D Singpurwalla, 2006]. Or souvent ces facteurs qui peuvent représenter par exemple des paramètres influençant les systèmes étudiés (température, pression, etc.) sont plus difficiles à identifier et on peut même se demander, parfois, s'ils ont vraiment un caractère aléatoire.

Ceci a amené la plupart des chercheurs [Enrico Zio, 2009], [Terje Aven, 2010] à faire une distinction entre les deux types d'incertitudes : aléatoires et épistémiques [Elisabeth Paté-Cornell, 1996], comme nous l'avons déjà signalé. Néanmoins, il existe d'autres classifications des incertitudes et de leurs sources. En effet, Blockley [Blockley, 2012] définit l'incertitude dans un espace orthogonal à trois dimensions: niveau flou, niveau d'incomplétude et niveau aléatoire.

Partant du constat que la théorie des probabilités classique confond les incertitudes aléatoires et épistémiques et modélise ces deux types par une seule distribution de probabilités [Aguirre et al., 2013], plusieurs travaux introduisant des méthodes autres que les méthodes probabilistes classiques ont été proposés pour traiter les différents types d'incertitudes. Ces théories présentent des cadres plus généraux pour traiter séparément les incertitudes aléatoires et épistémiques [Dubois et al. 2010]. Parmi ces alternatives, les plus utilisées dans l'analyse de fiabilité sont : les probabilités imprécises [LEV et al., 2010], la théorie des fonctions de croyances [SCHÖN et al., 2004], [SALLAK et al., 2012], [SALLAK et al., 2010], et la théorie des possibilités [SALLAK et al., 2008].

Néanmoins, certains auteurs considèrent encore que ces théories ne sont pas nécessaires et que la théorie des probabilités est le seul cadre théorique valable pour manipuler les incertitudes [Roger M. Cooke, 2004], [Daniel Warner North, 2010]. Ils estiment que le fait de considérer que les probabilités ne soient pas adaptées à tous les types d'incertitudes provient de la façon avec laquelle on interprète la probabilité. A partir d'un point de vue subjectif, la probabilité est une "description" de l'incertitude de l'analyste par rapport à un phénomène mal connu et non pas une description objective de la vraie variabilité du phénomène [Terje Aven, 2010]. En outre, ils considèrent que les axiomes des probabilités, notamment l'additivité, sont une conséquence naturelle de l'intuition et un pré-requis pour raisonner sous l'incertitude dans un cadre décisionnel alors que ces nouvelles théories relaxent l'axiome d'additivité. Or la validité de la non-additivité a été discuté à plusieurs reprises [Seamus Bradley, 2012].

- a. **Les incertitudes aléatoires** concernent les événements ou les phénomènes dont l'occurrence est considérée comme aléatoire ou stochastique. Les modèles probabilistes sont généralement utilisés pour décrire ces occurrences. D'après [LEDUY, 2011] [Winkler, 1996], les incertitudes aléatoires sont souvent liées aux quantités observables. Une autre terminologie «variabilité» est également utilisé pour désigner ce type d'incertitude [Stamatelatos, 2002].
- b. **Les incertitudes épistémiques**, quant à elles, sont liées à un manque de connaissances sur un phénomène, au niveau de confiance que des analystes ont dans le modèle lui-même, aux prédictions du modèle, etc. En théorie, elles peuvent être réduites voire éliminées par l'acquisition de connaissances supplémentaires. D'après [LEDUY, 2011] [Winkler, 1996], les incertitudes épistémiques sont associées à des quantités non observables.

Selon la définition de Hofer [Hofer, 1996], l'incertitude aléatoire apparaît du fait que nous ne pouvons pas donner une valeur unique à un événement aléatoire, mais plutôt une distribution de valeurs associées à des probabilités. L'incertitude épistémique quant à elle, est caractérisée comme une incertitude due au manque de connaissance sur des valeurs constantes mais mal connues. Du point de vue de l'analyse, le traitement de l'incertitude aléatoire répond à la

question «Que peut-il vraiment arriver et avec quelle probabilité ?» tandis que l'analyse de l'incertitude épistémique répond à la question «Quelle valeur est exacte ?» ou «Que savons-nous d'un problème donné et quelles connaissances supplémentaires pourraient réduire les doutes ?». Compte tenu de ces définitions, on peut résumer les caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques dans le tableau 2.1. Ainsi, les incertitudes aléatoires et épistémiques ont des caractéristiques très différentes. La distinction de ces deux types d'incertitudes joue un rôle important dans le choix de la modélisation et des moyens de les maîtriser. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons aux approches généralement utilisées pour modéliser ces deux types d'incertitude.

	Incertitude aléatoire	Incertitude épistémique
Critère de classification	Connaissances sur les lois gouvernant l'occurrence d'un événement, Degré de sensibilité aux conditions initiales ou aux environnements.	
Terminologie	Incertain irréductible, Observables, inhérente, stochastique et variabilité.	Incertain réductible, non observable, cognitive, associé à l'état de connaissance.
Source d'incertitude	Caractères aléatoires Variation d'un événement	Connaissance imprécise d'une quantité considérée comme fixe, représentations alternatives, de cette valeur mais mal connue.
Management d'incertitude	Irréductible	Réductible
But de l'analyse	Réponse à la question « Que peut –il vraiment arriver et avec quelle probabilité ? »	Réponse à la question « Quelle valeur est la plus représentative ? » Ou « Que savons-nous d'un problème donné et quelles connaissances supplémentaires pourraient réduire les dotes ? ».

Tableau 2.1 : Caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques.

2.1.3 Représentations numériques de connaissances imparfaites

Les principales théories numériques permettant de représenter les connaissances imparfaites et de raisonner à partir de celles-ci sont :

- les probabilités;
- les ensembles flous;
- les fonctions de croyance.

Dans les représentations probabilistes, le langage est constitué de distributions de probabilités sur un référentiel. Elles permettent de prendre en compte de manière rigoureuse des incertitudes aléatoires ou stochastiques ; 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 [Rabah, 2013]. Il est plus difficile de rendre compte des autres formes d'imperfections, à la fois formellement et sémantiquement. L'inférence bayésienne, souvent utilisée en fusion dans les domaines qui nous intéressent, permet un raisonnement abductif [Delcroix, et al., 2014] [Isabelle, 2004].

La théorie des fonctions de croyances repose sur un langage défini par des fonctions sur l'ensemble des parties du référentiel. Les représentations permettent de tenir compte à la fois de l'imprécision et de l'incertitude (y compris sous sa forme subjective), de l'ignorance, de l'incomplétude, et donnent accès au conflit. L'inférence par la règle de Dempster réalise une agrégation de type conjonctif des informations combinées.

Dans la théorie des ensembles flous, le langage est formé de sous-ensembles flous du référentiel ou de distributions de possibilité sur celui-ci. Il permet de représenter des informations qualitatives, imprécises, vagues. L'inférence se fait par des règles logiques (ou leur équivalent sous forme numérique), réalisant essentiellement un raisonnement de type déductif, pouvant être qualitatif.

2.1.4 Niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques [E. Elisabeth, 1996]

Les décisions de gestion des risques industriels sont souvent faites et ont été prises pour une longue période sans une spécifique analyse. L'analyse est extrêmement utile parce que le problème est complexe et l'information doit être structurée. Différents degrés de sophistication dans l'évaluation des risques peuvent être envisagés en fonction des possibilités de la décision, sur la règle de gestion que l'on entend appliquer, sur l'ampleur des résultats, et sur les probabilités de ces résultats. Les niveaux de traitements de l'incertitude sont présentés ci-dessous :

- *Niveau 0 : identification des dangers et non détection des modes de défaillances*

Il implique la détection d'un danger potentiel ou les différentes façons dont un système peut échouer, sans chercher à évaluer le risque en aucune façon quantitative. Cette approche est suffisante de soutenir la politique de risque zéro, et ou de prendre des décisions de gestion des risques lorsque les coûts sont bas et la décision est claire.

- *Niveau 1 : Approche « Worst- Case »*

Le niveau 1 est l'approche «pire cas». Elle n'implique aucune notion de probabilité. Il est basé sur l'accumulation des hypothèses les plus pessimistes et leurs rendements, en théorie, le niveau de perte maximale est raisonnable si la pire perte est suffisante pour soutenir la décision.

- *Niveau 2 : Limites supérieur de plausibilité (Quasi – worst case)*

Le niveau 2 implique «limites supérieures plausibles». Cette analyse constitue une tentative d'obtenir une évaluation des pires conditions possibles qui peuvent être «raisonnablement» attendu :

- Quand il y a une certaine incertitude quant à la possibilité des pires de cas;
- Lorsque le pire des cas est donc peu probable (ou peu fréquent) qu'il est dénué de sens.

L'exemple typique de ces approches est le tremblement de terre maximum crédible «grand» magnitude.

▪ Niveau 3 : Meilleures estimations / valeurs centrales

Le niveau 3 s'appuie sur la notion de la meilleure estimation et / ou sur la valeur centrale des résultats d'une distribution. Il est actuellement l'une des directions dans lesquelles les législateurs et les organismes gouvernementaux semblent se diriger (types d'informations, y compris les effets des incertitudes) pour une évaluation plus réaliste des risques pour la santé que par les limites supérieures plausibles seuls.

▪ Niveau 4 : Evaluation probabilistes des risques

Le niveau 4 est basé sur le processus probabiliste d'analyse des risques (QRA évaluation quantitative des risques). Dans sa forme la plus simple, la QRA peut être effectuée pour obtenir une distribution des probabilités des différents états du système fondés sur les meilleures estimations des modèles et des valeurs de paramètres. Sous cette forme, le modèle n'implique que les incertitudes aléatoires. La QRA permet également la représentation d'un risque, non pas par une seule estimation ponctuelle des résultats ou même une distribution des états de système, mais par une distribution complète des pertes potentielles, y compris les incertitudes épistémiques et aléatoires.

▪ Niveau 5 : Evaluation probabilistes des risques, multiples courbes de risques

Le Niveau 5 permet de visualiser les incertitudes sur des hypothèses fondamentales d'une famille de courbes. Cela peut se faire de plusieurs façons, y compris le traitement statistique des données existantes (inférence bayésienne). Une autre approche consiste à demander à un groupe d'experts de fournir une évaluation du risque en fonction de leur modèle préféré, et sur leur évaluation de la distribution des valeurs de paramètres ont donné ce modèle. Cet ensemble des courbes de risque (un pour chaque expert) peut alors être affiché sans essayer d'agrégier les résultats à travers des experts ou d'évaluer les probabilités des hypothèses fondamentales sur lesquelles ils reposent.

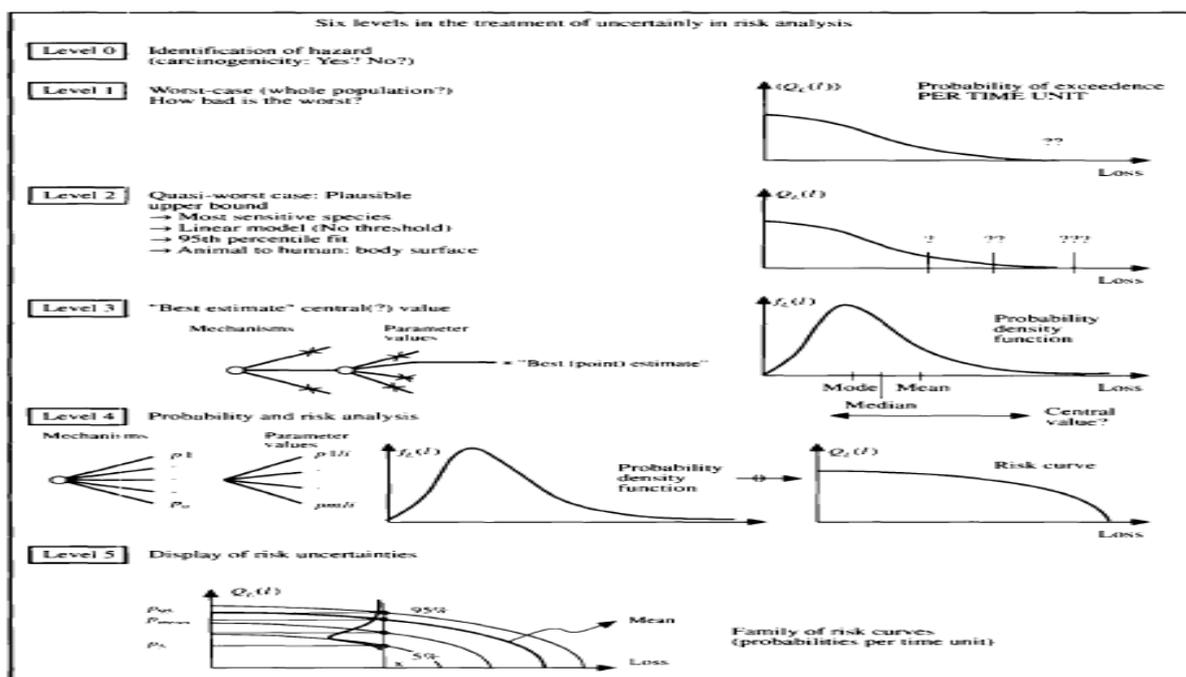


Figure 2.1 : Niveau de traitements des incertitudes [M. Elisabeth, 1996].

2.2 Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis

2.2.1 Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est une méthode d'approximation, au sens statistique du terme consiste à effectuer un nombre croissant d'essais (tirage) jusqu'à ce que les différents résultats d'intérêt soient stabilisés au sens statistique. Il n'y a pas de définition précise de ce qu'est une technique de type Monte-Carlo, mais la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce type se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur le calcul d'une valeur numérique. La réponse fournie sera une réponse statistique, de type « la valeur cherchée I se trouve très probablement (par exemple avec une probabilité au moins égale à 0, 95) dans l'intervalle de confiance I_1, I_2 [» [Céline et *al.*, 2013]. La précision est mesurée par la taille $I_2 - I_1$ de l'intervalle de confiance. Si on utilise n points échantillonnés de manière indépendante, la méthode converge en 0. La méthode de Monte-Carlo est le seul outil capable de donner une réponse en un temps raisonnable).

2.2.1.2 Définition :

Le terme **méthode Monte-Carlo**, désigne toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoire, c'est-à-dire des techniques probabilistes [Christian et George, 2010].

Selon [Smidts, 1997] et [Kalos et Whitlock, 1986] : « *il s'agit de toute méthode qui met en œuvre l'utilisation de nombre aléatoire dans un calcul qui a la structure d'un processus stochastique. Par processus stochastique, nous entendons une séquence d'états dont l'évolution est déterminée par des événements aléatoires* ».

2.2.1.2 Nombre d'essai de la méthode de Monte Carlo

C'est le nombre d'évaluations de modèle à faire, a besoin d'être sélectionné. Il peut être choisi a priori, auquel cas il n'y aura pas de contrôle direct sur la qualité des résultats numériques fournis par Monte Carlo.

On note qu'une valeur de tirage $N=10^6$ est souvent prévue pour fournir un intervalle de couverture de 95% [JCGM 101, 2008].

2.2.1.3 Description de la méthode

Pour utiliser la méthode de Monte-Carlo, on doit tout d'abord mettre sous la forme d'une espérance la quantité que l'on cherche à calculer. C'est souvent simple (calcul d'intégrale par exemple) mais peut-être plus compliqué (équations aux dérivées partielles par exemple). Les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo sont illustrées à la figure 2.2.

A l'issue de cette étape, il reste à calculer une quantité de la forme $E(X)$, c'est-à-dire l'espérance de la variable aléatoire X . Pour calculer $E(X)$, il convient de savoir simuler une variable aléatoire selon la loi de X . On dispose alors d'une suite $(X_i)_{1 \leq i \leq N}$ de N réalisations de la variable aléatoire X . On approxime alors $E(X)$ par :

$$E(X) \approx \frac{1}{N}(X_1 + \dots + X_N) \quad (2.1)$$

Application au cas du calcul d'une intégrale : on cherche à calculer :

$$I = \int_{[0,1]^d} f(u_1, \dots, u_d) du_1 \dots du_d \quad (2.2)$$

1. Mise sous forme d'espérance : on pose $X = f(U_1, \dots, U_d)$ où U_1, \dots, U_d sont des réalisations de la loi uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$, alors

$$E(X) = E(f(U_1), \dots, U_d) = I. \quad (2.3)$$

2. Simulation de la variable aléatoire : on suppose que l'on dispose d'une suite $(U_i)_{i \geq 1}$ de réalisations de la loi uniforme sur $[0, 1]$. On pose alors $X_1 = f(U_1, \dots, U_d)$, $X_2 = f(U_{d+1}, \dots, U_{2d})$, etc. Alors les (X_i) sont des réalisations de la variable aléatoire X et :

$$I \approx \frac{1}{N}(X_1 + \dots + X_N) \quad (2.4)$$

Remarque : cette méthode est facilement programmable, et ne dépend pas de la régularité de f (on lui demande juste d'être mesurable).

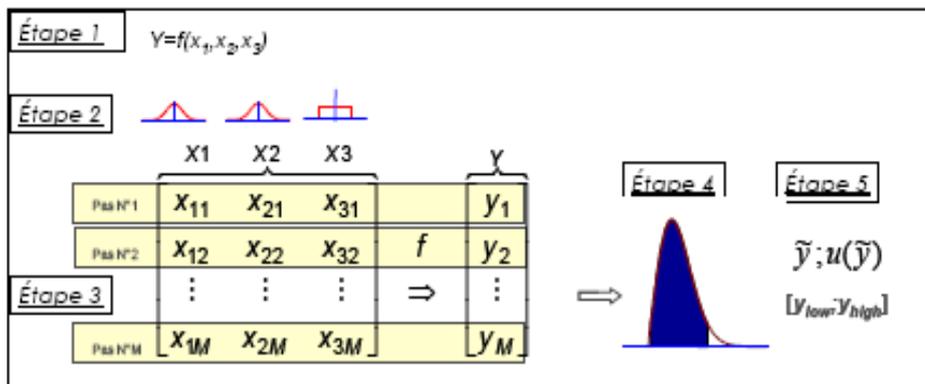


Figure 2.2 : les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo [Désenfant, 2007]

2.2.2 L'incertitude statistique dans la méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est largement utilisée pour effectuer l'étude de l'incertitude. Cette technique est devenue le standard pour les industriels dans l'étude de propagation des incertitudes [Innal et al., 2013][NASA, 2002].

L'ensemble du processus d'évaluation de l'incertitude pourrait être divisé en deux parties: analyse et propagation de l'incertitude (UA) et l'analyse de sensibilité (SA).

L'évaluation des incertitudes permet à un modèle utilisateur d'être mieux informés sur la confiance qui peut être placée dans les résultats du modèle [EPA, 2009].

Le résultat de Monte Carlo peut être vue comme un ensemble (ou un échantillon) de valeurs numériques aléatoires [Smidts, 1997] [Lux et Koblinger, 1991]

Considérons un échantillon de taille N constitué d'observations indépendantes aléatoires $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N$. d'une variable aléatoire μ . Nous supposons que cette variable aléatoire est fonction de t , avec distribution de densité $\varphi(t)$. La signification de t est général ici, elle représente une variable par lesquels tous processus stochastiques peuvent être paramétrisé.

L'espérance mathématique et la variance de μ sont définis par :

$$\langle \mu \rangle = \int \mu(t) \varphi(t) dt \quad (2.5)$$

$$\langle \sigma_\mu^2 \rangle = \langle \mu^2 \rangle - \langle \mu \rangle^2$$

Si l'espérance mathématique $\langle \mu \rangle$ est estimé à partir de la moyenne arithmétique des N observations, c'est-à-dire par :

$$\langle \mu \rangle \approx \bar{\mu}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (2.6)$$

Alors selon le théorème central limite, la moyenne $\bar{\mu}_N$ s'approche de l'espérance mathématique $\langle \mu \rangle$ avec une probabilité qui tend vers l'unité quand la taille de l'échantillon augmente ($N \rightarrow \infty$). Plus précisément :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P \left\{ a \leq \frac{\bar{\mu}_N - \langle \mu \rangle}{\sigma_\mu} \sqrt{N} \leq b \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (2.7)$$

Où $P\{x\}$ est la probabilité que l'expression X soit vérifiée. La relation (2.7) exprime que la variable aléatoire (moyenne des N $\bar{\mu}_N$ observations indépendantes de la variable aléatoire μ d'espérance mathématique et de variance finies) est distribuée selon une densité qui s'approche d'une normale $N(0, 1)$. Quand $a = -1$ et $b = 1$ dans (2.7). La probabilité que :

$$|\bar{\mu}_N - \langle \mu \rangle| > \frac{\sigma_\mu}{\sqrt{N}} \quad (2.8)$$

est d'environ 32%. La probabilité que la différence entre la moyenne et l'espérance mathématique dépasse est égale $3\sigma_\mu/\sqrt{N}$ seulement à 0.27%.

Nous appellerons la quantité σ_μ/\sqrt{N} l'incertitude statistique associée à l'estimation (2.6) de la grandeur $\langle \mu \rangle$.

L'écarttype σ_μ (comme l'espérance mathématique $\langle \mu \rangle$ et les moments d'ordre supérieur) peut aussi être estimé à partir de l'échantillon des N observation à l'aide de l'estimateur non biaisée suivant :

$$S_\mu = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_i - \bar{\mu}_N)^2} \quad (2.9)$$

Cet estimation est non biaisé car $\langle S_\mu^2 \rangle = \sigma_\mu^2$ L'écart type de la moyenne de l'échantillon est la variable aléatoire définie par : $\bar{\mu}_N$

$$S_{\mu} = \frac{S_{\mu}}{N} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \left[\sum_{i=1}^N \mu_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n \mu_i \right)^2 \right]} \quad (2.10)$$

C'est un estimateur de l'incertitude statistique σ_{μ}/\sqrt{N} . La forme (2.10) est celle utilisée lors des simulations numériques pour estimer l'incertitude statistique de $\langle \mu \rangle$, elle ne nécessite que la mémorisation des sommes des observations et de leur carré.

A partir de la notion d'incertitude statistique nous pouvons déjà énoncer les propriétés suivantes des méthodes Monte Carlo :

- L'incertitude statistique σ_{μ}/\sqrt{N} est associée à l'erreur d'une méthode Monte Carlo. C'est une convergence lente par rapport à d'autres méthodes numériques pour des problèmes de dimensions faibles.
- L'erreur peut être diminuée en réduisant σ_{μ} c'est le but des méthodes de réduction de variance qui agissent sur la définition des « processus stochastiques ».

2.2.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité (AS) étudie comment la variation de la sortie d'un modèle peut être attribuée aux variations des différents paramètres. L'analyse de sensibilité d'un modèle permet d'améliorer la compréhension du comportement du modèle, c'est-à-dire comment le modèle va réagir par rapport aux paramètres d'entrée, la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente et la manière dont les différentes parties du modèle interagissent.

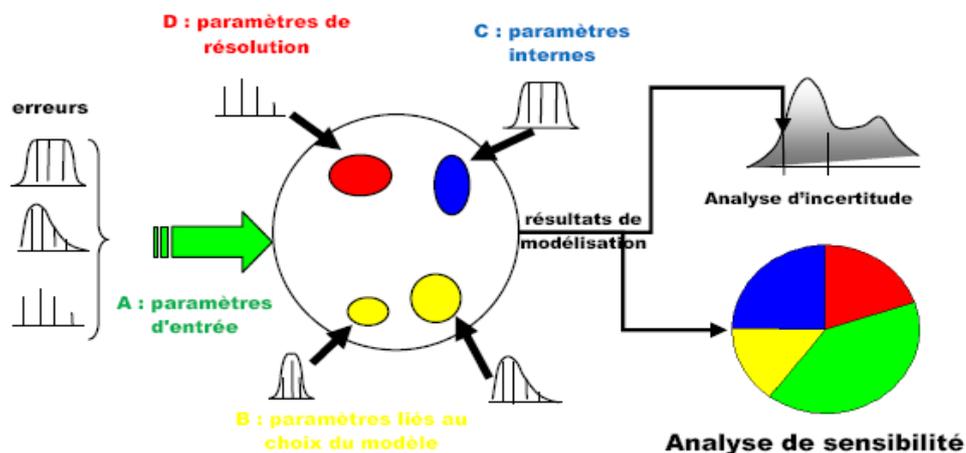


Figure 2.3: Démarche d'analyse de sensibilité [Saltelli, 2006]

D'après Saltelli [Saltelli et al, 2004], les résultats de l'AS peuvent :

- ✓ fournir des éléments pour approfondir l'étude des paramètres les plus influents sur la réponse du modèle ;
- ✓ faire ressortir des zones critiques dans l'espace d'entrée qui génèrent des sorties irréalistes ;
- ✓ aider à simplifier le modèle en négligeant les paramètres les moins influents du modèle ;

- ✓ donner des arguments pour prendre une décision politique.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité selon le domaine d'application et le niveau de complexité du système. Il existe trois catégories de méthode [Saltelli et al, 2004]:

- ✓ les méthodes de criblage ou « screening » ;
- ✓ les méthodes d'analyse de sensibilité locale ;
- ✓ les méthodes d'analyse de sensibilité globale.

2.2.3.1 Méthodes de criblage ou « screening »

Les méthodes de « screening » analysent qualitativement l'importance des variables d'entrée sur la variabilité de la réponse du modèle [Pandya, 2009][Bettonvil et Kleijnen, 1997][Campolongo et Braddock, 1999] [Deana et Lewis, 2002] [Morris, 2006]. L'objectif de ces méthodes est, dans un premier temps, d'isoler les paramètres qui sont très influents sur les résultats et donc, de réduire le nombre de paramètres à analyser avec des méthodes plus sophistiquées et/ou plus coûteuses. Ces méthodes sont souvent appliquées dans le cas où le modèle contient un nombre considérable de paramètres d'entrée et nécessite un temps de calcul très élevé.

2.1.3.2 Méthodes d'analyse de sensibilité locale

Les méthodes d'analyse de sensibilité locale reposent sur le calcul d'un indice de sensibilité représentant les variations d'une sortie du modèle suite à une faible variation d'un paramètre d'entrée [Turányi et Rabitz, 2004]. A chaque paramètre d'entrée est attribuée une valeur nominale de référence. L'analyse de sensibilité s'effectue en faisant varier la valeur de référence d'un paramètre d'entrée en fixant tous les autres paramètres d'entrée à leur valeur nominale.

Cette manière de procéder ne modifier la valeur que d'un paramètre d'entrée à la fois et ne permet aux analyses de sensibilité locale que de couvrir une partie de l'espace d'entrée, en excluant toute interaction entre paramètres. L'estimation de l'indice de sensibilité S_i par rapport au paramètre x_i , par une méthode OAT (« One-At-a-Time ») [Bubbico et Mazzarotta, 2008] [Nair et al., 1997] est définie par :

$$S_i^L = \frac{\partial y}{\partial x_i} (x_1^0, \dots, x_p^0) \quad (2.11)$$

Où y est une sortie, x_i est un paramètre d'entrée et l'exposant 0 symbolise la valeur nominale.

2.2.3.3 L'analyse de sensibilité globale

L'analyse de sensibilité globale permet de quantifier l'influence des différents paramètres d'entrée sur la variabilité de la réponse d'un modèle numérique. Elle permet de déterminer les variables qui contribuent le plus à la variabilité de la réponse du modèle, les variables les moins influentes et les variables qui interagissent avec les autres.

Ces méthodes prennent en compte la densité de probabilité de chaque variable d'entrée et traitent la variation de tous les paramètres simultanément.

2.2.3.4 Indices de sensibilité

a. L'indice de sensibilité du 1^{er} ordre est donné par l'équation suivante :

$$S_i = \frac{V(E(Y/X_i))}{V(Y)} = \frac{V_i}{V(Y)} \quad (2.12)$$

Où $V(Y)$ = variance totale de la sortie Y

$V(E(Y/X_i))$ = variance de l'espérance conditionnelle de Y par rapport à X_i .

Cet indice quantifie la sensibilité de la sortie Y par rapport au paramètre d'entrée X_i , ou encore la part de variance de Y imputable au paramètre X_i .

L'indice de sensibilité du 1er ordre représente l'influence « directe » de la variation du paramètre X_i sur Y .

b. L'indice de sensibilité de 2^{ème} ordre est défini par :

$$S_{ij} = \frac{V(E(Y/X_i, X_j)) - E(Y/X_i) - E(Y/X_j)}{V(Y)} = \frac{V_{ij}}{V(Y)} \quad (2.13)$$

Cet indice exprime la part de la variance de Y imputable à l'interaction croisée de X_i et de X_j , sans prendre en compte l'effet des variables seules.

L'interprétation de ces indices est assez facile puisque leur somme est égale à 1 et leurs valeurs sont toujours positives. Plus l'indice est grand (proche de 1), plus le paramètre a de l'importance. [Pandya, 2009]

c. **Indice de sensibilité total** : D'après Homma et Saltelli [Homma et Saltelli, 1996] ont introduit des indices de sensibilité totaux, qui expriment la sensibilité totale de la variance Y à un paramètre, c'est-à-dire la sensibilité à ce paramètre sous toutes ses formes (sensibilité au paramètre seul et sensibilité aux interactions de ce paramètre avec d'autres paramètres).

L'indice de sensibilité total S_{Ti} au paramètre X_i est défini comme la somme de tous les indices de sensibilité relatifs à la variable X_i :

$$S_{Ti} = S_i + S_{i2} + S_{i3} + \dots + S_{23} + \dots \quad (2.14)$$

Donc, pour p paramètres d'entrée, il y a p indices de sensibilité totaux.

L'utilisation et l'interprétation de ces indices de sensibilité totaux est plus simple, du fait de leur nombre plus faible. [Pandya, 2009].

2.2.3.5 Indicateurs classiques d'analyses de sensibilité

Le but de l'analyse d'incertitude est de déterminer l'incertitude des estimations des variables d'intérêt, [Saltelli, et al., 2000]. En outre le but de l'analyse de sensibilité est de déterminer les relations entre l'incertitude dans les variables indépendantes et l'incertitude dans les variables dépendantes qui en résultent.

a. Analyse de régression : la majorité de mesures quantitatives de sensibilité sont fondées sur une analyse de régression. Un échantillon multiple de l'entrée x est généré par une certaine stratégie d'échantillonnage (dimension de $m \times k$), et la séquence correspondante de valeurs de sortie de m est calculée en utilisant le modèle en cours d'analyse. Si un modèle de régression linéaire est demandé de forme :

$$y_i = b_0 + \sum_j b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2.15)$$

Avec $y = 1, \dots$, sont les valeurs de sortie du modèle,

$b_j = 1, \dots, k$ (k étant le nombre de variables d'entrée) sont les coefficients qui doivent être déterminés et ε est l'erreur (résiduelle) en raison de l'approximation. Pour de déterminer les coefficients b_j la méthode des moindres carrés seront la plus performante ; où ils sont déterminés par la fonction :

$$F(\mathbf{b}) = \sum_i \varepsilon_i^2 \quad (2.16)$$

Une fois les coefficients b_j sont calculés, ils peuvent être utilisés pour indiquer l'importance de variables d'entrée individuels x par rapport à l'incertitude de la sortie y . En fait, en supposant que b_j a été calculée, le modèle de régression peut être réécrit sous la forme :

$$(y - \bar{y}) / \hat{s} = \sum_j (b_j \hat{s}_j / \hat{s})(x_{ij} - \bar{x}_j) / \hat{s}_j \quad (2.17)$$

Avec :

$$\bar{y} = \sum_i y_i / m, \quad \bar{x}_j = \sum_i x_{ij} / m \quad (2.18)$$

$$\hat{s} = \left[\sum_i (y_i - \bar{y})^2 / (m-1) \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

$$\hat{s}_j = \left[\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (m-1) \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

Les coefficients $b_j \hat{s}_j / \hat{s}$ sont appelés coefficients de régression standardisé (*Standardised Regression Coefficients SRC*). Ceux-ci peuvent être utilisés pour l'analyse de sensibilité (lorsque les x sont indépendants), car elles permettent de quantifier l'effet de la variation de chaque entrée variable loin de sa moyenne par une fraction fixe de sa variance tout en maintenant les autres variables à leurs valeurs attendues.

Lors de l'utilisation de la SRC, il est également important de considérer le coefficient de modèle de détermination :

$$R_y^2 = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.21)$$

Avec :

R_y^2 : est la mesure du modèle linéaire de régression basé de la SRC de sortie réelle y .

\hat{y}_i : est l'estimation obtenue à partir du modèle de la régression.

R_y^2 : représente la fraction de la variance de la sortie expliquée par la régression. Plus proche à l'unité, meilleure est la performance du modèle.

b. Mesures de corrélation : Une autre mesure d'importance du variable est donnée par les coefficients de corrélation partielle (*Partial Correlation Coefficients ; PCC*). Ces coefficients sont basés sur les concepts de la corrélation et de la corrélation partielle. Pour une séquence de (x_{ij}, y_i) observations, la corrélation $r_{x_j y}$ entre la variable d'entrée X_j et la sortie Y est définie par :

$$r_{x_j y} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{\left[\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (2.22)$$

Avec :

$$\bar{y} = \sum_i y_i / m \quad \text{Et} \quad \bar{x}_j = \sum_i x_{ij} / m$$

Le coefficient de corrélation $r_{x_j y}$ est la mesure linéaire entre l'interaction X_j et Y . Le coefficient de corrélation partielle entre la grandeur de sortie Y et la variable d'entrée X_j est obtenu à partir l'utilisation d'une séquence de modèles de régression.

Les deux modèles suivants sont construits

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{h \neq j} b_h x_h \quad \text{et} \quad \hat{X}_j = c_0 + \sum_{h \neq j} c_h x_h \quad (2.23)$$

Les résultats de ces deux régressions sont utilisés pour définir la nouvelle variables $Y - \hat{Y}$ et $X_j - \hat{X}_j$. Le coefficient de corrélation partielle entre Y et X_j est défini comme le coefficient de corrélation entre $Y - \hat{Y}$ et $X_j - \hat{X}_j$.

En d'autres termes, PCC donne la corrélation entre Y et X_j

En particulier PCC fournir une mesure de l'importance des variables qui tend à exclure les effets des autres variables. Toutefois, dans le cas particulier où les variables d'entrée ne sont pas corrélées, l'ordre d'importance variable basé soit sur SRC ou de PCC de (leurs valeurs absolues) est exactement le même.

2.2.3.6 Méthodes d'estimation des indices de sensibilité globale

Les indices de sensibilité globale peuvent parfois être calculés formellement lorsque la forme analytique du modèle et les densités de probabilité des paramètres d'entrée sont connues et relativement simples. Le plus souvent, le modèle étant très complexe ou la forme analytique étant inconnue, nous ne pouvons pas calculer les indices de sensibilité et il est alors nécessaire de les estimer [Pandya, 2009]. L'estimation de ces indices est faite par des méthodes stochastiques telles que FAST ou Sobol. Ces deux méthodes sont basées sur le même principe de décomposition de la variance.

On considère le modèle :

$$Y = f(X_1, \dots, X_p)$$

où Y est la réponse du modèle et $[X_1, \dots, X_p]$ sont des p paramètres d'entrée du modèle. Ces deux méthodes sont basées sur l'hypothèse que les paramètres d'entrée sont indépendants [Xu and Gertner, 2007a].

a. Méthode de Sobol

Cette méthode est basée sur l'évaluation des intégrales multidimensionnelles pour estimer la décomposition de fonction f [Sobol, 1993]. La méthode de Monte Carlo avec échantillonnage aléatoire des paramètres d'entrée X est la méthode de base pour calculer ces intégrales. Il existe diverses méthodes d'échantillonnage permettant d'améliorer la vitesse de convergence comme les échantillonnages Quasi-Monte Carlo, les méthodes pseudo-probabilistes (échantillonnage stratifié ou par hypercube latin (LHS)).

L'échantillonnage stratifié consiste à découper l'espace des variables d'entrée en petits espaces disjoints, puis à échantillonner au sein de chacun de ces sous espaces.

L'échantillonnage *LHS* est basé sur le même principe, en s'assurant que le découpage a défini des espaces équiprobables, et que chaque espace est bien échantillonné ; le quadrillage se fait dans le cube unité, pour un tirage aléatoire d'échantillon uniforme, puis ces échantillons sont transformés via la fonction de répartition inverse. Les méthodes de Quasi-Monte Carlo sont des versions déterministes des méthodes de Monte Carlo. Ces méthodes définissent des séquences d'échantillons déterministes qui ont une répartition uniforme dans l'espace des variables d'entrée.

b. Méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)

Cette méthode [Cukier et al., 1973] utilise la transformée de Fourier multidimensionnelle de f pour obtenir une décomposition de la variance de Y [Saltelli et al., 2005] [Xu et Gertner, 2007b]. Le principe de cette méthode est de remplacer les décompositions multidimensionnelles par des décompositions unidimensionnelles le long d'une courbe parcourant l'espace d'entrée $[0,1]^p$.

Cette courbe est définie par un ensemble d'équations paramétriques :

$$X_i(s) = g_i(\sin(\omega_i s)) \text{ pour } i = 1, \dots, p$$

Où g_i sont des fonctions à déterminer, permettant un recouvrement uniforme de $[0, 1]^p$ et où $(\omega_1, \dots, \omega_p)$ est un ensemble de fréquences entières linéairement indépendantes.

L'estimation des indices de sensibilité nécessite de définir les fonctions g_i et les fréquences ω_i utilisées et d'effectuer l'évaluation du modèle avec un nombre suffisant de cas pour calculer les intégrales. Pour le choix des fonctions g_i , plusieurs possibilités ont été proposées. Saltelli et al. [Saltelli et al., 1999] définissent ces fonctions par :

$$x_i(s) = g_i(\sin(\omega_i s)) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s)) \quad (2.24)$$

Où $s \in [-\pi, \pi]$ qui sont celles qui recouvrent le mieux l'espace $[0, 1]^p$ en respectant une distribution uniforme des échantillons.

2.2.2 Théorie des sous ensembles flous (Fuzzy Logic)

La théorie des ensembles flous date depuis 1965. L'idée de la théorie a été induite par le professeur Lotfi Zadeh dans le cadre de manipuler les informations exprimées en langage naturel [Zadeh, 1965]. La théorie des ensembles classiques est basée sur une proposition qui soit vraie ou fautive [Zadeh, 1968]. En théorie des ensembles flous une proposition peut être partiellement vraie et fautive. Cette théorie est considérée comme étant le seul cadre dans lequel puissent être traitées des connaissances numériques et des connaissances exprimées symboliquement par des qualifications du langage naturel [Bouchon-meunier, 1995].

Soit X un ensemble référentiel et soit x un élément de X . On appelle un « ensemble flou » \tilde{A} de U un sous ensemble de E caractérisé par une fonction $\mu_A(x)$ qui prend ses valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$. Cette fonction dite « d'appartenance », donne le « degré d'appartenance » de x dans \tilde{A} . Un ensemble ordinaire est un cas particulier d'un ensemble flou ($\mu_A(x)$ ne prend que 0 ou 1) [Ouzraoui, 2014] [Rabah, 2013] [Bourarache, 2009] [Zadeh, 1965]. Formellement, \tilde{A} peut s'écrire comme :

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x)) / x \in E\}. \quad (2.25)$$

Le noyau de \tilde{A} représente l'ensemble des éléments qui appartiennent complètement à l'ensemble flou \tilde{A} , tel que

$$\tilde{A} : \{x \in \Omega / \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\}. \quad (2.26)$$

Le support de \tilde{A} est défini par les éléments pour lesquels le degré d'appartenance n'est pas nul. Si le noyau de \tilde{A} est non vide, \tilde{A} est dite normalisé [Mechri, 2011].

On appelle « nombre flou » tout ensemble flou \tilde{A} de référentiel l'ensemble R des nombres réels et possédant les deux propriétés suivantes [Dubois et Prade, 1988] (Figure 2.4)

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

Un intervalle flou généralise un nombre flou sous forme d'intervalle (Figure 2.5). la représentation paramétrique d'un intervalle flou s'écrit :

$$\tilde{A} = (\alpha_1, [\alpha_2, \alpha_3], \alpha_4). \quad (2.27)$$

A noter un intervalle flou est un outil adapté à la représentation des quantités imprécises [Kaufman, et al., 1991].

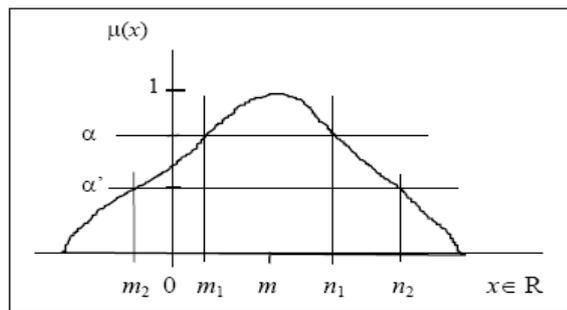


Figure 2.4: Exemple d'un nombre flou.

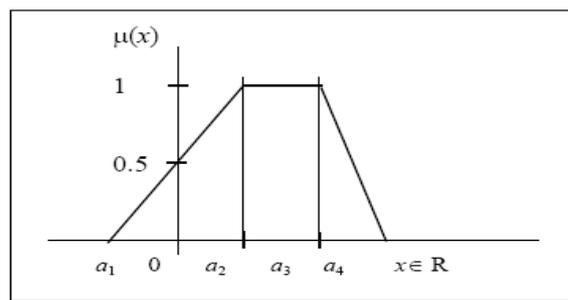


Figure 2.5 : Intervalle flou trapézoïdal.

Un nombre flou peut être caractérisé par un intervalle de confiance à un certain niveau α . En effet, si on considère un nombre flou \tilde{A} de fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$, en utilisant la méthode des α -coupes, on obtient une série d'intervalles emboîtés. Les termes $A_L^{(\alpha)}$ et $A_R^{(\alpha)}$ représentent respectivement les limites gauche et droite de la fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$ à chaque α -coupes [Dubois et al, 2004], [Sallak, 2007].

2.2.3 Théorie des fonctions de croyance (DST)

La théorie de *Dempster-Shafer* où théorie des fonctions de croyance fournit des outils mathématiques permettant à la fois de traiter de l'information de nature aléatoire et imprécise [Dempster, 1967], [Baudrit, et al., 2007]. Les informations sont alors représentées comme des masses (poids de probabilité) affectées à des intervalles.

L'ensemble de la connaissance est synthétisé par une distribution de masse appelée aussi fonction de croyance. Toute distribution de probabilité et toute distribution de possibilité peuvent être représentées à l'aide d'une telle fonction ce qui a pour avantage de travailler dans un cadre commun pour traiter l'information quelle que soit sa nature aléatoire ou imprécise [Mecheri, 2011] [Baudrit et al., 2007].

La théorie de Dempster (1966-1968), complétée par les propositions Shafer en 1974, a donné naissance à un modèle mathématique de croyance connue sur le nom de la théorie de l'évidence. Cette théorie est un modèle d'inférence statistique qui généralise l'inférence Bayésienne et qui connaît des applications diverses telles que la modélisation des incertitudes dans les systèmes experts.

Elle permet de représenter explicitement, à partir d'outils mathématiques, l'incertitude liée aux connaissances (tels que l'avis des experts sur le degré de croyance que la PSV sera ouvert sur 5 sollicitations continu pendant 05 jours). Par cette méthode l'on peut modéliser le degré de croyance, notion « de croyance » qui se révèle particulièrement efficace lors de la combinaison de différents points de vue.

En résumant que la théorie DST est une théorie mathématique basée sur la notion de preuves [Shafer, 1976] en utilisant les *fonctions de croyance* et le *raisonnement plausible*. Le but de cette théorie est de permettre de combiner des preuves distinctes pour calculer la probabilité d'un évènement. [Zadeh, 1986]

La fonction de croyance $Bel(A)$ (croyance que la vérité est dans A) est par conséquent la somme des masses des propositions incluses dans A. Elle est définie par la formule suivante :

$$Bel(A) = \sum_{B_i \subset A} m(B_i) \quad (2.28)$$

La fonction de plausibilité $Pl(A)$ (la plausibilité que la vérité est dans A) est la somme de des masses des propositions dont l'intersection avec A n'est pas nulle, elle est donnée par la formule :

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B_i} m(B_i). \quad (2.29)$$

2.3 Procédure de calcul de la fréquence d'accident via la méthode Nœud Papillon

Dans le cadre de ce mémoire, nous proposons d'évaluer les incertitudes liées au calcul de la fréquence accidentelle. A cet effet, la méthode du nœud de papillon a été mise en œuvre.

Le Nœud Papillon est une approche arborescente développée par SHELL. Il permet de considérer une approche probabiliste dans le management du risque [Mazouni, 2008]. Le nœud papillon est une connexion d'un arbre de défaillances (AdD) et d'un arbre d'évènements (AdE), généralement établie lorsqu'il s'agit d'étudier des évènements hautement critiques.

Le point central du Nœud Papillon est l'Évènement Redouté Central. Généralement, ce dernier désigne une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche sert à identifier les causes de cette perte de confinement, tandis que la partie droite du nœud s'attache à déterminer les conséquences de cet évènement redouté central [INERIS-DRA, 2003] [Joly & Vallee, 2004].

Chaque scénario d'accident est relatif à un évènement redouté central et est représenté à travers un chemin possible allant des évènements indésirables ou courants jusqu'à l'apparition des effets majeurs.

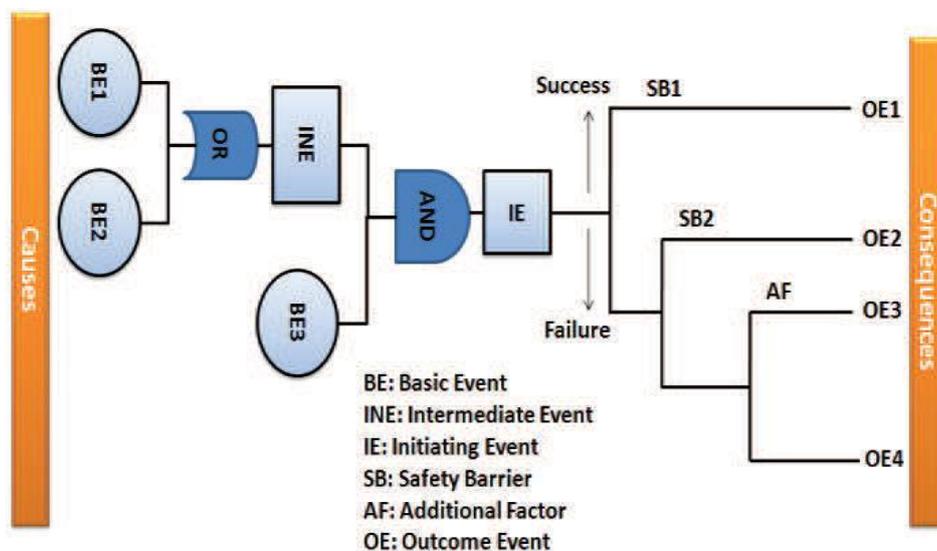


Figure 2.6 exemple d'un schéma de nœud de papillon [Innal, al., 2013].

Le nœud papillon permet d'avoir une vision globale des scénarios d'accident en mettant en exergue leurs causes, les liens logiques existant entre elles et les barrières de sécurité. La modélisation graphique des séquences accidentelles proposée par cet outil en fait un support adapté pour l'étape d'estimation probabiliste.

Les événements initiateurs peuvent être des agressions externes ou des défaillances du système étudié. Par exemple, le vieillissement des matériaux, le choc d'embâcles, la défaillance humaine lors d'une manœuvre, la non ouverture de clapets ou encore le séisme, la foudre, l'avalanche ...

Du point de vue pratique, les nœuds papillon mobilisent des méthodes spécifiques des arbres de défaillances et d'événements, et sont réalisés en groupe de travail. Ils permettent de visualiser :

- les scénarios susceptibles de conduire à des accidents majeurs ;
- les mesures de maîtrise des risques ;
- en conséquence directe des deux points précédents, les chemins critiques ne présentant pas suffisamment de mesures de maîtrise du risque.

Une fois que la structure nœud de papillon a été établie, par la suite une analyse probabiliste est effectuée. Elle vise à quantifier les fréquences de chaque ENS. Pour ce faire, la relation suivante s'applique:

$$w_{OEi}(t) = w_{IE}(t) \cdot \prod_{j=1}^J P_{Bj}(t) \quad (2.30)$$

Avec :

$w_{OEi}(t)$: Fréquence de l'événement indésirable d'ordre i (OE : Outcome Event).

$w_{IE}(t)$: fréquence de l'événement initiateur (IE : Initiating Event).

$P_{Bi}(t)$: probabilité de la branche d'ordre j (situé dans l'arbre d'évènements) qui contribue à l'OE i .

Il est nécessaire de noter qu'on doit calculer la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur (événement de lancement) et pas sa probabilité comme on le voit dans de nombreux revues et publications.

Le $w_{IE}(t)$ montant peuvent provenir de l'arbre de défaillance en utilisant les relations données ci-dessous [Innal, 2008] [Birnbbaum, 1969]:

$$w_{IE}(t) = \sum_{i=1}^I I_{BEi}(t) \cdot \lambda_{BEi} \cdot A_{BEi}(t) \quad (2.31)$$

$$I_{BEi}(t) = P_{TE/BEi=true}(t) - P_{TE/BEi=false}(t) \quad (2.32)$$

Avec :

$I_{BEi}(t)$: coefficient d'importance de l'événement base (BE) de Birnbbaum d'ordre i .

P_{TE} : Probabilité de l'événement indésirable.

λ_{BEi} : Taux de défaillance du composant liée à la BE i .

$A_{BEi}(t)$: Disponibilité du composant liée à la BE i .

Par ailleurs, la probabilité de défaillance d'une barrière de sécurité gérée avec un arbre de défaillance est calculée selon l'équation (2.34). C'est une approximation basée sur les coupes minimales obtenus à partir de l'AdD. Des approches plus précises peuvent servir à réaliser ce calcul, par exemple, diagramme de décision binaire (BDD) [Rauzy, 1993].

$$P_{TE}(t) = P(UMCS_i) \approx \sum_{i=1}^i P(MCS_i) \quad (2.34)$$

Les fréquences moyennes w_{acc}^{avg} liée aux événements de résultat sont calculées en intégrant l'équation (2.30) sur une période d'observation donnée T:

$$w_{OEi}^{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T w_{OEi}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T w_{IE}(t) \cdot \prod_{j=1}^J P_{Bj}(t) dt \quad (2.35)$$

Conclusion

La prise en compte des incertitudes dans la démarche d'analyse des risques s'impose en raison des imperfections des modèles et données manipulés. Dans cette partie, nous avons rappelé les différents les notions d'incertitudes épistémiques et stochastiques et aussi les niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques. Puis nous avons présenté les Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis comme Monte Carlo, logique floue et théorie de croyance.

Cependant dans la dernière partie nous expliquons la procédure de calcul de la fréquence d'accident utilisé dans notre mémoire.

Ces rappels servent comme support de base pour le traitement de l'incertitude et l'analyse de sensibilité pour un système opérationnel, objet du chapitre suivant.

Introduction

Dans l'industrie pétrolière, le process d'exploitation présente des risques majeurs et nécessite des moyens de sécurité sophistiqués pour la maîtrise de ces risques. Parmi ces moyens en retrouve les systèmes de régulation (BPCS) et les SIS. L'implémentation de ces systèmes requière la détermination de leurs niveaux d'intégrité de sécurité (SIL). Le problème qui se pose dans l'évaluation de ces indicateurs est la fiabilité des différents paramètres qui s'y associent : taux de défaillance, couverture de diagnostic, proportion de défaillance de cause commune,... En effet, ces paramètres sont généralement entachés d'incertitudes, d'autant plus que les SIS sont des systèmes très fiables et produisent donc un faibles retour d'expérience [Sellak, et al., 2008].

L'objet de ce chapitre est, dans un premier temps, l'analyse d'incertitude et de sensibilité liée à la fréquence d'accident relative à un exemple illustratif d'une chaudière via le logiciel SIMPLAB. Ensuite, cette étude concernera un système opérationnel : débutaniseur 01-V-231 de l'association Sonatrach/BP/Statoil. Au cours de cette seconde étude, nous proposons de nouveaux indicateurs permettant de caractériser la sensibilité de la fréquence accidentelle au regard des incertitudes liées aux différents paramètres fiabilistes. Pour ce faire, le logiciel GRIF sera mis à profit.

3.1 Traitement de l'incertitude via SIMLAB

Comme convenu, afin de traiter l'incertitude par SIMLAB nous avons besoins de l'équation probabiliste de l'événement non souhaité (ENS). L'établissement de cette équation n'est pas réalisable compte tenu du nombre élevé des événements de base (voir annexe 7); en effet nous illustrons un exemple illustratif qui traite ce volet (cet exemple déjà présenté dans le cadre de : *IEEE 3rd International Conference on Systems and Control, Algeria, 2013*).

Le système schématisé dans la figure 3.1 montre le croquis d'une chaudière à vapeur (*Steam Boiler System*) [Innal et al, 2013] [Rausand, 2004]. Il a été conçu pour fournir certaine quantité de vapeur à une pression donnée. L'eau est dirigée vers la chaudière par une canalisation avec indicateur de vanne contrôleur de niveau (LICV). Le combustible est dirigé vers la chambre de combustion par une vanne de contrôleur de pression (PCV). Le niveau de l'eau dans la chaudière est contrôlé par deux émetteurs de niveau connectés en parallèle (LE1, LE2). Le niveau d'eau est maintenu dans un intervalle de faible niveau (Low) et haut (High) niveau par un circuit de commande pneumatique relié à LICV.

Si le bas niveau est conclu à l'issue d'une production de vapeur élevé, ce niveau est détecté par les émetteurs de niveau qui émet un signal électrique à LIC (contrôleur de niveau) afin d'ouvrir LICV, ceux-ci permettant le remplissage du générateur. Si le niveau élevé est atteint, il est également détecté par LE et de la même séquence ci-dessus conduit à la fermeture de LICV. Il est très important que le niveau d'eau ne vient pas au-dessous du faible niveau spécifié. Lorsque le niveau d'eau s'approche du bas niveau, un signal pneumatique est passé de LIC à l'émetteur de niveau (LT). Le LT traduit le signal en un signal électrique qui est envoyé à l'électrovanne (SV). La SV régule la vanne PCV sur l'arrivée de carburant. Ce circuit est donc installé afin de couper

l'alimentation en combustible dans le cas où le niveau d'eau est au-dessous du niveau spécifié (faible niveau).

La pression de vapeur dans la chaudière et dans la sortie de la canalisation est contrôlée par un contrôleur de pression PC qui est relié à la vanne solénoïde SV où existe la soupape PCV sur le pipeline d'arrivée de carburant. Ce circuit est donc installé afin de couper l'alimentation en combustible dans le cas où la pression dans la chaudière augmente au-dessus de la haute pression spécifiée, qui pourrait conduire l'explosion de générateur de vapeur.

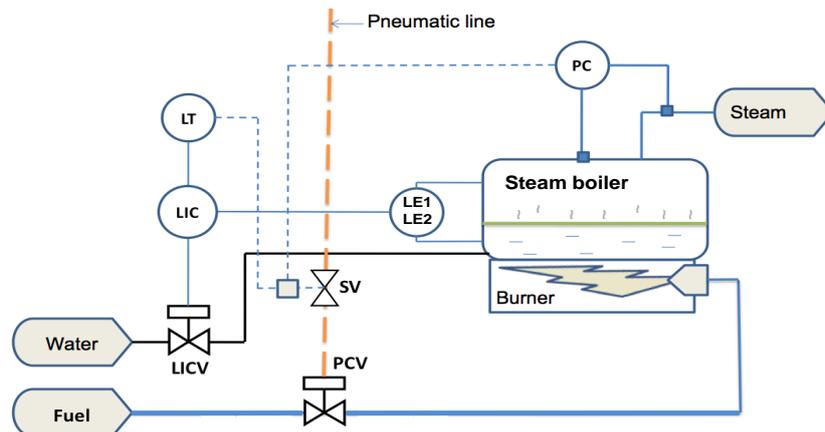


Figure 3.1 Schéma de la chaudière.

3.1.1 Construction du nœud de papillon du système SBS

L'analyse du schéma et l'exploitation prévue du système montre que l'événement non souhaité est « destruction de la chaudière due à une surpression incontrôlée ». Cet événement se produit si la chaudière n'est pas alimentée en eau et si la chambre de combustion continue à fonctionner. En d'autres termes, si la première couche de protection (la boucle de régulation de l'eau dans le SBS) échoue et si les deux barrières de sécurité ne fonctionnent pas.

Voici les composants de ces couches de protection :

- ✓ Couche 1 (LA1): elle régule le niveau d'eau dans le SBS, qui varie en permanence entre un niveau faible (l'eau est fournie) et un niveau élevé (eau n'est temporairement pas alimentée). Cette couche est constituée de LE1/2, LIC et LICV.
- ✓ Couche 2 (LA2): sa fonction est de couper l'alimentation en carburant du brûleur en cas d'un faible niveau d'eau. Il est composé de LE1/2, LIC, LT, SV et PCV.
- ✓ Couche 3 (LA3): elle a la même fonction que la deuxième couche de protection ; elle est composée de PC, SV et PCV.

Il est à noter que ces trois couches ne sont pas indépendantes.

Le nœud de papillon de la SBS, avec comme événement initiateur la défaillance de LA1, est représenté sur la figure 3.2.

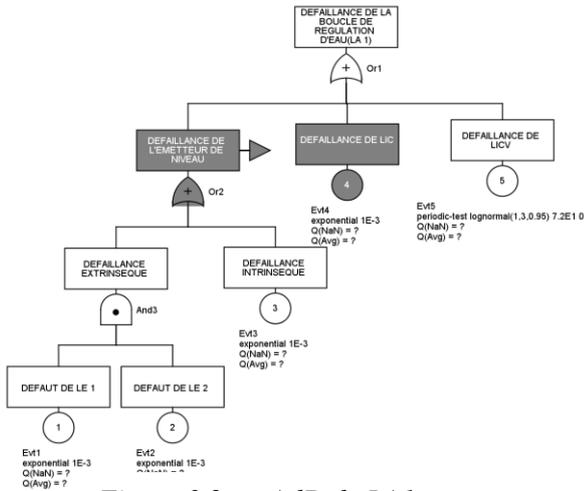


Figure 3.2 a : AdD de LA1

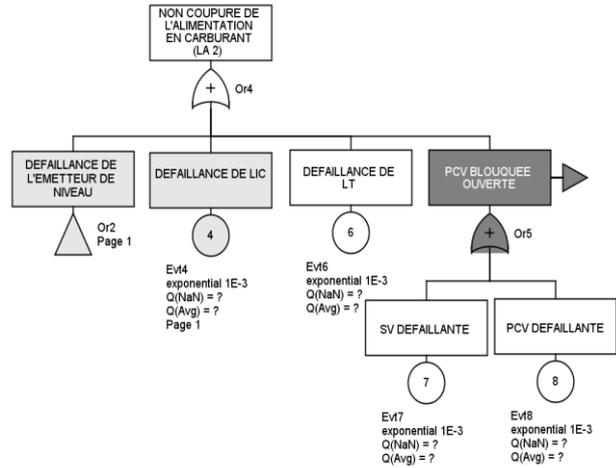


Figure 3.2 b : AdD de LA2

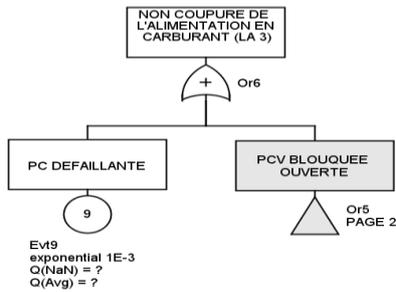


Figure 3.2 c : AdD de LA3

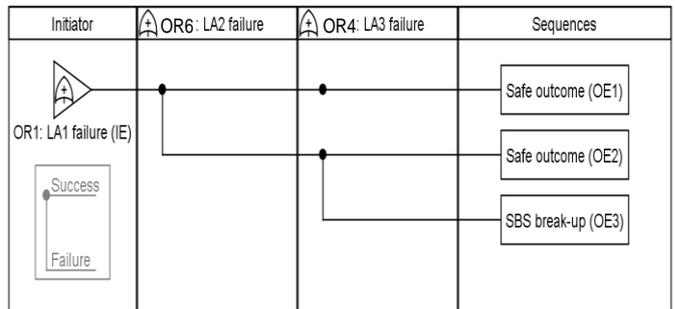


Figure 3.2 d : AdE du SBS

Figure 3.2. Nœud de papillon du système SBS.

3.1.2 Calcul de la fréquence d'ENS du Système SBS

Les données de fiabilité avec l'incertitude associées à des éléments du système considéré sont données dans les tableaux suivant :

Eléments	LE1	LIC	LICV	LT	PC	SV	PCV
Données	LE2						
λ (1E-6/h)	Logn ¹ $M^2 = 1.3$ $EF^3 = 3$	Logn $M = 5$ $EF = 4$	Logn $M = 2.7$ $EF = 4$	Logn $M = 0.6$ $EF = 5$	Unif ⁴ $a = 1.6$ $b = 2.5$	Unif $a = 0.9$ $b = 1.5$	Unif $a = 2$ $b = 5$
β	Unif $a = 0.1$ $b = 0.3$						
$T (h)$	Constant : 8760 (1 an)						

1 Log normale, 2 Médiane, 3 Facteur d'erreur, 4 Uniforme

Tableau 3.1 : donnée de λ et β du système SBS

Le tableau suivant exprime μ et σ du système calculé à partir des équations suivant :

$$EF = e^{1.645\sigma}$$

$$Median = e^{(\mu+\sigma/2)} \quad (3.1)$$

Eléments	LE1	LIC	LICV	LT	PC	SV	PCV	β
Données	LE2							
μ	Logn ¹ -13.776	Logn -12.5611	Logn -13.1773	Logn -14.8048	Unif ² 1.6E-6	Unif 0.9E-6	Unif 2E-6	Unif 0.1
σ	0.6678	0.8427	0.8427	0.9783	2.5E-6	1.5E-6	5E-6	0.3
$T(h)$	Constant : 8760 (1an)							

1 Log normale, 2 Uniforme

Tableau 3.2 : donnée de μ et σ du système SBS

L'équation (3.2) donne une formule approximative pour la fréquence moyenne associée à la sortie EO3 (éclatement SBS (voir figure 3.2)), pendant la période [0, T].

$$w_{OE3}^{avg} \approx (\lambda_{LIC} + \beta_{LE} \lambda_{LE}).(\lambda_{SV} T/2 + \lambda_{PCV} T/2 + \lambda_{PC} T/2) + \lambda_{LICV} . (\lambda_{SV} T/2 + \lambda_{PCV} T/2 + \lambda_{LT} \lambda_{PC} T^2/3) + 2(1-\beta_{LE})^2 \lambda_{LE}^2 . (\lambda_{SV} + \lambda_{PCV} + \lambda_{PC}) . T^2/3 \quad (3.2)$$

La fréquence moyenne obtenue de (3.2) à l'aide de valeurs de base des paramètres d'entrée est égale à **2.115E-7/h** (sans incertitude).

Considérons maintenant les incertitudes liées à ces paramètres d'entrées et examinez comment ils se propagent et affectent la sortie. Pour ce faire, le logiciel SimLab a été utilisé [SIMLAB, 2006]. Le résultat entraîné w_{OE3}^{avg} est représenté à la figure 3.3. La moyenne et l'Écart-type avec incertitude associés sont respectivement **2.14E-7/h** et **1.57E-7/h** (1E +4 échantillons ont été générés).

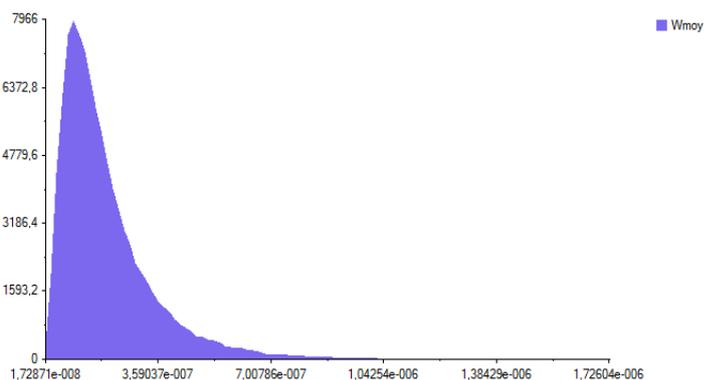


Figure 3.3 : Fonction densité de probabilité de l'ENS.

Il est clair que w_{OE3}^{avg} donnée par l'utilisation de valeurs de base est inférieure à la valeur fournie lorsqu'on considère les incertitudes. Il y a une différence relative de **1,16 %**. La première valeur (2.115E-7 /h) est **optimiste** ce qui est dangereux d'un point de vue de sécurité.

3.1.3 Analyse de sensibilité

Le tableau 3.3 donne les indices de sensibilité (PRCC et FAST et SOBOL) pour chaque paramètre d'entrée calculé à l'aide du logiciel SIMLAB,

Elément d'entrée		λ_{LE}	λ_{LIC}	λ_{LICV}	λ_{LT}	λ_{PC}	λ_{SV}	λ_{PCV}	β_{LE}
PRCC		0,0495	0,9108	0,3188	0,0011	0,0192	0,0380	0,01893	0,0182
		4	1	2	8	6	5	3	7
FAST		0,0015	0,6731	0,0895	1,76E-5	0,000578	0,0016	0,00365	0,000183
		4	1	2	8	6	5	3	7
SOBOL	First Ordre	0,002156	0,842542	0,107395	2,7E-5	0,000695	0,001175	0,036814	0,000296
		4	1	2	8	6	5	3	7
	Total Ordre	0,001912	0,851943	0,111845	8,73E-6	0,001962	0,002136	0,0448617	-0,000287
		6	1	2	7	5	4	3	8

Tableau 3.3 : Indice de sensibilité total PRCC, FAST et SOBOL

En outre la figures 3.4 montre les diagrammes de dispersion des λ (chaque composants) et β_{LE} en fonction de w_{OE3}^{avg} .

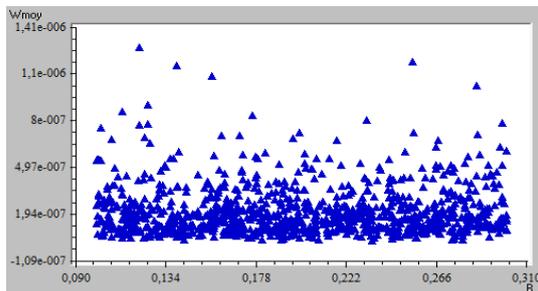


Figure 3.4a. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de β_{LE}

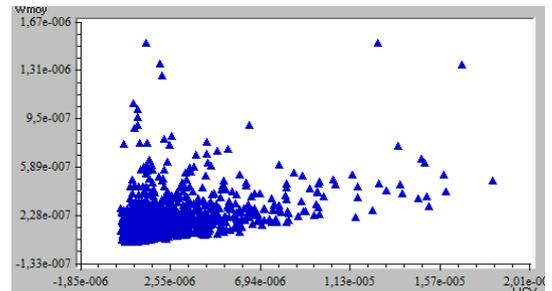


Figure 3.4b. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LIC}

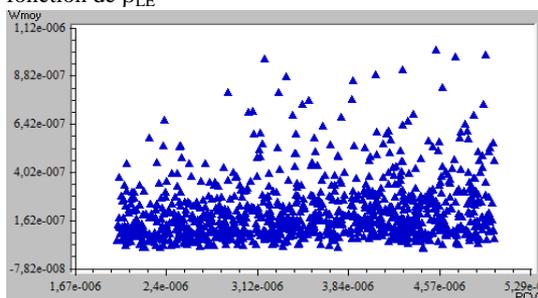


Figure 3.4c. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{PCV}

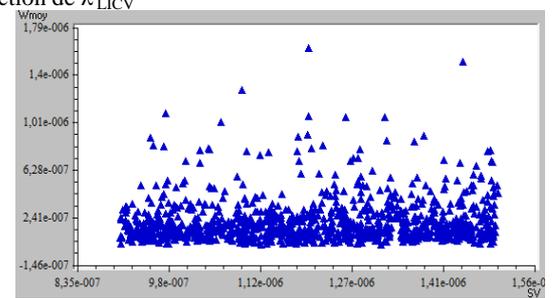


Figure 3.4d. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{SV}

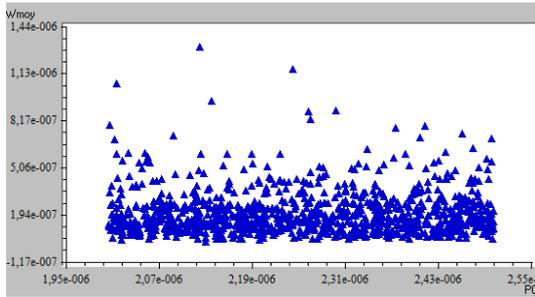


Figure 3.4e. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{PC}

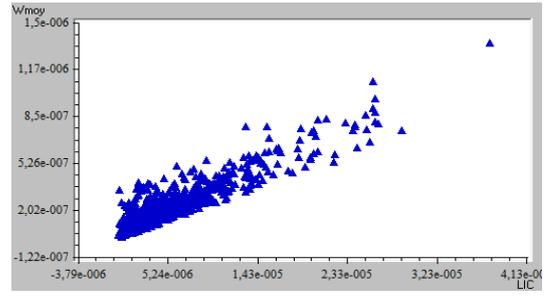


Figure 3.4f. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LIC}

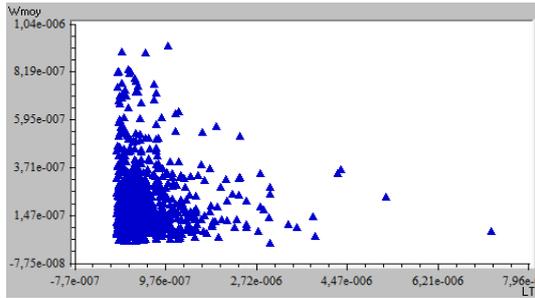


Figure 3.4g. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LT}

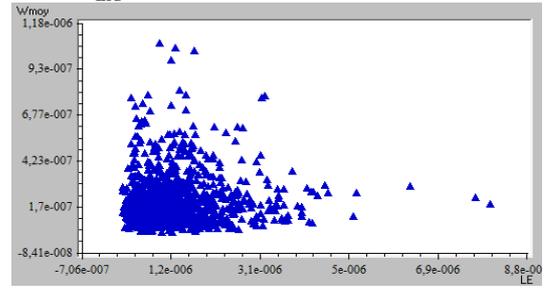


Figure 3.4h. Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de λ_{LE}

Figure 3.4 : Diagrammes de dispersion de w_{OE3}^{avg} en fonction de $\lambda_{LE}, \lambda_{LIC}, \lambda_{LICV}, \lambda_{LT}, \lambda_{PC}, \lambda_{SV}, \lambda_{PCV}$ et β_{LE}

La figure 3.4f montre que l'incertitude liée à λ_{LIC} est plus importante que autres paramètres ($\lambda_{LE}, \lambda_{LICV}, \lambda_{LT}, \lambda_{PC}, \lambda_{SV}, \lambda_{PCV}$ et β_{LE}) en termes d'impact sur w_{OE3}^{avg} , car elle donne plus de « forme » sur w_{OE3}^{avg} . La dispersion donne donc une indication visuelle directe de la sensibilité.

Le tableau 3.3 fournit des informations sur les huit facteurs d'entrée qui sont principalement responsables de la variation de la valeur de w_{OE3}^{avg} . Les indices de sensibilité PRCC, FAST et SOBOL donnent le même classement pour les trois facteurs influents, à savoir : $\lambda_{LIC}, \lambda_{LICV}$ et λ_{PCV} .

3.1.4 Traitement de l'incertitude par Grif Software

A. Calcul de la fréquence moyenne sans incertitude

Après avoir traité l'arbre de défaillance correspondante du système SBS (figure 3.2), où les données des paramètres de bases sont fixés en valeurs moyennes (sans incertitudes), la fréquence moyenne retournée par le logiciel Grif est d'ordre de : $1.9903E-7/h \approx 2E-7/h$.

Il convient de rappeler que la fréquence moyenne obtenue par SIMLAB est d'ordre de : $2.115E-7/h$.

B. Calcul de la fréquence moyenne avec incertitude

De même manière, nous procédons à la calcul de la fréquence moyenne du système SBS en leur considérant l'incertitude des événements de bases.

La valeur obtenue est de : $1,9698E-7/h$. Il y'a eu une différence relative de **1.03 %**. (1E +4 échantillons ont été générés, pour une durée d'observation égale à 8760 h).

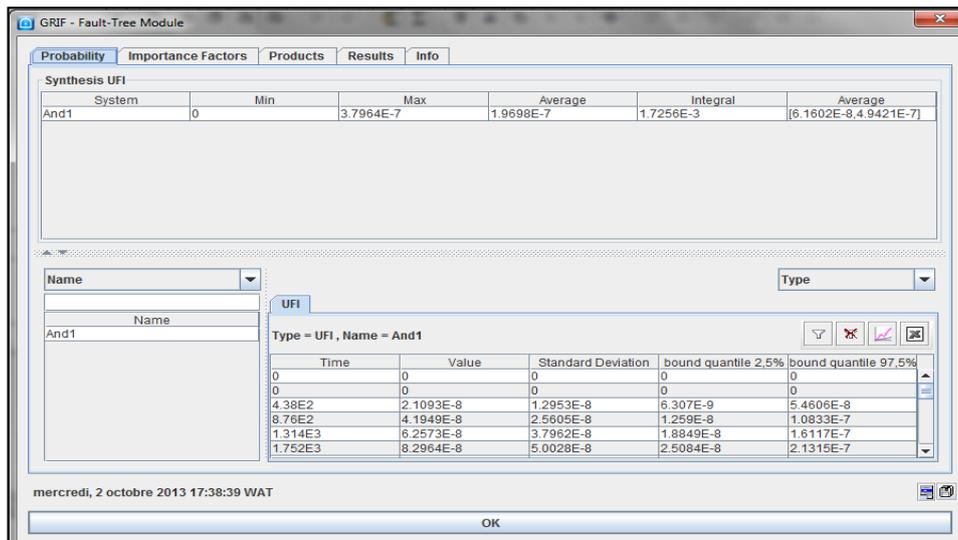


Figure 3.5 : w_{OE3}^{avg} calculé par Grif

On constate également que l'intervalle de confiance à 95% est : [6,1602E-8 4,9421E-7].

C. Analyse de sensibilité

Considérons maintenant les incertitudes liées à ces paramètres d'entrées et examinez comment ils se propagent et affectent la sortie. Il convient de noter que le logiciel GRIF ne possède pas encore des outils dédiés à l'analyse de sensibilité. Pour remédier à cette carence, nous proposons dans ce qui suit de nouveaux indicateurs de sensibilité basés sur la fréquence moyenne et le facteur d'importance critique (CIF). Ce dernier facteur est donné pour les différents composants au niveau du tableau 3.4.

- **Indicateur 1 : Facteurs d'importance des composants élémentaires**

Les moyennes des facteurs d'importances critiques de chaque composant ont donné dans le tableau suivant :

<i>Composant</i>	<i>CIF moyen</i>	<i>Ordre</i>
LE2 / LE1	7,66E-4	8
LT	2,98E-4	7
CCF	4,06E-2	6
PCV	4,98E-1	2
PC	1,90E-1	4
LIC	5,74E-1	1
LICV	2,48E-1	3
SV	1,75E-1	5

Tableau 3.4: CIF moyen de l'ENS avec incertitude (SBS)

D'après le tableau 3.4, on constate que le composant LIC avec un CIF Moyen de **5,74E-1/h** est le plus important vis-à-vis de la réalisation de l'ENS. Ce résultat est compatible avec celui donné par SIMLAB (voir tableau 3.3).

La variation du facteur d'importance critique de chaque composant en fonction de temps (calculé en 43800 heure (5ans)) est schématisée dans la figure suivante :

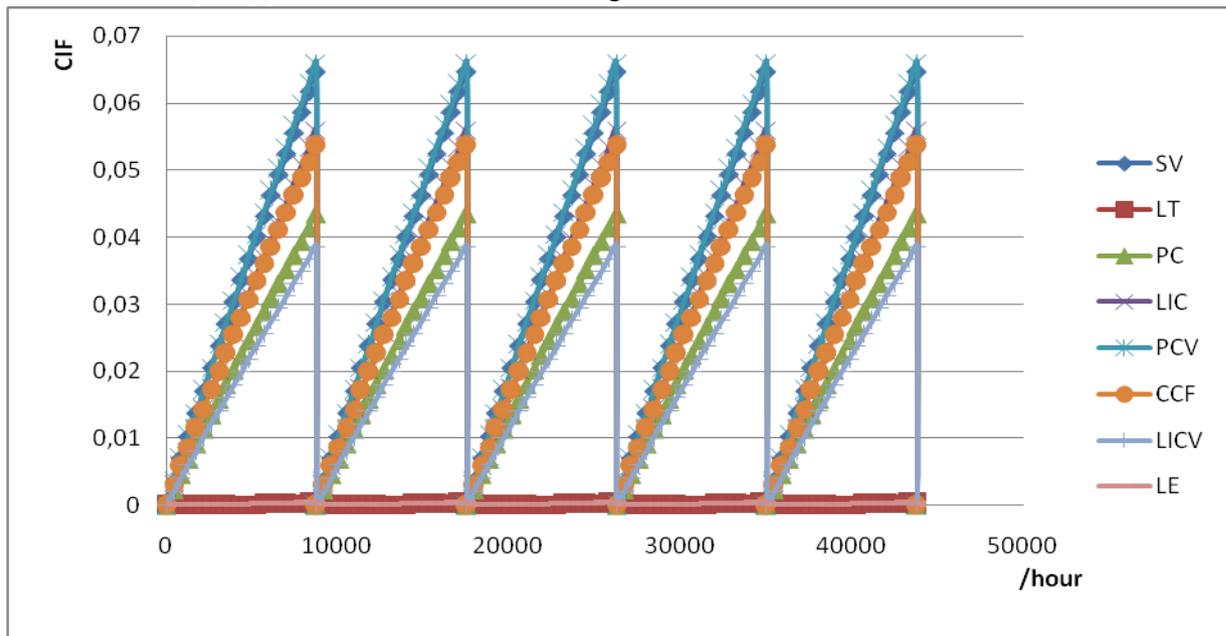


Figure 3.6 : CIF de chaque composant en fonction de t (SBS).

D'après la figure 3.6, on constate que le composant LIC, est le plus critique pour le système SBS, d'où l'importance et la participation du composant LIC à la panne totale du système est plus critique suivi par le composant PCV.

• **Indicateur 2 : One at-a-Time**

Procédons maintenant à analyser l'effet de chaque composant sur la panne total du système par l'approche *One at a Time* (OAT).

Le tableau suivant exprime les fréquences moyennes de l'ENS en fixant composant par composant (OAT : la valeur attribué à chaque composant choisie est sans incertitude)

Composant fixé (OAT)	Fréquence Moyenne/h (1)	Fréquence Moyenne du SBS (2)	Ecart (3)= (1)-(2)	Ordre
LICV	1,9358E-07	1,9698E-07 /h (1E+4 échantillons ont été générés, pour un temps égal à 8760 heures).	-1,7000E-09	4
CCF	1,9302E-07		-2,0500E-09	6
LIC	1,9720E-07		+1,1200E-10	1
LE	1,9307E-07		-2,0250E-09	5
LT	1,9293E-07		-2,0990E-09	7
SV	1,9602E-07		-4,9000E-10	8
PCV	1,9534E-07		-0,8400E-09	2
PC	1,9499E-07		-1,0210E-09	3

Tableau 3.6 : Ecart entre w_{avg} et $w_{avg/OAT}$ (SBS)

On constat toujours que le composant LIC est celui qui contribue le plus à la réalisation de l'ENS du SBS, ce résultat est identique à celui trouvé par le software Simlab. Ce constat peut être vu comme une validation préliminaire des indicateurs proposés.

• **Indicateur 3**

Considérons maintenant la variation de CIF Moyen de chaque composant étudié séparément (OAT). Les résultats obtenus sont exprimés dans le tableau 3.7 suivant :

	<i>CIF AVEC INCERTITUDE</i>	<i>OAT CIF</i>	<i>Différence</i>	<i>Ordre d'importance</i>
CCF	4,0650E-02	4,2127E-02	3,6331E-02	7
LE1	7,6577E-04	7,6789E-04	2,7735E-03	8
LIC	5,7445E-01	6,3071E-01	9,7934E-02	4
LT	2,9821E-04	3,2168E-04	7,8704E-02	6
PC	1,9007E-01	2,0564E-01	8,1933E-02	5
PCV	4,9778E-01	3,8942E-01	2,1768E-01	1
SV	1,7493E-01	1,4992E-01	1,4297E-01	2
LICV	2,4840E-01	2,8341E-01	1,4093E-01	3
LE2	7,6577E-04	7,6789E-04	2,7735E-03	9

Tableau 3.7 : CIF Moyen de chaque composant du SBS (OAT).

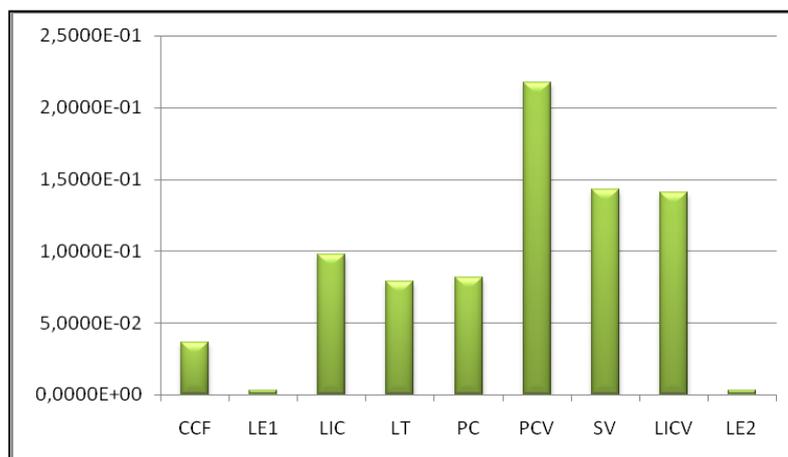


Figure 3.7 : Ordre d'importance des composants du SBS

La figure 3.7 exprime l'ordre d'importance des événements de base du SBS calculé par la formule $[CIF_{\text{avec incertitude}} - CIF_{\text{OAT}}] / CIF_{\text{avec incertitude}}$.

Ce taux nous permet de clarifier l'importance des incertitudes de chaque composant sur la réalisation de l'ENS total du système.

D'après le tableau 3.7 et la figure 3.7, on constat que les composant PCV, LICV et LIC demeure les plus critique pour la réalisation de l'ENS. En revanche, LIC n'est plus le composant le plus important.

d. Conclusion

A partir des résultats trouvés ; on peut d'une manière générale utilisée ces indicateurs pour caractériser la sensibilité de la fréquence d'accident aux différents paramètres.

3.2 Description du système de séparation des produits (Débutaniseur)

3.2.1 Description : Le système de séparation des produits (01-V-231) est conçu pour séparer le butane et les composants plus légers du pentane et des composants les plus lourds. Le produit de tête quitte la colonne sous le contrôle de pression et avec une pression de vapeur de 14,34 barg à 37,8 °C. La teneur en éthane et produits plus léger ne doit pas dépasser 3% mole, celle du pentane et des produits plus lourds ne doit pas dépasser 0,4 % mole. Le GPL ne doit pas contenir de l'eau libre. Les produits lourds quittent le fond de la colonne sous contrôle de niveau comme *condensât*.

Le débutaniseur est composé de 36 plateaux à soupapes à deux voies et reçoit deux alimentations. Une première charge provenant du fond du dé-éthaniseur (01-V-151) entre au 16eme plateau après préchauffage a 106 °C dans la batterie d'échangeurs (01-E-233 A/B), une deuxième alimente le 26ème plateau a partir du fond du stabiliseur (01-V-221).

La température de fond du débutaniseur (01-V-231) est contrôlée à environ 200° C pour obtenir un produit de fond avec une pression de vapeur Reid (TVR) ne dépassant pas 0,69 barg. L'apport de chaleur au débutaniseur se fait par le rebouilleur (01-E-231). Les gaz de tête du débutaniseur (01-V-231) sont totalement condensés par l'aéroréfrigérant (01-E-232). Le liquide condensé est collecté dans le ballon de reflux de débutaniseur (01-V-232) et est renvoyé vers la tête de colonne comme débit de reflux ou vers le stockage comme GPL produit par les pompes (01-P-231 A/B).

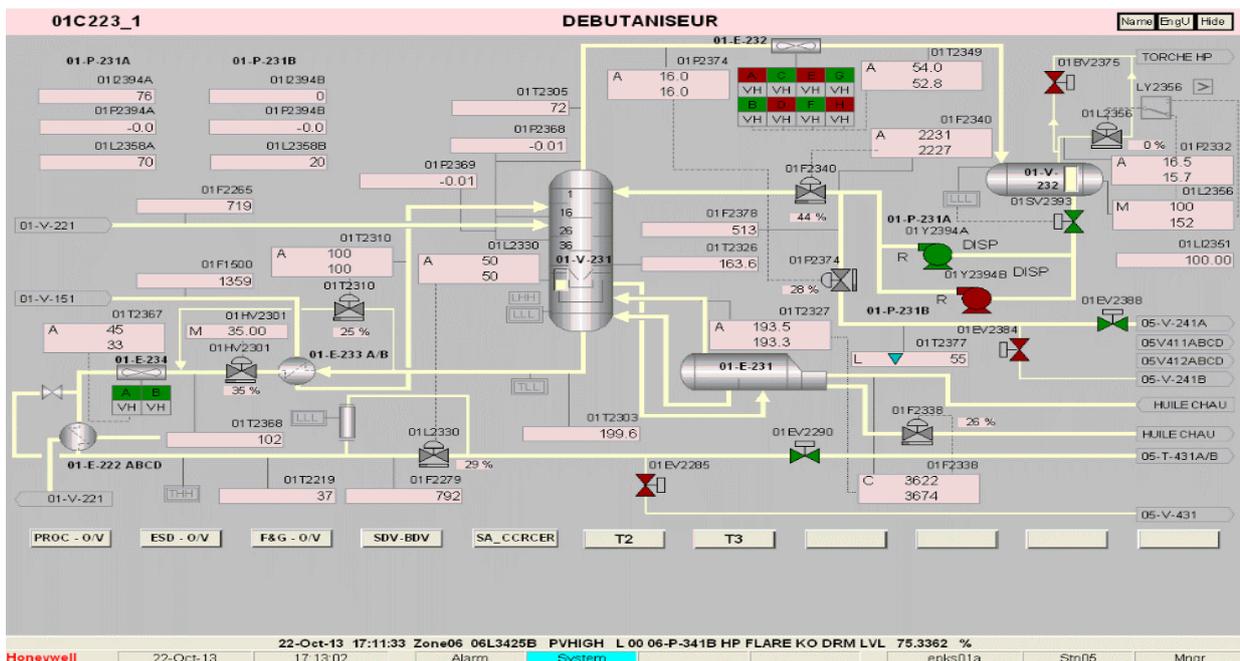


Figure 3.8: Schéma détaillé du débutaniseur

3.2.2 Systèmes de Contrôle

La pression opératoire et le profil de température dans le débutaniseur doit être maintenue dans une marge désirée pour assurer une spécification du produit. La pression de fonctionnement de la colonne est contrôlée par la pression du ballon de reflux du débutaniseur. La température du fond est contrôlée directement tandis que la température de tête est déterminée par la température opératoire du condenseur et par le reflux du débit du liquide.

La pression de vapeur sortant du haut de débutaniseur est contrôlée par le contrôleur de pression 01-PIC-2374, qui détermine indirectement la puissance de condensation du condenseur de tête de débutaniseur, en variant le débit de GPL produit vers le stockage à travers 01-PV-2374.

Le flux du GPL produit affecte le degré d'engorgement de la surface d'échange thermique dans le condenseur et par conséquent le contrôle de la quantité condensée.

La température du fluide du plateau 36 du débutaniseur est transmise par un transmetteur de température 01-TT-2326 et il est contrôlé à partir de la console de l'opérateur du CMS (*Control Monitoring System*) par le 01-TIC-2326. Le contrôle de cette température est important pour assurer et maintenir une composition correcte du liquide. Le 01-TIC-2326 fonctionne en donnant un point de consigne à distance pour le contrôleur de débit 01-FIC-2338 qui régule le flux de l'huile chaude à travers le rebouilleur via la vanne de contrôle de débit 01-FV-2338 située sur la ligne de retour de l'huile chaude du rebouilleur.

Le profil de température du débutaniseur est établi par la quantité de reflux entrant du haut de la colonne. Le débit du reflux est mesuré par un débit mètre de type orifice 01-FT-2340 et puis il est contrôlé du CMS par un contrôleur de débit 01-FIC-2340 en modulant la vanne de contrôle de débit 01-FV-2340.

Le niveau du liquide au fond du débutaniseur est mesuré par un transmetteur de niveau 01-LT-2330, qui est situé sur une colonne montante à l'extérieur de la colonne, puis il est contrôlé du CMS par un contrôleur de niveau 01-LIC-2330.

Le 01-LIC-2330 contrôle le niveau en régulant le flux du condensât à travers la vanne de contrôle de niveau 01-LV-2330, située sur la sortie du condensât de l'échangeur du préchauffage d'alimentation de la stabilisation 01-E-222A/B/C/D.

3.2.3 Systèmes de Protection

Afin de maintenir les paramètres opératoires dans une marge désirée en cas d'une défaillance du système de contrôle, le débutaniseur est protégé contre les perturbations du process par les dispositifs suivants installés directement sur la colonne:

- 01-LT-2331 (HH) : Niveau du liquide haut haut ;
- 01-LT-2331 (LL) : Niveau du liquide bas bas ;
- 01-TT-2381 (LL) : Température du produit du fond bas bas ;
- 01-LT-2254 (LL) : Niveau de la colonne montante bas bas (en amont de 01-LV-2330).

En détectant un niveau de liquide haut haut par le 01-LT-2331, le système d'ESD lance l'alarme.

En détectant un niveau de liquide bas bas par le 01-LT-2331, le système d'ESD ferme les vannes d'arrêts sur la ligne de sortie du condensât 01-ESDV-2290 et 01-ESDV-2285 vers les bacs de stockage on-spec et off-spec respectivement, pour éviter le passage du gaz vers le bac de stockage du condensât du système 43.

En détectant une température basse basse par le 01-TT-2381 ou du niveau bas bas par le 01-LT-2254, le système d'ESD ferme la vanne d'arrêt 01-ESDV-2290 sur la ligne de sortie de condensât vers le bac de stockage On-Spec et ouvre la vanne d'arrêt 01-ESDV-2285 sur la sortie du condensât vers le bac de stockage Off-Spec pour protéger les extrémités du bac de stockage de condensât.

Dans le cas d'une défaillance du contrôle normale et du système d'arrêt, le débutaniseur est protégé contre la surpression par des soupapes de sécurité 01-PSV-2342A/B situées sur la ligne de tête du débutaniseur et elles sont réglées pour dégager vers la torche HP.

3.3 Analyse des barrières de sécurité du système

L'identification des scénarios d'accidents pouvant se produire dans le débutaniseur est faite à l'aide de la méthode HAZOP [IEC 61882, 2001]. L'utilisation de la méthode HAZOP permet d'identifier les causes, les conséquences et les barrières de mesures de sécurité mises en œuvre dans le système pour faire face au développement de ces scénarios.

Le tableau 3.8 de HAZOP suivant montre ces différentes causes et conséquences et barrières de sécurités existantes au niveau du dubitaniseur 01-V-231.

Après identification des scénarios d'accidents, nous procédons à élaborer l'AdD de l'ENS critique du système ; la figure 3.9 présente l'AdD de cet événement.

Thème étudié : 01 V 123 Système de séparation des produits (Débutaniseur), N° du dessin (P&ID) : DC-PS-01-23-21176 /DC-PS-01-75-21144 / DC-PS-01-23-21176. Révision 0									
Partie Considérée :					Intention de conception :				
N°	Mot-guide	Elément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
01	Pas de / Bas	Niveau de liquide	Niveau de liquide bas	<ul style="list-style-type: none"> -Alimentation insuffisante (FCV 1500 et FV 2265) Fermé - Evacuation du liquide du fond excessive FV2330 ouvert 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la pression dans le débutaniseur suivie par la sollicitation de la PIC 2374 qui ouvre la PV2374 - Augmentation de la température dans le débutaniseur suivie par la sollicitation de la TIC 2326 qui réduit l'ouverture de la FV 2338 (huile chaude). 	<ul style="list-style-type: none"> - Alarme basse pression PLL-2374 à 15 bars. - Sollicitation de LT 2331 à 10 % fermeture des ESDV 2385 et 2390. 			

Tableau3.8 : Feuille de présentation HAZOP

Partie Considérée :					Intention de conception :				
N°	Mot-guide	Elément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
02	Plus de / haut	Niveau de liquide	Niveau de liquide haut	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation excessive en liquide (FCV 1500 et FV2265 ouvert complètement) - Interruption de l'évacuation par : <ul style="list-style-type: none"> - FV2330 fermé - Bouchage au niveau de l'échangeur E 233 A/B - Fermeture de HV 2301 et TV 2310 - Bouchage des Aero E234 - Bouchage de l'échangeur E 222 ABCD 	<ul style="list-style-type: none"> - Alarmes haute pression PAH- 2374 à 17.5 bars. - Augmentation de la pression dans le séparateur suivi par la sollicitation de la PIC 2374 pour diminuer la pression qui ouvre vers stockage GPL. - Diminution de la température dans le séparateur suivi par la sollicitation de la boucle TIC 2326 qui ouvre la vanne FV 2338 - Condensat non conforme Off Spec 	<ul style="list-style-type: none"> - Ouverture de FV 2332 pour évacuer la matière condensée (Vers torche). - Alarme très haute niveau de LT2331 suivi par la fermeture de l'ESDV 2385 et 2390 (état d'arrêt total) - Si le niveau augmente faulty (Haut niveau le LT 2331 sera déclaré Faulty puis arrêt total du système) - Intervention de l'opérateur 			

Tableau3.8 : Feuille de présentation HAZOP (Suite)

Partie Considérée :					Intention de conception :				
N°	Mot-guide	Elément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
03	Plus de / haut	Pression	Haute pression	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation excessive en liquide (FCV 1500 et FV2265 complètement ouvert). - Système de refroidissement des Aéros E 232 en arrêt. - Réduction de l'évacuation PV 2374 fermé - Arrêt des pompes P239 A/B - Perturbation dans le débit de reflux FV 2340 fermé 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la pression jusqu'à la pression de calcul dans le séparateur, - Initiation d'Alarme très haute pression PIC 2374 a 17.5 bars. - Réduction de la température dans le séparateur suivi par l'intervention de la boucle TIC 2326 qui ouvre la vanne FV 2338 - Condensat Off spec. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ouverture de la soupape PSV-2342 A / B. - Dégazage vers torches par l'ouverture de PIC 2332 (système n'a pas dote d'un alarme seulement points de consigne de 16.5 bars). 			

Partie Considérée :					Intention de conception :				
N°	Mot-guide	Elément	Déviaton	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
04	Moins de / Basse	Pression	Basse pression	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation insuffisante en liquide (FCV 1500 et FT 2265 Fermé) - Evacuation excessive FV2330 (vers condensat) et PV 2374 (vers GPL). - Excès en refroidissement E 232 	<ul style="list-style-type: none"> - Alarme basse pression PAH 2374 a 15 bars - sollicitation du PIC 2374 par la fermeture de PV 2374, - Augmentation de la température dans le séparateur suivi par la sollicitation de la boucle TIC 2326 qui ferme la vanne FV 2338. 	<ul style="list-style-type: none"> - Intervention de l'opérateur pour l'augmentation du débit entrant. 			

Tableau 3.8 : Feuille de présentation HAZOP (Suite)

N°	Mot-guide	Elément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
05	Moins de / Basse	Température	Basse Température	<p>Alimentation froide (liquide de très basse température)</p> <p>- La boucle TIC 2310 défailante.</p> <p>- La boucle TIC 2326 défailante.</p> <p>- Excès en refroidissement E 232</p>	<p>- Alarme basse température (TAL) de TIC 2303 à 198°C.</p> <p>- Sollicitation de la boucle TIC 2326 qui ouvre la vanne FV 2338.</p> <p>- Condensat Off Spec (Entrainement des légers avec condensat, endommagement Bac On spec Toit flottant)</p>	<p>- Alarme très basse température de TLL 2381 à 196°C suivi par l'ouverture d'ESDV 2385 et ouverture d'ESDV 2390.</p> <p>- Sollicitation de LLL 2254 qui ferme ESDV 2390 et ouvre ESDV 2385.</p>			

Tableau 3.8 : Feuille de présentation HAZOP (Suite)

Partie Considérée :					Intention de conception :				
N°	Mot-guide	Elément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protection	Commentaires	Mesures à prendre	Responsables des mesures
06	Plus de / haute	Température	Haute Température	<p>-Alimentation insuffisante (FCV 1500 et FT 2265) Fermé.</p> <p>Système de refroidissement Aéros E 232 en arrêt.</p> <p>Boucle TIC 2326 défaillante (chauffage excessive)</p> <p>Boucle TIC 2310 Défaillante (Alimentation excessivement chaude)</p>	<p>- Augmentation de la pression dans le séparateur suivi par la sollicitation de la boucle PIC 2374.</p> <p>- GPL Off Spec (contamination de GPL par les produits lourds).</p>	<p>- Ouverture de la PSV-2342 A / B.</p> <p>- High High Alarme de la boucle THH 2251 qui ferme la ESDV 2390 et ouvre ESDV 2385.</p>			

Tableau 3.8 : Feuille de présentation HAZOP (Suite)

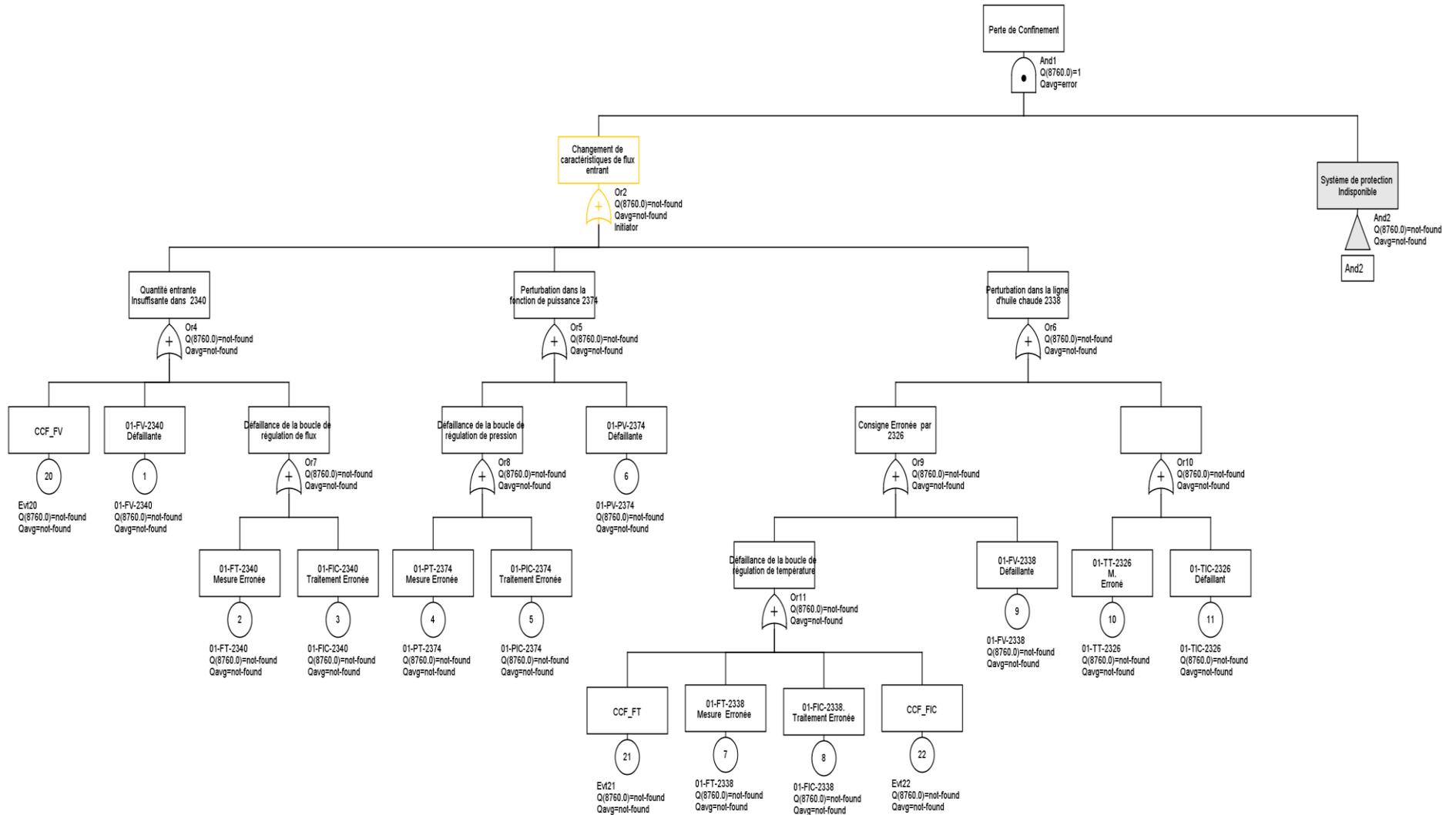


Figure 3.9 : Arbre de défaillance de l'événement : perte de confinement

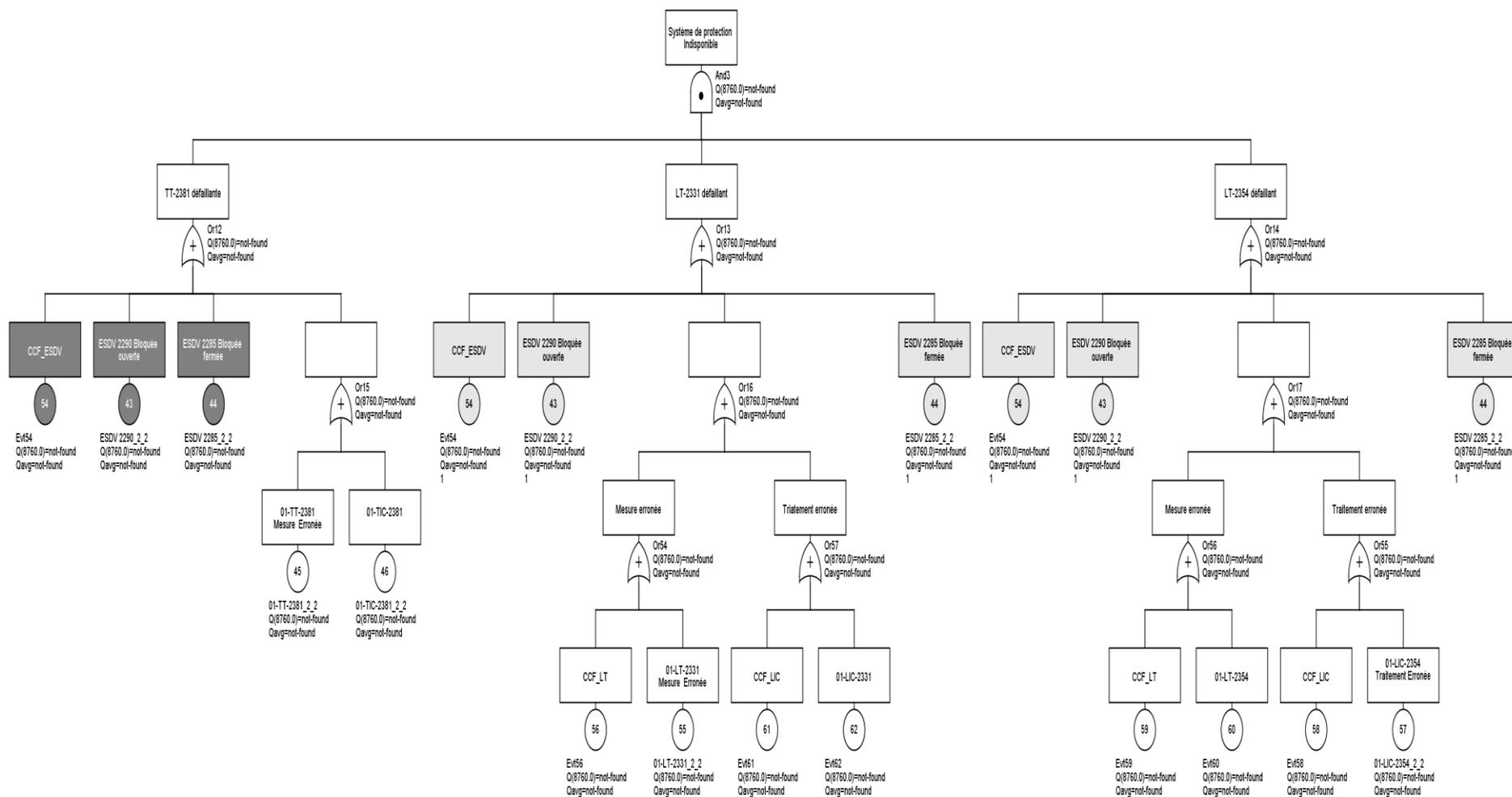


Figure 3.9 : Arbre de défaillance de l'événement : perte de confinement

3.5 Traitement de l'incertitude du système : débutaniseur (01-V-231)

Après avoir confirmé partiellement la possibilité de traiter l'incertitude des systèmes par le logiciel GRIF, nous pouvons procéder maintenant à étudier notre système opérationnel.

Les données de fiabilité avec l'incertitude associées à des éléments du système considéré sont données dans les tableaux suivant [Anon, 95], [Any, 71], [Skal, 74], [Anon, 89]. Ces incertitudes sont données en suivant deux lois : Log-normale et Uniforme.

Les composants de régulations suivent la loi de type (λ, μ) et les composants de protection suivent une loi de type Test Périodique Simple.

Eléments	FV	FT	FIC	PT	PIC	TT-2326	TIC-2326
Données							
λ (1E-6/h)	Unif ¹ a=0.1 b = 1	Logn ² M = 11.4 EF = 4	Logn M = 172 EF = 3	Logn M= 44.50 EF=4	Logn M= 131 EF=3	Logn M= 13.71 EF=4	Logn M= 107 EF=3
β	0.05	0.02	0.01				
Eléments	ESDV	LT-2331	LIC-2331	TT-2381	TIC-2381	PV	
Données		LT-2354	LIC-2354				
λ (1E-6/h)	Logn M= 0.15 EF = 6	Logn M = 187 EF=5	Logn M = 257 EF=3	Logn M = 13.71 EF=5	Logn M = 107 EF=3	Logn M= 15 EF=6	
β	0.05	0.02	0.01				
μ (h ⁻¹)	0.125						
T (h)	Constant : 8760 (1 an)						

Tableau 3.9 : donnée fiabilistes du système 01-V-231.

3.5.1 Calcul de la fréquence moyenne sans incertitude

Après avoir traité l'arbre de défaillance correspondante du système (figure 3.9) de séparation des liquides (débutaniseur), où les données des paramètres de bases sont fixés en valeurs moyennes (sans incertitudes), la fréquence moyenne donnée par le logiciel Grif est d'ordre de : **1,9938E-4/h**.

3.5.2 Calcul de la fréquence moyenne avec incertitude

De même manière, nous procédons au calcul de la fréquence moyenne du débutaniseur en considérant l'incertitude des événements de bases.

La valeur obtenue est: **1,8597E-4/h**. Il y'a eu une différence relative de 7,21% (1E +4 échantillons ont été générés, pour une durée d'observation égale à 8760 h).

On constate également que l'intervalle de confiance à 95% est : [1,7576 E-5 3,4469 E-4].

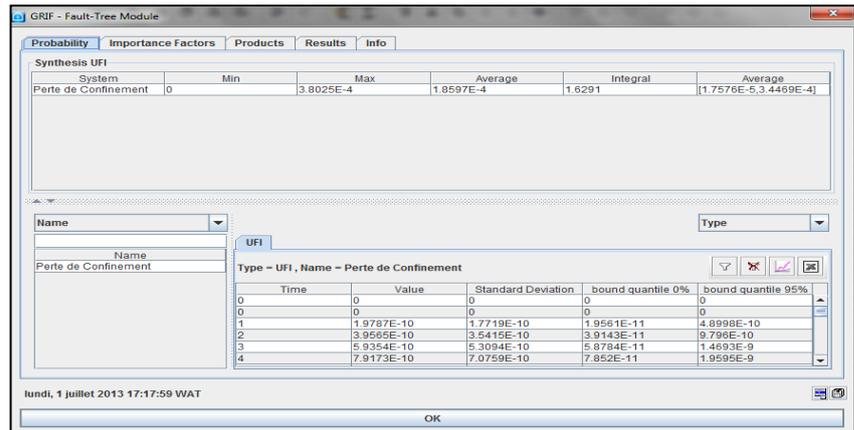


Figure 3.10 : w_{avg} obtenue par Grif

En outre la fréquence tolérable de l'association est de **10E-2/an**, soit **1,14E-6/h** [BP Amocco, 2010]. Donc, la fréquence de l'ENS enregistré est largement supérieure (non tolérable) par rapport au standard de l'association.

3.5.3 Analyse de sensibilité

Considérons maintenant les incertitudes liées aux paramètres d'entrées et examinez comment ils se propagent et affectent la sortie (réalisation de l'ENS).

- **Indicateur 1 : Facteurs d'importance des composants élémentaires**

Les moyennes des facteurs d'importances critiques des composants élémentaires du système 01-V-231 ont donné le tableau suivant

<i>Composant</i>	<i>CIF moyen</i>	<i>Ordre</i>
ESDV 2285	3,52E-01	1
ESDV 2290	3,07E-01	2
FIC 2338	2,85E-01	3
TIC 2381	2,69E-01	4
FIC 2340	2,12E-01	5
PIC 2374	1,89E-01	6
LIC 2331	1,57E-01	7
TIC 2326	1,50E-01	8
LT 2331	1,25E-01	9
LIC 2354	1,09E-01	10
LT 2354	1,04E-01	11
PT 2374	6,60E-02	12
TT 2381	3,51E-02	13
TT 2326	3,13E-02	14
PV 2374	2,32E-02	15

CCF_ESDV	2,12E-02	16
FT 2340	1,70E-02	17
FT 2338	1,61E-02	18
CCF_FIC	2,63E-03	19
CCF_LT1	2,27E-03	20
CCF LT2	2,27E-03	21
CCF_LIC1	1,72E-03	22
CCF_LIC2	1,50E-03	23
CCF_FV	8,97E-04	24
FV 2340	8,19E-04	25
FV 2338	8,04E-04	26
CCF_FT	3,45E-04	27

Tableau 3.10: CIF moyen des composants du débutaniseur (avec incertitude).

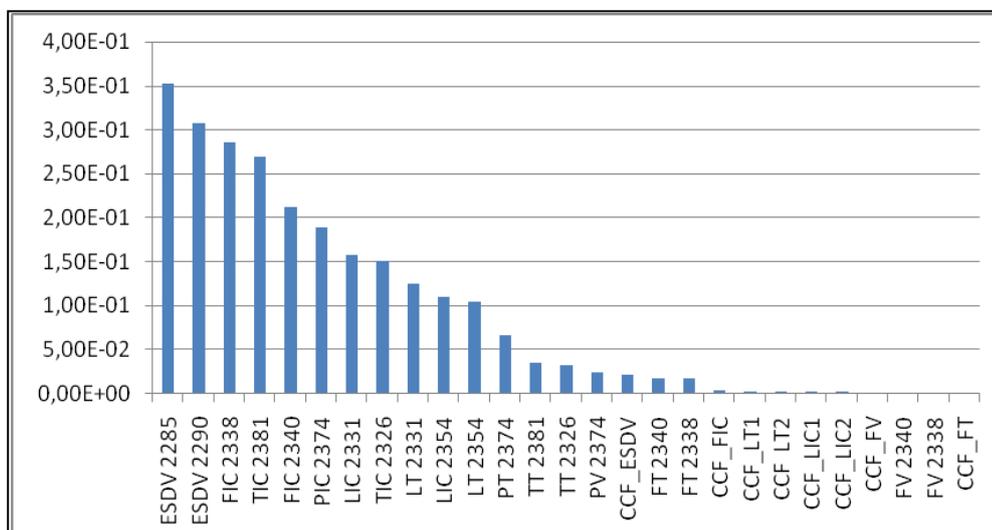


Figure 3.11 : Ordre d'importance des composants de base du débutaniseur

Il est clair à partir de la figure 3.11 et les résultats du tableau 3.10, que les deux vannes d'arrêt d'urgences sont les plus importantes pour la réalisation de l'ENS.

• **Indicateur 2**

Nous procédons maintenant à analyser l'effet de l'incertitude de chaque composant sur l'état total du système. A cet effet, on compare les CIF moyens (sans et avec incertitude) et analyser l'importance de chaque composant. Les résultats obtenus sont exprimées dans le tableau 3.11.

Composant	CIF Sans Incertitude	Ordre	Composant	CIF avec incertitude	Ordre
ESDV 2285	3,29E-01	1	ESDV 2285	3,52E-01	1
ESDV 2290	3,12E-01	2	ESDV 2290	3,07E-01	2
FIC 2340	2,45E-01	3	FIC 2340	2,12E-01	5
FIC 2338	2,15E-01	4	FIC 2338	2,85E-01	3
PIC 2374	1,89E-01	5	PIC 2374	1,89E-01	6

PT 2374	1,60E-01	6	PT 2374	6,60E-02	12
TIC 2381	1,53E-01	7	TIC 2381	2,69E-01	4
LIC 2331	1,41E-01	8	LIC 2331	1,57E-01	7
LIC 2354	1,36E-01	9	LIC 2354	1,09E-01	10
TIC 2326	1,31E-01	10	TIC 2326	1,50E-01	8
LT 2354	1,08E-01	11	LT 2354	1,04E-01	11
LT 2331	9,56E-02	12	LT 2331	1,25E-01	9
TT 2381	3,13E-02	13	TT 2381	3,51E-02	13
CCF ESDV	2,78E-02	14	CCF_ESDV	2,12E-02	16
CCF_LIC	2,34E-02	15	CCF_LIC	1,72E-03	22
PV 2374	2,14E-02	16	PV 2374	2,32E-02	15
TT 2326	1,93E-02	17	TT 2326	3,13E-02	14
FT 2338	1,52E-02	18	FT 2338	1,61E-02	18
FT 2340	1,60E-02	19	FT 2340	1,70E-02	17
CCF_LT	1,79E-03	20	CCF_LT	2,27E-03	20
CCF LT	1,78E-03	21	CCF LT	2,27E-03	21
CCF FIC	7,13E-03	22	CCF_FIC	2,63E-03	19
CCF_LIC	1,88E-03	23	CCF_LIC	1,50E-03	23
FV 2338	1,39E-03	24	FV 2338	8,04E-04	26
FV 2340	7,16E-04	25	FV 2340	8,19E-04	25
CCF FT	6,08E-04	26	CCF_FT	3,45E-04	27
CCF FV	9,35E-05	27	CCF_FV	8,97E-04	24

Tableau 3.11 : variation des CIF avec et sans incertitude (01-V-231).

L'histogramme suivant exprime la variation des valeurs de facteurs d'importances critiques sans et avec incertitude.

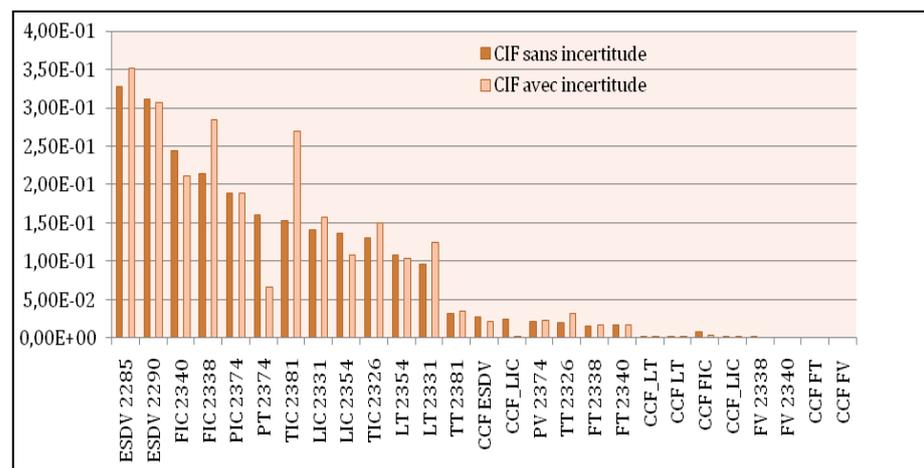


Figure 3.12: Variation des CIF avec et sans incertitude (01-V -231)

La figure 3.12 montre la variation des CIF de chaque composant avec et sans prise d'incertitude. Par exemple, l'ordre d'importance du composant TIC 2381 a changé de la 7^{ème} place vers la 4^{ème} place. *Ceci explique l'importance de la considération des incertitudes dans l'évaluation de la fréquence d'accident.*

Indicateur 3 : One at-a-Time

Nous procédons maintenant à analyser l'effet de chaque composant sur la réalisation de l'ENS total du système par l'approche *One at a Time* (OAT). Cette analyse est exprimée dans les tableaux 3.12 et 3.13.

Le tableau 3.12 suivant ; exprime les fréquences moyennes des composants élémentaires par rapport à la fréquence moyenne du système ; les valeurs attribuées à chaque composant choisie sont sans incertitude (OAT).

<i>Composant Fixé (OAT)</i>	<i>Fréquence Moyenne/h (1)</i>	<i>Fréquence Moyenne (2)</i>	<i>Différence (3)=(2)-(1)/(2)</i>	<i>Ordre(>)</i>
ESDV 2285	1,5682E-04	1,8597E-04 (1E+4 échantillons ont été générés, pour un période d'observation égale à 8760 heures).	1,5675E-01	1
ESDV 2290	1,5682E-04		1,5675E-01	2
TT 2326	1,5790E-04		1,5094E-01	3
TT 2381	1,5810E-04		1,4986E-01	4
FT 2340	1,5840E-04		1,4825E-01	5
FT 2338	1,5840E-04		1,4825E-01	6
FIC 2340	1,5884E-04		1,4588E-01	7
FIC 2338	1,5884E-04		1,4588E-01	8
CCF FV	1,5896E-04		1,4524E-01	9
PT 2374	1,6021E-04		1,3852E-01	10
PV 2374	1,6026E-04		1,3825E-01	11
PIC 2374	1,6093E-04		1,3465E-01	12
CCF LIC1	1,6111E-04		1,3368E-01	13
TIC 2326	1,6185E-04		1,2970E-01	14
CCF LIC2	1,6256E-04		1,2588E-01	15
CCF ESDV	1,6260E-04		1,2567E-01	16
CCF LT2	1,6260E-04		1,2567E-01	17
CCF FT	1,6261E-04		1,2561E-01	18
CCF FIC	1,6262E-04		1,2556E-01	19
CCF LT1	1,6264E-04		1,2545E-01	20
LT 2331	1,6579E-04		1,0851E-01	21
LIC 2331	1,6666E-04		1,0383E-01	22
LT 2354	1,6831E-04		9,4962E-02	23
TIC 2381	1,7460E-04		6,1139E-02	24
FV 2340	1,7608E-04		5,3181E-02	25
FV 2338	1,7608E-04		5,3181E-02	26
LIC 2354	1,7884E-04		3,8340E-02	27

Tableau 3.12 : Ecart entre w_{avg_OAT} et w_{avg_ENS}

Les figures 3.13 (a et b) suivantes expriment la différence entre la fréquence moyenne de l'ENS obtenue par la prise en compte d'incertitude et les fréquences de l'ENS obtenues par OAT effectué pour chaque composant.

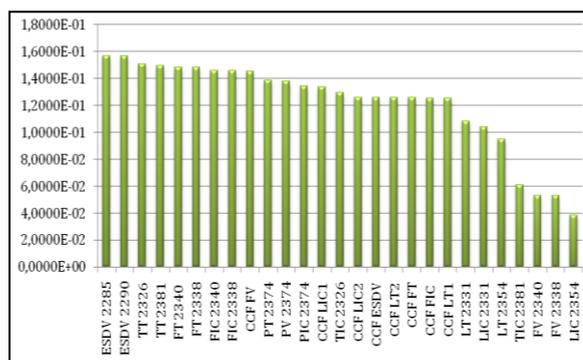
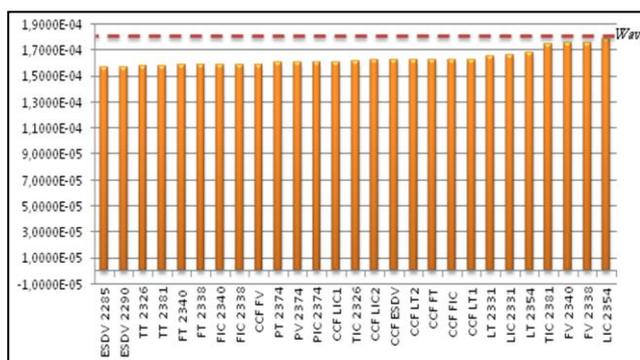


Figure3. 13a : W_{avg_Syst} et W_{avg_OAT}

Figure 3. 13b : Taux de différence entre W_{avg_Syst} et W_{avg_OAT}

Les résultats obtenus dans le tableau 3.12 et les figures 3.13 (a et b) montrent toujours que les ESDV 2285 et 2290 sont les plus importantes pour la réalisation de l'ENS.

Les résultats expriment aussi que les éléments de profil de température du débutaniseur (FT 2340, FT 2338, FIC 2340, FIC 2338 et CCF FIC) dont l'ordre est respectivement 5, 6, 7, 8 et 9 sont importants pour la réalisation de l'ENS. **Ces résultats vont permettre de réaliser un plan de maintenance préventive adéquat du système.**

• **Indicateur 4**

Le tableau 11 suivant exprime la variation des CIF calculé à partir de l'OAT de chaque composant en fonction des CIF obtenue en considérant l'incertitude.

	<i>CIF avec incertitude (1)</i>	<i>CIF_OAT (2)</i>	<i>Différence (3)= (1-2)/1 </i>	<i>Ordre d'importance</i>
ESDV 2285	3,5184E-01	4,1243E-01	1,7221E-01	9
ESDV 2290	3,0725E-01	3,6746E-01	1,9597E-01	8
FIC 2340	2,1156E-01	2,4754E-01	1,7006E-01	10
FIC 2338	2,8502E-01	2,3600E-01	1,7199E-01	11
PIC 2374	1,8912E-01	1,7419E-01	7,8924E-02	17
PT 2374	6,6002E-02	6,6059E-02	8,6178E-04	26
TIC 2381	2,6945E-01	2,7432E-01	1,8084E-02	24
LIC 2331	1,5728E-01	1,5330E-01	2,5294E-02	23
LIC 2354	1,0876E-01	1,5196E-01	3,9720E-01	4
TIC 2326	1,5037E-01	1,6372E-01	8,8771E-02	15
LT 2354	1,0398E-01	1,0898E-01	4,8083E-02	20
LT 2331	1,2459E-01	1,1453E-01	8,0757E-02	16
TT 2381	3,5066E-02	4,4795E-02	2,7745E-01	6
CCF_ESDV	2,1212E-02	2,5375E-02	1,9626E-01	7
CCF_LIC	1,7151E-03	1,5555E-03	9,3057E-02	14
PV 2374	2,3197E-02	2,1957E-02	5,3434E-02	18
TT 2326	3,1336E-02	2,0557E-02	3,4397E-01	5
FT 2338	1,6140E-02	3,2288E-02	1,0005E+00	2
FT 2340	1,6971E-02	9,1036E-03	4,6358E-01	3

CCF_LT	2,2735E-03	1,9197E-03	1,5564E-01	12
CCF LT	2,2725E-03	1,9197E-03	1,5527E-01	13
CCF_FIC	2,6326E-03	2,5031E-03	4,9176E-02	19
CCF_LIC	1,5008E-03	1,5555E-03	3,6446E-02	21
FV 2338	8,0376E-04	7,7546E-04	3,5213E-02	22
FV 2340	8,1899E-04	8,1848E-04	6,1801E-04	27
CCF_FT	3,4505E-04	3,4451E-04	1,5775E-03	25
CCF_FV	8,9668E-04	2,9808E-03	2,3242	1

Tableau 3.13 : Ordre d'importance des éléments élémentaires par CIF Moyen et OAT

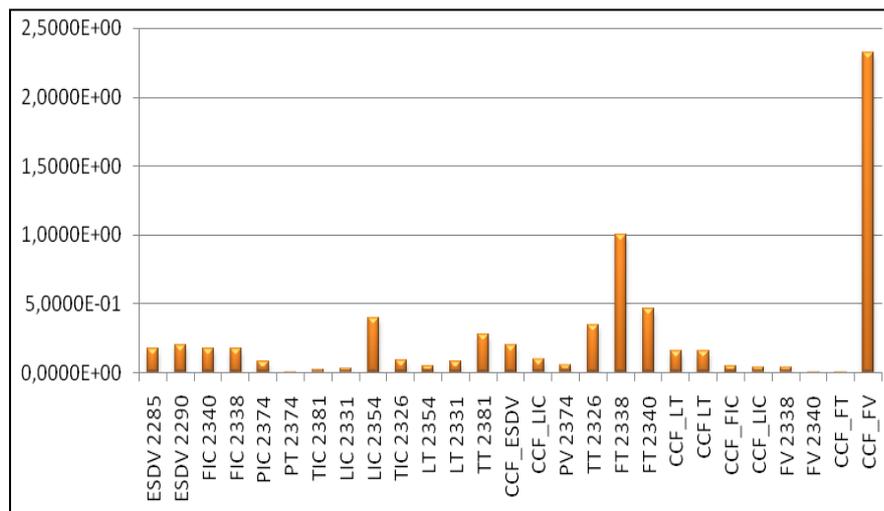


Figure 3.14 : Ordre d'importance des éléments élémentaires de débutaniseur

Les résultats exprimés dans le tableau 3.12 et la figure 3.14 montrent l'effet de l'incertitude sur la réalisation de l'ENS du système étudié, par exemple l'importance de la défaillance de causes communes CCF_FV a changé de la dernière position (27^{ième}) à la première position. *Ceci explique l'importance de la considération des incertitudes des composants de base dans l'évaluation de la fréquence d'accident du système.*

• **Indicateur 5**

Le tableau 3.13 suivant exprime les résultats trouvés lors de comparaison des intervalles des fréquences moyennes de chaque composant calculé par OAT par rapport à l'intervalle de la fréquence moyenne de l'ENS (1E +4 échantillons ont été générés, pour une durée d'observation égale à 8760 h).

Composant fixé (OAT)	Fréquence Moyenne/h	Intervalle	Ecart	Intervalle de la fréquence moyenne w_{avg} de l'ENS	Borne Inferieur	Borne Supérieur
ESDV 2285	1,5682E-04	[5,2726E-05 2,9214E-04]	2,3941E-04	$w_{avg} = 1.8597E-4$ de variation entre [1,7576E-05 3,4469E-04]	-3,5150E-05	5,2550E-05
ESDV 2290	1,5682E-04	[5,2726E-05 2,9214E-04]	2,3941E-04		-3,5150E-05	5,2550E-05
TT 2326	1,5790E-04	[5,9022E-05 3,0048E-04]	2,4146E-04		-4,1446E-05	4,4210E-05
TT 2381	1,5810E-04	[5,8381E-05 2,9434E-04]	2,3596E-04		-4,0805E-05	5,0350E-05
FT 2340	1,5840E-04	[4,9469E-05 3,0049E-04]	2,5102E-04		-3,1893E-05	4,4200E-05
FT 2338	1,5840E-04	[4,9469E-05 3,0049E-04]	2,5102E-04		-3,1893E-05	4,4200E-05
FIC 2340	1,5884E-04	[5,3627E-05 2,9760E-04]	2,4397E-04		-3,6051E-05	4,7090E-05

FIC 2338	1,5884E-04	[5,3627E-05 2,9760E-04]	2,4397E-04	-3,6051E-05	4,7090E-05
CCF FV	1,5896E-04	[4,3040E-05 2,9654E-04]	2,5350E-04	-2,5464E-05	4,8150E-05
PT 2374	1,6021E-04	[3,9433E-05 3,0766E-04]	2,6823E-04	-2,1857E-05	3,7030E-05
PV 2374	1,6026E-04	[3,9244E-05 3,0807E-04]	2,6883E-04	-2,1668E-05	3,6620E-05
PIC 2374	1,6093E-04	[4,4449E-05 3,0839E-04]	2,6394E-04	-2,6873E-05	3,6300E-05
CCF LIC1	1,6111E-04	[4,4295E-05 3,0108E-04]	2,5679E-04	-2,6719E-05	4,3610E-05
TIC 2326	1,6185E-04	[4,2823E-05 3,1683E-04]	2,7401E-04	-2,5247E-05	2,7860E-05
CCF LIC2	1,6256E-04	[5,2668E-05 3,0467E-04]	2,5200E-04	-3,5092E-05	4,0020E-05
CCF ESDV	1,6260E-04	[5,2067E-05 3,0493E-04]	2,5286E-04	-3,4491E-05	3,9760E-05
CCF LT2	1,6260E-04	[5,2473E-05 2,9169E-04]	2,3922E-04	-3,4897E-05	5,3000E-05
CCF FT	1,6261E-04	[5,2126E-05 3,0511E-04]	2,5298E-04	-3,4550E-05	3,9580E-05
CCF FIC	1,6262E-04	[5,2218E-05 3,0536E-04]	2,5314E-04	-3,4642E-05	3,9330E-05
CCF LT1	1,6264E-04	[5,2150E-05 3,0514E-04]	2,5299E-04	-3,4574E-05	3,9550E-05
LT 2331	1,6579E-04	[4,6688E-05 3,1463E-04]	2,6794E-04	-2,9112E-05	3,0060E-05
LIC 2331	1,6666E-04	[4,2691E-05 3,0291E-04]	2,6022E-04	-2,5115E-05	4,1780E-05
LT 2354	1,6831E-04	[4,9367E-05 3,0397E-04]	2,5460E-04	-3,1791E-05	4,0720E-05
TIC 2381	1,7460E-04	[8,9550E-05 2,9139E-04]	2,0184E-04	-7,1974E-05	5,3300E-05
FV 2340	1,7608E-04	[6,4340E-05 3,5270E-04]	2,8836E-04	-4,6764E-05	-8,0100E-06
FV 2338	1,7608E-04	[6,4340E-05 3,5270E-04]	2,8836E-04	-4,6764E-05	-8,0100E-06
LIC 2354	1,7884E-04	[4,2258E-05 2,9936E-04]	2,5710E-04	-2,4682E-05	4,5330E-05

Tableau 3.14 : Ecart d'intervalle entre w_{avg_OAT} et w_{avg}

L'écart d'intervalle de chaque composant trouvé entre w_{avg_OAT} et w_{avg} est schématisé dans la figure 3.15 suivant :

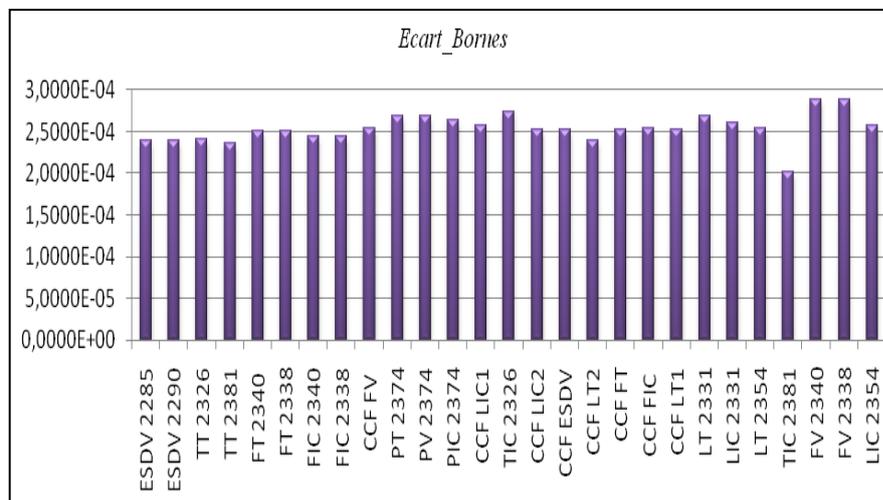


Figure 3.15 : Ecart d'intervalle entre w_{avg_OAT} et w_{avg}

Les résultats du tableau 3.14 et la figure 3.15 exprime l'écart entre les bornes supérieures et inférieures de chaque composant. Les résultats obtenus nous permettent d'identifier les composants dont l'élimination d'incertitudes se traduit soit par un accroissement de la borne supérieure de la fréquence d'accident (signe négatif), soit par sa diminution (signe positif). **Cela dit, le critère de**

classification des composants est le suivant : plus l'écart est important, plus le composant est critique vis-à-vis la considération des incertitudes qui lui sont associées.

Conclusion

L'incertitude en évaluation des risques a surtout été appréhendée dans un cadre purement probabiliste. Cela revient à supposer que la connaissance sur les paramètres des modèles est toujours de nature aléatoire (variabilité). Cette approche consiste à représenter les paramètres incertains par des distributions de probabilité uniques et à transmettre l'incertitude relative à ces paramètres sur celle du risque encouru par la cible, en appliquant en général la technique de Monte Carlo. Dans cette optique, le troisième et dernier chapitre était consacré pour étudier la propagation de l'incertitude et l'analyse de sensibilité d'une fréquence moyenne d'ENS. Pour ce faire nous avons d'abord calculé la fréquence moyenne d'une manière classique (sans incertitude) d'un système opérationnel choisi, puis nous avons calculé la fréquence avec incertitude en utilisant le logiciel Grif par la simulation de Monte Carlo sur un intervalle d'observation d'une année (8760 h). Nous avons finalement analysé la sensibilité de ce système et déterminé les composants de bases critiques pour la réalisation de l'ENS.

A noter aussi, que les indicateurs proposé pour caractériser la sensibilité de la fréquence accidentelle au regard des incertitudes liés aux différents paramètres fiabilistes ont été validés.

Annexe 1 : Exemple de classification des risques d'accidents

Probabilité	Gravité			
	Conséquence catastrophique	Conséquence critique	Conséquence marginale	Conséquence négligeable
Fortement probable	I	I	I	II
Probable	I	I	II	II
Possible	I	II	II	II
Peu probable	II	II	II	III
Improbable	II	III	III	III
Invraisemblable	II	III	III	III

Note 1 : Se reporter au tableau II.2 pour l'interprétation des classes de risque I à III.
Note 2 : Le renseignement réel de ce tableau avec les classes de risque I, II et III dépendra de l'application et également de ce que sont effectivement les probabilités : fortement probable, probable, etc. De ce fait, il convient de regarder ce tableau plutôt que comme une spécification destinée à une utilisation ultérieure.

Annexe 2 : Relation entre classes et zones de risque

Classe de risque	Interprétation
Classe I	Risque intolérable
Classe II	Risque indésirable et uniquement tolérable si la réduction du risque est impossible ou si les coûts sont manifestement disproportionnés par rapport aux améliorations obtenues.
Classe III	Risque négligeable

Annexe 3 : Description du logiciel SimLab [SimLab, 2006]

SimLab est un logiciel conçu pour le calcul de l'incertitude et l'analyse de sensibilité en se basant sur la méthode de Monte Carlo.

La méthode de Monte Carlo est utilisée ici pour la génération de nombres pseudo-aléatoires avec un accent sur le plateau de points de distributions de probabilité conjointe d'échantillonnage, la "répartition de l'échantillon" de désignation est souvent utilisée.

L'incertitude et l'analyse de sensibilité sont fondées sur l'exécution de multiples évaluations de modèle avec la participation de modèle probabiliste sélectionné, puis en utilisant les résultats de ces évaluations afin de déterminer :

- l'incertitude dans les prédictions du modèle ;
- les variables d'entrée qui ont donné lieu à cette incertitude.

L'application SimLab est composée de trois modules. Ces modules couvrent toutes les étapes résumées ci-dessus.

1. Le module de **traitement de pré statistique**: génère un échantillon dans l'espace des facteurs de production ;
2. Le module **d'exécution du modèle**: le modèle exécute pour chaque point de l'échantillon de facteurs de production ;
3. Le module **processeur de statistiques**: effectue l'incertitude et l'analyse de sensibilité.

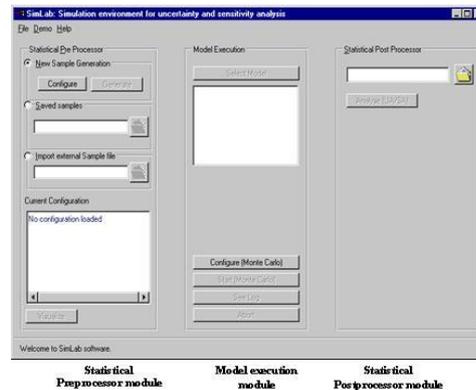


Figure A.1. Fenêtre principale du soft SimLab

Annexe 4 : Description du Logiciel Grif [Grif, 2013]

GRIF (Graphique Interactifs pour la fiabilité) est un logiciel maintenu par la société Satodev au sein de l'entreprise TOTAL pour l'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement : Fiabilité – Disponibilité – Performance – Sécurité.

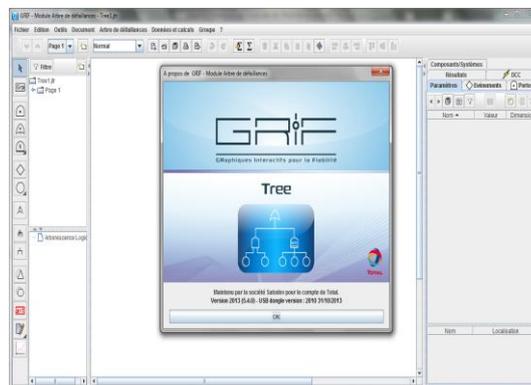


Figure A.2. Fenêtre principale du soft Grif.

GRIF est structuré en 3 packages :

Le package Booléen comprend les modules BFIAB, Tree, ETree et SIL

- Le module *BFIAB* repose sur une modélisation du type blocs diagrammes de fiabilité.
- Le module *Tree* repose sur une modélisation de type arbre de défaillances.
- Le module *ETree* repose sur une modélisation de type arbre d'événements.
- Le module *SIL* permet d'évaluer les Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) à partir du calcul des niveaux d'intégrité de sécurité SIL selon les normes IEC 61508 & 61511.

Annexe 5 : Définitions

• Loi Uniforme

Cette loi a deux paramètres: une limite supérieure et une limite inférieure.

- a = limite supérieure
- b = limite inférieure

La définition de la loi est la suivante:

$$Q(t) = \frac{(t-a)}{(b-a)}$$

• Loi Log normale

Cette loi a deux paramètres: la moyenne et l'écart type.

- μ = moyenne
- σ = écarttype

La définition de la loi est la suivante:

$$Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

• Loi Normale

Cette loi a deux paramètres: la moyenne et l'écart type.

- μ = moyenne
- σ = écarttype

La définition de la loi est la suivante:

$$Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

• Facteur d'importance marginal (MIF : *Marginal Importance Factor*)

Le facteur d'importance marginal, introduit par Birnbaum [DO VAN, 2008], est défini comme une mesure de variation de la disponibilité/fiabilité du système en fonction de la disponibilité/fiabilité d'un composant. Par définition, le facteur d'importance marginal relatif au composant i peut s'écrire selon l'expression suivante :

$$MIF = \frac{\partial A(t)}{\partial a_i(t)} \quad (\text{ou} \quad \frac{\partial \overline{A(t)}}{\partial a_i(t)})$$

Avec :

- $A(t)$, $a_i(t)$ sont les disponibilités /fiabilités du système et du composant i à l'instant t ,
- $A(t)$, $a_i(t)$ sont les indisponibilités/dé fiabilités du système et du composant i à l'instant t .

Une autre façon permettant de calculer ce facteur est donné selon l'expression suivante:

$$MIF = P\{\varphi(\mathbf{1}_i, s) - \varphi(\mathbf{0}_i, s) = 1\}$$

Avec:

- $s = (s_1, s_2, s_3, \dots)$ représente le vecteur d'états du système avec s_i une variable booléenne indiquant l'état du composant i : $s_i = 1$ si le composant i est en marche, sinon $s_i = 0$;
- $(\mathbf{1}_i, s) = (s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, 1, s_{i+1}, \dots)$,
- (s) correspond à la fonction de structure du système pour laquelle $\varphi(s) = 1$ si le système est en marche, $\varphi(s) = 0$ en cas de panne.

Le facteur d'importance marginal relatif au composant i dans un système cohérent peut donc être défini comme la probabilité que la panne du composant i conduise à la panne du système.

- **Facteur d'importance de critique (CIF : *Critical Importance Factor*)**

Le facteur d'importance critique, introduit par Lambert [DO VAN, 2008], correspond à la probabilité que le composant i ait mis en panne le système, sachant que le système est en panne. Ce facteur évalue donc l'importance d'un composant en fonction de sa participation à la mise en panne du système global.

$$CIF = \frac{P\{(\varphi(\mathbf{1}_i, s) - \varphi(\mathbf{0}_i, s) = 1) \cap \mathcal{S}_i = 0 / \varphi(s) = 0\}}{P\{\varphi(s) = 0\}}$$

Ce facteur est en fait utile en cas de panne pour identifier les composants à réparer en priorité, c'est à dire ceux dont la mise en marche est la plus susceptible de restaurer le fonctionnement du système.

Annexe 6 : Coupes minimales du système SBS (Figure 3.1)

CCF*SV, LE₁*LE₂*SV, LIC*SV, LICV*SV, CCF*PCV, LE₁*LE₂*PCV, LIC*PCV, LICV*PCV, CCF*PC, LE₁*LE₂*PC, LIC*PC, LICV*LT*PC

Annexe 7 : Coupes minimales du débutaniseur V231 (Figure 3.8)

TIC2326*CCFESDV, TIC2326*ESDV 2285_2_2, TIC2326*ESDV 2290_2_2,
 TIC2326*TIC2381_2_2*LIC2331*LT2354, TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLT*LIC2331,
 TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLIC*LIC2331, LIC2354_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2*LIC2331,
 TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLIC*LT2354, TIC2326* TIC2381_2_2*CCFLIC*CCFLT,
 TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLIC*CCFLIC2, LIC2354_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLIC,
 LT2331_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2*LT2354, LT2331_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLT2,
 LT2331_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLIC2,
 LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2326*TIC2381_2_2, TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLT*LT2354,

TIC2326*TIC2381_2_2*CCFLT*CCFLT2, TIC2326* TIC2381_2_2*CCFLT*CCFLIC,
LIC2354_2_2*TIC2326* TIC2381_2_2*CCFLT, TIC2326*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
TIC2326*TT2381_2_2*CCFLT2*LIC2331, TIC2326*TT2381_2_2*CCFLIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2* TIC2326*TT2381_2_2*LIC2331, TIC2326*TT2381_2_2*CCFLIC*LT2354,
TIC2326*TT2381_2_2*CCFLIC*CCFLT2, TIC2326*TT2381_2_2*CCFLIC*CCFLIC2,
LIC2354_2_2* TIC2326* TT2381_2_2*CCFLIC, LT2331_2_2* TIC2326*
TT2381_2_2*LT2354, LT2331_2_2* TIC2326*TT2381_2_2*CCFLT2, LT2331_2_2* TIC2326*
TT2381_2_2*CCFLIC2, LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2326*TT2381_2_2*TIC2326*
TT2381_2_2*CCFLT*LT2354, TIC2326*TT2381_2_2*CCFLT*CCFLT, TIC2326*
TT2381_2_2*CCFLT*CCFLIC2, LIC2354_2_2*TIC2326*TT2381_2_2*CCFLT,
TT2326*CCF_ESDV, TT2326*ESDV 2285_2_2 , TT2326*ESDV 2290_2_2,
TIC2381_2_2*TT2326*LT2354*LIC2331 , TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT2*LIC2331,
TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC2*LIC2331, LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*LIC2331,
TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC*LT2354, TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC*CCF_LT2,
TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC*CCF_LIC2, LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*LT2354, LT2331_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT2,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*TT2326, TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT*LT2354,
TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT*CCF_LT2, TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*TT2326*CCF_LT, TT2326*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TT2326*TT2381_2_2*LIC2331, TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*TT2326*TT2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT2, LT2331_2_2*TT2326*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2326*TT2381_2_2, TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2326*TT2381_2_2*CCF_LT, FV2338*CCF_ESDV, FV2338*ESDV 2285_2_2,
FV2338*ESDV 2290_2_2, FV2338*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FV2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331, FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FV2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC, FV2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354,
FV2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FV2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FV2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FV2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FV2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FV2338*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FV2338*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FV2338*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FV2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FV2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FV2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FV2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FV2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FV2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FV2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2, FV2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,

FV2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FV2338*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FV2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FV2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FV2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT, CCF_ESDV*CCF_FIC, ESDV
2285_2_2*CCF_FIC, ESDV 2290_2_2*CCF_FIC, TIC2381_2_2*CCF_FIC*LT2354*LIC2331,
TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT2*LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*LT2354,
TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*CCF_LT2, TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*LT2354,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT2,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC,
TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*LT2354, TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*CCF_LT2,
TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT, TT2381_2_2*CCF_FIC*LT2354*LIC2331,
TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT2*LIC2331, TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*LIC2331, TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*LT2354,
TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*CCF_LT2, TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC, LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*LT2354,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT2,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC, TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*LT2354,
TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*CCF_LT2, TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FIC*CCF_LT, CCF_ESDV*CCF_FT, ESDV
2285_2_2*CCF_FT, ESDV 2290_2_2*CCF_FT, TIC2381_2_2*CCF_FT*LT2354*LIC2331,
TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT2*LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*LT2354,
TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*CCF_LT2, TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC, LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*LT2354,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT2,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT, TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*LT2354,
TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*CCF_LT2, TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT, TT2381_2_2*CCF_FT*LT2354*LIC2331,
TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT2*LIC2331, TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*LIC2331, TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*LT2354,
TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*CCF_LT2, TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC, LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*LT2354,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT2,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT, TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*LT2354,
TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*CCF_LT2, TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FT*CCF_LT, FIC2338*CCF_ESDV, FIC2338*ESDV

2285_2_2, FIC2338*ESDV 2290_2_2, FIC2338*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LIC2331,
FIC2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331, FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC, FIC2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354,
FIC2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FIC2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FIC2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FIC2338*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FIC2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FIC2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FIC2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2,
FIC2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FIC2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FIC2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT, FT2338*CCF_ESDV, FT2338*ESDV 2285_2_2,
FT2338*ESDV 2290_2_2, FT2338*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FT2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331, FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC, FT2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354,
FT2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FT2338*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FT2338*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FT2338*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FT2338*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FT2338*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FT2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FT2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FT2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FT2338*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FT2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FT2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2, FT2338*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FT2338*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FT2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FT2338*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FT2338*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT, PV2374*CCF_ESDV, PV2374*ESDV 2285_2_2,
PV2374*ESDV 2290_2_2, PV2374*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*LIC2331, PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2,

LT2331_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PV2374*TIC2381_2_2, PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PV2374*TIC2381_2_2*CCF_LT, PV2374*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PV2374*TT2381_2_2*LIC2331, PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PV2374*TT2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT2, LT2331_2_2*PV2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PV2374*TT2381_2_2, PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PV2374*TT2381_2_2*CCF_LT, PIC2374*CCF_ESDV, PIC2374*ESDV
2285_2_2, PIC2374*ESDV 2290_2_2, PIC2374*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*LIC2331, PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
LT2331_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2, PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PIC2374*TIC2381_2_2*CCF_LT, PIC2374*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*LIC2331, PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT2,
LT2331_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PIC2374*TT2381_2_2, PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PIC2374*TT2381_2_2*CCF_LT, PT2374*CCF_ESDV, PT2374*ESDV 2285_2_2,
PT2374*ESDV 2290_2_2, PT2374*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*LIC2331, PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
LT2331_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PT2374*TIC2381_2_2, PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PT2374*TIC2381_2_2*CCF_LT, PT2374*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*PT2374*TT2381_2_2*LIC2331, PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,

PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC, LT2331_2_2*PT2374*TT2381_2_2*LT2354,
LT2331_2_2*PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT2, LT2331_2_2*PT2374*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*PT2374*TT2381_2_2, PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*PT2374*TT2381_2_2*CCF_LT, CCF_FV *CCF_ESDV, CCF_FV *ESDV
2285_2_2, CCF_FV *ESDV 2290_2_2, TIC2381_2_2*CCF_FV *LT2354*LIC2331,
TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT2*LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC2*LIC2331,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *LIC2331, TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*LT2354,
TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*CCF_LT2, TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *LT2354,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT2,
LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV,
TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*LT2354, TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*CCF_LT2,
TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*CCF_LIC2, LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT,
TT2381_2_2*CCF_FV *LT2354*LIC2331, TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT2*LIC2331,
TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC2*LIC2331, LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *LIC2331,
TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*LT2354, TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*CCF_LT2,
TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC*CCF_LIC2, LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *LT2354, LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT2,
LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV, TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*LT2354,
TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*CCF_LT2, TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT*CCF_LIC2,
LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_FV *CCF_LT, FIC2340*CCF_ESDV,
FIC2340*ESDV 2285_2_2, FIC2340*ESDV 2290_2_2,
FIC2340*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331, FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331,
FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331, FIC2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331,
FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354, IC2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2,
FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FIC2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC,
FIC2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354, FIC2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FIC2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FIC2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FIC2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FIC2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FIC2340*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FIC2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FIC2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FIC2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FIC2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2,
FIC2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,

FIC2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FIC2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FIC2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT, FT2340*CCF_ESDV,
FT2340*ESDV 2285_2_2, FT2340*ESDV 2290_2_2, FT2340*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FT2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331, FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC, FT2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354,
FT2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FT2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FT2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FT2340*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FT2340*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FT2340*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FT2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FT2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FT2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FT2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FT2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FT2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2, FT2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FT2340*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FT2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FT2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FT2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT, FV2340*CCF_ESDV, FV2340*ESDV 2285_2_2,
FV2340*ESDV 2290_2_2, FV2340*TIC2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FV2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*LIC2331, FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC, FV2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*LT2354,
FV2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT2,
FV2340*LT2331_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TIC2381_2_2, FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FV2340*TIC2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*TIC2381_2_2*CCF_LT, FV2340*TT2381_2_2*LT2354*LIC2331,
FV2340*TT2381_2_2*CCF_LT2*LIC2331, FV2340*TT2381_2_2*CCF_LIC2*LIC2331,
FV2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*LIC2331, FV2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*LT2354,
FV2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LT2, FV2340*TT2381_2_2*CCF_LIC*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC, FV2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*LT2354,
FV2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT2, FV2340*LT2331_2_2*TT2381_2_2*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*LT2331_2_2*TT2381_2_2, FV2340*TT2381_2_2*CCF_LT*LT2354,
FV2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LT2, FV2340*TT2381_2_2*CCF_LT*CCF_LIC2,
FV2340*LIC2354_2_2*TT2381_2_2*CCF_LT.

[3SF, 1974] Société pour l'avancement de la sécurité des systèmes en France. *Terminologie cohérente dans le domaine de la sécurité moderne. Document non publié.*

[André Lannoy, 2010] : André Lannoy et Emmanuel Arbaretier «Contributions de la surveillance à la maîtrise des risques et à la sûreté de fonctionnement » Institut de management et maîtrise de risques V1-2, France, 2010.

[Anon, 89] *Guidelines for Process Equipment Reliability Data. New York, AIChE Center for Chemical Process Safety. ISBN 0-8169-0422-7, 1989.*

[Anon, 95] *Nonelectronic Parts Reliability. New York, Reliability Analysis Center, Griffiss AFB. 1995.*

[Anya, 71] Anyakora S.N. «*Some data on the reliability of instruments in the chemical plant environment*». Chem. Engr. London, 1971.

[Baudrit, 2005] : Cédric BAUDRIT, « Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués. Thèses de doctorat, Université de Toulouse, France, 2005.

[Baudrit, et al., 2007] Baudrit C., Guyonnet, D., and Dubois, D. (2007). Joint propagation of variability and imprecision in assessing the risk of groundwater contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93(1-4):72-84.

[Bettonvil & Kleijnen, 1997] Bettonvil B. & Kleijnen J. P.C «*Searching for important factors in simulation models with many factors: Sequential bifurcation*». *European Journal of Operational Research*, 96(1):180-194. 1997

[Birnbaum, 1969] Birnbaum Z.W., «*On the importance of different components in a multi-component system*». In *Multivariable analysis II*, P.R. Krishnaiah, Ed. New York: Academic Press, pp. 581–592, 1969.

[Bubbico & Mazzarotta, 2008] Bubbico R. & Mazzarotta B. «*Accidental release of toxic chemicals: Influence of the main input parameters on consequence calculation*». *Journal of Hazardous Materials*, 151:394 – 406. 2008.

[Bouchon-Meunier, 1995] Bouchon-Meunier BERNADETTE «*La logique floue et ses applications, Vie artificielle* », Addison-Wesley France, 1995.

[Bourarache, 2009] Mouloud Bourarache «*Apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse semi quantitatives des risques industriels* » Mémoire de Magistère, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2009.

[BP Amocco, 2010] BP Amoco Exploration (In-Amenas) Ltd «*Evaluation of In Amenas CPF Explosion Risks*», Report no/DNV Reg No.: 1/ 12JEZRS-4, 2010.

[Campolongo & Braddock, 1999] Campolongo F. & Braddock R «*The use of graph theory in the sensitivity analysis of the model output: a second order screening method*» *Reliability Engineering & System Safety*, 64(1):1 – 12. 1997

[CEI 61508-5, 1998] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 5: Exemples de méthodes de détermination des niveaux d'intégrité de sécurité - Edition 1.0. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse, 1998.

[CEI 61508-5, 1998] Norme CEI 61508-5. Annexe B. Concepts d'ALARP et de risque Tolérable. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, 1998.

[CEI 61511, 2003] Norme CEI 61511. Sécurité fonctionnelle - Systèmes instrumentés de Sécurité pour le domaine de la production pour processus – Parties 1 à 3. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, Janvier-Juillet 2003.

[CEI 61511-1, 2003] Sécurité fonctionnelle – Systèmes instrumentés de sécurité pour le secteur des industries de transformation – Partie 1: Cadre, définitions, exigences pour le système, le matériel et le logiciel - Edition 1.0. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse, Janvier 2003.

[CCPS, 2001] *Layer of protection analysis; simplified process assessment; center for chemical process safety of the American institute for chemical Engineers; New York; 2001.*

[CEA, 2002] Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). *Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques*. CEA, France, 2002.

[Céline et al., 2013] Céline Baranger et Julien Mathiaud « Méthode de Monté Carlo pour les équations de transport » Springer, Spain 2013.

[Christian & George, 2010] Christian Robert & George Casella «Monte Carlo Statistical Methods» Springer, 2010.

[Cukier et al., 1973] Cukier R.I., Fortuin C.M., Shuler K.E., Petschek A.G. & Schaibly J.H. «Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients theory» *Journal Chemical Physics*, 59:3873 – 3878, 1973.

[Daniel Warner North, 2010] Daniel Warner North. « Probability theory and consistent reasoning». *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 30(3):377–80, March 2010.

[David Blockley, 2012] David Blockley. «Analyzing uncertainties: Towards comparing Bayesian and interval probabilities». *Mechanical Systems and Signal Processing*, pages 1–13, June 2012.

[Deana & Lewis, 2002] Deana A. M. & Lewis S. M. «Comparison of group screening strategies for factorial experiments», *Computational Statistics & Data Analysis*, 39(3):287-297. 2002.

[Delcroix, et al., 2014] Véronique Delcroix, Ali Ben M'rad & Sylvain Piechowiak «De l'information à l'observation dans un réseau bayésien » Actes IAF 2014.

[Dempster, 1967] Dempster A.P. «*Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping*». *Annals of mathematical statistics. Reliability Engineering and System Safety*, 38(12):325-339, 1967.

[Désenfant, 2007] Désenfant M. «*Evaluation de l'incertitude en utilisation de la simulation de Monté Carlo*» Article non publié, laboratoire nationale de métrologie et d'essai LNE, France, 2007.

[DIN V 19250, 1994] Exigences de sécurité des équipements de mesures et de contrôle «*Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen*», Berlin, Deutsches Institut für Normung, 1994.

[Dubois et Prade, 1988] Dubois D., & Prade H., «*Possibility theory. An approach to computerized processing of uncertainty*». Plenum Press, 1988.

[Dubois et Prade, 1994] Dubois, D. and Prade., H. «*La fusion d'information imprécis*» *Traitement Du Signal*, chapitre *La fusion d'informations imprécises*, pages 447-458. France 1994.

[Dubois et al., 2004] Didier DUBOIS, Foulloy LAURENT, Mauris GILLES and Henri PRADE «*Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities*». *Jornal of Reliable computing*, 10:273-297. 2004

[Dubois et al. 2010] Didier Dubois and Henri Prade. «*Formal representations of uncertainty*». In *Decision-making Process: Concepts and Methods*, chapter 3, pages 85–156. ISTE & Wiley, London, 2010.

[Elisabeth Paté-Cornell, 1996] Elisabeth Paté-Cornell «*Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*» *Reliability Engineering and System Safety* 54:95-111. 1996.

[Enrico Zio, 2009] Enrico Zio. «*Reliability engineering: Old problems and new challenges*». *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2):125–141, February 2009.

[EPA, 2009] EPA «*Guidance on the development, Evaluation, and application of Environmental models*». U.S. Environmental Protection Agency, 2009.

[Felipe AGUIRRE et al., 2013] Felipe AGUIRRE, Mohamed SELLAQ & Walter SCHÖN «*Prise en compte des incertitudes dans les études de fiabilité: Comparaison entre le Modèle de Croyances Transférables et les méthodes de simulations de Monté-Carlo*» Manuscrit publié dans *Qualita*. France, 2013.

[Groot, 1988] De Groot, M.H., «*Modern aspects of probability and utility*». In *Accelerated Life Testing and Expert Opinion in Reliability*, page 3-27, North Holland, Amsterdam, 1988.

[Grif, 2013] : Grif Software: <http://grif-workshop.fr/> distributed under the Satodev, USB Dongle License, Version 5.4.0, 2013.

[HADDAD, 2013] Samia HADDA «*Evaluation et Optimisation des Performances des Systèmes Instrumentés de Sécurité pour une Meilleure Maîtrise des Risques*» Mémoire de magistère, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2013.

[Helton & Oberkampf, 2004] Helton, J. C. & Oberkampf, W. L. « Alternative representations of epistemic uncertainty ». *Reliability Engineering and System Safety*, 85:110. 2004.

[Hofer, 1996] Hofer, E. « *When to separate uncertainties and when not to separate* ». *Reliability Engineering and System Safety* **54**:113–118. 1996.

[Homma et Saltelli, 1996] Homma T., Saltelli A., « *Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models* ». *Reliability Engineering & System Safety*, 52 (1):1 – 17, 1996.

[IEC61508, 1998] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / Électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 1 à 7. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse, 1998-2000.

[IEC 61882, 2001] CEI IEC 61882, Norme internationale, études de danger et d'exploitation (étude HAZOP), guide d'exploitation, première édition, CEIIEC 61 882:2001.

[IEC 61511, 2000] *Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector, 2000*.

[IEC 61508-4, 2002] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 4: Définitions et abréviations - Edition 1.0. *Commission Electrotechnique Internationale*, Genève, Suisse, Décembre 1998-2002.

[Innal, 2008] Innal F., « Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances, Analyse critique de la norme CEI 61508 ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2008.

[Innal et al., 2013] Innal F., Bourarache M, Chebila M, Simohammed A. « *Treatment of Uncertainty in Probabilistic Risk Assessment Using Monte Carlo Analysis* » *Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control, 978-1-4799-0275-IEEE Algiers, Algeria, 2013*.

[INERIS-DRA, 2003] INERIS-DRA « Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle ». INERIS, Direction des Risques Accidentels, France, 2003.

[Isabelle, 2004] Isabelle BLOCH, « Les méthodes de raisonnement dans les images » ENST, Département TSI, France, 2004.

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

[JCGM 101, 2008] JCGM 101:2008 « *Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"- Propagation of distributions using a Monte Carlo method* »; 2008.

[Joly & Vallee, 2004] Joly C., & Vallee A. « Analyse des risques et prévention des accidents majeurs: Synthèse vis-à-vis de l'étude de danger ». INERIS-Direction des Risques Accidentels, France, 2004.

[Kalos & Whitlock, 1986] Kalos, M. and Whitlock, P. « *Monte Carlo methods* » Volume I: *Basics*. John Wiley and Sons, New York, 1986.

[Kaufman, et al., 1991] Kaufman A., & Gupta M.M. « *Introduction to Fuzzy Arithmetic Theory and Application* ». Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1991.

[LANTERNIER ET ADJADJ, 2008] Lanternier B. et Adjadj A. Allocation de Niveau d'Intégrité de Sécurité (Sil) Requis conformément à la Norme CEI 61511- Institut Nationale de l'Environnement Industriel et des Risques, DCE/LEEL Verneuil en Halatte – France – Publié dans la Revue internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels Vol 1, No 1, 2008.

[LEDUY, 2011] Tu Duong LE DUY. « *Traitement des incertitudes dans les applications des Études Probabilistes de Sûreté Nucléaire* » Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes. 2011.

[LE MOIGNE, 1984] J. L. Le Moigne. *La théorie du système général – Théorie de la modélisation*. PUF, Paris, France.7

[LEV et al., 2010] Lev V. Utkin and Igor Kozine « *On new cautious structural reliability models in the framework of imprecise probabilities* ». *Structural Safety*, 32(6):411–416, November 2010.

[LIEVENS, 1976] C. Lievens « *Sécurité des systèmes* ». *Cepadues éditions*, Toulouse, France, 1976.

[Lux et Koblinger, 1991] Lux I. and Koblinger L. « *Monte Carlo Particle transport methods* » *Neutron and Photon calculations*, CRC Press, 1991.

[Mazouni, 2008] Mazouni M-H « *Pour une Meilleure Approche du Management des Risques: De la modélisation Ontologique du Processus Accidentel au Système Interactif d'Aide à la Décision* ». Thèse de doctorat, Université de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2008.

[Mechri, 2011] Walid MECHRI, « *Evaluation de la performance des Systèmes Instrumentés de Sécurité à paramètres imprécis* » Thèse de doctorat, université de Tunis ELMANAR, 2011.

[Mechri et al., 2011] Mechri W., Simon C., Benothman K., & Benrejeb M. « *Evaluation des performances imprécises des SIS par des familles de densités de probabilités* ». In Proceedings of the QUALITA Conference, Angés, France, 2011.

[Morris, 2006] Morris M. D. « *Input screening: Finding the important model inputs on a budget* », *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11): 1252-1256. 2006

[NASA, 2002] NASA « *Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners* ». NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.

[Nair et al., 1997] Nair S. K., Chambers D. B., Park S. H. & Hoffman, F. O. « *Review of Models Used for Determining Consequences of UF6 Release: Model Evaluation Report, Vol.2* », Prepared for the Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear

Regulatory Commission, Washington, District of Columbia 20555-0001, NUREG/CR-648, 1997.

[Nozer D Singpurwalla, 2006] Nozer D Singpurwalla «*Reliability and Risk: A Bayesian Perspective*». *Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons, 2006.*

[Ouddai, 2013] Ouddai Roukai «*Étude des relations entre les coûts d'accidents et la performance en sécurité*» Thèse de doctorat, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2013.

[OHSAS18001, 1999] *Système de management de la santé et de la sécurité au travail-Spécification - BSI, Afnor.*

[Ouzraoui, 2014] Ouzraoui Noura «*Application des Techniques de l'Intelligence Artificielle aux Problèmes de Gestion des Risques Industriels*» Thèse de doctorat, Institut Hygiène et sécurité industrielle, Université de Batna, 2014.

[Ouzraoui, et al., 2014] Ouzraoui N., Rabah B., Nait Said R., Bourarache M., «*Implementation of Safety Instrumented Systems using Fuzzy Risk Graph Method*» *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bali, Indonesia, 2014.*

[Pandya, 2009] Nishant PANDYA «*Analyse de sensibilité paramétrique d'un outil de modélisation des conséquences de scénarios d'accidents. Application à la dispersion atmosphérique de rejets avec le logiciel Phast*», Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[Rabah, 2013] Rabah Bilal «*Etude de l'implémentation des Systèmes Instrumentés de Sécurité par des méthodes semi-quantitatives dans un environnement de connaissances imparfaites*» Mémoire de magistère, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, soutenu le 26/12/2013.

[Rausand, 2004] Rausand M., & Hoyland A. «*System Reliability Theory: Models, Statistical Methods and Applications*». *2nd ed., New Jersey: Wiley, Hoboken, 2004.*

[Rauzy, 1993] Rauzy A., «*New Algorithms for Fault Tree Analysis*». *Reliability Engineering and System Safety, Vol. 40, pp. 203–211, 1993.*

[Roger M. Cooke, 2004] Roger M. Cooke, «*The anatomy of the squizzel : The role of operational definitions in representing uncertainty*». *Reliability Engineering & System Safety, 85(1-3):313–319, July 2004.*

[Seamus Bradley, 2012] Seamus Bradley «*Dutch Book Arguments and Imprecise Probabilities. In Dennis Dieks, Wenceslao J. Gonzalez, Stephan Hartmann, Michael Stöltzner, and Marcel Weber, editors, Probabilities, Laws, and Structures, volume 3 of The Philosophy of Science in a European Perspective*», pages 3–17. *Springer Netherlands, 2012.*

[Sallak, 2007] Mohamed SALLAK, «*Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité*». Thèse de doctorat, Nancy University, Institut National Polytechnique de Lorraine,

France, 2007.

[SALLAK et al., 2008] Mohamed SALLAK, Christopher SIMON, and J.-F AUBRY, «A fuzzy probabilistic approach for determining safety integrity level». *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(1):239-248. 2008.

[SALLAK et al., 2010] Mohamed SALLAK, Walter SCHÖN, and Felipe AGUIRRE. «The Transferable Belief Model for reliability analysis of systems with data uncertainties and failure dependencies». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 40:266–278, 2010.

[SALLAK et al., 2012] Mohamed Sallak, Walter Schön, and Felipe Aguirre. «Reliability assessment for multi-state systems under uncertainties based on the Dempster-Shafer theory». *IIE Transactions*, DOI: 10.1080/0740817X.2012.706378, 2012.

[Saltelli et al., 1999] Saltelli A., Tarantolac S. & Chan, K., «A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output», *Technometrics*, 41(1): 39 – 56, 1999.

[Saltelli, et al., 2000] Saltelli A., Chan K. & Scott M. «Mathematical and statistical methods for sensitivity analysis». John Wiley & Sons publishers, Probability and Statistics series, 2000.

[Saltelli et al, 2004] Saltelli A., Chan K., & Scott EM. «Sensitivity Analysis» John Wiley & Sons Publication, 2004.

[Saltelli et al., 2005] Saltelli A., Ratto M., Tarantola S. & Campolongo F. «Sensitivity analysis for chemical models» *Chemical Reviews*, 105(7):2811 – 2826, 2005.

[Saltelli, 2006] Saltelli A. «The critique of modeling and sensitivity analysis in the scientific discourse». Institute for the Protection and Security of the Citizen, rapport EUR 22487 EN. 2006

[Smidts, 1997] Smidts Olivier «Analyse probabiliste du Risque du stockage de Déchets radioactifs par la Méthode des arbres d'Événements continus ». Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 1997.

[Sandri, 1991] Sandra SANDRI, «La combinaison de l'information incertaine et ses aspects algorithmiques ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1991.

[SCHÖN et al., 2004] W. Schön and T. Denoeux. «Prise en compte des incertitudes dans les évaluations de risque à l'aide de fonctions de croyance ». In 14^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France, 2004.

[Shafer, 1976] Shafer, Glenn «A Mathematical Theory of Evidence». Princeton University Press, 1976.

[Skal, 74] Skala V. «Improving instrument service factors». *Instrument Technology*, 21(11):27, 1974.

- [Signoret, et al. 2007] Signoret J-P., Dutuit Y., & Rauzy A. « *High integrity protection systems (hips): Methods and tools for efficient safety integrity levels (SIL) analysis and calculations* ». In *Risk, Reliability and Societal Safety Aven and Vinnem (eds)*, 2007.
- [SimLab, 2006] SimLab Software: <http://simlab.jrc.ec.europa.eu/> distributed under the SimLab Software License, Version 2.2.1, 2006.
- [Sobol, 1993] Sobol I. M. « *Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models* ». *Mathematical Modeling & Computational Experiment*, 1(4):407 – 414, 1993.
- [Stamatelatos, 2002] Stamatelatos, M. « *Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners* ». *Note technique, NASA*, 2002.
- [Terje Aven, 2010] Terje Aven. « *Some reflections on uncertainty analysis and management* ». *Reliability Engineering & System Safety*, 95(3):195–201, March 2010.
- [Turányi & Rabitz, 2004] Turányi T. & Rabitz, H. « *Sensitivity Analysis* » *John Wiley & Sons Publication*, pages 81 – 99. 2004
- [Utkin, et al, 2007] Utkin, L. & Coolen, F. « *New metaheuristics, neural and fuzzy techniques in reliability*, volume 2, chapter Imprecise reliability » An introductory overview, pages 261-306. *Computational intelligence in reliability engineering*, 2007.
- [Villemeur, 1998] Villemeur A. « *Sureté de fonctionnement des systèmes industriels* ». Number 2. Eyrolles, 1998.
- [Winkler, 1996] Winkler, R. « *Uncertainty in probabilistic risk assessment* ». *Reliability Engineering and System Safety* 54:127 –132.1996
- [Xu and Gertner, 2007a] Xu C. & Gertner G. Z. « *Uncertainty and sensitivity analysis for models with correlated parameters* ». *Reliability Engineering & System Safety*, 93(10): 1563 – 1573, 2007.
- [Xu et Gertner, 2007b] Xu C. & Gertner G. Z. « *A general first-order global sensitivity analysis method* » *Reliability Engineering & System Safety*, 93(7): 1060 – 1071, 2007.
- [Zadeh, 1965] Zadah L.A., « *Fuzzy Sets* » *Information and control*, vol 8, pp 338-353, 1965.
- [Zadeh, 1968] Zadah L.A., « *Probability measures of fuzzy events* ». *Journal Mathematical Annals*, 23:421-427, 1968.
- [Zadeh, 1986] Zadeh L.A. « *A Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination* », *Computer Science Division, University of California, Berkeley, California 94720*, 1986.

Résumé

L'objectif de ce travail, s'agissait de traiter l'incertitude dans les données des paramètres de fiabilité: taux de défaillance, proportion de défaillance de cause commune,... et analyser l'effet de ses incertitudes sur la réalisation des accidents majeurs (Analyse de sensibilité).

L'étude d'incertitude et l'analyse de sensibilité liée à la fréquence d'accident a été étudié à l'aide d'un exemple illustratif. Ensuite, cette étude a été concerne un système opérationnel choisi.

A la fin, une validation de nouveaux indicateurs basée sur la fréquence moyenne et les facteurs d'importance critiques permettant de caractériser la sensibilité de la fréquence accidentelle au regard des incertitudes liées aux différents paramètres fiabilistes a été démontré.

Mots Clé : Incertitude, Sensibilité, Fréquence Moyenne, Facteur d'importance Critique.

Abstract

This work deals with treatment of uncertainty in data reliability parameters. e.g. failure rate, common cause failure of proportion ... and analyze the effect of its uncertainties on the achievement of major incidents (sensitivity analysis).

The study of uncertainty and sensitivity analysis related to the accident frequency has been studied using an illustrative example. Then, this study was directed to an operational system. At the end, a validation of new indicators based on the average frequency and critical importance factors to characterize the sensitivity of accidental frequency given the uncertainty related to the various parameters in reliability has been demonstrated.

Key word: Uncertainty, Sensitivity, Average frequency, Critical importance factors

ملخص

يتضمن هذا العمل كيفية التعامل مع حالة عدم اليقين و الارتياح في المعلومات والبيانات مثل : نسبة الفشل، وتحليل تأثير عدم اليقين في المصاحبة لحدوث سيناريو حادث صناعي (تحليل الحساسية).

تتضمن هاته الدراسة في المرحلة الأولى دراسة عدم اليقين وتحليل حساسية المتعلقة بوتيرة الحوادث باستخدام مثال توضيحي. يليها تطبيق على نظام صناعي لمعالجة الغاز الطبيعي.

في الختام تم التحقق من مؤشرات جديدة مستمدة على أساس متوسط التردد وأهمية العوامل الحاسمة لتوصيف حساسية تردد عرضي.

كلمات استدلالية: الارتياح، الحساسية، متوسط التردد، العوامل الحاسمة