



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de sécurité industrielle et environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité industrielle

Spécialité : sécurité industrielle et environnement

Thème

Etude de Fiabilité pour Estimation et Analyse de La Sensibilité

Présenté et soutenu publiquement par :

- Belghazi Mohammed Zakarya
- Lefsiouen Mohamed Mokhtar

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. METAHRI Dhiyaeddin	MCB	IMSI Univ. ORAN2	Président
Mr. GUETARNI Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI Univ. ORAN2	Encadreur
Mr. BOUIEDJRA Bachir	MCB	IMSI Univ. ORAN2	Examineur

Année 2022/2023

Etude de Fiabilité pour Estimation et Analyse de La Sensibilité

Résumé

Ce présent travail porte sur l'étude et l'analyse d'un système HIPPS (High Integrity Pressure Protection System) installé au niveau du système d'alimentation de GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié). Lors de cette étude une analyse de la Sûreté de fonctionnement détaillée par l'utilisation de différentes Méthodes AMDEC, Pareto, ADD, étude de sensibilité et Chaîne de Markov avec principale intérêt l'optimisation du système HIPPS.

Dans un premier temps, une présentation approfondie de la sûreté de fonctionnement et de ses méthodes d'analyse a été réalisée. Cela a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension des outils utilisés pour évaluer la performance du système.

Ensuite, le système HIPPS a été présenté en détail, en mettant l'accent sur son fonctionnement, ses composants et ses spécificités. Des données techniques et opérationnelles pertinentes ont été recueillies afin de faciliter l'analyse ultérieure.

L'application des méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS a donné lieu à des résultats probabilistes, telles que le facteur d'importance et l'indisponibilité du système analyse de sensibilité. Ces résultats ont permis de quantifier les performances et la fiabilité du système étudié ainsi que de proposer des programmes de maintenance préventives efficaces permettant le bon fonctionnement du système.

Mots clés : Fiabilité, Disponibilité, Sûreté de Fonctionnement, HIPPS, Sphère GPL, ADD, AMDEC, Chaînes Markov

Reliability Analysis for Estimation and Sensitivity Analysis

Abstract

This study centers on the examination and assessment of a HIPPS (High Integrity Pressure Protection System) mechanism that has been implemented in the LPG (Liquefied Petroleum Gas) system. Throughout this project, Dependability analysis was applied using the following methods of AMDEC, Pareto, ADD methodologies, sensitivity studies, and Markov Chains, with the primary objective optimizing the HIPPS system.

Initially, an exhaustive presentation of dependability and its corresponding analytical methods was executed. This facilitated the establishment of the necessary theoretical review required to comprehend the tools utilized to evaluate the system's performance.

Subsequently, the HIPPS system was presented in a detailed manner, with specific emphasis placed on its function, constituents, and particularities. Pertinent technical and operational information was gathered to expedite subsequent analysis.

The implementation of reliability analysis techniques in the HIPPS system generated probabilistic results, such as significant factors and the unavailability and sensitivity analysis of the system. These results enabled the quantification of the system's performance and reliability, as well as the proposal of effective preventive maintenance programs that ensure that the system operates optimally.

Key terms: Dependability, Reliability, Operational Safety, HIPPS, Sphere LPG, ADD, AMDEC, Markov Chains.

تحليل الموثوقية لتقدير وتحليل الحساسية

ملخص

هذا العمل الحالي يتناول دراسة وتحليل نظام HIPPS (نظام الحماية من الضغط ذو سلامة عالية) المثبت على مستوى نظام توريد غاز البترول المسال (غاز البترول المسال). خلال هذه الدراسة، تم إجراء تحليل للأمان التشغيلي باستخدام طرق تحليل مختلفة مثل AMDEC (تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها وخطورتها) و Pareto و ADD (شجرة الأعطال) ودراسة الحساسية وسلسلة ماركوف، مع التركيز الرئيسي على تحسين نظام HIPPS. في البداية، تم تقديم تحليل مفصل للأمان التشغيلي وطرق تحليله. وقد ساهم ذلك في إرساء الأسس النظرية اللازمة لفهم الأدوات المستخدمة لتقييم أداء النظام. ثم تم تقديم نظام HIPPS بالتفصيل، مع التركيز على عمله ومكوناته وخصائصه. تم جمع البيانات الفنية والتشغيلية ذات الصلة لتسهيل التحليل في وقت لاحق. أدت تطبيق طرق تحليل الأمان التشغيلي على نظام HIPPS إلى الحصول على نتائج احتمالية، مثل معامل الأهمية وعدم التوفر لتحليل الحساسية. وقد سمحت هذه النتائج بتقدير أداء وموثوقية النظام المدروس، وكذلك اقتراح برامج الصيانة الوقائية الفعالة التي تضمن عمل النظام بشكل جيد. الكلمات الرئيسية: الموثوقية، التوفر، الأمان التشغيلي، نظام الحماية من الضغط ذو سلامة عالية، كرة غاز البترول المسال، شجرة الأعطال، تحليل أنماط الفشل وتأثيراتها وخطورتها، سلاسل ماركوف.

Remerciement

C'est avec un immense plaisir que nous réservons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Tout d'abord, Nous remercions Allah le tout puissant d'avoir guidé nos pas vers les portes du savoir.

La première personne que nous tenons à remercier est notre Encadreur Mr. Guetarni Islam Hadj Mohamed pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu mené au bon port.

Nous présentons nos remerciements pour les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail qui nous a aidé beaucoup et encourage toute à la longue de notre formation.

Nous remercions aussi nous parents qui nous ont donné tout l'encouragement et tous les moyens pendant toute la durée de nos études.

Enfin nous aimerions remercier tous nos amis et nos collègues pour leur amitié, leur soutien, et à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail et tous ceux qui se sont intéressés à notre mémoire.

En guise de reconnaissance, nous tenons à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'étude et à l'élaboration de ce travail.

DÉDICACE

*J'ai le grand honneur de dédier ce travail
À mon père qui a fait de moi un homme de valeur,
À ma mère, l'être le plus cher, source de bonheur.
À mes frères et sœurs, soutien et chaleur.
À tous les membres de ma grande famille.
À mon binôme Lefsiouen Mohamed Mokhtar
À tous mes amis, surtout IMED, SOUHILA, YOUNES,
KAWTHER, avec tous mes vœux de succès.
À notre Encadreur Mr. Guetarni.
À mes amis les plus chers avec qui j'ai passé des années à
l'université : LATIFA, HASNA, MOHAMED,
ABDERAHMEN, avec tous mes vœux de succès.
À toute la promotion SIE M2 2022-2023.
À tous ceux qui m'ont aidé de près et de loin à la
réalisation de ce travail.
À tous ceux que j'aime.
À tous ceux qui m'aiment.*

Zakarya

JE DÉDIE CE TRAVAIL

A mon cher père

A ma chère mère

*Source de vie, d'amour et d'affection pour leurs
sacrifices, leur*

*Encouragement et toute aide qu'ils m'ont apportée
durant mes études et ma vie globalement.*

A mon cher frère (Reda) et ma chère sœur (Amina)

*A mes tantes et mes cousins et A toute ma famille
(lefsiouen et mehidí)*

*A ma super promo SIE spécialement : Zaki, kamel,
Omar, imed, Kawter, Nadir, Sameh, Aymen, Younes.*

Un spécial dédicace pour mon professeur Mr.

GUETARNI.

*A mon précieux ami et mon binôme Zaki, qui a
assume tous mes sautes d'humeur durant la réalisation
de ce travail. J'ai tellement de chance de t'avoir, être
toujours bien.*

Mohamed

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Résumé	
Introduction générale.....	1
I. CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Norme iso 31010	4
I.2.1. Domaine d'application	4
I.2.2. Structure générale	5
I.2.3. Objectifs de la norme.....	6
I.2.4. Mise en œuvre de l'appréciation du risque	6
I.3. Notion de danger	6
I.3.1. Définition.....	6
I.3.2. Identification du danger.....	6
I.3.3. Situation dangereuse.....	7
I.4. Notion de risque.....	7
I.4.1. Définition.....	7
I.4.2. Classification des risques.....	8
I.4.3. Réduction du risque.....	8
I.4.4. La protection.....	8
I.4.5. La prévention.....	8
I.4.6. La matrice des risques	9
I.5. Notion Défaillance	9
I.6. Sûreté de fonctionnement.....	10
I.6.1. Définition.....	10
I.6.2. Analyse de système	10
I.6.3. Paramètres de sûreté de fonctionnement	13
I.6.4. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement.....	15
I.6.6. Principales lois de probabilité.....	18

I.6.7.	Quelques lois usuelles	19
I.6.8.	Indisponibilité [15]	27
I.6.9.	Dormant [15]	28
I.7.	Conclusion	29
II.	CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques	31
II.1.	Introduction	31
II.2.	Méthode applicable en sûreté de fonctionnement.....	32
II.2.1.	Définition.....	32
II.2.2.	Principales méthodes :.....	32
II.3.	Facteurs d'importance [35] [36]	52
II.3.1.	Principe	52
II.3.2.	Définitions.....	53
II.4.	Analyse de sensibilité.....	56
II.4.1.	Principe	56
II.4.2.	Définitions.....	57
II.5.	Conclusion	59
III.	Chapitre III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL	61
III.1.	Introduction	61
III.2.	Etude de la sphère.....	61
III.2.2.	Appareils annexes d'une sphère de stockage d'alimentation.....	62
III.2.3.	L'ACCIDENTOLOGIE INTERNE/EXTERNE LIEE AU GPL:.....	63
III.3.	Système instrumenté de sécurité.....	70
III.3.1.	Normes relatives au système instrumenté de sécurité	70
III.3.2.	Définition Un système instrumenté de sécurité (SIS) :	73
III.3.3.	Fonction instrumentée de sécurité (SIF)	73
III.3.4.	Propriétés d'un SIS	74
III.4.	Niveau d'intégrité de sécurité (SIL)	75
III.5.	Système de protection de pression de haute intégrité HIPPS.....	75
III.5.1.	Définition.....	75
III.5.2.	PRINCIPAUX AVANTAGES DE L'UTILISATION D'UN SYSTÈME HIPPS.....	76
III.5.3.	Architecture de Système HIPPS :	77
III.5.4.	Le schéma de base d'un HIPPS	78
III.6.	Conclusion	80
IV.	CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sureté de fonctionnement sur le système HIPPS	82
IV.1.	Introduction.....	82
IV.2.	Présentation du complexe GP1/Z(Arzew)	82

IV.2.1.	Historique.....	82
IV.2.2.	Objectif de complexe GP1/Z :.....	83
IV.2.3.	Situation géographique et voisinage du complexe GP1/Z:.....	83
IV.2.4.	Organisation Du Complexe GP1/Z :.....	84
IV.2.5.	Fiche Technique Du Complexe GP1/Z :.....	85
IV.2.6.	Les Caractéristiques Du Complexe GP1/Z :.....	86
IV.2.7.	Zone Stockage Et Chargement.....	87
IV.2.8.	Les Principales Installations Du Complexe GP1/Z :.....	89
IV.2.9.	Description de système de production :.....	89
IV.3.	Philosophie du système proposé.....	93
IV.4.	Démarche de l'étude AMDEC.....	93
IV.4.1.	Initialisation de l'étude.....	94
IV.4.2.	Analyse fonctionnelle.....	95
IV.4.3.	Analyse des défaillances.....	100
IV.4.4.	Analyse AMDEC.....	102
IV.4.5.	Calcul de criticité.....	105
IV.5.	Approche de l'étude de l'arbre de défaillance (ADD):.....	107
IV.5.1.	Élaboration de l'analyse des risques par l'ADD:.....	107
IV.5.2.	Analyse par ADD :.....	108
IV.5.3.	Facteurs d'importance et coupes minimal :.....	109
IV.6.	Analyse par chaîne de markov.....	112
IV.6.1.	Graphe de markov 1.....	112
IV.6.2.	Graphe de markov 2.....	114
IV.7.	Conclusion.....	116
	Conclusion général.....	117
	Bibliographie.....	118

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Lois de probabilité.....	19
Tableau II. 1 les types de l'AMDEC [19].....	33
Tableau II. 2 Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance	40
Tableau II. 3 quelques règles d'optimisation permettant de réduire les Arbres en faisant appliquer l'algèbre booléen.....	43
Tableau III. 1 Appareils annexes d'une sphère de charge GPL	63
Tableau III. 2 Accidents et scénarios provoqués par des installations de matériel dangereux [37]	65
Tableau III. 3 L'accidentologie liée aux installations de GPL à l'étranger	66
Tableau III. 4 L'accidentologie liée aux installations de GPL en Algérie	69
Tableau IV. 1 L'historique de la construction du complexe GP1Z.....	83
Tableau IV. 2 Grille de cotation	100
Tableau IV. 3 matrice de criticité.....	101
Tableau IV. 4 Analyse AMDEC	102
Tableau IV. 5 Criticités cumulées	105
Tableau IV. 6 Tableau des actions correctives HIPPS	106
Tableau IV. 7 les données de (λ et MTTR) des composants.....	108
Tableau IV. 8 Facteurs d'importance et coupes minimal.....	110
Tableau IV. 9 Gate sensitivity results for parameter Unavailability and sensitivity parameter Failure rate.....	111

Liste des figures

Figure I. 1 structure générale de la norme ISO 31010 [1].....	5
Figure I. 2 Courbe de Farmer	7
Figure I. 3 Exemple d'une matrice des risques [7].....	9
Figure I. 4 Différence entre système compliqué et système complexe	11
Figure I. 5 les différentes configurations de système	12
Figure I. 6 Fonction associée [12]	14
Figure I. 7 Courbe en baignoire [14].....	15
Figure I. 8 Métriques de sûreté de fonctionnement [8]	16
Figure I. 9 Densité de probabilité.....	20
Figure I. 10 Fonction de répartition.....	20
Figure I. 11 Densité normal avec σ	24
Figure I. 12 Densité de probabilité $\mu=0$	26
Figure I. 13 Fonction de répartition $\mu=0$	27
Figure II. 1 Organisation de la méthode AMDEC.....	34
Figure II. 2 Exemple de diagramme de Pareto	35
Figure II. 3 Les éléments disponibles pour construire l'arbre des défaillances	42
Figure II. 4 Passage de paramètres dans réseau bayésien.....	45
Figure II. 5 Schéma suivant illustre le principe de cette approche.....	46
Figure II. 6 MdF d'un système série	49
Figure II. 7 MdF d'un système parallèle	49
Figure II. 8 Exemple de réseau de Petri	50
Figure III. 1 Appareils annexes d'une sphère de stockage d'alimentation.....	62
Figure III. 2 Norme CEI 61508 et normes dérivées [39].....	71
Figure III. 3 Utilisateurs de l'IEC 61508 et l'IEC 61511	72
Figure III. 4 Fonction instrumentée de sécurité.....	74
Figure III. 5 Architecture de Système HIPPS	77
Figure III. 6 Schéma HIPPS	79
Figure IV. 1 Situation géographique de complexe GP1/Z	84
Figure IV. 2 L'organisation du complexe GP1/Z.....	85
Figure IV. 3 Fonction principale du système.....	95
Figure IV. 4 analyse fonctionnelle de système.....	96
Figure IV. 5 Système de détection	97
Figure IV. 6 Unité logique	97
Figure IV. 7 Système d'alarme.....	98

Figure IV. 8 PSV	98
Figure IV. 9 Vanne déluge	99
Figure IV. 10 Diagramme ABC des criticités	105
Figure IV. 11 Arbre de défaillance de dysfonctionnement de système HIPPS	109
Figure IV. 12 Arbre de défaillance du sous-système de détection	109
Figure IV. 13 Chaîne de Markov 1 de système de détection.....	112
Figure IV. 14 Chaîne de markov 2 de système de détection	114

Liste des abréviations

ADD : arbre de défaillance

AFNOR : Association française de normalization

AMDEC : Analyse des modes de défaillance et de leurs effets et de leur criticité

APR : Analyse préliminaire des risques

BOG : gaz bouillant (Boil Of Gas).

C3 : Propane.

C4 : Butane.

C5 : Pentane.

CEI : Commission électrotechnique internationale.

CIF : Facteur d'Importance Critique

DIF : Facteur d'Importance de Diagnostic

FDMS : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, sécurité

GNL : Gaz Naturel Liquéfié.

GPL : Gaz Pétrolier Liquéfié.

HAZOP : Hazard and opérabilité

HIPPS : High Integrity Pressure Protection System

ISO : Organisation internationale de normalization

L.I : indicateur de niveau

MDT : durée moyenne d'indisponibilité (Mean Dawn Time)

MIF : Facteur d'Importance Marginale

MTBF : Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.
(Mean Time Between Failure)

MTTF : Durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance (Mean Time To Failure)

MTTR : durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair).

MUT : durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time).

OHSAS : Occupational Health and Safety AssessmentSéries.

P.S.V : vanne de sécurité de pression

RAW ou RIF : Facteur d'Augmentation du Risque

RRW ou RDF: Facteur de Diminution du Risque .

SADT : analyse de structure technique de conception (structure analysis design technique)

SDF : Sûreté De Fonctionnement

SIF : Fonction instrumentée de sécurité

SIL : Le Safety Integrity Leve

SIS : un système instrumenté de sécurité

T.E : élément de température

UIC : union des industries chimiques

Introduction générale

La fiabilité des équipements est d'une importance primordiale dans de nombreux domaines, notamment dans l'industrie et les infrastructures critiques. La fiabilité peut être définie comme la capacité d'un équipement à accomplir une fonction spécifiée pendant une période donnée, sous des conditions déterminées. Les équipements fiables sont essentiels pour assurer un fonctionnement sans heurts des systèmes, minimiser les interruptions coûteuses et garantir la sécurité des personnes et de l'environnement.

La sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur dans l'industrie, car elle concerne la protection des personnes, des biens et de l'environnement. Les équipements présentent de nombreux risques potentiels, allant des défaillances mécaniques aux erreurs humaines, en passant par les défaillances électriques ou les situations d'urgence. Pour minimiser ces risques, il est primordial de disposer de systèmes instrumentés de sécurité fiables, capables d'intervenir ou de prévenir les situations dangereuses.

Parmi les différents types de systèmes instrumentés de sécurité, l'attention se porte notamment sur le système instrumenté de sécurité à haute intégrité (High Integrity Pressure Protection System - HIPPS) dans les installations de gaz de pétrole liquéfié (GPL). Le GPL est un gaz hautement inflammable et explosif, ce qui en fait un environnement particulièrement dangereux à gérer. Le système HIPPS joue un rôle crucial dans la protection des installations et des opérateurs en réduisant rapidement la pression à des niveaux sûrs lorsqu'une condition anormale est détectée. Ainsi, il permet de minimiser les risques d'explosion ou de fuite majeure, garantissant la sûreté de fonctionnement de l'ensemble du processus GPL.

Dans le cadre de cette étude, notre objectif est d'appliquer différentes méthodes d'analyse de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement afin d'évaluer et d'améliorer la performance du système HIPPS. Les méthodes utilisées incluent l'Analyse des Défaillances, des Modes et de leurs Effets Critiques (AMDEC), les chaînes de Markov, ainsi que l'évaluation de l'incertitude et le calcul de la sensibilité et de la disponibilité du système. Ces méthodes nous permettront d'identifier les défaillances potentielles, les risques associés et les mesures préventives appropriées pour renforcer la fiabilité du système HIPPS.

Au cours de notre étude, nous effectuerons des calculs en utilisant des données variées pour évaluer l'incertitude, ainsi que pour calculer la sensibilité du système. Ces mesures sont essentielles pour évaluer les performances du système et prendre des décisions en matière de conception et de maintenance. En analysant les résultats obtenus à l'aide de ces méthodes, nous

serons en mesure d'améliorer la fiabilité du système HIPPS et de renforcer sa capacité à assurer la sûreté de fonctionnement des installations GPL.

CHAPITRE I

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I. CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.1. Introduction

La Sûreté de Fonctionnement (SdF), représente l'habilité d'assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes techniques. C'est système sont utilisés dans de nombreuses industries, notamment le transport, l'énergie, l'aérospatiale et l'automobile. Pour garantir une utilisation sûre et efficace des systèmes techniques, la Sûreté de fonctionnement donne une grande importance à l'analyse et à la gestion des risques, à la prévention des pannes, à la planification de la maintenance et à la résolution des problèmes techniques.

Dans ce chapitre on va présentéen premier lieu : la norme 31010, leur domaine d'application et leur objectifs,

En seconde lieu : les notions de danger et de risque,

En troisième lieu : fondamentaux de la sûreté de fonctionnement (définition, paramètres, métriques de la sûreté de fonctionnement, Approche de la fiabilité par les probabilités, les Principales lois de probabilité)

En dernier lieu : Analyse de système (définition, structure, analyse fonctionnel, fiabilité d'un système)

I.2. Norme iso 31010

I.2.1. Domaine d'application

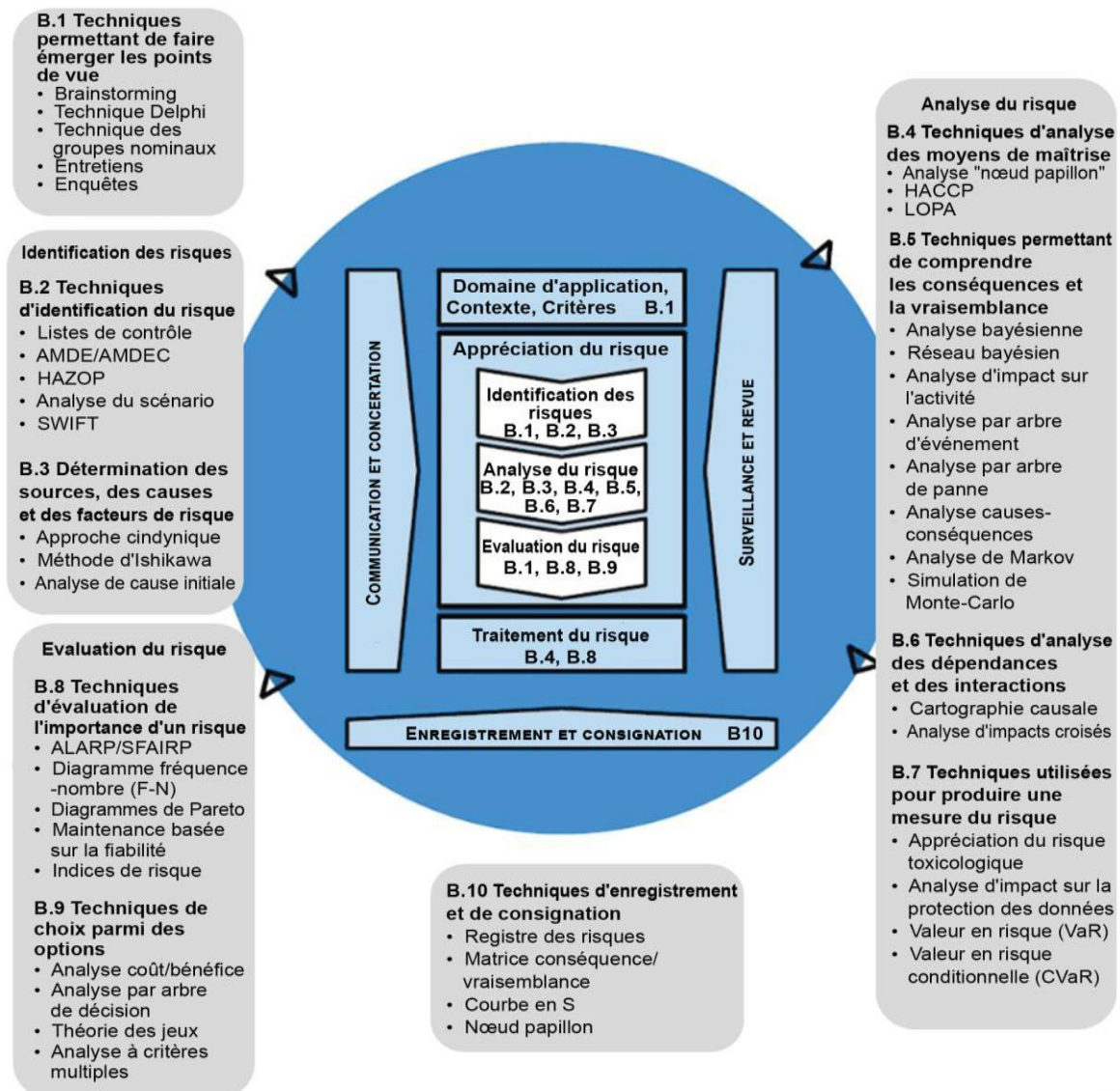
La norme ISO 31010 concerne les techniques de management du risque. Plus précisément, elle fournit un cadre pour l'évaluation des risques et la sélection de techniques appropriées pour leur traitement. La norme fournit des lignes directrices pour l'utilisation de techniques telles que l'analyse d'impact, l'analyse de risque, l'évaluation des risques, l'analyse de cause et d'effet et l'analyse de décision pour aider les organisations à comprendre, évaluer et traiter les risques liés à leurs activités. La norme est applicable à toutes les organisations, publiques ou privées, de toutes tailles et de tous secteurs, et peut être utilisée pour gérer les risques dans de nombreux domaines, tels que la finance, la santé, l'environnement, la sécurité, les technologies de l'information, l'énergie, etc. [1]

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.2.2. Structure générale

La norme comprend des parties importantes :

- Domaine d'application, contexte, critères.
- Appréciation du risque : identification des risques, analyse du risque, évaluation du risque.
- Traitement du risque.
- Surveillance et revue.
- Communication et concertation.
- Enregistrement et consignation.



IEC

Figure I. 1 structure générale de la norme ISO 31010 [1]

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.2.3. Objectifs de la norme

Il est important d'établir et, si possible, de documenter les objectifs du système ou du processus spécifique pour lequel l'évaluation des risques est effectuée. Cela facilitera la reconnaissance des dangers et la compréhension de leurs ramifications. [1]

Dans la mesure du possible, il convient que les objectifs soient :

- Spécifiques à l'objet de l'appréciation ;
- Mesurables de manière qualitative ou quantitative ;
- Réalisables dans la limite des contraintes imposées par le contexte ;
- Pertinents du point de vue des objectifs plus généraux ou du contexte de l'organisation ;
- Réalisés dans un délai défini.

I.2.4. Mise en œuvre de l'appréciation du risque

- Selon la norme ISO 31010, la mise en œuvre de l'appréciation des risques doit passer les points suivants :
- Planification de l'appréciation
- Gestion des informations et développement de modèles
- Application des techniques d'appréciation du risque
- Examen de l'analyse
- Application des résultats à l'appui des décisions
- Enregistrement et consignation du processus d'appréciation du risque et de ses résultats

I.3. Notion de danger

I.3.1. Définition

Selon Desroches [2] et la norme IEC 61508 [3], Une menace potentielle, connue sous le nom de danger, pourrait mettre en danger des personnes, des biens (en causant des dommages ou des destructions) ou l'environnement. Les risques peuvent affecter directement les personnes en provoquant des maladies ou des blessures physiques, ou indirectement en causant des dommages à l'environnement ou aux biens.

I.3.2. Identification du danger

L'identification du danger est un processus qui consiste à identifier les sources potentielles de danger dans un environnement donné. Ce processus est essentiel pour la gestion des risques, car il permet de déterminer les mesures à prendre pour réduire les risques et protéger les personnes, les biens et l'environnement.

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.3.3. Situation dangereuse

Une situation dangereuse selon la norme (ISO 12100-1) est une circonstance où quelqu'un est exposé à au moins un événement dangereux. Les dommages causés par l'exposition peuvent survenir immédiatement ou avec le temps.

I.4. Notion de risque

I.4.1. Définition

Le risque est lié à l'idée de préjudice potentiel associé à une situation dangereuse. Le risque peut signifier plusieurs choses. La nature des dangers peut également varier considérablement et de nombreuses catégories différentes ont été proposées.

Le risque est une mesure permettant de déterminer à quel point quelque chose est dangereux, cela dépend de la probabilité que quelque chose de grave se produise et de la gravité de ce qui pourrait se produire. [4]

Le risque est souvent expliqué en termes d'origine, de résultats potentiels, d'effets et de probabilités. [1]

Selon Iso 31000 « effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs » La courbe "Courbe de Farmer" ci-dessous illustre comment Farmer divise le risque en deux catégories : risque acceptable (maîtrisé) et risque inacceptable basé sur la fonction $G = f(P)$. [5]

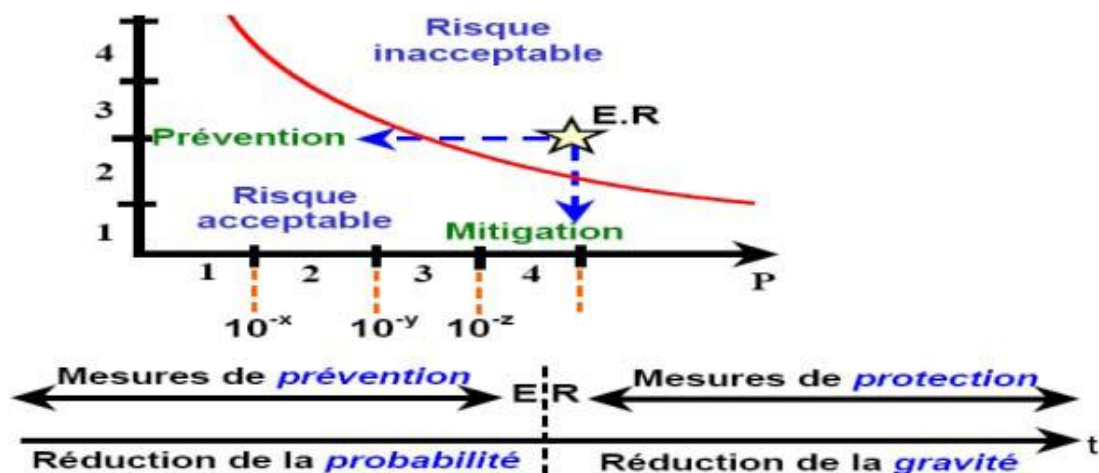


Figure I. 2 Courbe de Farmer

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.4.2. Classification des risques

Il existe de nombreuses classifications des risques dans la littérature [6], et l'analyse des risques permet de les regrouper en cinq grandes catégories.

- Les risques naturels : les menaces naturelles comprennent les tremblements de terre, les avalanches, les tempêtes, les inondations et les incendies de forêt.
- Les risques technologiques : ces risques sont d'origine humaine et comprennent les dangers industriels, nucléaires et biologiques ainsi que les ruptures de barrages.
- Les risques de transports collectifs : (personnes, matières dangereuses) associées aux transports en commun sont également considérés comme des dangers technologiques.
- Les risques de la vie quotidienne : comprennent les mésaventures domestiques et les accidents de la circulation.
- Les risques liés aux conflits.

Dans notre projet de fin d'étude on va s'intéresser uniquement aux risques technologiques

I.4.3. Réduction du risque

Dans les cas où le risque est considéré comme inacceptable, l'atténuation du risque doit être prise en compte. En agissant le plus tôt possible dans leur genèse (principe d'élimination à la source), il s'agit d'identifier les obstacles nécessaires pour abaisser à un niveau acceptable le degré de risque associé aux différents scénarios d'accidents. Deux stratégies peuvent être utilisées pour réduire les risques. (Figure I. 2).

I.4.4. La protection

La protection fait référence aux actions entreprises pour diminuer la gravité d'un accident en limitant ses effets s'il se produit. Par exemple, un bassin de rétention qui prévient les déversements, un système d'extinction automatique qui atténue les conséquences d'un incendie, des plans d'urgence et des procédures d'urgence qui diminuent considérablement les risques de dommages, etc.

I.4.5. La prévention

La prévention tente de réduire la probabilité qu'un événement se produise ou se reproduise. Par conséquent, le terme « prévention » fait référence aux mesures prises au préalable pour empêcher qu'un accident ne se produise. Cela peut être assuré par une conception sûre de l'installation ou par l'ajout de systèmes assurant la sécurité de l'installation en cas de

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

dérive. Ainsi, les mesures préventives peuvent inclure une soupape de sécurité ou encore un système d'arrêt d'urgence automatique pour protéger l'installation des surpressions.

I.4.6. La matrice des risques

La matrice des risques est un outil d'analyse qui vous permet de déterminer la probabilité et la gravité des risques associés à un projet dans les premières étapes. Une fois que vous avez identifié ces deux facteurs, vous pouvez visualiser chaque danger dans la matrice pour identifier les impacts potentiels.

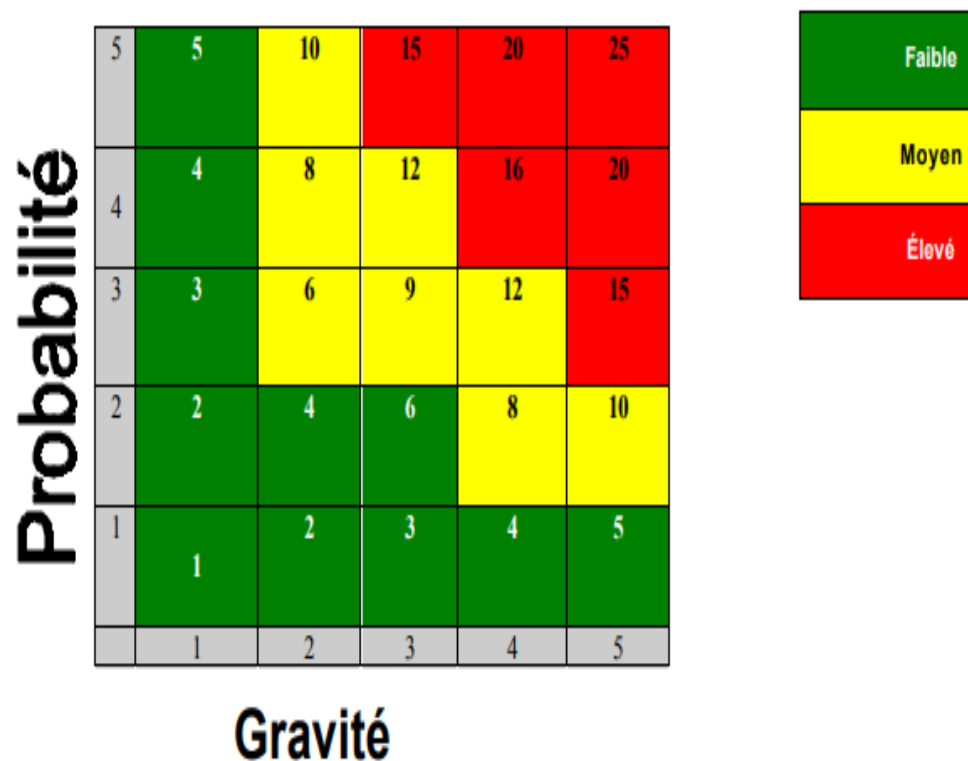


Figure I. 3 Exemple d'une matrice des risques [7]

I.5. Notion Défaillance

Définition: c'est le passage de l'état de fonctionnement à l'état de panne.

Les défaillances peuvent être momentanées (indisponibilité du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné, le composant redevient disponible sans réparation) ou permanentes (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service). [8]

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6. Sûreté de fonctionnement

I.6.1. Définition

Aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données, et une notion générale qui se caractérise comme la science des défaillances, l'analyse de risque, elle regroupe quatre notions: fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.

Elle se caractérise à la fois par les études structurelles statiques et dynamiques des systèmes, du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects probabilistes et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines. [8] [9]

La sûreté de fonctionnement est souvent définie comme :

- Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.
- Science des défaillances.
- Maintien de la qualité dans le temps.

I.6.2. Analyse de système

I.6.3.1. Définition d'un système

Un système est un ensemble d'éléments (composants, équipements) discrets qui interagissent entre eux. [8]

Un système peut être décrit comme un ensemble de parties interconnectées qui sont créées pour effectuer une tâche spécifique dans des circonstances spécifiques et sur une période spécifique. Il est crucial d'identifier les caractéristiques déterminantes de chaque système, y compris sa fonction, sa structure, ses conditions de fonctionnement et l'environnement dans lequel il doit fonctionner.

Un système peut être compliqué en raison de la façon dont ses éléments constitutifs interagissent les uns avec les autres, faisant ressortir de nouvelles qualités qui n'existent pas séparément dans les éléments. La différence entre un système compliqué et un système complexe, comme le montre la figure 4, est que les deux types de systèmes peuvent contenir un grand nombre de composants ; mais, dans un système compliqué, les relations entre les composants sont directes et de type arborescent.

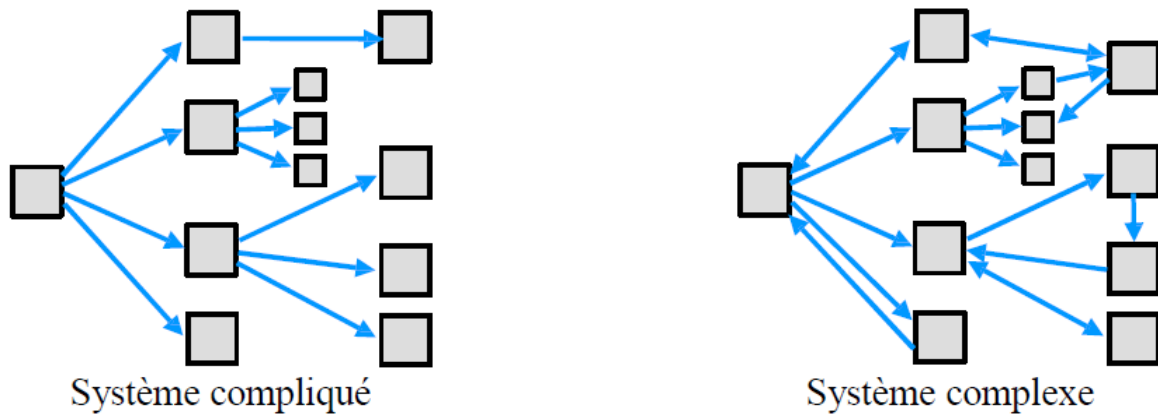


Figure I. 4 Différence entre système compliqué et système complexe

I.6.3.2. Structure d'un système

La structure d'un système peut être définie de trois manières :

- Fonctionnelle : résulte de la décomposition de ses fonctions opérationnelles en une hiérarchie de sous fonctions.
- Organique : consiste à définir le système par une décomposition itérative des différentes hiérarchies de ses constituants jusqu'aux composants physiques élémentaires.
- Organisationnelle : consiste à déterminer ses modes d'organisation en intégrant les aspects hiérarchiques et relationnels.

I.6.3.3. Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une méthode de conception qui permet de décomposer un système complexe en sous-systèmes ou fonctions élémentaires et d'analyser les relations entre eux. Elle permet de décrire les fonctions attendues d'un système et d'identifier les contraintes à respecter pour répondre aux besoins de l'utilisateur. Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie, l'architecture, la mécanique, l'informatique, etc. [8]

I.6.3.4. Fiabilité d'un system

La fiabilité d'un système définie comme sa capacité à remplir une fonction spécifiée dans des conditions données pendant une durée donnée, sans défaillance ou avec une probabilité de défaillance acceptable. Cette propriété est d'une importance capitale pour les systèmes critiques utilisés dans des secteurs tels que l'aviation, les centrales nucléaires et les transports.

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

La fiabilité d'un système est affectée par plusieurs facteurs tels que la qualité des composants, la conception du système, l'environnement dans lequel il est utilisé, et la maintenance effectuée sur le système. L'analyse de défaillance, les essais de fiabilité et l'analyse de risques sont parmi les méthodes disponibles pour évaluer la fiabilité d'un système.

Lorsqu'il s'agit d'analyser la fiabilité d'un système complexe, il existe différentes configurations possibles. En général, plus un système est complexe, plus sa fiabilité est faible, à moins que des mesures de compensation ne soient prises (la redondance). Afin de déterminer la fiabilité d'un système, une modélisation fonctionnelle sous forme de schéma bloc peut être utilisée. Chaque bloc représente un composant ou un mode de défaillance du système. Les configurations les plus courantes pour modéliser la fiabilité sont les associations série, parallèle et série-parallèle. D'autres configurations peuvent être envisagées pour modéliser la redondance ou les éléments de secours tels que les redondances actives et passives. [8]

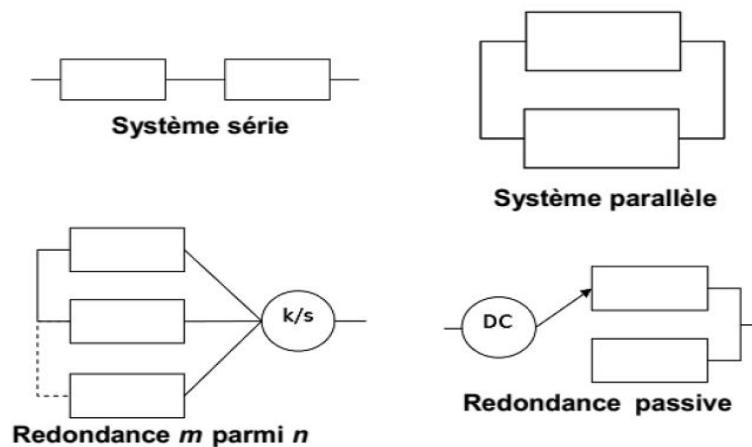


Figure I. 5 les différentes configurations de système

I.6.3.5. Système série

Dans ce cas, chaque composant est indispensable au fonctionnement du système, la défaillance de n'importe lequel entraîne la défaillance de tout le système. La fiabilité du système est exprimée de la manière suivante :

$$R(t) \text{ système} = \prod_{i=1}^n R(t) \text{ composant } i \quad (1)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

On démontre aisément à partir de la formule précédente l'expression du taux de défaillance instantanée du système en fonction de ceux des composants :

$$\lambda(t) \text{ système} = \sum_{i=1}^n \lambda(t) \text{ composant } i \quad (2)$$

I.6.3.6. Système parallèle

Dans ce cas, le système compte i composants, la défaillance du système n'a lieu que si tous les composants sont défaillants. Le système présente alors une ou plusieurs redondances. La fonction cumulée de défaillance du système s'exprime alors en fonction de défaillance des composants :

$$F(t) \text{ système} = \prod_{i=1}^n F(t) \text{ composant } i \quad (3)$$

On en déduit la fiabilité du système :

$$R(t) \text{ système} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(t) \text{ composant } i) \quad (4)$$

I.6.3. Paramètres de sûreté de fonctionnement

I.6.4.1. Fiabilité $R(t)$

La norme NF X 60-500 définit la fiabilité comme : C'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée. Elle a sans doute pris son développement depuis la dernière guerre mondiale. [8]

Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité. [10]

Elle est généralement désignée par R . D'un point de vue qualitatif, la fiabilité peut être définie comme la capacité de l'article à rester fonctionnel. Quantitativement, la fiabilité spécifie la probabilité qu'aucune interruption de fonctionnement ne se produise pendant une période intervalle de temps. [11]

- $R(t)$ est une fonction non croissante variant de 0 à 1 sur $[0, +\infty [$.
- $\lim_{t \rightarrow +\infty} R(t) = 0$
- La dé-fiabilité $F(t)$. Elle est le complément à 1 de la fiabilité: $F(t) = 1 - R(t)$.

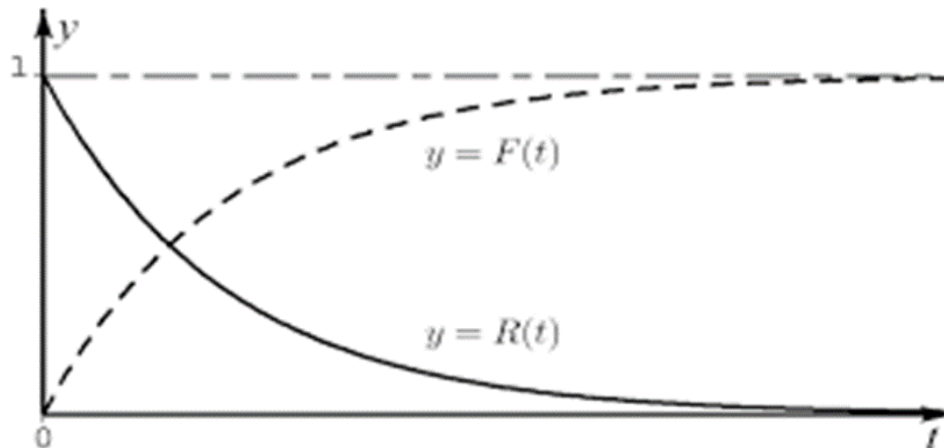


Figure I. 6 Fonction associée [12]

I.6.4.2. Disponibilité $A(t)$ [10] [8]

La disponibilité est la capacité d'un système, dans des conditions de fonctionnement et d'environnement bien définies, à être en état d'exécuter les fonctions requises à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné indépendamment de ses défaillances précédentes.

La disponibilité se traduit par « Availability » généralement notée $A(t)$.

Dans le cas d'un composant non réparable, la disponibilité et la fiabilité se confondent : $A(t) \sim R(t)$ dans le cas contraire : $A(t) \geq R(t)$. L'indisponibilité $U(t)$ est le complément à 1 de la disponibilité, défini par : $U(t) = 1 - A(t)$.

I.6.4.3. Maintenabilité $M(t)$ [10] [8]

- La Maintenabilité d'une entité est la probabilité qu'elle est réparée entre 0 et t .
- Maintenabilité = être rapidement dépanné
- La maintenabilité se traduit en anglais par « Maintainability, » et se note souvent $M(t)$.

I.6.4.4. Sécurité

La sécurité est une aptitude d'une entité à éviter la survenance d'événements critiques ou catastrophiques dans des conditions données.

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.4. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

Les mathématiques peuvent être utilisées pour définir à partir des fonctions $R(t)$ et $M(t)$ de nouvelles grandeurs. [8] [13]

- Le taux de défaillance, généralement noté $\lambda(t)$:

Il signifie l'intensité de défaillance en fonction du temps, dépend principalement de l'âge du composant. C'est la probabilité conditionnelle, divisée par dt , de tomber en panne entre t et $t + dt$ sachant qu'au temps t l'entité n'est pas défaillante:

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (5)$$

$$M(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (6)$$



Figure I. 7 Courbe en baignoire [14]

Un taux d'échec élevé chez les jeunes lié à des erreurs de conception ou de fabrication, suivi de pannes aléatoires relativement constantes lors de l'utilisation, et enfin un taux d'échec élevé dans la vieillesse après la fatigue et l'usure. [8]

Le taux de réparation, généralement noté $\mu(t)$

C'est le nombre de réparations divisé par le temps total de réparation. Il y a un délai jusqu'à ce que les composants soient réparés. Ce temps comprend le temps de détection et le temps nécessaire à l'équipe de réparation pour arriver sur place. [8]

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

$$\mu(t) = \frac{-dM(t)/dt}{M(t)} \quad (7)$$

Si on le suppose constant : $M(t) = \exp(-\mu t)$

- MTTF est la moyenne des durées de fonctionnement de l'instant 0 à la première défaillance. (Mean Time To Failure).

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (8)$$

- MTBF est la moyenne des temps séparant deux défaillances consécutives. (Mean Time Between Failure).
- MTTR : durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair).

$$MTTR = \int (1 - M(t))_0^{\infty} dt \quad (9)$$

- MUT : durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time).
- MDT : durée moyenne d'indisponibilité (Mean Dawn Time). Cette durée comptabilise le temps de détection de la panne, le temps de réparation et la remise en service.
- $MTBF = MDT + MUT$

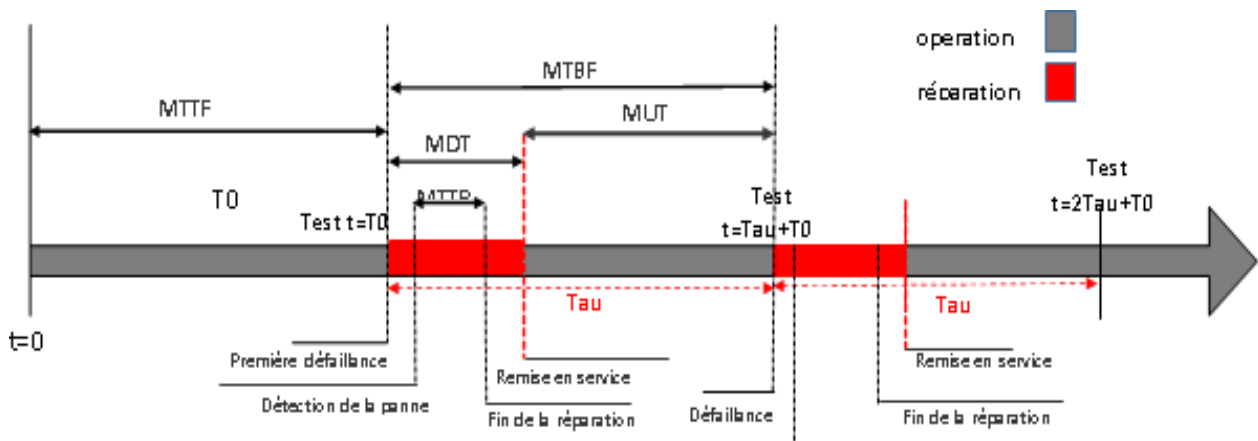


Figure I. 8 Métriques de sûreté de fonctionnement [8]

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.5. Approche de la fiabilité par les probabilités [8]

En règle générale, les composants du système nécessitent une période de mise en service (pour éviter les pannes "jeunes") et de maintenance préventive (pour éliminer les pannes d'usure). Par conséquent, une approximation d'un taux constant est généralement acceptée pendant le fonctionnement du système. En considérant le taux de défaillance $\mu(t) = \mu$ et le taux de réparation $\mu(t) = \mu$ constantes, alors nous pouvons écrire à partir des principes de la section fiabilité et des équations du taux de défaillance et du taux de réparation :

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (10)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (11)$$

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu) \cdot t} \quad (12)$$

$$U(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \mu) \cdot t}) \quad (13)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

$$MDT = \frac{1}{\mu} \quad (15)$$

On calcule les valeurs asymptotiques de la disponibilité $A(\infty)$ et de l'indisponibilité $U(\infty)$:

$$A(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MDT} \quad \text{et} \quad U(\infty) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MDT}{MTBF + MDT} \quad (16)$$

En considérant la définition du paramètre temps, nous remarquons que la disponibilité asymptotique correspond à la proportion de temps pendant laquelle l'entité est en état de fonctionnement, et de même, l'indisponibilité asymptotique correspond à la proportion de temps

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

pendant laquelle l'entité est en panne. Les taux l et m ne sont pas constants, le résultat fonctionne également.

Dans le cas où le temps moyen de réparation est négligeable par rapport au temps moyen de fonctionnement, on peut exprimer l'indisponibilité par : $U(\infty) = \lambda/\mu$

I.6.6. Principales lois de probabilité

Parmi les lois de probabilité les plus utilisées en fiabilité et maintenabilité, les lois de probabilité discrète ou continue.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot P[\text{panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t \text{ sachant qu'elle n'a pas eu lieu entre } 0 \text{ et } t]$$

En terme de probabilité conditionnelles, on a :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{P[\text{panne du composant } t \text{ et } t + \Delta t \text{ et pas de panne du composant entre } 0 \text{ et } t]}{P[\text{pas de panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t]}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{P[\text{panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t] - P[\text{panne du composant entre } 0 \text{ et } t]}{P[\text{pas de panne du composant entre } t \text{ et } t + \Delta t]}$$

Par l'introduction de la fiabilité $R(t)$ on obtien :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{[(1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t))]}{R(t)} \rightarrow \lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{[R(t + \Delta t) - R(t)]}{\Delta t \cdot R(t)} \quad (17)$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (18)$$

I.6.6.1. Les lois de probabilité discrètes

Sont utilisées, par exemple, lorsqu'il s'agit de quantifier la défaillance à la sollicitation, qui se produit lorsqu'une entité refuse de changer d'état lorsque cela lui est demandé.

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.6.2. Les lois de probabilité continues

Sont associées aux variables aléatoires continues, par exemple, lorsqu'il s'agit de quantifier la durée de bon fonctionnement d'une entité.

Tableau I. 1 Lois de probabilité

Type de variable aléatoire	Nom de loi	Application
Discrète	Loi binomiale	Défaillance à la sollicitation
	Loi de Poisson	défaillance à la sollicitation, lorsque le nombre d'expériences est élevé et quand l'espérance mathématique de la variable aléatoire est constante
Continue	Loi de Weibull	Taux de défaillance décroissant, croissant ou constant
	Loi exponentielle	Taux de défaillance constant
	Loi normale	Incertitude liée à des mesures, fabrication
	Loi Log-Normale	Données de maintenabilité et défaillances dues à la fatigue

I.6.7. Quelques lois usuelles

I.6.7.1. Loi exponentielle

La loi exponentielle est applicable à différents phénomènes dans divers domaines. En radioactivité, elle permet de modéliser la durée de vie de chaque atome radioactif. Dans le domaine de la fiabilité électronique, elle est largement utilisée pour représenter le taux de défaillance constant des équipements. La loi exponentielle est particulièrement adaptée pour modéliser des systèmes qui ne vieillissent ni ne se rajeunissent pendant leur durée de vie utile. Cette caractéristique est représentée par la zone B de la courbe en baignoire.

Elle se caractérise par un seul paramètre, le taux de défaillance λ . Sa fonction de répartition prend la forme :

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (19)$$

Sa fonction de densité est exprimée :

$$f(t) = F'(t) = e^{-\lambda t} \quad (20)$$

Or la fiabilité est définie comme le complément de la fonction de répartition, alors :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (21)$$

La durée de vie moyenne ou MTTF.

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \quad (22)$$

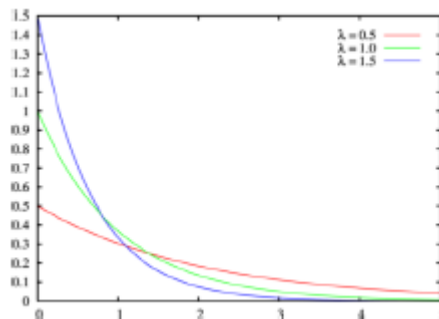


Figure I. 9 Densité de probabilité

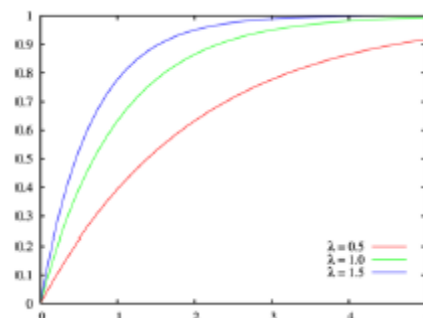


Figure I. 10 Fonction de répartition

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.7.2. La loi de Weibull :

En raison de ses trois paramètres, le modèle standard de Weibull est hautement adaptable et peut être combiné avec d'autres distributions de fiabilité. Il est couramment employé pour les analyses de fiabilité des composants et équipements, en raison de sa grande flexibilité.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Si } t > \delta \quad (23)$$

$$F(t) = 0 \quad \text{Si } t \leq \delta \quad (24)$$

Elle comporte 3 paramètres:

- β : paramètre de forme $\in]0, +\infty[$.
- η : Paramètre d'échelle $\in]0, +\infty[$.
- γ : paramètre de localisation par rapport à l'origine $\in]-\infty, +\infty[$.

La fonction de la fiabilité, le taux de défaillance et de probabilité de la loi de Weibull est la suivante [15] :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (25)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (26)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

$$f(t) = \lambda(t)R(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (27)$$

I.6.7.3. Loi Gamma :

$\Gamma(s, \lambda)$.

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(s)} (\lambda t)^{s-1} e^{-\lambda t} \quad (28)$$

- λ : est le taux ou débit de réponse
- s : est le nombre de réponses qu'on attend

Le temps d'attente moyen sera donc de :

$$\mu = s \times \frac{1}{\lambda} \text{ (Unités de temps)} \quad (29)$$

Il est possible de créer un modèle de réponse de débit en utilisant une ou plusieurs variables indépendantes, tout comme nous l'avons fait pour les modèles poissonniers.

La moyenne d'un Gamma s'écrit

$$\mu = \frac{s}{\lambda} \quad (30)$$

On peut définir un modèle de régression inverse :

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

$$\mu = \frac{s}{\lambda} = \frac{s}{\beta_0 + \beta_1 \times 1 + \dots + \beta_p \times p} \quad (31)$$

Peut aussi s'écrire :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta_0}{s} + \frac{\beta_1}{s} X_1 + \dots + \frac{\beta_p}{s} X_p = \beta_0^* + \beta_1^* X_1 + \beta_p^* \quad (32)$$

Régression Gamma (lien log), Nous pouvons aussi observer que si $\mu = \frac{\Omega}{\lambda^2}$, alors :

$$\ln \mu = \ln s - \ln \lambda \quad (33)$$

Si nous pensons que l'effet des variables sur le temps d'attente est non plus additif mais multiplicatif (effet d'apprentissage ou d'accumulation):

$$\lambda = e^{\beta_0} e^{\beta_1 X_1} e^{\beta_2 X_2} \dots e^{\beta_p X_p} = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p} \quad (34)$$

Alors on a un modèle log linéaire.

$$\ln \mu = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \quad (35)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.7.4. Loi normale

La loi normale, également connue sous le nom de loi de Laplace-Gauss ou loi gaussienne, décrit une variable aléatoire réelle X qui a une espérance de μ et un écart type de σ (qui est un nombre strictement positif car il est la racine carrée de la variance σ^2). La densité de probabilité de la variable aléatoire X est représentée par la fonction $p(x)$, qui est définie pour

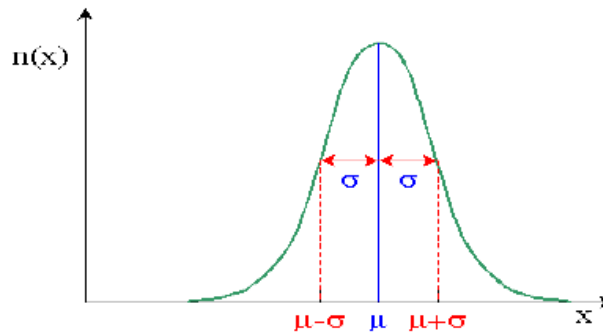


Figure I. 11 Densité normal avec σ

Tout nombre réel x .

$$p(x) = \frac{1}{(\sigma, \sqrt{2\pi})} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - \mu)}{\sigma} \right)^2} \quad (36)$$

La distribution normale est la loi statistique la plus courante et la plus pratique, étant utilisée pour représenter de nombreux événements aléatoires. En outre, la loi normale peut servir d'approximation pour de nombreuses autres lois statistiques.

Tout spécialement dans le cas des grands échantillons. Son expression mathématique est la suivante:

$$n(x) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (37)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

- μ : est la moyenne
- σ : l'écart type
- n : le nombre total d'individus dans l'échantillon
- $n(x)$: le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x

I.6.7.5. Loi log-normale

La loi de Galton, connue sous le nom de loi log-normale ou loi gausse-logarithmique, ressemble à la loi normale mais avec une transformation logarithmique appliquée à la variable. Cette loi peut être représentée comme suit :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{1}{2}u^2} du \quad (38)$$

Ou:

- x : est la variable qui est dans notre cas la pluie maximale journalière
- u : est la variable centrée réduite

$$u = \frac{\ln(xi) - M}{\sigma y} \quad (39)$$

M : est la moyenne des logarithmes de la variable P_i :

$$M = \frac{\sum_i^N \ln(pi)}{N} \quad (40)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

σ_y est l'écart type :

$Cv(y)$: Le coefficient de variation:

$$Cv = \frac{\sigma_y}{M} \quad (41)$$

r : Coefficient de corrélation:

$$r = \frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_1^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (42)$$

La droite de Galton ou loi log normale :

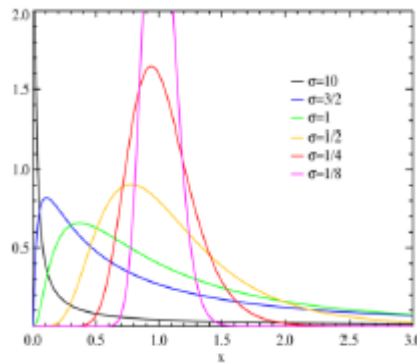


Figure I. 12 Densité de probabilité $\mu=0$

$$\text{Ln } x = \overline{\text{Ln } x} + u\sigma_{\text{Ln } x} \quad (43)$$

$$P_{\text{max},j}(10\%) = e^{\overline{\text{Ln } x} + u\sigma_{\text{Ln } x}} \quad (44)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

$$P_{\max, j}(10\%) = e^{\overline{\ln x} + u\sigma_{\ln x}} \quad (45)$$

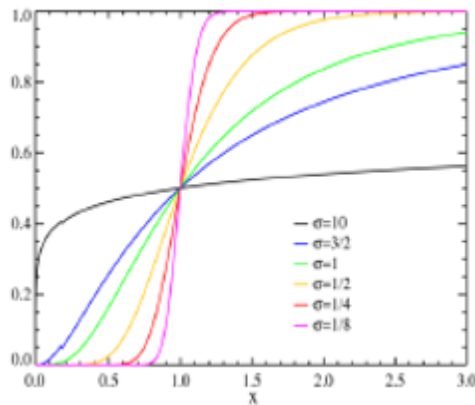


Figure I . 13 Fonction de répartition $\mu=0$

I.6.8. Indisponibilité [15]

Cette loi décrit le comportement d'un composant réparable (ou non), avec (ou sans) refus de démarrage à l'aide d'expressions exponentielles. Elle généralise la loi exponentielle à paramètre Lambda (taux de défaillance).

Paramètres:

- Gamma (Probabilité) = probabilité de refus de démarrage initial (à $t = 0$)
- Lambda (Taux) = taux de défaillance
- Mu (Taux) = taux de réparation La définition de la loi est la suivante:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda - \delta(\lambda + \mu)}{\lambda + \mu} \times e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (46)$$

Les paramètres Gamma et Mu sont optionnels, ils peuvent selon le cas être mis à zéro.

- Si le composant n'est pas réparable il suffit de mettre Mu à zéro.
- Si le composant ne peut pas tomber en panne au démarrage, il suffit de mettre Gamma à zéro.

Remarque: Le refus de démarrage n'est pris en compte qu'à $t = 0$.

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.6.9. Dormant [15]

Cette loi a trois paramètres: un taux de défaillance, un temps moyen de réparation et un délai.

De plus, elle ne dépend pas du temps.

Paramètres:

- Lambda (Taux) = taux de défaillance
- MTTR (Durée) = durée moyenne de réparation
- d (Durée) = délai La définition de la loi est la suivante:

$$Q(t) = \frac{\lambda d - (1 - e^{-\lambda d}) + \lambda \cdot MTTR \cdot (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda d + \lambda \cdot MTTR \cdot (1 - e^{-\lambda d})} \quad (47)$$

CHAPITRE I : Généralités sur la sûreté de fonctionnement

I.7. Conclusion

La sûreté de fonctionnement est un facteur crucial dans le développement et la conception des systèmes, qui doit prendre en compte les dangers et les risques potentiels, tout en assurant la fiabilité et la sécurité des systèmes pour garantir la sécurité de la population et de l'environnement. La norme ISO 31010 fournit un cadre méthodologique largement utilisé dans de nombreux secteurs industriels pour l'analyse des risques et la gestion de la sûreté de fonctionnement. Lors de ce chapitre une analyse fonctionnelle comme étant une méthode primordiale de réussite de toute analyse de sûreté de fonctionnement a été prise en considération. Par la suite le métrique de sûreté de fonctionnement a été abordée, il représente les différentes phases par lesquelles un composant passe, ainsi que le taux de défaillance et de réparation et l'approche de la fiabilité par les probabilités. Ce métrique peut aider à évaluer la fiabilité des composants et des systèmes en identifiant les phases critiques et les facteurs de risque potentiels. Ainsi, la sûreté de fonctionnement doit être intégrée dès les phases de conception et de développement des systèmes en utilisant des normes et des méthodologies appropriées pour garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes et minimiser les risques et les dangers pour les utilisateurs et l'environnement..

CHAPITRE II

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II. CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.1. Introduction

Les méthodes d'analyse des risques jouent un rôle essentiel en permettant d'identifier, d'évaluer et de gérer les potentiels dangers.

Ce chapitre représente l'exploration des différentes méthodes d'analyse des risques utilisées dans diverses industries. Nous examinerons en détail ces méthodes qui permettent d'appréhender les risques sous différents angles, de manière à établir des mesures préventives et correctives adaptées. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, nous aborderons l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et leurs Criticité (AMDEC), l'Analyse préliminaire des risques (APR), l'Étude de danger et d'opérabilité (HazOp), l'Arbre de défaillance (ADD), les Réseaux bayésiens, le Diagramme de fiabilité, le Réseau de Petri stochastique, le diagramme de Pareto, les Chaînes de Markov, ainsi que d'autres approches pertinentes.

Ces méthodes offrent des outils et des cadres conceptuels pour comprendre les risques associés à un système ou à un processus donné. Elles permettent d'identifier les potentielles défaillances, d'évaluer leurs probabilités d'occurrence, leurs gravités et leurs impacts, ainsi que de déterminer les mesures appropriées pour minimiser les risques. En utilisant ces méthodes d'analyse des risques, les organisations peuvent anticiper les problèmes potentiels, améliorer la sécurité et la fiabilité de leurs opérations, et prendre des décisions éclairées pour la gestion des risques.

Dans ce chapitre, nous aborderons également les facteurs d'importance qui représente des éléments clés dans l'évaluation des risques. Ces facteurs, tels que le facteur d'importance marginale, le facteur d'importance critique, le facteur d'importance de diagnostic, le facteur d'Augmentation du Risque et le facteur de Diminution du Risque, permettent de prioriser les risques et d'orienter les actions de prévention et de mitigation.

Enfin, nous discuterons également de l'analyse de sensibilité, qui est une approche visant à évaluer l'impact des variations ou des incertitudes sur les résultats des analyses de risques. L'analyse de sensibilité permet de mieux comprendre les sources d'incertitude, d'identifier les facteurs clés influençant les résultats et de prendre des décisions éclairées en tenant compte de ces variations.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.2. Méthode applicable en sûreté de fonctionnement

II.2.1. Définition

La sûreté de fonctionnement est évaluée en analysant les systèmes réels afin de créer un modèle abstrait qui représente une caractéristique de sûreté de fonctionnement spécifique telle que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité. Les événements qui peuvent se produire dans le système et son environnement sont identifiés et utilisés comme éléments dans ce modèle, tels par exemple :

- Des défaillances et des pannes des composants du système.
- Des événements liés à l'environnement.
- Des erreurs humaines en phase d'exploitation.

Le modèle permet ainsi de représenter toutes les défaillances et les pannes des composants du système qui compromettent une des caractéristiques de sdf [16]

II.2.2. Principales méthodes :

Il y'a plusieurs méthodes d'analyse ont été mises au point. Les principales sont :

II.2.2.1. Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets et leurs Criticité (AMDEC):

Définition :

L'AMDEC est un outil renommé de l'amélioration continue en qualité, qui vise à prévoir et à gérer les risques au sein d'une entreprise. Initialement développée pour les entreprises industrielles, en particulier dans le domaine de l'automobile, cette méthode s'est étendue à toutes les organisations qui appliquent les normes ISO 9000 et qui cherchent à répondre aux attentes de leur clientèle. L'AMDEC permet d'identifier les modes de défaillance potentiels d'un processus ou d'un système, d'en évaluer l'impact et la criticité, et de mettre en place des mesures d'amélioration pour prévenir les risques et renforcer la fiabilité et la qualité. [17]

Le principe de la méthode

L'AMDEC est une méthode d'analyse qui peut être utilisée pour identifier les points de défaillance potentiels qui pourraient affecter la performance d'un nouveau produit en cours de conception, d'un processus en développement ou d'un procédé de fabrication en phase d'optimisation. Elle permet ainsi d'anticiper les risques et de mettre en place des mesures préventives pour améliorer la qualité et la fiabilité du produit ou du processus. [18]

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Le but d'AMDEC

Selon la norme IEC61508-7, le but de AMDEC est d'établir une hiérarchisation de criticité des composants qui pourraient être à l'origine d'une blessure, d'un préjudice ou d'une dégradation du système par le biais de défaillances uniques, afin de déterminer quels composants peuvent nécessiter une attention particulière et des mesures de surveillance nécessaires pendant la conception ou l'exploitation. [3]

Les types de l'AMDEC

Tableau II . 1 les types de l'AMDEC [19]

Types d'AMDEC	Rôle	Document de travail associé
AMDEC Fonctionnelle	Analyse des défaillances et de ses causes à l'étape de la conception.	<ul style="list-style-type: none">• Plan de construction• Brevet
AMDEC Produit	Analyse les demandes des clients en termes de fiabilité.	<ul style="list-style-type: none">• Plan de fiabilisation
AMDEC Process	Analyse des risques liés aux défaillances d'un produit.	<ul style="list-style-type: none">• Plan de surveillance• Contrôle qualité
AMDEC Moyen de Production	Analyse les risques liés aux défaillances de la chaîne de production.	<ul style="list-style-type: none">• Guide de maintenance
AMDEC Flux	Analyse les risques liés à l'approvisionnement, le temps de réaction et de correction et leurs coûts.	<ul style="list-style-type: none">• Plan de gestion des stocks• Procédure de sécurité

L'application de la méthode AMDEC

L'application de la méthode comprend 7 étapes principales qui s'agencent de la façon décrite dans la Figure II. 2 [20].

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

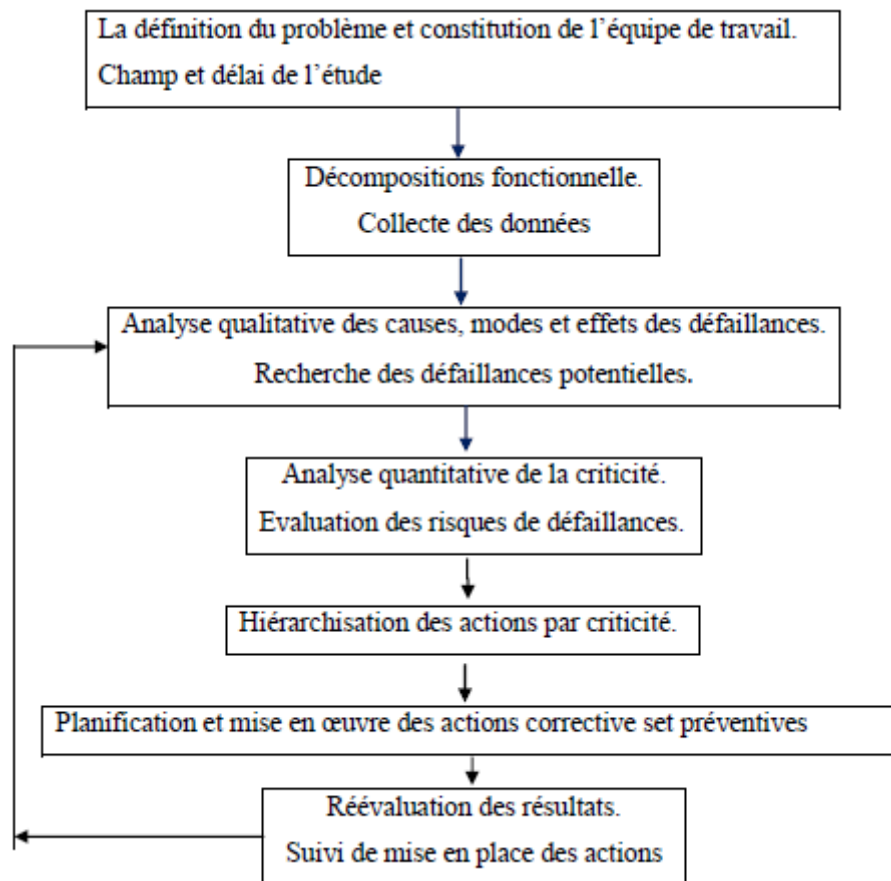


Figure II. 1 Organisation de la méthode AMDEC

II.2.2.2. Le diagramme de Pareto

Définition

Le diagramme de Pareto est un instrument qui permet de sélectionner un nombre restreint de tâches qui auront un impact global important. Ce dispositif utilise le principe de Pareto, également appelé loi des 80/20, qui stipule que 80% des problèmes sont engendrés par 20% des causes et que réaliser 20% du travail peut générer 80% des bénéfices. Pour élaborer un diagramme de Pareto pour la sélection des causes à résoudre, plusieurs étapes sont requises : [1]

- Identifier les problèmes et en dresser une liste;
- Identifier la cause de chaque problème;
- Regrouper les problèmes selon leur cause commune;
- Additionner les scores pour chaque groupe;
- Dessiner un diagramme en colonnes qui représente les causes, en faisant apparaître en premier celles qui ont le score le plus élevé.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

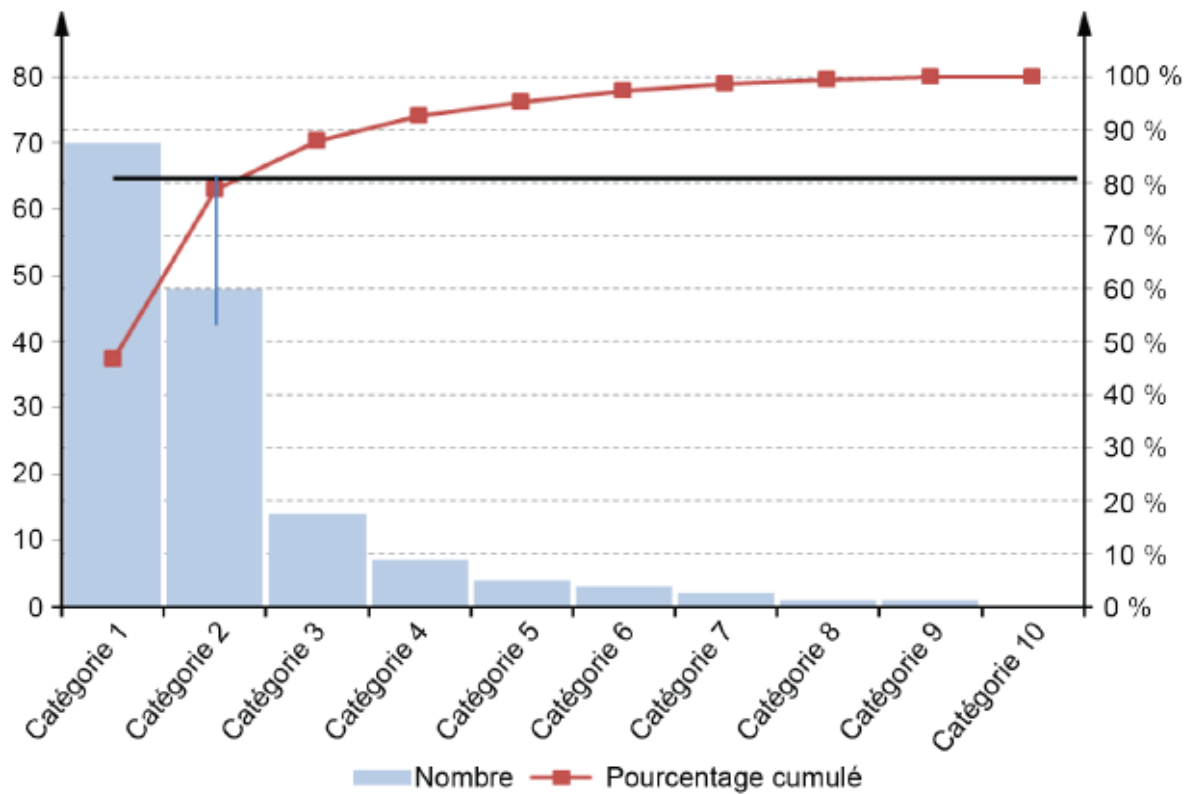


Figure II. 2 Exemple de diagramme de Pareto

Objectif :

L'objectif de l'utilisation d'un diagramme de Pareto est de concentrer les efforts sur les problèmes qui ont le plus grand impact, afin d'obtenir des résultats significatifs et efficaces. Il permet de hiérarchiser les causes d'un problème, de déterminer les causes les plus courantes, et ainsi de concentrer les ressources sur les solutions les plus efficaces.

Principe :

Le principe de Pareto, également connu sous le nom de loi des 80/20, énonce que 80% des problèmes sont produits par 20% des causes, et que 20% du travail peut générer 80% des bénéfices. Le diagramme de Pareto utilise ce principe en identifiant les causes les plus fréquentes d'un problème, afin de les hiérarchiser et de concentrer les efforts sur celles qui ont le plus grand impact. Le diagramme de Pareto est souvent présenté sous la forme d'un graphique en barres, où les causes sont classées par ordre décroissant de fréquence, et où l'axe vertical représente le nombre d'occurrences de chaque cause, tandis que l'axe horizontal représente les différentes causes.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.2.2.3. Analyse préliminaire des risques (APR)

Historique et domaine d'application

L'Analyse Préliminaires des Risques (Dangers) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautiques et militaires. Elle est utilisée depuis dans de nombreuses autres industries. L'Union des Industries Chimiques (UIC) recommande son utilisation en France depuis le début des années 1980.

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée. [21]

Principe :

L'APR permet d'identifier les différentes composantes dangereuses ou situations dangereuses présentes dans un procédé ou système. Elle permet également d'évaluer le potentiel de chacun à engendrer un accident plus ou moins grave. [9]

L'APR a principalement trois objectifs :

- D'identifier les dangers d'une installation industrielle et ses causes
- D'évaluer la gravité des conséquences liées aux situations dangereuses et aux accidents potentiels
- Proposer les mesures adéquates

Objectifs

L'objectif de la méthode de l'APR est de :

- De forcer le projet à pratiquer une décomposition fonctionnelle de base, de tout le concept de l'instrument, y compris les softs, pendant la phase de design.
- L'identification des erreurs et des non-conformités de design en comparaison aux spécifications d'origine.
- L'identification très tôt dans le déroulement du projet, des modes de pannes possibles et en particulier des pannes à effet catastrophique sur le système, ces dernières sont traitées en priorité.
- L'apport de modifications pour réduire le nombre d'éléments critiques et, plus généralement, pour réduire les risques de pannes [22]

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Les différentes étapes utilisées pour réaliser la méthode APR

Jean-Marie Flaus a mentionné dans son livre [23] les différentes étapes utilisées pour réaliser la méthode d'analyse de risques APR :

- Préparer l'analyse : cette étape consiste à définir le contexte,
- Décrire et modéliser le système,
- Identifier les risques et les différents événements redoutés,
- Analyser les situations dangereuses,
- Analyser les conséquences,
- Rechercher les barrières existantes,
- Évaluer la sévérité et la fréquence ou vraisemblance, de façon qualitative, ou semi-qualitative,
- Proposer de nouvelles barrières,
- Rédiger un rapport d'analyse.

II.2.2.4. Étude de danger et d'opérabilité (HAZOP)

Historique

Il y a une cinquantaine d'années, en 1965, la société britannique Imperial Chemical Industries, l'une des plus grosses entreprises de l'industrie chimique au monde, a décidé d'améliorer les performances de ses processus et la sécurité de ses installations. Pour ce faire, la méthode HAZOP a été mise au point. Son objectif est d'identifier l'ensemble des dangers et des risques pouvant menacer un site industriel afin de pouvoir éviter tout événement indésirable.

En 1974, l'industrie chimique vit sa plus grande catastrophe lorsqu'une explosion libère dans l'atmosphère de Flixborough, en Grande-Bretagne, un nuage de 40 tonnes de cyclohexane, qui fait 28 morts et 89 blessés. La méthode HAZOP va alors se répandre dans de nombreuses industries à risques (notamment dans la chimie et la pétrochimie, le nucléaire ou encore les transports). [24]

Définition

Méthode HAZOP : « ... application d'un examen critique formel et systématique aux du procédé et de l'ingénierie d'une installation neuve ou existante afin d'évaluer le potentiel de danger lié à la mauvaise utilisation, ou au mauvais fonctionnement, d'éléments d'équipement et leurs effets sur l'installation dans son ensemble... ». [25]

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Principe

La méthode HAZOP, est une approche qui consiste à subdiviser un système en composants distincts, appelés "nœuds", puis à appliquer des mots-clés ou des guides spécifiques pour examiner les écarts par rapport aux points de consigne du système, appelés "intentions de processus". Les résultats de ces écarts sont étudiés par une équipe multidisciplinaire pour déterminer les éventuelles conséquences pour le système dans son ensemble, en particulier les risques potentiels pour la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement. L'équipe de travail formule des recommandations pour éliminer ou atténuer les causes et les conséquences des écarts identifiés, et ces recommandations sont enregistrées sous forme de tableaux pour servir de base à la mise en œuvre des actions recommandées. [26]

Objectifs

La norme CEI 61882 définit les objectifs de la méthode HAZOP (HAZard and OPerability study) originelle comme suit :

– « ... identification des dangers potentiels dans le système. Le danger peut se limiter à la proximité immédiate du système ou étendre ses effets bien au-delà, comme dans le cas des dangers environnementaux... ».

– « ... identification des problèmes potentiels d'exploitabilité posés par le système et, en particulier, l'identification des causes, des perturbations du fonctionnement et des déviations dans la production susceptible d'entraîner la fabrication de produits non conformes... ».

Déroulement

Il convient pour mener l'analyse de suivre les étapes suivantes :

- 1) Dans un premier temps, choisir une ligne de la maille. Elle englobe généralement un équipement et ses connexions, l'ensemble réalisant une fonction dans le procédé identifiée au cours de la description fonctionnelle.
- 2) Choisir un paramètre de fonctionnement,
- 3) Retenir un mot-clés et générer une dérive,
- 4) Vérifier que la dérive est crédible. Si oui, passer au point 5, sinon revenir au point 3,
- 5) Identifier les causes et les conséquences potentielles de cette dérive,
- 6) Examiner les moyens visant à détecter cette dérive ainsi que ceux prévus pour en prévenir l'occurrence ou en limiter les effets,

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

- 7) Proposer, le cas échéant, des recommandations et améliorations,
- 8) Retenir un nouveau mot-clé pour le même paramètre et reprendre l'analyse au point 3,
- 9) Lorsque tous les mots-clés ont été considérés, retenir un nouveau paramètre et reprendre l'analyse au point 2,
- 10) Lorsque toutes les phases de fonctionnement ont été envisagées, retenir une nouvelle ligne et reprendre l'analyse au point 1. [27]

II.2.2.5. Arbre de défaillance (ADD)

Historique et domaine d'application

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques qui a été développée dans les années 1960 par Bell Téléphone pour évaluer la sécurité des systèmes de tir de missiles. Elle consiste à identifier les séquences et combinaisons d'événements menant à un événement redouté de référence. Depuis, cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire et l'industrie chimique. Elle est également employée pour analyser les causes des accidents qui se sont produits, où l'événement redouté est généralement connu. Dans ce cas, on parle d'analyse par arbre des causes, dont l'objectif principal est de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident. [28]






Définition

L'arbre de défaillance (ADD) est une méthode de représentation symbolique en arborescence des différentes composantes d'un système et des éléments agissant sur ce système [29]. L'ADD est une méthode qui met en évidence les relations entre les différents éléments d'un système ainsi que les facteurs qui peuvent entraîner une défaillance ou une panne. En outre, cette technique permet d'estimer la probabilité de panne. Cette approche, appelée top-down, consiste à partir d'un événement final (une panne) pour identifier les causes potentielles de cette panne. Chacune de ces causes est ensuite examinée de manière indépendante afin d'identifier les événements qui ont pu la déclencher. L'objectif principal de l'Arbre de défaillance est de déterminer les causes sous-jacentes d'un événement indésirable, comme une panne.

Les relations entre les composantes et les éléments agissant sur le système sont représentés à l'aide de symboles logiques.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Tableau II. 2 Symboles utilisés dans la construction d'un arbre de défaillance

	Événement ou sous-événement	Un événement est le résultat d'un événement non développé et/ou d'une défaillance de base
	Événement non développé	Événement non développé, par manque d'information, ou événement qui sera développé plus tard
	Défaillance de base	Cause primaire d'un événement
	Porte logique ET	Porte désignant que toutes les conditions sous-jacentes sont requises pour que l'événement se produise
	Porte logique OU	Porte désignant qu'au moins une des conditions sous-jacentes est requise pour que l'événement se produise

Principe

Cette méthode déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un événement redouté, parfois identifié par une AMDEC. A partir de cet « événement sommet », on construit une arborescence (schéma graphique en forme d'arbre inversé) représentant l'enchaînement logique des « événements intermédiaires » jusqu'à la mise en cause des « événements élémentaires » (défaillance d'un composant). Cela par utilisation du symbolisme logique de l'algèbre de Boole. Il est ainsi possible d'identifier toutes les défaillances élémentaires pouvant conduire à l'événement redouté, puis de quantifier celui-ci par son taux de défaillance λ obtenu à partir des taux de défaillances λ_i de chaque composant mis en cause. [29]

Ce type d'analyse permet, dans le domaine de la maintenance :

- D'améliorer la conception ;
- De faire un diagnostic rapide ;
- De prévoir une meilleure logistique.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Objectif

L'objectif « qualitatif » est de construire une synthèse de tout ce qui peut conduire à un événement redouté et d'évaluer l'effet d'une modification du système, de comparer les conséquences des mesures qui peuvent être envisagées pour réduire l'occurrence de l'événement redouté étudié.

L'objectif « quantitatif » est d'évaluer la vraisemblance de la survenue de l'événement étudié à partir des combinaisons d'événements élémentaires qui peuvent le produire. Si on connaît les probabilités de ces événements on peut en déduire la probabilité de l'événement étudié et l'impact sur celle-ci d'une réduction (ou augmentation) de telle ou telle des probabilités élémentaires.

À défaut d'une quantification par probabilités, l'arbre permet d'apprécier le nombre de scénarios conduisant à l'événement étudié, le nombre minimum d'événements ou de conditions suffisant pour qu'il arrive, etc. [30]

Construction de l'arbre de défaillances

Composants : dispositifs représentés au dernier niveau de décomposition du système dans le cadre de la construction de l'ADD

Mode de défaillance : manifestation extérieure de la défaillance

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

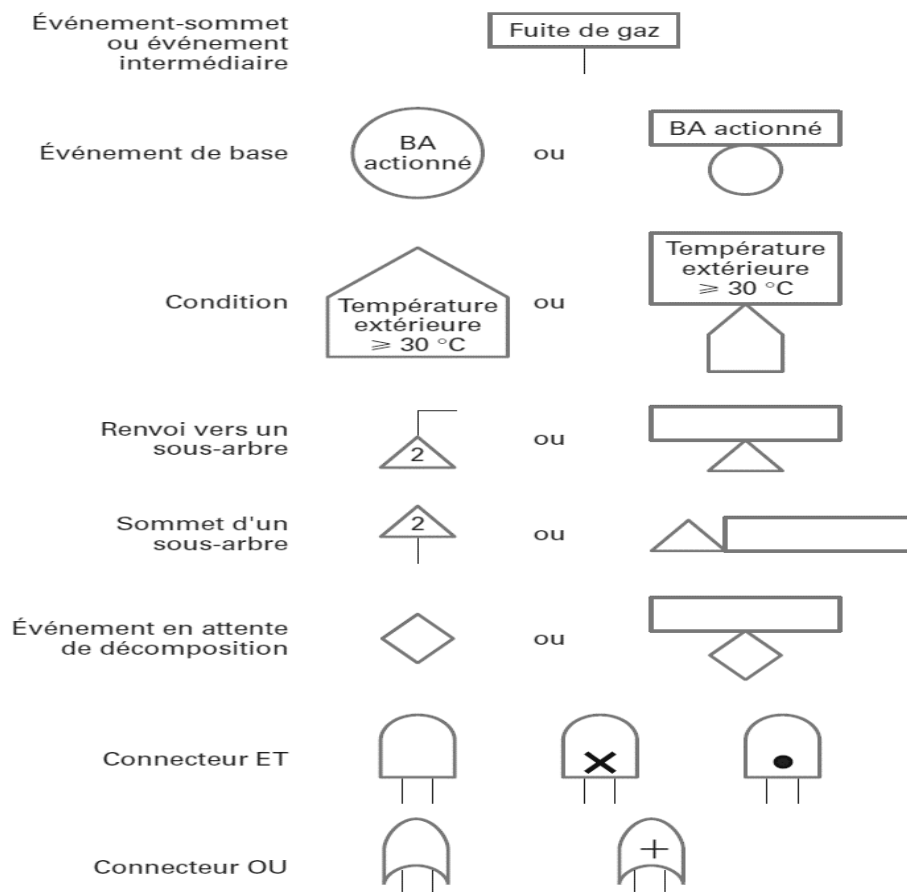


Figure II. 3 Les éléments disponibles pour construire l'arbre des défaillances

Les résultats de l'analyse par arbre des défaillances

L'arbre des défaillances produit deux types de résultats:

- Résultats qualitatifs
- Résultats quantitatifs

Résultats qualitatifs

Les résultats qualitatifs s'obtiennent en réduisant l'arbre à une expression algébrique selon les règles de l'algèbre booléenne pour décrire l'événement en termes Coupes et Coupes Minimales (MCS):

- Les Coupes sont toutes les combinaisons (intersection) d'évènements élémentaires à l'origine de l'évènement Top.
- Les Coupes Minimales (MCS) sont toutes les combinaisons minimales (intersection) d'évènements élémentaires à l'origine de l'évènement Top.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

La présence possible d'un ou plusieurs coupes minimales d'ordre 1 montre la faiblesse du système parce qu'une seule défaillance peut conduire à la défaillance du système.

Coupes minimales

Une coupe minimale est la petite combinaison d'événements entraînant l'événement indésirable. Ainsi par définition, si un des événements d'une coupe minimale ne se produit pas, l'événement indésirable ne se réalise pas l'expression « chemin critique » est parfois utilisée.

Tableau II. 3 quelques règles d'optimisation permettant de réduire les Arbres en faisant appliquer l'algèbre booléen

Propriétés	Produit (Porte logique Et)	Somme (Porte logique Ou)
Commutativité	$A \cdot B = B \cdot A$	$A + B = B + A$
Idempotence	$A \cdot A = A$	$A + A = A$
Absorption	$A \cdot (A + B) = A$	$A + A \cdot B = A$
Associativité	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
Distributivité	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$	$A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C)$

Résultats quantitatifs

Les résultats quantitatifs consistent dans l'évaluation de la probabilité de chaque MCS en prenant en compte la présence d'évènements dépendants et de Causes Communes de Défaillance CCF

Avantages et faiblesses de l'arbre des défaillances

Avantages

- La modélisation se fait d'une manière simple et systématique, utilisant opérateurs simples et pas nombreux
- L'approche est statique ; pour la construction (mais pas pour l'analyse) un gros arbre des défaillances peut être décomposé en sous-arbres
- L'analyse est plutôt simple et il existe nombreux outils pour aider l'analyste.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

- Les coupes minimales représentent des résultats synthétiques qui montrent directement les criticités des composants.

Inconvénients

- Dans le cas de gros arbres, il est possible d'oublier des événements, surtout pour des systèmes à haut risque qui présentent nombreuses redondances et protections
- La quantité de travail pour construire l'arbre est remarquable

II.2.2.6. Réseaux bayésiens

L'utilisation des méthodes bayésiennes a augmenté ces dernières années. Aujourd'hui, avec les progrès de l'informatique et des méthodes, les chercheurs utilisent les méthodes bayésiennes pour résoudre des problèmes de plus en plus complexes.

Dans de nombreuses applications, ces méthodes offrent des avantages importants par rapport aux techniques méthodologiques traditionnelles.

L'inférence bayésienne est le seul cadre d'inférence statistique qui suit encore le principe de vraisemblance. En termes simples, le principe de vraisemblance stipule que toutes les informations contenues dans les données expérimentales sont contenues dans la densité d'échantillonnage des données observées. [31]

Théorème de Bayes

L'application de la théorie bayésienne à la fiabilité utilise les concepts de lois de probabilité a priori (obtenues à partir d'un jugement d'expert ou d'un retour d'expérience) et de lois de probabilité a posteriori.

La figure ci-dessous représente le passage des paramètres d'un modèle probabiliste d'une distribution a priori à une distribution a posteriori, exprimée dans une formulation bayésienne pour construire une aide à la décision, qui peut ensuite être interprétée comme une mise à jour des connaissances, sur un réseau bayésien.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

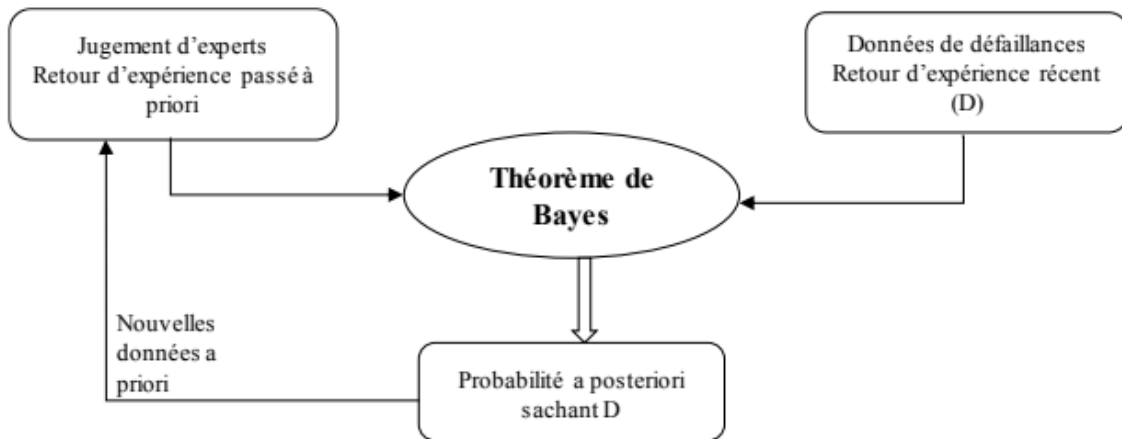


Figure II. 4 Passage de paramètres dans réseau bayésien

Formule de Bayes [8]

$$P(B_i/A) = \frac{P(A/B_i) \cdot P(B_i)}{\sum_j [P(A/B_j) \cdot P(B_j)]} \quad (48)$$

La probabilité conditionnelle de réalisation d'un événement B sachant que l'événement A s'est produit, est proportionnelle à la probabilité (a priori) de B (probabilité avant que l'on observe A) multipliée par la probabilité d'observer A sachant B.

Où : B: événement étudié,

A: événement(s) observé(s),

P(B): probabilité a priori de réalisation de l'événement B,

(A/B) : vraisemblance de l'occurrence de l'événement Bi sachant que A a été observé,

(B/A) : probabilité a postérieure de réalisation de l'événement B sachant que A a été observé.

Les principes de la démarche bayésienne

L'approche bayésienne usuelle

Comme mentionné ci-dessus, les méthodes bayésiennes sont basées sur des probabilités a priori et a posteriori. D'une part, cette approche part d'hypothèses a priori basées sur des avis d'experts en l'absence d'observations disponibles.

En revanche, cette approche modélise les informations sous forme de lois de probabilité paramétriques, et ce sont les valeurs des paramètres qui sont à déterminer.

Pour cela, nous utilisons le maximum de vraisemblance a posteriori lorsque les premières données sont disponibles.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Ensuite, lorsqu'il y en a assez, nous pouvons construire des lois de probabilité a posteriori. Au fil du temps, dans l'ordre de leurs décisions, nous avons donc :

- La loi de probabilité à priori
- La loi conditionnelle des observations recueillies ou la fonction de vraisemblance
- La loi de probabilité à posteriori

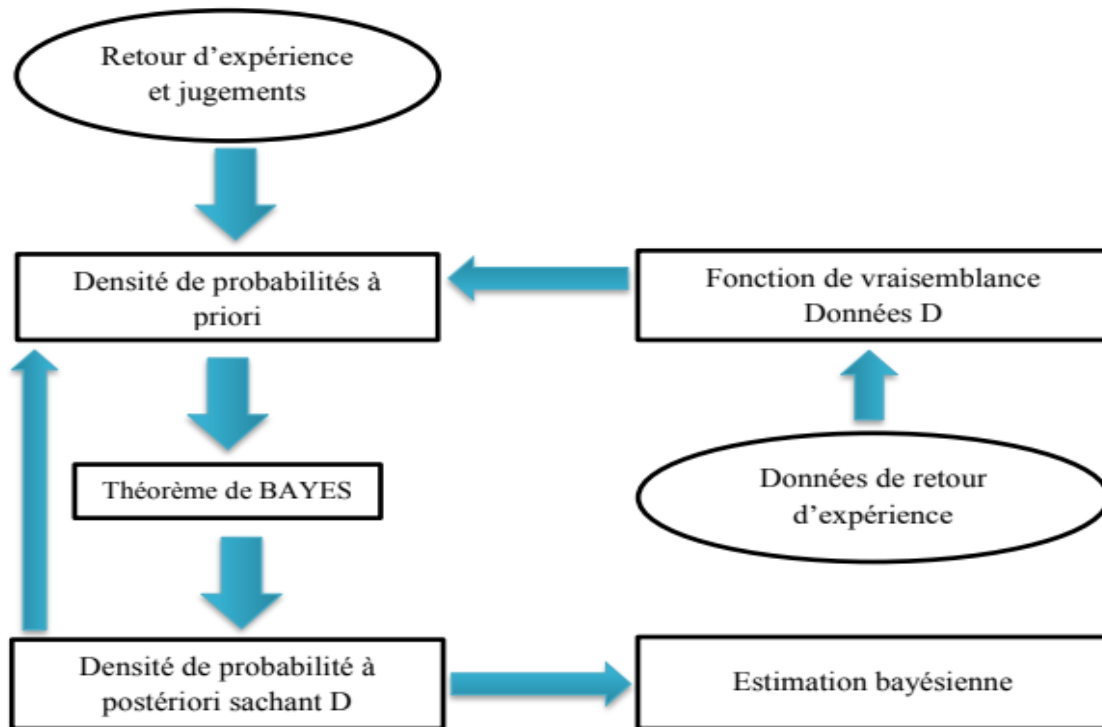


Figure II. 5 Schéma suivant illustre le principe de cette approche

Le mécanisme de l'inférence bayésienne

Le processus d'inférence comprend les étapes suivantes :

- Sélection du modèle par rapport aux données : distributions conditionnelles. La distribution conditionnelle appartient à la famille des probabilités.
- Déterminer la distribution a priori des paramètres de la loi conditionnelle pour incorporer les informations subjectives. Il est basé sur ce que l'on sait de l'appareil étudié : essais antérieurs sur des appareils similaires, avis d'experts, retours d'expérience, enquête, etc.
- Appliquer le théorème bayésien pour obtenir la distribution a posteriori, qui peut combiner des informations subjectives et des informations objectives dans l'échantillon.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

- Estimations des paramètres de fiabilité à l'étude (par exemple, taux de défaillance)
- Dérivé de la distribution postérieure.

Limites des Réseaux Bayésiens

- Une perspective de déficit d'apprentissage : la technique des réseaux bayésiens n'intègrent pas immédiatement l'ensemble du problème d'apprentissage comme le font les réseaux de neurones. Aujourd'hui, la plupart de la littérature sur l'apprentissage avec les réseaux bayésiens ignore le problème de la généralisation des modèles, et les précautions que cela implique lors de la construction des modèles. Cela peut être expliqué en choisissant la distance des critères de recherche ou la distribution de probabilité.
- Lisibilité des graphes : En effet, même si les connaissances manipulées dans les réseaux bayésiens, ou extraites des données par les algorithmes d'apprentissage par corrélation sont lisibles, car représentées sous forme de graphe, elles ne sont tout de même pas aussi bonnes que celles représentées par un arbre de décision. Lisibilité, par exemple, surtout si le graphe a un grand nombre de nœuds. Notez également que l'information représentée par le diagramme est une structure causale. La probabilité n'est pas représentable, donc on ne peut pas comprendre la signification d'un arc donné en lisant simplement le graphique.
- Utilisation de la probabilité : l'utilisation de cartes causales est une méthode très intuitive. Cependant, au contraire, le concept de probabilité n'est toujours pas très intuitif. Sur la base du raisonnement de probabilité, il est vraiment facile de construire un paradoxe. Déterminé par l'entrée et la sortie (telle que les modèles de régression, les réseaux de neurones ou les arbres de décision) formulés, il est toujours un moyen plus facile de les réexpliquer même dans le contexte du formalisme de probabilité.
- La complexité des algorithmes: en termes de représentation et d'utilisation, la nature générale du réseau bayésien rend difficile pour eux de faire face à une certaine taille. La complexité du réseau bayésien ne se reflète pas seulement dans la compréhension des utilisateurs. Le problème potentiel est en fait tous les problèmes de toute complexité non physique, et l'algorithme conduit au développement, et son comportement ne peut garantir des problèmes à grande échelle. [8]

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.2.2.7. Diagramme de fiabilité

Définition

Le Diagramme de Fiabilité (DDF) est utilisé pour évaluer la fiabilité d'un système modélisé. Il est composé de blocs représentant des entités telles que des composants, des sous-systèmes ou des fonctions, reliés par des lignes orientées indiquant leurs dépendances. Les entités ont un comportement binaire (fonctionnement/défaillance). Les DDF ont une entrée, un corps diagrammatique et une sortie. Lorsqu'un signal est émis en entrée, il est transmis par les lignes jusqu'à la sortie. Si une entité échoue, le signal s'arrête au niveau du bloc qui lui est associé. Si aucun chemin n'existe pour que le signal atteigne la sortie, le système est défaillant. Les DDF représentent le système de manière statique. L'analyse consiste à rechercher les combinaisons de défaillances des entités qui conduisent à la défaillance du système, appelées "coupes". Les coupes qui ne contiennent pas d'autres coupes sont considérées comme "minimales" et sont essentielles pour les calculs probabilistes résultant de cette première analyse. [32]

Principe

La technique de diagramme de fiabilité se fonde sur la fragmentation du système en différentes parties, appelées sous-systèmes, représentées graphiquement sous forme de blocs. Chaque bloc représente une entité spécifique du système et est associé à des fonctions et des composants particuliers.

Objectif

La méthode du "diagramme de fiabilité" consiste à modéliser le fonctionnement d'un système en considérant que les fonctions globales de ce système sont obtenues par l'association de fonctions élémentaires en série ou en parallèle. Chaque composant du système, considéré comme étant autonome, assure une fonction spécifique. En utilisant cette modélisation fonctionnelle, il est possible d'évaluer la fiabilité du système.

La méthodologie de l'analyse :

La méthode d'analyse implique l'utilisation courante des Diagrammes de Fiabilité dans plusieurs secteurs industriels pour évaluer la fiabilité des systèmes non réparables. Toutefois, dans certaines circonstances, ces diagrammes peuvent aussi être employés pour estimer la fiabilité des systèmes réparables.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Diagramme en série

La panne de l'un des éléments E_i du système entraîne la panne du système. Si nous désignons par R_S la fiabilité du système et R_i la fiabilité du composant E_i , alors la fiabilité du système est donnée par :

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (49)$$

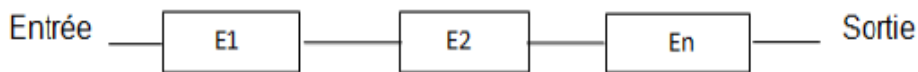


Figure II. 6 MdF d'un système série

Diagramme en parallèle

La panne de tous les éléments E_i du système entraîne la panne du système. Si un seul des éléments fonctionne alors il conduit au fonctionnement du système.

Dans ce cas, la fiabilité du système est donnée par :

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (50)$$

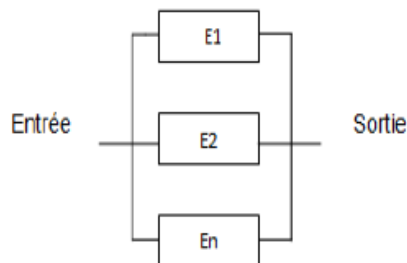


Figure II. 7 MdF d'un système parallèle

II.2.2.8. Réseau de Petri stochastique

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Définition

Un réseau de Petri est un modèle mathématique qui représente les relations entre les conditions et les événements intervenant sur un système. Il est constitué d'un graphe orienté composé de places, de transitions et d'arcs. Les places sont représentées graphiquement par des cercles et peuvent être marquées par une ou plusieurs marques appelées jetons, qui représentent l'état du système. Les transitions sont représentées par des rectangles et agissent, sous certaines conditions, sur le marquage du réseau. Les arcs sont représentés par des flèches qui lient une place à une transition ou inversement une transition à une place. [8]

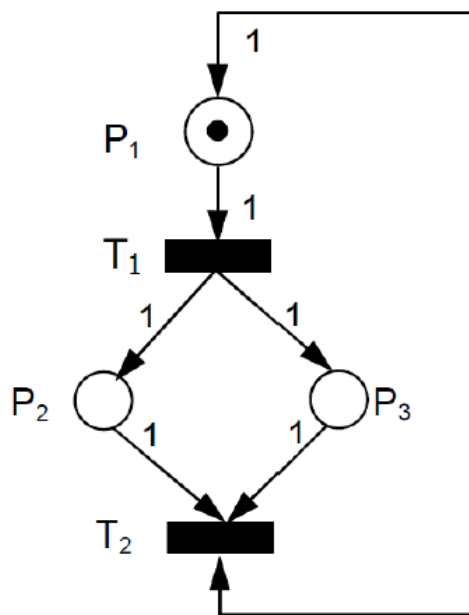


Figure II . 8 Exemple de réseau de Petri

Principe

Le principe du réseau de Petri est que le comportement du système est simulé par les franchissements de transitions qui changent l'état du système. Pour qu'une transition soit franchie, il faut qu'elle soit valide ou sensibilisée, c'est-à-dire que toutes les places amont de la transition doivent posséder un nombre de jetons au moins égal au poids de l'arc qui les relie à la transition. Elle peut alors être franchie, ce qui consiste à retirer un nombre de jetons égal au poids de l'arc amont de chacune des places amont associées et à ajouter un nombre de jetons égal au poids de l'arc aval dans chacune des places aval associées. Le nouveau marquage du réseau correspond au nouvel état atteint par le système.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Objectif

L'objectif du réseau de Petri est de modéliser le comportement d'un système en représentant ses états possibles et les transitions possibles entre ces états. Les lois de transitions peuvent être des lois de probabilités ou des délais constants, et les transitions peuvent être affectées d'équations "d'entrée" ou de changements de variables. Cette représentation mathématique permet d'analyser différents aspects du système modélisé, tels que sa performance, sa fiabilité, sa sécurité, etc.

II.2.2.9. Chaînes de Markov

Historique

Dans le domaine du sdf, les chaînes de Markov ou la méthode des espaces d'états (MEE) ont été créées dans les années 1950 et utilisées pour évaluer la fiabilité des systèmes dynamiques. [33]

Principe

L'idée est d'utiliser un outil appelé graphe d'état (ou graphe de Markov) pour représenter tous les états du système (y compris les états des composants et de fonctionnement) et toutes les interactions potentielles entre eux.

Le graphe d'état permet de visualiser les différents états d'un système, qui sont désignés par des cercles et reliés par des arcs orientés qui indiquent les pannes et les réparations entre les états. [34]

Objectif :

En utilisant un graphe de Markov pour décrire tous les états potentiels du système et toutes les transactions potentielles entre ces états, la méthode des espaces d'états (MEE) ou chaînes de Markov vise à étudier la fiabilité des systèmes dynamiques. Cette analyse permet de lister et de classer tous les états du système en états de défaut et de fonctionnement, de lister toutes les transitions potentielles entre ces états, d'identifier toutes les causes potentielles de ces transitions, ainsi que de calculer les probabilités d'être dans chaque état. Sur la durée de vie et les temps moyens d'un système (MTTF, MTBF, MTTR, etc.).

Déroulement

Prenons en compte un système composé de n composants, dont chacun a un nombre fini d'états de fonctionnement et de défaillance. Ce système est destiné à être réparable, et chaque composant est réparé après qu'un problème ait été constaté. Ainsi, le système est composé de :

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

- Les états de fonctionnement incluent une condition entièrement fonctionnelle dans laquelle toutes les pièces sont en place, ainsi que des situations dans lesquelles certaines pièces sont endommagées mais le système est toujours capable de fonctionner.
- Lorsqu'un nombre suffisant de pièces est défaillant, on dit que le système est en panne.

Pour effectuer cette analyse, il est indispensable de :

- a) De recenser et de classer tous les états du système en états fonctionnement ou en états de panne (Si chaque composant a 2 états (ok ou panne) et si le système à n composants, le nombre maximal d'états est $2n$. Au cours de la vie du système, des états de panne peuvent apparaître à la suite de défaillance ou disparaître à la suite de réparation).
- b) Recenser toutes les transitions potentielles entre ces différents états et déterminer toutes les causes potentielles de ces transitions. Les transitions sont généralement provoquées par des défaillances de composants ou des réparations de composants.
- c) Calculer les temps moyens (MTTF, MTBF, MTTR, etc.) et la probabilité d'être dans différents états au cours de la vie d'un système.

II.3. Facteurs d'importance [35] [36]

II.3.1. Principe

Dans une étude liée à la sûreté de fonctionnement, il est important de pouvoir cibler les composants critiques du système, et de mériter l'attention dans la mise en place du plan de maintenance. Vous devez être en mesure de savoir quels composants être réparés en priorité ou quels composants se renforcer pour améliorer les performances de fiabilité du système. C'est dans ce cas que le facteur important a été introduit.

Le facteur d'importance est l'indicateur de chaque événement de base d'un arbre de défaillance. Ces indicateurs sont conçus pour évaluer les contributions relatives de chaque composante du système au risque global.

La littérature traite principalement cinq facteurs d'importance différents :

- Facteur d'Importance Marginale (MIF) parfois appelé facteur de Birnbaum.
- Facteur d'Importance Critique (CIF).
- Facteur d'Importance de Diagnostic (DIF) sont également appelés facteurs de Fussel-Vesely.
- Facteur d'Augmentation du Risque (RAW ou RIF).
- Facteur de Diminution du Risque (RRW ou RDF).

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.3.2. Définitions

II.3.2.1. Facteur d'importance marginale

Le facteur de Birnbaum représente la variation de la fiabilité du système en fonction de la fiabilité du composant i . Il est exprimé comme la différence entre le risque du système d'être défaillant quand le composant i fonctionne et le risque du système à tomber en panne quand le composant i ne fonctionne pas. Sa définition mathématique est :

$$I^B(i \mid \text{système défaillant à } t) = R_{\text{systeme}}(1_i, R(t)) - R_{\text{systeme}}(0_i, R(t)) \quad (51)$$

Avec :

- $R_{\text{systeme}}(1_i, R(t))$ la fiabilité du système à l'instant t en supposant que le composant i fonctionne
- $R_{\text{systeme}}(0_i, R(t))$ la fiabilité du système à l'instant t en supposant que le composant i ne fonctionne pas

Le facteur de Birnbaum varie dans le temps, selon les événements qui sont arrivés sur le système ainsi que sur le composant i en question. Plus la valeur est élevée, plus la fiabilité du composant i a un impact sur le système, c'est-à-dire que sa défaillance entraîne rapidement une dégradation du système.

II.3.2.2. Facteur d'importance critique

Le facteur d'importance critique (Criticality Importance en anglais) est en relation avec le facteur de Birnbaum. Il représente la probabilité qu'un composant soit défaillant et critique pour le système sachant que le système global est défaillant. Un équivalent serait de dire qu'il s'agit de la probabilité que le composant i soit la source de la défaillance du système sachant que le système est défaillant. Sa définition mathématique est :

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

$$I^{CR}(i | \text{système défaillant à } t) = \frac{I^B(i | \text{système défaillant à } t)[1 - R_i(t)]}{1 - R_{\text{systeme}}(t)} \quad (52)$$

Avec :

- $R_{\text{systeme}}(t)$ la fiabilité du système à l'instant t
- $R_i(t)$ la fiabilité du composant i à l'instant t est défaillante à l'instant
- $I^B(i | \text{système défaillant à } t)$ le facteur de Birnbaum du composant sachant que le système est défaillant à l'instant

Le composant i est défini comme critique pour le système, si le système fonctionne si et seulement si le composant i fonctionne, en d'autres termes, si l'état du système dépend du composant i .

II.3.2.3. Facteur d'importance de diagnostic

Le facteur de Fussell-Vesely représente la part du composant dans les coupes minimales du système pour être défaillant. Ici, une coupe est une combinaison de composants sans lien de causalité et avec des conditions suffisantes, telle que cet ensemble, si tous les composants sont défaillants, alors provoque la défaillance du système (Duflot, Bérenguer, Dieulle, & Vasseur, 2009) (Vatn, 1992). Une coupe est dite minimale si elle ne contient aucune autre coupe du système, c'est-à-dire que nous avons la plus petite séquence de composants provoquant la défaillance immédiate du système. Les coupes minimales permettent donc de décrire les conditions pour que le système soit défaillant de la façon la plus concise possible.

Ce facteur mesure l'importance d'un composant i en calculant la probabilité que le système soit défaillant à cause d'une coupe minimale qui contient le composant i . Sa définition mathématique est :

$$I^{FV}(\text{composant } i | t) = \frac{\sum_{j=1}^{m_j} P(i \text{ dans coupe minimale } j | t)}{1 - R_{\text{systeme}}(t)} \quad (53)$$

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Avec :

- $R_{\text{systeme}}(t)$ la fiabilité du système à l'instant t
- m_j le nombre de coupes minimales dans le système
- $P(i \text{ dans coupe minimale } j | t)$ la probabilité que le composant i soit dans la liste des composants constituant la coupe minimale j
- $I^{FV}(\text{composant } i | t)$ le facteur Fussell-Vesely du composant i à l'instant t

II.3.2.4. Facteur d'Augmentation du Risque

Le facteur d'augmentation du risque (Risk Achievement Worth RAW en anglais) mesure l'augmentation du risque sur le système à devenir défaillant quand le composant i est défaillant. C'est le ratio entre la défiabilité du système si le composant i est défaillant (ne fonctionne pas) et la défiabilité nominale du système. Sa définition mathématique est :

$$I^{RAW}(\text{composant } i | t) = \frac{1 - R_{\text{systeme}}(0_i, R(t))}{1 - R_{\text{systeme}}(t)} \quad (54)$$

Avec :

- $R_{\text{systeme}}(0_i, R(t))$ la fiabilité du système à l'instant t en supposant que le composant i est défaillant
- $R_{\text{systeme}}(t)$ la fiabilité du système à l'instant t
- $I^{RAW}(\text{composant } i | t)$ le facteur d'augmentation du risque dû au composant i à l'instant t

Si le facteur d'augmentation du risque du composant se rapproche de la valeur égale à 1, alors cela signifie que la défaillance du composant a peu ou pas d'effet sur la défaillance du système.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.3.2.5. Facteur de Diminution du Risque

Le facteur de diminution du risque (Risk Reduction Worth RRW en anglais) peut être vu comme le complémentaire du facteur d'augmentation du risque. Il mesure la diminution du risque sur le système à devenir défaillant quand le composant i fonctionne. Pareillement, il s'agit d'un ratio entre la défiabilité nominale du système et la défiabilité du système si le composant i est en marche (fonctionne). Sa définition mathématique est :

$$I^{RRW}(\text{composant } i) = \frac{1 - R_{\text{systeme}}(t)}{1 - R_{\text{systeme}}(1_i, R(t))} \quad (55)$$

Avec :

- $R_{\text{systeme}}(1_i, R(t))$ la fiabilité du système à l'instant t en supposant que le composant i fonctionne
- $R_{\text{systeme}}(t)$ la fiabilité du système à l'instant t
- $I^{RAW}(\text{composant } i | t)$ le facteur de diminution du risque dû au composant i à l'instant t

Si la valeur du facteur d'augmentation du risque du composant se rapproche de 1, alors cela signifie qu'améliorer le fonctionnement du composant a peu ou pas d'effet sur la fiabilité du système.

II.4. Analyse de sensibilité

II.4.1. Principe

Les paramètres de fiabilité sont généralement connus dans une certaine incertitude. Par conséquent, la sensibilité de la probabilité d'étudier les événements de la tête pour les changements dans les valeurs des paramètres de fiabilité est très intéressante. Utilisez Monte-Carlo pour simuler l'analyse de sensibilité. Les principes de ces simulations de Monte-Carlo sont les suivants.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

Pour un nombre donné de tentatives, les opérations suivantes sont effectuées.

- Premièrement, la valeur des paramètres est tracée en fonction de leur distribution de probabilité ;
- Deuxièmement, la probabilité des événements de base est calculée ;
- Troisièmement, la probabilité de l'événement de tête est calculée.

Calculez le couple de la distribution de probabilité de l'événement de tête (moyenne, écart-type, intervalle d'intervalle à 95% et 95% d'erreur). Vous pouvez également imprimer des histogrammes et des quantiles distribuées. Les quantiles sont calculés en temps réel. Par conséquent, même s'il est généralement très proche de la valeur réelle, elle peut être proche de leurs valeurs. Les mêmes instructions conviennent également à l'histogramme.

Enfin, vous pouvez également imprimer l'heure des événements de base et des paramètres de distribution.

II.4.2. Définitions

II.4.2.1. Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance $[X_{0.05}, X_{0.95}]$ associée à un niveau de confiance de 0,95 d'une variable aléatoire X est défini ci-après.

$$X_{0.05} = e^{\mu - 1.645\sigma} \quad (56)$$

$$X_{0.95} = e^{\mu + 1.645\sigma} \quad (57)$$

Où μ et s représentent respectivement la moyenne et l'écart-type de la variable aléatoire X .

II.4.2.2. Facteur erreur

Le facteur d'erreur EF à 95% est défini comme suit.

$$EF(X) = \sqrt{\frac{X_{0.95}}{X_{0.05}}} = e^{1.645\sigma} \quad (58)$$

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.4.2.3. Quantiles

Les quantiles sont des points pris à intervalles réguliers de la fonction de distribution cumulative (CDF) d'une variable aléatoire. La division d'une donnée ordonnée en q sous-ensembles de même taille est le but des quantiles.

Les quantiles sont les valeurs de données qui marquent les limites entre les sous-ensembles consécutifs. En d'autres termes, le k ème q -quantile d'une variable aléatoire X est la valeur de telle sorte que la probabilité que la variable aléatoire sera inférieure à X est d'au plus k / q et la probabilité que la variable aléatoire sera plus que X est au plus $(q - k) / q$.

Il y a $q - 1$ des q -quantiles, un pour chaque entier k satisfaisant $0 < k < q$.

II.4.2.4. Les histogrammes

L'histogramme est construit d'une manière similaire à celle des quantiles. La différence est due à la valeur moyenne du sous-ensemble, et non à sa limite supérieure. L'histogramme peut être injecté dans une distribution de probabilité.

CHAPITRE II : Les méthodes d'analyse des risques

II.5. Conclusion

Les méthodes d'analyse des risques sont des outils indispensables dans la gestion des dangers potentiels. Ce chapitre a examiné en détail les différentes méthodes d'analyse des risques utilisées dans diverses industries, telles que l'AMDEC, l'APR, l'HazOp, l'ADD, les Réseaux bayésiens, le Diagramme de fiabilité, le Réseau de Petri stochastique, le diagramme de Pareto, les Chaînes de Markov.

Ces méthodes offrent une approche systématique et structurée pour identifier, évaluer et gérer les risques. En utilisant ces méthodes, les organisations peuvent anticiper les problèmes potentiels, mettre en place des mesures préventives et correctives efficaces, et améliorer la sûreté de fonctionnement de leurs systèmes et processus.

De plus, les facteurs d'importance étudiés, tels que le facteur d'importance marginale, le facteur d'importance critique, le facteur d'importance de diagnostic, le facteur d'Augmentation du Risque et le facteur de Diminution du Risque, jouent un rôle prépondérant dans l'évaluation et la priorisation des risques. Ils permettent de concentrer les efforts sur les aspects les plus critiques et de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques. Enfin, l'analyse de sensibilité apporte une compréhension plus approfondie des sources d'incertitude et de leur impact sur les résultats des analyses de risques. Cette approche permet d'identifier les facteurs clés influençant les résultats et de prendre en compte les variations et les incertitudes pour une prise de décision plus robuste.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la sphère GPL et système instrumenté de sécurité HIPPS.

CHAPITRE III

III. Chapitre III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

III.1. Introduction

Au niveau de l'industrie Gazière les réservoirs de stockage sous pression, comme les sphères de GPL sont indispensables. Ces réservoirs sont régis par des lois et normes strictes pour assurer leurs sécurités et sont construits pour supporter des pressions et des températures importantes.

Parmis les moyens de protection des système de stockage sous pression on trouve le HIPPS (High Integrity Pressure Protection System) a été créé pour fournir une protection supplémentaire en cas d'incident à cause de cela. En contrôlant la pression dans les conduites d'alimentation en amont et en aval des sphères de stockage sous pression, les systèmes de sécurité HIPPS empêchent la surpression dans les sphères de GPL. Ces appareils sont conçus pour répondre automatiquement pour abaisser la pression dans les sphères de GPL et identifier rapidement les circonstances potentiellement dangereuses, évitant ainsi les accidents majeurs.

Dans ce chapitre, nous allons présenter de plus près les sphères de GPL et leurs fonctionnements, ainsi que les HIPPS et leurs rôles crucial dans la sécurité des réservoirs de stockage sous pression.

III.2. Etude de la sphère

III.2.1. Description de la sphère

Les réservoirs sphériques sont communément utilisés pour le stockage de grandes quantités de gaz liquéfié à haute pression, car la forme sphérique est la plus appropriée pour résister à cette pression. En effet, ce type de coque offre une résistance accrue tout en maintenant les niveaux de contraintes de membrane à un minimum.

Les principaux constituants des sphères sont classés en quatre accessoires :

- Les accessoires d'accès : qui regroupent les composants suivants : l'escalier, les trous d'homme et l'échelle intérieure.
- Les accessoires du contrôle : regroupent les constituants suivants : un indicateur de pression, un indicateur de température et un indicateur de niveau.
- Les accessoires d'exploitation : ce sont les différentes tubulaires placées sur les parties inférieures et extérieures du réservoir qui communiquent avec l'intérieur du réservoir.
- Les accessoires de sécurité : ce sont les organes et l'équipement qui assurent la protection du réservoir contre les risques engendrés au niveau de ce dernier.

III.2.2.Appareils annexes d'une sphère de stockage d'alimentation

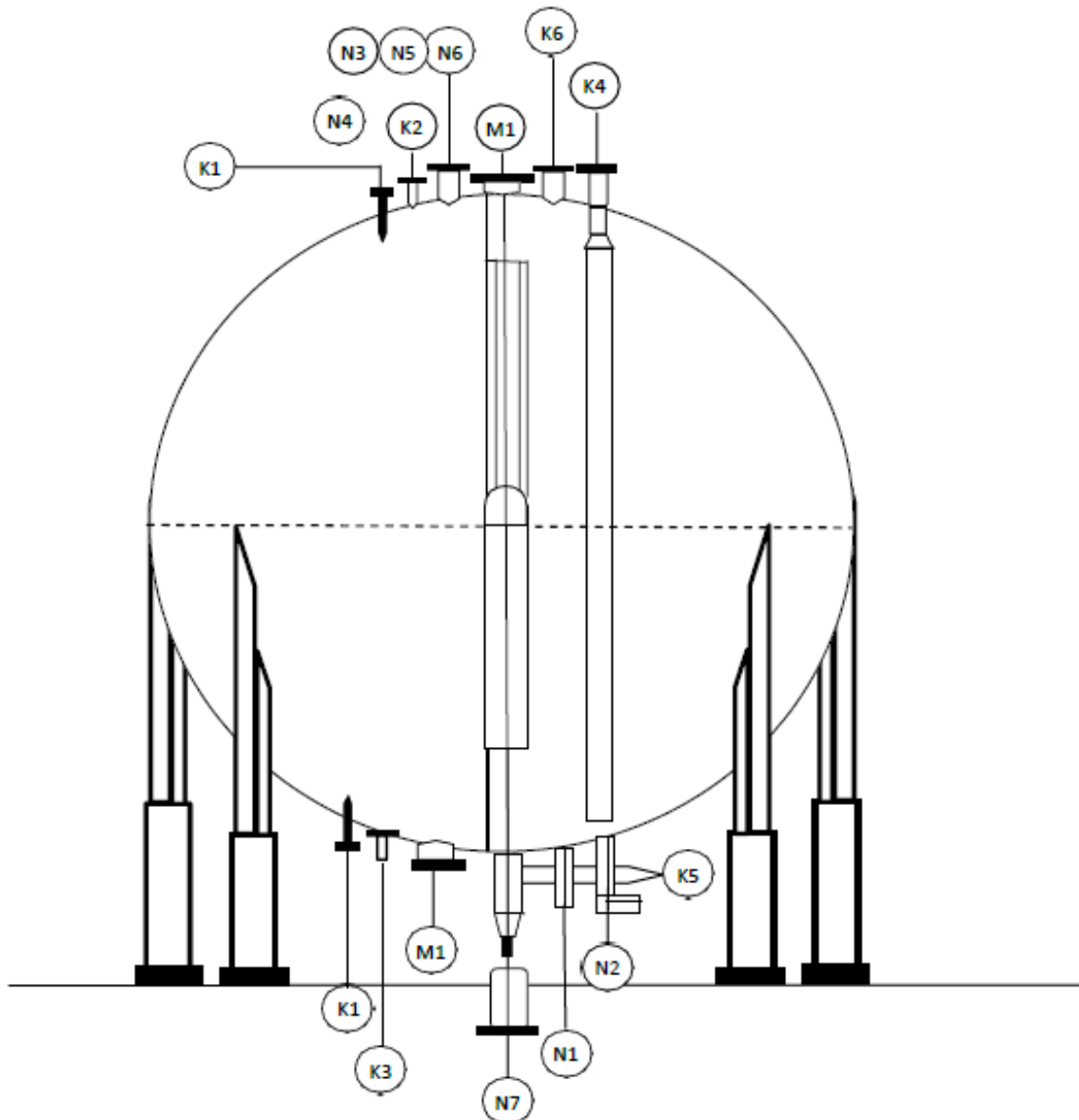


Figure III. 1 Appareils annexes d'une sphère de stockage d'alimentation

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

Tableau III. 1 Appareils annexes d'une sphère de charge GPL

N°	Désignation	Situation
M1	Trou d'homme	Calotte supérieur
N3	Retour liquide	
N4	Entrée vapeur	
N5	Entrée/sortie vapeur	
N6	Ventilation	
K1	T.E. (élément de température)	
K2	Instrument de niveau et de pression	
K4	L.I. (indicateur de niveau)	
K6	P.S.V. (vanne de sécurité de pression)	
M1	Trou d'homme	
N1	Entrée liquide	
N2	Sortie liquide	
K1	T.E. (élément de température)	
K3	Instrument de niveau	
--	Accumulateur	
N7	Drainage	
K5	L.G. (niveau à glace)	

III.2.3.L'ACCIDENTOLOGIE INTERNE/EXTERNE LIEE AU GPL:

Notre cas d'étude porte sur le stockage de GPL, un gaz inflammable et hautement volatile utilisé dans de nombreux domaines, tels que l'industrie, l'énergie et le transport. Le GPL est généralement stocké dans des réservoirs de grande capacité.

Le stockage de GPL présente certains risques, et malheureusement, certains des scénarios les plus catastrophiques liés aux accidents industriels sont survenus dans ce contexte. Ces incidents peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur l'environnement, la sécurité des travailleurs et les communautés avoisinantes.

Les scénarios les plus fréquents comprennent des fuites de gaz, des explosions, des incendies et des ruptures de réservoirs. Ces événements peuvent être déclenchés par des facteurs

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

tels que des erreurs humaines, des défaillances techniques, des conditions météorologiques extrêmes.

Le retour d'expérience effectué sur les accidents permet de tirer plusieurs enseignements sur les phénomènes (incendie, explosion, toxique). Parmi les principaux, nous pouvons retenir l'influence de la température et du mode de sollicitation (vitesse d'augmentation de la pression) sur le seuil de rupture d'une enceinte.

Concernant les effets sur l'environnement, les informations sur les effets de pression ne sont pas fournies dans les descriptions des accidents ; en revanche, les distances de projection de fragments sont parfois indiquées et la distance maximale atteinte dans les accidents mentionnés précédemment est de 1200m.

Types d'accidents technologiques communs occasionnés par des installations de GPL: [16]

Selon le retour d'expériences d'accidents technologiques majeur survenus dans le monde les accidents sont classés selon leur magnitude en de 2 types :

- Moins forts et contrôlables dans leur impact, comme dans le cas des incendies.
- Eventuels, de grande ampleur et difficile à contrôler, comme les explosions et les effets toxiques.

Les causes peuvent être le produit d'erreurs humaines dans l'opération de machineries, ou des défauts des systèmes techniques, et environnementaux.

A partir de ces erreurs les installations présentent différents phénomènes physiques qui peuvent déclencher de graves dangers à savoir:

Emission ou fuite : fait référence à l'échappement d'une substance gazeuse ou liquide d'un système de stockage ou d'un réseau de conduction. La fuite change les concentrations du matériel qui s'est échappé.

Dispersion : Est liée à la forme et à la densité du dépôt occasionné par une fuite ou un déversement accidentel, elles peuvent être d'origine globale avec la rupture d'un réservoir de stockage, ou d'origine ponctuelle avec la rupture d'un oléoduc. La dispersion peut être instantanée, dans le cas d'une explosion d'un réservoir, ou bien continue comme dans le cas de l'évaporation de la nappe de combustibles répandus sur une superficie.

Le tableau 11 montre quelques exemples d'accidents occasionnés par des erreurs ou un mauvais fonctionnement des systèmes

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

Tableau III. 2 Accidents et scénarios provoqués par des installations de matériel dangereux [37]

Accidents	Types de Produits	Scénario	Exemples survenus
Incendies	Liquides inflammables	Feu de grande ampleur BOIL OVER : boule de feu et projection de produits inflammables. Une partie de la masse d'hydrocarbures liquides contenus dans un récipient s'est répandue par la vaporisation brutale de l'eau ; le résultat fut un incendie qui a duré environ 6 heures	Juin 1974. Accident Flixborough, à 240 Km au nord de Londres. La rupture accidentelle d'une tuyauterie, dans une fabrique chimique de nylon, provoqua un nuage chimique qui s'est enflammé. La chaleur et le feu ont affecté 2 450 habitations et ont entraîné la mort de 28 personnes. Le nombre de morts est dû au fait que l'accident est survenu un week-end.
Effets toxiques	Gaz toxiques	La perte totale et instantanée du produit contenu. La rupture instantanée d'une grande canalisation en phase liquide, durant son rendement maximal	1984. Bhopal, Inde. La rupture d'une vanne a produit un fluide d'isocyanate de méthyle, un produit à haute toxicité qui s'est propagé aux populations alentours et a entraîné la mort de 2 660 personnes. Cela fut considéré comme le majeur accident de l'histoire (Lapierre et Moro, 2001)
Explosion	Gaz combustibles liquéfiés GLP	BLEVE: Explosion de gaz inflammable liquéfié en ébullition. Cela se présente comme une masse qui s'enflamme ou brûle en compagnie d'explosions. Phénomène commun dans les grandes installations de combustibles (GLP). UVCE (Unconfined vapor cloud explosions) : explosion d'un nuage de gaz suivi de la rupture d'une canalisation en phase liquide.	1980. Ortuella, Espagne. Une explosion suite à la fuite de gaz propane a entraîné la mort de 51 personnes et de nombreux blessés. Avril 1986, Philippines. Une explosion de produits volatils a entraîné la mort de 11 personnes et en a blessé huit. Novembre 1984. San Juan Ixhuatepec, Mexique. La rupture d'une canalisation a libéré un nuage de gaz qui s'est enflammé, générant une série d'explosions qui a atteint un proche dépôt de GLP, L'accident a provoqué la mort d'au moins 452 personnes. 1992. Guadalajara, Mexico, Le gaz d'un collecteur d'eaux usées qui apparemment contenaient des eaux industrielles résiduelles d'une fabrique de pétrole, a produit une explosion qui a tué 175 personnes et affecté des demeures situées à 8 Km.

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

LES ACCIDENTS AU NIVEAU DES INSTALLATIONS DE GPL :

A- L'accidentologie liée aux installations de GPL à l'étranger :

Tableau III. 3 L'accidentologie liée aux installations de GPL à l'étranger

Accidents/Lieu	Equipement	Types de produit	Scénario	Conséquence
Raffinerie Feyzin, France, 04/01/1966	L'installation de stockage de G.P.L. (quatre sphères de propane de 1200 m ³ , quatre sphères de butane de 2000 m ³ , ainsi que deux réservoirs cylindriques horizontaux	Liquides inflammables propane / butane	Trois sphères de butane s'ouvrent sans donner matière à un BLEVE	Le village de Feyzin, distant d'environ 400 mètres est touché par les ondes de surpression successives. Au total 11 réservoirs sont détruits, des missiles sont projetés jusqu'à 800 mètres. L'accident causa 18morts et 84 blessés.
IXHUATEPEC, MEXICO, MEXIQUE, 19/11/1984	Le site de stockage était constitué de 4 sphères de G.P.L. d'un volume unitaire de 1600 m ³ , de deux sphères de 2400 m ³ de volume unitaire et de 48 réservoirs cylindriques horizontaux.	GPL	SERIE DE BLEVE SUR UNE INSTALLATION DE STOCKAGE DE G.P.L.	Quelques minutes après l'inflammation du nuage, deux des plus petites sphères donnent matière à des BLEVE, engendrant la formation d'une boule de feu (d'un diamètre évalué, sans certitude, à 350 ou 400 mètres) ainsi que l'éjection d'un ou deux réservoirs cylindriques. Les effets thermiques et l'éjection de fragments entraînent, par effet domino, d'autres BLEVE. Cet accident causa au total le décès de plus de 500 personnes. Il y eut environ 7000 blessés, et 39000 personnes évacuées. Les secours mobilisèrent de l'ordre de 4000 personnes. Des fragments de sphères furent retrouvés à plus de 600 mètres

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

<p>RAFFINERIE (TEXAS CITY, TEXAS, USA, 30/05/1978)</p>	<p>d'un réservoir sphérique d'isobutane d'une capacité de 800 m³</p>	<p>isobutane</p>	<p>SUCCESSION DE BLEVE</p>	<p>Le nuage est enflammé par une source non identifiée et un feu de type chalumeau se forme à la fuite. Moins d'une minute après, la sphère donne matière à un BLEVE. Plusieurs BLEVE de petits réservoirs se produisent ensuite, puis 20 minutes plus tard, une autre explosion survient. Il s'agit du BLEVE d'une autre sphère de 800 m³ de capacité</p>
<p>LOS ALFAQUES, ESPAGNE, 11/07/197</p>	<p>Un camion transportant 23,5 tonnes de propylène</p>	<p>propylène</p>	<p>un BLEVE se produit engendrant notamment une boule de feu.</p>	<p>La citerne est fissurée et l'inflammation du rejet gazeux qui se forme entraîne une augmentation de la pression interne et une détérioration des parois de la citerne. Consécutivement à une première explosion, un BLEVE se produit engendrant notamment une boule de feu. Cet accident fut la cause de 216 morts et plus de 200 blessés dans un rayon de 125 m (Lees, 1996).</p>
<p>ARIA N° 100 Le 19/08/1988 - JAPON- ASAHIKAWA</p>	<p>une fuite de GPL issue de l'unité de re-compression des gaz résiduels dans l'atelier d'inspection et de remplissage des bouteilles.</p>	<p>GPL</p>	<p>Explosion suite à fuite GPL</p>	<p>une explosion (cause d'allumage indéterminée) et un incendie; 1 207 bouteilles sont détruites au cours du sinistre. qui fait 3 morts et 2 blessés sur le site. Les trains sont arrêtés et la production électrique est perturbée.</p>
<p>ARIA N° 9049 Le 04/02/1992 - JAPON- NIIGATA</p>	<p>Défaillance four de re-cuisson Une explosion se produit alors que des employés notent une odeur anormale autour des conduites de GPL raccordées aux brûleurs d'un four de re-cuisson tubulaire</p>	<p>GPL</p>	<p>Explosion de conteneurs GPL</p>	<p>7 employés sont blessés. Une grande partie de l'installation de traitement d'eau de condensation. située près du four. s'effondre. Dix conteneurs de 50 kg de GPL placés dans un bassin d'eau de 30 cm de haut où l'eau est chauffée pour vaporiser les GPL sont à l'origine de l'accident. Alors que le four ne fonctionne pas.</p>

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

<p>(KAMENA VOURLA, GRECE, 30/04/1999)</p>	<p>camion citerne contenant 18 tonnes de GPL</p>	<p>GPL</p>	<p>BLEVE</p>	<p>une fuite de GPL qui s'enflamme, Trente minutes plus tard, un BLEVE se produit. la formation d'une boule de feu d'environ 100 m de rayon et 150 m de hauteur. De grosses gouttes de GPL liquide en feu pleuvent sur des distances de 300 à 400 m.</p>
<p>ARIA N° 36310 Le25/06/2009 - FRANCE - PORT-LA-NOUVELLE</p>	<p>Dans un dépôt de GPL de 1 250 m³. une fuite de propane se produit vers 14h45 sur une vanne de purge d'une des pompes des 3 réservoirs sous talus (2 x 500 m³ + 1 x 250 m³) mis en service début juin en remplacement de 3 sphères aériennes ; le jet vertical de gaz (7 bar). de 6 à 8 m. s'enflamme en moins de 5 s.</p>	<p>GPL</p>	<p>Fuite enflammée sur vanne de purge</p>	<p>La fuite enflammée perdure 35 min. temps nécessaire pour brûler le propane présent dans la canalisation de 250 mm de diamètre et de 20 m de long entre la vanne de sectionnement en soutirage du réservoir et le point de fuite. Après extinction. la vanne de purge est refermée manuellement ; le POI est levé à 15h40. Aucun blessé n'est à déplorer ; les eaux de refroidissement ont été confinées sur le site. La fuite de gaz est estimée à 350 kg.</p>
<p>ARIA N° 29590 Le23/04/2004 - ALLEMAGNE – NC</p>	<p>Dans une raffinerie. un " flash " de GPL se produit lors d'un transfert entre un stockage fixe et une citerne routière</p>	<p>GPL</p>	<p>Flash de GPL</p>	<p>Le jour de l'accident. le chargement d'une citerne est en cours quand le raccord vissé entre le bras de chargement et la citerne fuit. Le nuage ainsi formé s'enflamme. enveloppant le chauffeur. Ce dernier. grièvement brûlé. décèdera de ses blessures par la suite</p>

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

B- L'accidentologie liée aux installations de GPL en Algérie:

Tableau III. 4 L'accidentologie liée aux installations de GPL en Algérie

Accident/LIEU	Equipement	Cause	Conséquence
2004 - EL KHEMIS	Bras de chargement	/	Flash
2004 - BLIDA	Canalisation enterrée du poste chargement	Corrosion interne	Fuite du GPL non enflammée
2005 - BERRAHAL	Soupape de ligne	Dysfonctionnement de la soupape	Fuite du GPL non enflammée
2005 - BBA	Soupape d'une citerne	Dysfonctionnement de la soupape	Fuite du GPL non enflammée
2007 - SKIKDA	Canalisation 6"	Corrosion interne	Fuite du GPL non enflammée
2007 - BERRAHAL	Soupape d'une citerne	Augmentation en pression	Fuite du GPL non enflammée
2007 - PORT BEJAIA	Canalisation 6"	Détérioration d'un joint	Fuite du GPL non enflammée
2009 - SBA	Pipe Arzew-SBA-Tlemcen	Travaux d'excavation d'une société chinoise CETIC	Fuite du GPL non enflammée
2009 - ARZEW	Citerne	Rupteur du joint d'étanchéité du au mauvais serrage	Fuite du GPL non enflammée
Mardi 31 Août 2004 (Jetée M6/GP1/Z)	Bras de chargement	- Outillage - Frottement de brides (création de l'électricité statique)	Fuite du propane enflammée
2009 - SIDI KHALED	Citerne	Arrachement de la vanne de purge du a l'usure du filetage	Fuite du GPL non enflammée
2009 - KHROUB	Soupape de ligne	Elévation de la température	Déclenchement de la soupape
2009 - PORT BEJAIA	Pipe	Cisaillement du pipe est provoqué par une manœuvre d'un remorque de l'EPB	

III.3. Système instrumenté de sécurité

III.3.1. Normes relatives au système instrumenté de sécurité

III.3.1.1. La norme CEI 61508

La norme CEI 61508[3] est la référence pour d'autres normes spécifiques à différents secteurs (par exemple, machines, procédés continus, ferroviaire, nucléaire) ou produits (par exemple, variateurs de vitesse). Elle influence ainsi le développement des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables (E/E/PE) et des produits liés à la sécurité dans tous les secteurs [38]. Cette norme repose sur deux concepts fondamentaux pour son application : le cycle de vie en matière de sécurité et les niveaux d'intégrité de sécurité. Elle s'applique aux systèmes liés à la sécurité lorsque l'un ou plusieurs de ces systèmes contiennent des dispositifs électriques/électroniques/électroniques programmables. Un avantage de cette norme est qu'elle propose des moyens de justifier la sécurité d'un produit tout au long de son cycle de vie, en fonction du niveau de sécurité souhaité. La norme IEC 61508 se compose de sept parties, à savoir :

- La première partie (61508-1) présente les définitions et les exigences générales.
- La deuxième partie (61508-2) traite des exigences spécifiques relatives aux aspects matériels des systèmes E/E/EP.
- La troisième partie (61508-3) est consacrée aux exigences spécifiques relatives aux aspects logiciels des systèmes E/E/EP et est développée dans cette section de la norme.
- La quatrième partie (61508-4) présente les définitions et les abréviations utilisées.
- La cinquième partie (61508-5) fournit des exemples de méthodes pour déterminer les niveaux d'intégrité de sécurité.
- La sixième partie (61508-6) fournit des directives d'application des parties 2 et 3 de la norme.
- La septième partie (61508-7) présente les techniques et les mesures recommandées pour la validation des systèmes E/E/EP.

La figure 3.2 montre la norme CEI 61508 générique et ses normes filles par secteur d'activité.

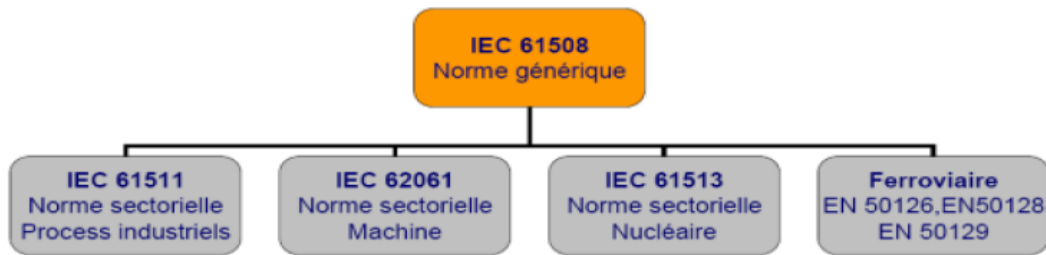


Figure III. 2 Norme CEI 61508 et normes dérivées [39]

III.3.1.2. La norme CEI 61511

La norme CEI 61511 [40] se concentre sur la sécurité fonctionnelle des SIS dans l'industrie des procédés continus. Elle se compose de trois parties principales :

- La partie 61511-1 énonce les définitions et les exigences des systèmes (matériel et logiciel).
- La partie 61511-2 donne des directives pour l'application de la première partie de la norme.
- La partie 61511-3 offre des conseils pour déterminer les niveaux d'intégrité de sécurité.

La norme CEI 61511 précise les définitions et les exigences concernant le cycle de vie en matière de sécurité, y compris la spécification, la conception, l'exploitation et la maintenance d'un système instrumenté de sécurité, dans le but de maintenir le processus dans une position de sécurité appropriée.

La norme CEI 61511 est une déclinaison de la norme CEI 61508. Bien que ces deux normes portent principalement sur les SIS, elles les abordent différemment en fonction des industries auxquelles elles s'adressent.

La norme CEI 61508 est complexe et difficile à mettre en pratique, elle est principalement destinée aux fabricants et aux fournisseurs de systèmes E/E/EP. En revanche, la norme CEI 61511 est plus facile à utiliser et simplifie la norme CEI 61508 en se concentrant sur les éléments essentiels pour l'industrie des procédés.

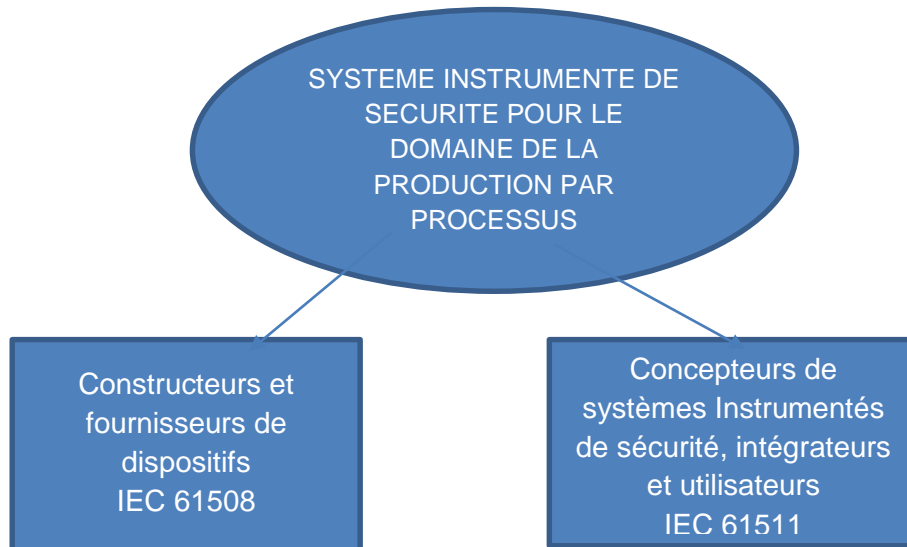


Figure III. 3 Utilisateurs de l'IEC 61508 et l'IEC 61511

La norme CEI 61508 est une directive technique compliquée à mettre en pratique, conçue principalement pour les fabricants et les fournisseurs de systèmes E/E/EP. En revanche, la norme CEI 61511 est plus accessible et représente une simplification de la CEI 61508, en se concentrant sur les aspects essentiels spécifiques à l'industrie de processus.

III.3.1.3. La norme CEI 62061 :

La CEI 62061[41] repose sur les mêmes concepts que ceux de la CEI 61508. Elle est destinée à être utilisée par les concepteurs de machines et les fabricants de systèmes de commande électroniques relatifs à la sécurité de machines. Elle concerne la spécification des prescriptions et fait des recommandations pour la conception, l'intégration et la validation de ces systèmes.

III.3.1.4. La norme ECI 61513 :

La norme CEI 61513 [42] est liée à la sûreté des centrales nucléaires. Elle établit les directives pour les systèmes de contrôle-commande utilisés afin d'assurer les fonctions de sécurité des centrales nucléaires. Les systèmes de contrôle-commande peuvent être conçus en combinant des composants traditionnels câblés avec des composants informatiques. Se conformer à la norme CEI 61513 facilite la compatibilité avec les exigences de la norme CEI 61508, telle qu'elle est interprétée dans l'industrie nucléaire.

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

III.3.1.5. Norme EN 50126

La norme EN 50126 [43] a pour objectif principal de réglementer les domaines liés aux applications ferroviaires. Elle vise à définir les concepts essentiels de la sûreté de fonctionnement des systèmes, tels que la fiabilité, la disponibilité et la sécurité. Cette norme est composée de deux sous-normes distinctes. L'EN 50128 se concentre sur les aspects logiciels des systèmes de protection ferroviaire, tandis que l'EN 50129 traite des systèmes électroniques de sécurité utilisés dans la signalisation.

III.3.2. Définition Un système instrumenté de sécurité (SIS) :

Un système instrumenté de sécurité (SIS) est un système visant à mettre un procédé en position de replis de sécurité (c'est-à-dire un état stable ne présentant pas de risque pour l'environnement et les personnes), lorsque le procédé s'engage dans une voie comportant un risque réel pour le personnel et l'environnement (explosion, feu).

Les SIS sont utilisés pour exécuter des fonctions de sécurité ou sous fonction de sécurité, ils sont aussi appelés boucles de sécurité. Ils comprennent les matériels et logiciels nécessaires pour obtenir la fonction de sécurité désirée.

Ces systèmes peuvent atteindre un niveau d'intégrité de sécurité important en conformité avec les normes en vigueur telles que ; la norme IEC 61508 et la norme IEC 61511, qui traitent de la sécurité fonctionnelle des systèmes. [44]

Le Système Instrumenté de Sécurité (SIS) est une solution utilisée dans les industries pour prévenir les accidents majeurs en détectant les situations anormales et en prenant des mesures de sécurité appropriées. Une évolution récente dans ce domaine est la technologie HIPPS (High Integrity Pressure Protection System), qui se concentre spécifiquement sur la protection contre les défaillances liées à la pression. Le HIPPS est conçu pour réduire les risques liés à une surpression dans les systèmes industriels en permettant une isolation rapide et fiable en cas de dépassement des seuils de pression prédéfinis.

III.3.3. Fonction instrumentée de sécurité (SIF)

La norme IEC 61508 et ses normes associées suivent un cycle de vie qui englobe toutes les étapes, de l'analyse des risques à l'exploitation des fonctions de sécurité instrumentées (SIF) pour assurer la sécurité des systèmes. Une SIF est mise en place pour réduire le risque lié à un système instrumenté de sécurité (SIS). Lorsque le SIS agit comme une barrière de protection fonctionnelle, cette barrière est considérée comme une fonction de sécurité. Une fonction instrumentée de sécurité est spécifiée pour maintenir les risques à un niveau acceptable face à un événement dangereux spécifique. Elle peut être réalisée par un système instrumenté de

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

sécurité, une combinaison de ses composantes, un autre système de sécurité basé sur une technologie différente, ou encore un dispositif externe de réduction des risques. [45]

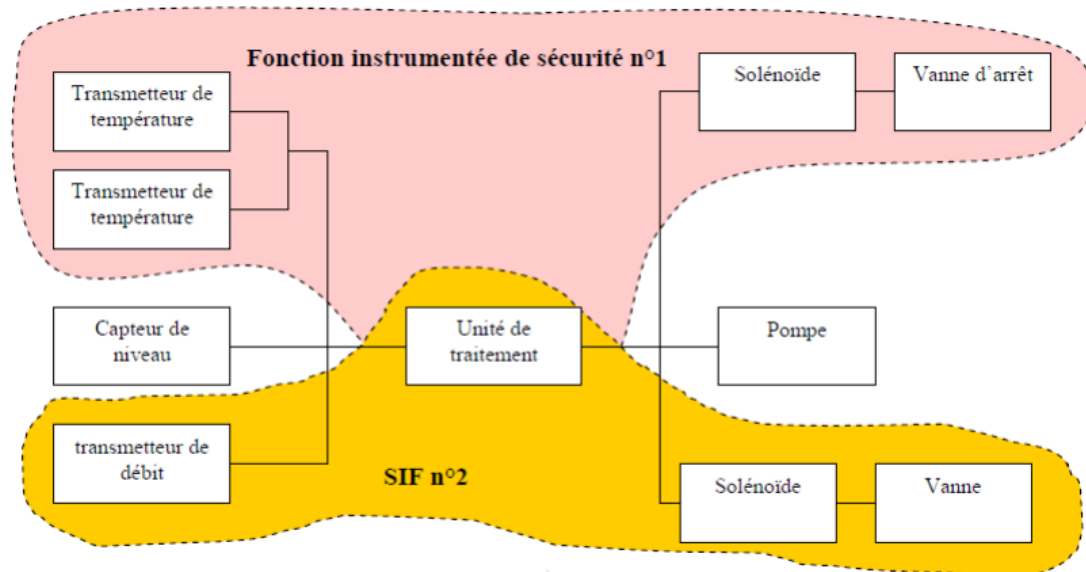


Figure III. 4 Fonction instrumentée de sécurité

Pour illustrer et rendre plus claire cette définition, nous proposons l'exemple d'un équipement utilisé dans la fonction instrumentée de sécurité.

Cette fonction vise à protéger un réservoir sous pression contenant un liquide inflammable en cas de surpression à l'intérieur du réservoir. La sécurité se déclenche selon deux procédures :

- La vanne se ferme pour interrompre l'alimentation en liquide.
- La pompe qui injecte le liquide dans le réservoir s'arrête.

Il est essentiel de répertorier tous les composants nécessaires à la mise en œuvre de cette fonction de sécurité instrumentée. Ces composants comprennent un Transmetteur de pression, solver, vanne, pompe.

III.3.4. Propriétés d'un SIS

Les systèmes instrumentés de sécurité sont caractérisés par plusieurs propriétés :

- Ils dépendent d'une source d'énergie externe pour assurer leur fonction de sécurité.
- On retrouve tout ou partie de ces différents éléments pour constituer des chaînes de sécurité.
- Plusieurs capteurs ou actionneurs peuvent être connectés à une même unité de traitement.

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

- Toutes les combinaisons de capteurs, d'unité de traitement et d'actionneurs qui sont exigées pour accomplir des fonctions de sécurité sont considérées comme une partie de systèmes instrumentés de sécurité.
- Les capteurs, l'unité de traitement et les éléments finaux sont des équipements de sécurité qui exécutent des sous-fonctions de sécurité. L'ensemble de ces sous-fonctions réalise la fonction de sécurité.

III.4. Niveau d'intégrité de sécurité (SIL)

Le Safety Integrity Level (SIL) est le degré d'intégrité de sécurité d'un système. Il est dérivé directement de la norme IEC 61508. Le SIL est une mesure de la fiabilité opérationnelle qui détermine les recommandations relatives à l'intégrité des fonctions de sécurité pour les systèmes E/E/PE liés à la sécurité.

Les normes de sécurité fonctionnelle IEC 61508 et IEC 61511 décrivent une approche pour évaluer le SIL d'un système en termes de sécurité. Elles permettent de définir le niveau SIL qui doit être atteint par un système instrumenté de sécurité (SIS) en fonction d'une analyse des risques. Plus le SIL est élevé, plus la réduction des risques est importante. Les SIS sont classés en quatre niveaux SIL, représentés par des indicateurs allant de un à quatre. Les niveaux SIL sont utilisés pour spécifier les exigences de sécurité des fonctions de sécurité des systèmes E/E/EP liés à la sécurité. Le SIL "quatre" correspond au plus haut degré de sécurité en raison des exigences de sécurité strictes imposées, tandis que le niveau SIL "un" correspond à l'exigence la plus faible. [46]

III.5. Système de protection de pression de haute intégrité HIPPS

III.5.1. Définition

HIPPS est l'abréviation de High Integrity Pressure Protection System (Système de protection de pression de haute intégrité), qui est une application spécifique du Safety Instrumented System (SIS). La fonction d'un HIPPS est de protéger les équipements en aval contre les conditions de surpression ou de perturbation provenant de l'amont. Ceci est réalisé en fermant rapidement deux vannes d'interception de sécurité dédiées en série pour empêcher une pressurisation supplémentaire de la tuyauterie en aval.

L'ensemble HIPPS se compose principalement de :

- Initiateurs
- Solveur logique
- Éléments finaux

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

Il est conçu pour atteindre l'état de sécurité souhaité pour le processus conformément aux normes suivantes :

- CEI 61508 : « Sécurité fonctionnelle du système de sécurité électrique/électronique/électronique programmable »
- CEI 61511 : « Sécurité fonctionnelle : systèmes de sécurité instrumentés pour le secteur de l'industrie de processus »
- ANSI/ISA S84.01, « Application des systèmes instrumentés de sécurité aux industries de transformation »

III.5.2. PRINCIPAUX AVANTAGES DE L'UTILISATION D'UN SYSTÈME HIPPS

Les industries pétrolière et gazière utilisent les systèmes HIPPS pour assurer une protection contre la surpression dans les pipelines, les tuyauteries, les réservoirs et les processus de transformation. L'un des avantages majeurs de l'utilisation d'une pression théorique inférieure en aval du système HIPPS est la possibilité de réduire l'épaisseur de la paroi et ses effets associés, notamment :

- Une diminution du poids et des coûts pour les pipelines et les réservoirs en aval du HIPPS.
- Une augmentation de la capacité/débit dans les applications de transport de fluide.
- Une réduction des coûts de transport et de stockage grâce à une diminution du volume et du poids.

Avantage environnemental :

Le HIPPS présente un avantage significatif sur le plan environnemental en réduisant considérablement, voire en éliminant, la nécessité d'installer des dispositifs de décharge tels que des vannes de sécurité. Cela permet de prévenir les émissions de gaz dans l'atmosphère, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

Avantage au niveau de la sécurité :

La présence d'un HIPPS assure un niveau élevé de protection et de fiabilité en évitant complètement les situations de surpression dans tous les types d'équipements en aval. Cela garantit la sécurité des installations en prévenant les risques liés à la surpression, offrant ainsi une protection optimale.

III.5.3. Architecture de Système HIPPS :

Le système HIPPS se compose principalement d'un solveur logique, de deux vannes d'arrêt fonctionnant selon la logique 1oo2 et de trois transmetteurs de pression fonctionnant selon la logique 2oo3. Chaque composant a été soigneusement sélectionné et conçu pour garantir que l'ensemble du système atteigne le niveau de sécurité SIL 3 (Probabilité de panne à la demande PFD entre 10^{-4} et 10^{-3}). Le HIPPS regroupe tous les dispositifs nécessaires pour assurer l'état de sécurité souhaité du processus. Cela inclut l'ensemble de la boucle d'instrumentation, depuis les capteurs sur le terrain jusqu'aux éléments finaux, en passant par le solveur logique. De plus, le système comprend d'autres dispositifs essentiels au bon fonctionnement du SIS, tels que les interfaces utilisateur SIS, les dispositifs de communication et les alimentations électriques.

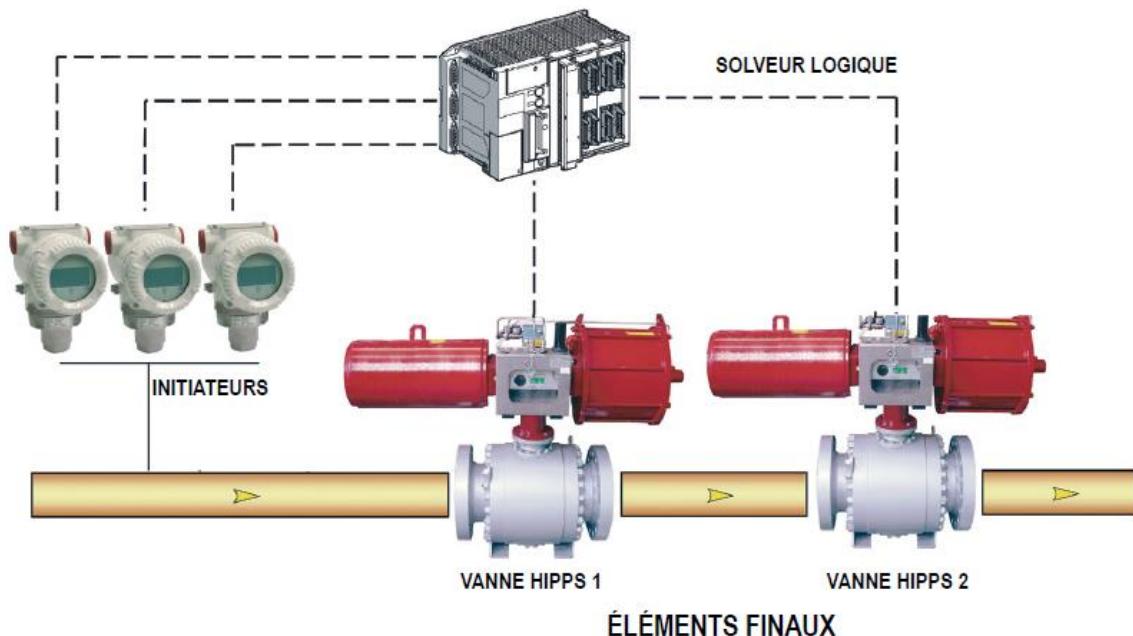


Figure III. 5 Architecture de Système HIPPS

Initiateurs :

Les dispositifs de détection de pression sont des transmetteurs de pression électroniques qui fonctionnent comme des appareils intelligents à deux fils avec une sortie de courant de 4-20 mA. Ils sont installés sur un collecteur d'interverrouillage et reliés à une carte distincte dans l'unité de traitement logique. La logique votante 2oo3 est mise en œuvre dans cette unité de traitement logique. Le transmetteur de pression intègre une fonction d'autodiagnostic et est programmé pour générer une sortie correspondant à un état de défaillance prédéfini.

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

Le solveur logique

Le rôle du solveur logique est d'activer les sorties de signal appropriées en fonction des applications préconfigurées et des entrées provenant des capteurs. Des API certifiées SIL 3, disponibles sur le marché, sont utilisées comme solveur logique. Le système est composé d'une unité centrale de traitement (UC) et de modules d'entrées/sorties redondants avec une sécurité intégrée adaptée aux applications de sécurité. Toutes les communications sécurisées entre l'unité de commande et les cartes d'E/S associées sont redondantes. Comme alternative, le solveur logique peut également être basé sur la logique SSL (Solid State Logic). L'armoire de commande peut être fournie pour une installation en zone dangereuse, conforme aux normes EEx-d IP-66, ou pour une installation en zone sûre dans une armoire standard 19" IP-54.

Eléments Finaux

Les derniers éléments ont pour fonction d'isoler la partie aval de l'installation de la surpression. En règle générale, les éléments finaux consistent en deux vannes avec leurs actionneurs associés installés

III.5.4. Le schéma de base d'un HIPPS

HIPPS est une boucle fonctionnelle complète composée de :

- Détecteurs / Initiateur qui détectent l'augmentation de pression et envoient un signal à la partie suivante de la boucle, l'initiateur peut être électronique ou mécanique
- Solveur logique qui prend le signal de l'initiateur et le traite pour trouver le signal le plus approprié à envoyer à la troisième partie de HIPPS
- Élément final qui est la dernière partie de HIPPS, il reçoit le signal du solveur logique puis entreprend la mesure correctrice, l'élément final est une vanne de régulation qui par exemple s'arrête en cas de surpressurisation. [47]

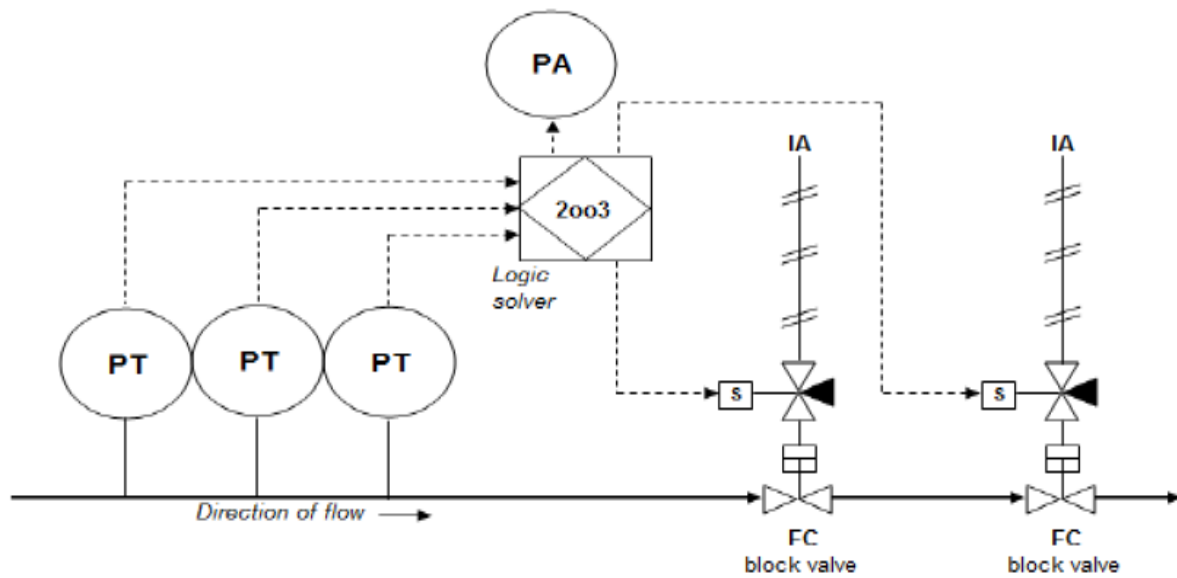


Figure III. 6 Schéma HIPPS

Le HIPPS conçu est dans un système de « séparateur triphasé » qui comprend les équipements suivants :

1. Vannes de contrôle
2. Séparateur triphasé
3. Contrôleurs de vannes
4. Tuyaux
5. Vannes HIPPS
6. Soupapes de décompression

CHAPITRE III : Système instrumenté de sécurité HIPPS dans une sphère GPL

III.6. Conclusion

Les systèmes de sécurité HIPPS jouent un rôle essentiel dans la sécurité des processus de GPL que ce soit en amont ou en aval des bacs de stockage sous pression utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière.

Lors de ce chapitre on a identifié les systèmes de stockage de GPL ainsi que les scénarios les plus catastrophiques survenu au niveau de ces systèmes suite aux constats que les canalisations d'alimentation représentent la partie la plus importante de la survenu de ces scénarios, une étude de l'un des systèmes instrumentés le plus utilisé soit HIPPS est requise d'où une présentation de ce système était nécessaire par ce chapitre afin de mieux élaborer notre étude pratique.

CHAPITRE IV

IV. CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons mettre en pratique notre compréhension des modes de défaillances associés aux différents composants du système HIPPS, ainsi que de leurs effets et de leur criticité par AMDEC. Nous examinerons en détail les modes de défaillances critiques qui pourraient compromettre le bon fonctionnement du système, en identifiant les conséquences potentiellement dommageables.

Dans le cadre de cette étude, nous appliquerons également des méthodes d'analyse probabilistes, telles que le diagramme Pareto, ainsi que l'Analyse d'arbre de défaillance (AdD) et les chaînes de Markov. Ces méthodes nous permettront d'évaluer la criticité des différents modes de défaillances, d'identifier les causes sous-jacentes et de proposer des mesures correctives appropriées.

Enfin, nous nous pencherons sur l'analyse de la sensibilité du système HIPPS, Cette analyse nous aidera à identifier les facteurs les plus influents et à proposer des stratégies d'optimisation pour garantir un fonctionnement optimal du système dans différentes conditions.

IV.2. Présentation du complexe GP1/Z(Arzew)

IV.2.1. Historique

Le complexe GP1/Z fait partie des six complexes de liquéfaction appartenant à l'activité (AVAL) de l'entreprise national Sonatrach.

Tableau IV. 1 L'historique de la construction du complexe GP1Z

Date	Evènement	Commentaires
11/12/1978	Le contrat de construction passé avec IHI-ITOH JAPON	-
11/10/1980	Ouverture du chantier	-
10/11/1980	Démarrage des travaux	-
12/12/1983	Mise en production de la phase 1	4 trains de traitement GPL produisant au total 4.8 Mt/an
31/12/1983	Inauguration officielle	-
20/02/1984	Chargement du premier navire de propane réfrigéré	-
24/02/1998	Extension phase 2	2 trains de traitement GPL supplémentaires permettant de passer à une production totale de 7.2 Mt/an pour (pour 6 trains)
Avril 2010	Extension phase 3	3 trains de traitement GPL apportant une capacité de production de 3 Mt/an supplémentaire, permettant de passer à une production totale de 10,8 Mt/an pour (pour 9 trains).

IV.2.2. Objectif de complexe GP1/Z :

L'objectif du complexe construit dans la zone industrielle d'Arzew est le traitement du GPL venant de plusieurs sources du sud algérien (Hassi Messaoud, Hassi R'mel) pour la production des gaz « **Propane** » et « **Butane** » liquéfiés.

Le complexe GP1/Z est dénommé JUMBO-GPL pour ces grandes capacités de production.

IV.2.3. Situation géographique et voisinage du complexe GP1/Z:

Le complexe GP1Z est situé sur le littoral de l'ouest algérien, à 40 KM approximativement de la ville d'Oran et à 8KM de la ville d'Arzew.

Le complexe est de superficie de 120 hectares, est situé dans la zone industrielle d'Arzew ; entre le centre thermique Marsa El Hadjaj de la coté este et les complexes GNL de liquéfaction du gaz naturel (GL4/Z, le complexe d'ammoniac et les complexes (GP2/Z. GL1/Z, GL2/Z) de la côté ouest.



Figure IV. 1 Situation géographique de complexe GP1/Z

IV.2.4. Organisation Du Complexe GP1/Z :

Le complexe GP1/Z est géré suivant un organigramme bien déterminé de façon à bien maîtriser les tâches, il est composé d'une direction générale, de deux sous-directions et des départements de contrôle, comme le montre l'organigramme suivant :

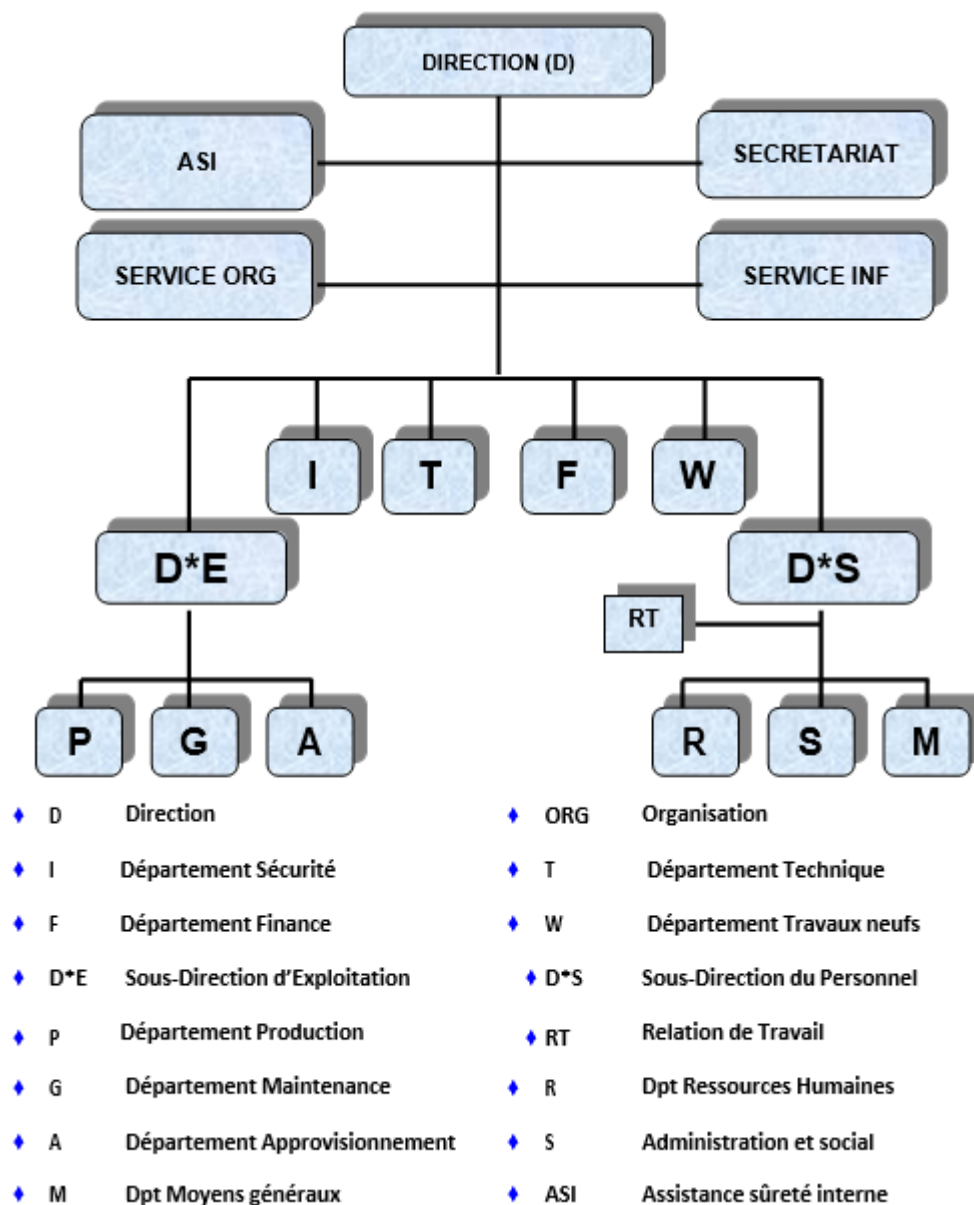


Figure IV. 2 L'organisation du complexe GP1/Z

IV.2.5. Fiche Technique Du Complexe GP1/Z :

Le complexe a pour mission la production du GPL (Propane et Butane) commerciaux destinée aussi bien au marché national qu'au marché international.

- **Raison Sociale :** Complexe GP1Z
- **Superficie :** 120 hectares.
- **Effectifs :** 777 agents.
- **Objectif :** 10.8 Mt/an de GPL.

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

- **Produits :**
 - Propane Commercial
 - Butane Commercial
- **Procédé Utilisé :** Distillation sous pression.
- **Nombre de Trains :** Neuf (09) trains de 1,2 Mt /an chacun.
- **Constructeur :** Consortium japonais IHI (Ishikawajima Arima Heavy Industries) et C.ITOH Compagnies.
- **Date de démarrage des travaux :** 10 Novembre 1980
- **Date de Mise en Production du premier train Phase I :** 12 Décembre 1983.
- **Date de Mise en Production du premier train Phase II :** 24 février 1998.
- **Date de Mise en Production du premier train Phase III :** 12 février 2010.
- **Enlèvements :** Deux quais de chargement recevant navire des Gaz Pétrolier Liquéfier d'une capacité de 3 000 à 50 000 tonnes de GPL (D1, M6)
- **Une rampe de chargement par camions :** Six (06) camions.
- **Destination de la Production :** Exportation et Marché national.
- **Source d'Approvisionnement :** Gaz en provenance des champs gaziers du sud algérien.
- **Capacité de stockage :**
 - Vingt-deux (22) Sphères de Stockage de la charge : 22 000 m³.
 - Quatre (04) Bacs de Stockage de propane réfrigéré : 280 000 m³.
 - Quatre (04) Bacs de Stockage du butane réfrigéré : 280 000 m³.
 - Quatre (04) sphères, une (01) de propane et trois (03) de butane ambiants : 500 m³ et 1500 m³.
 - Une (01) Sphère de stockage pentane : 500 m³.

IV.2.6. Les Caractéristiques Du Complexe GP1/Z :

L'usine comprend les principales zones suivantes :

Zone Procès : Elle comprend Neuf (09) Trains de production dont trois nouvellement installés.

- Chaque train comprend les sections suivantes :
- Une (01) Section de déshydratation
- Une (01) Section de séparation
- Une (01) Section de réfrigération

- Une (01) Section Huile chaude

Zone utilité : Cette zone sert à fournir les énergies nécessaires pour le fonctionnement de l'usine tel que :

- Production d'eau distillée.
- Production de la vapeur d'eau.
- Production d'air comprimé.
- Une alimentation en azote.
- Une alimentation en gaz naturel.
- Une alimentation en méthanol.
- Une alimentation en carburant diesel.
- Un générateur de secours.
- Et elle comprend :
- Section de stockage de la charge GPL composée de 22 sphères et un système de filtration de la charge brute de GPL.
- Quatre (04) Chaudières d'une capacité unitaire de 10t/h
- Deux (02) dessaleurs de 10t/h chacun
- Trois (03) Sections de production d'air comprimé.
- Six (06) Générateurs assurant l'énergie de secours du complexe.
- Une (01) section d'azote.
- Trois (03) sections de distribution de gaz naturel.

IV.2.7. Zone Stockage Et Chargement

- **Produits réfrigérés :**

Le propane et le butane réfrigérés sont stockés respectivement à -42°C et - 5°C dans quatre bacs chacun, d'une capacité unitaire de 70 000 m³.

Le Chargement de ces produits est assuré par deux quais de chargement pouvant recevoir des GPL d'une capacité de 3 000 à 50 000 tonnes. Chaque quai est doté de Trois (03) bras de chargement

- Un bras (01) retour vapeur (Boil Off).
- Un Bras (01) de sautage.

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

- **Produits ambiants :**

Le propane et le butane sont stockés à température ambiante dans quatre (04) sphères, d'une capacité unitaire de 500 m³. Le pentane est aussi stocké dans une sphère de 500 m³

Le chargement de ces produits est assuré par une rampe de chargement camions qui est dotée de :

Butane :

- Trois (03) bras de chargement
- Trois (03) bras retour vapeur (Boil Off)

Propane :

- Deux (02) bras de chargement
- Deux (02) bras retour vapeur (Boil Off)

Pentane :

- Un (01) bras de chargement.
- Un (01) bras retour vapeur (Boil Off)

Un (01) Pipe Arzew - Sidi Bel abbés -lemcen connu sous le nom de AST est entré en service le 14/10/2005 pour alimenter à partir du complexe GP1Z les trois wilayas en butane ambient vrac à raison de 125 m³ par heure.

Installations de Contrôle et sécurité :

Le complexe est doté de :

- Une (01) Salle de contrôle principale pour le contrôle des installations de production
- (MCR).
- Une (01) Salle de contrôle locale pour le stockage (LCR).
- Une (01) Salle de contrôle locale pour les expéditions par navires (JCR).
- Une (01) salle de contrôle locale pour les expéditions par camions (CCR).
- Une (01) Salle de contrôle sécurité (SCR).

e-Annexes :

- Un atelier de maintenance.
- Un magasin approvisionnement.
- Un centre de formation.

IV.2.8. Les Principales Installations Du Complexe GP1/Z :

- 16 Sphères de la charge de GPL.
- 9 Trains de traitement GPL.
- 2 Unités de reliquéfaction du gaz évaporé.
- 1 Sous station électrique alimentée par SONELGAZ.
- 4 Générateurs de secours pour assurer l'énergie en cas de coupure de courant.
- 3 Bacs de Stockage de propane à basse température.
- 3 Bacs de stockage de butane à basse température.
- 4 Sphères de stockage de produit à température ambiante (propane, butane).
- 1 Station de pomperiez eau de mer pour le réseau d'incendie.
- 2 Quais de chargement (jetées D1 et M6).
- 1 Rampe Pour chargement camions.

IV.2.9. Description de système de production :

Le GPL venant de l'extérieur est stockés 16 réservoirs sphériques dans la section de stockage, ensuite est acheminé vers six trains de procédés qui fonctionnent d'une façon parallèle et chaque trains passe par les différents étapes suivants :

❖ **Section déshydratation :**

La section de déshydratation se compose de 3 sections appelées « Déshydrateurs ».

Le but de cette section est de réduire la teneur d'eau dissoute dans le GPL de 100 ppm à 5 ppm, pour éviter le problème de givrage dans les équipements au niveau de la section de réfrigération. Cette dernière comprend trois colonnes d'adsorption (sécheur) à tamis moléculaires, à tout instant on a une colonne en service (en adsorption), l'autre en régénération et la dernière en attente. Le GPL passe dans le sécheur qui est en adsorption du bas vers le haut, l'humidité est extraite lors du passage du GPL à travers les tamis moléculaires. La durée de cette opération est de 36 heures, une fois cette durée dépassée le sécheur passe automatiquement en régénération, cette dernière comprend les séquences suivantes :

✓ **Drainage : (durée 1h)**

La vidange du sécheur se fait par l'injection du gaz naturel sous une pression de 20 kg/cm². Le GPL restant est acheminé vers les sphères de charge.

✓ **Dépressurisation : (durée 30 min)**

Afin de préparer la colonne à la séquence de réchauffage, il convient de réduire la pression du sécheur de 20 kg/cm² à 3 kg/cm² et cela se fait par l'évacuation de GN contenu dans le sécheur vers la section fuel gaz.

✓ **Réchauffage : (durée 11h)**

Le réchauffage se fait par le GN chauffé dans le four à une température de 280°C, il passe dans le sécheur de haut en bas pour évaporer l'eau contenue dans les tamis moléculaires.

✓ **Refroidissement : (durée 5h)**

Le sécheur étant chaud après la séquence de réchauffage, il est refroidit par le GN porté à une température de 12 à 45 °C, le gaz chaud passe à travers l'aéro-réfrigérant et le ballon séparateur puis envoyé vers la section fuel gaz.

✓ **Pressurisation : (durée 30 min)**

Avant le remplissage de la colonne par le GPL, il faut avoir sa pression de service qui est de 20 kg/cm², cette opération se fait par l'introduction de GN à haute pression pour éviter une détente brusque du GPL.

✓ **Remplissage :** Cette opération consiste à mettre le sécheur en attente.

❖ **Section de séparation :**

C'est la section qui assure la séparation de GPL en deux produits finis propane et butane, en plus de très faibles quantités d'éthane et de pentane. Le GPL déshydraté avant de passer au fractionnateur il doit être porté à sa température d'ébullition (71°C), en passant à travers trois préchauffeurs (échangeur de chaleur), le premier est chauffé par le produit de fond du déethaniseur, le second par les produits de fond du fractionnateur et le dernier par l'huile chaude provenant du four.

Le GPL ainsi préchauffé à 71 °C passe directement dans le fractionnateur (c'est une colonne de distillation constituée de 55 plateaux à clapets) où il est séparé en (propane + éthane) en tête de colonne et en (butane + pentane) au fond de la colonne. Les produits de tête de colonne sont condensés et récupérés au niveau du ballon de reflux.

Les produits de fond de colonne sortent à une température de 110°C, préchauffent la charge GPL et passent vers le dépentaniseur.

✓ **Déethaniseur :**

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

Dans le but de produire du propane commercial plus au moins pur. Les produits de tête de colonne passent au déethaniseur, ce dernier est une colonne de fractionnement équipée de 25 plateaux à clapets. L'éthane sort de la tête de colonne, alors que le propane sort du fond de la colonne à une température de 62 °c. IL se dirige directement vers le premier préchauffeur de fractionnateur.

✓ **Dépentaniseur :**

Il existe un seul dépentaniseur commun pour les 06 trains, son rôle est d'éliminer les traces de pentane contenues dans le butane. Le dépentaniseur est une colonne constituée de 50 plateaux à clapets.

❖ **Section de Réfrigération :**

Le but de cette section est de refroidir les produits finis à leur température de stockage (-42°C pour le propane et -9°C pour le butane). Le fluide utilisé comme réfrigérant est le propane pur, celui-ci est contrôlé à haute, moyenne et basse pression, il est évaporé dans les échangeurs de chaleur, cette évaporation provoque l'abaissement de température du produit à réfrigérer ; Le propane ainsi évaporé est de nouveau comprimé et liquéfié par le condenseur.

❖ **Section de l'huile chaude :**

Cette section est utilisée comme source de chaleur pour le troisième préchauffeur, les rebouilleurs et finalement pour le gaz naturel de régénération utilisé à la section de déshydratation. L'huile sort du four à une température de 180°C.

❖ **Section De Stockage et Expédition :**

On distingue deux types de stockage :

✓ **Section de stockage à basse température :** sont destinés pour le marché international :

- Trois (03) bacs pour le Propane de 70 000 m3 chacun.
- Trois (03) bacs pour le Butane de 70 000 m3 chacun

✓ **Section de stockage à température ambiante :** sont destinés pour le marché national.

- Une sphère (01) pour le Propane de 500 m3 chacune.
- Trois sphères (03) pour le Butane de 500 m3 chacune.
- Une sphère (01) pour le pentane de 500 m3 chacune.

Le service Stockage et Expédition chapote trois zones :

✓ **BOG (Boil- Off- Gaz) :**

C'est une zone de récupération qui sert à reliquéfier les gaz d'évaporation provenant des différentes capacités (bacs de stockage de produits, de la section de chargement par navires ainsi que les différentes sections du procès et particulièrement les gaz de détente de la section réfrigération.

Les gaz sont récupères liquéfiés par pressurisation au moyen des compresseurs (5 pour le propane et 3 pour le butane) et refroidis à travers des aéro-réfrigérants et renvoyés à la section de stockage de produits.

La section BOG se compose de deux ensembles indépendants un pour le propane et un pour le butane.

✓ **Section jetée (CN) :**

S'occupe des enlèvements par navire, il y a deux jetées : D1, concernant les petits navires et M6, concernant les grands navires, (on appelle les enlèvements par navire, Post de chargement navire).

✓ **Section Chargement par Camion (CC) :**

S'occupe de la gestion des enlèvements par camion au niveau de la rompe de chargement par camion (client NAFTAL et les opérateurs privés).

IV.3. Philosophie du système proposé

La haute pression dans les installations de GPL peut provoquer de graves catastrophes pour le personnel et l'équipement. Cependant, pour atténuer ces dangers, de nombreux systèmes instrumentés de sécurité sont installés dans ces installations de gaz de pétrole liquéfié.

L'un des dispositifs les plus importants pour assurer la stabilité et la sécurité du processus de gaz de pétrole liquéfié est le HIPPS (High-Integrity Pressure Protection System). Le HIPPS joue un rôle essentiel dans le contrôle de la pression. Il se compose de trois détecteurs de pression qui envoient des données à une unité logique dédiée.

L'unité logique du HIPPS utilise les informations fournies par les détecteurs de pression pour exécuter certaines procédures visant à maintenir la pression aux niveaux recommandés. Par exemple, si la pression dépasse les seuils de sécurité, l'unité logique peut actionner plusieurs mesures correctives. Elle peut ouvrir les vannes de déluge, qui permettent de libérer une grande quantité de liquide pour réduire la pression rapidement. De plus, l'unité logique peut également activer les PSV (Pressure Safety Valves).

IV.4. Démarche de l'étude AMDEC

Afin d'assurer la stabilité et la sécurité de la sphère GPL, nous avons choisi d'entreprendre une étude AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) spécifiquement axée sur le HIPPS. Notre objectif est d'identifier les modes de défaillance potentiels associés à ce dispositif crucial et de mettre en place des mesures préventives adéquates.

Dans le cadre de cette étude, nous suivrons une démarche méthodique comprenant plusieurs étapes essentielles. Tout d'abord, nous procéderons à une analyse détaillée du fonctionnement du HIPPS dans la sphère GPL, en étudiant ses caractéristiques et son rôle dans le contrôle de la pression.

Ensuite, nous évaluerons les effets possibles de chaque mode de défaillance identifié du HIPPS. Il est essentiel de comprendre les conséquences potentielles pour le personnel et l'équipement afin de mettre en place des mesures de prévention appropriées.

Enfin, à partir des résultats de l'analyse, nous élaborerons un plan d'action détaillé qui inclura des mesures de prévention, de détection et de correction. L'objectif de ce plan sera de maintenir la pression à l'intérieur de la sphère GPL aux niveaux recommandés en assurant le bon fonctionnement du HIPPS. Grâce à ces mesures, nous visons à prévenir les catastrophes

potentielles liées à une haute pression et à garantir la sécurité du personnel et de l'équipement dans l'environnement de la sphère GPL.

Pour cette étude, nous avons défini une approche générale qui se compose des étapes suivantes :

- Initialisation,
- Analyse fonctionnelle,
- Analyse des défaillances,
- Analyse AMDEC,
- Diagramme de pareto,
- Actions correctives menées.

IV.4.1. Initialisation de l'étude

La phase préparatoire de l'analyse vise à délimiter le champ d'étude et à définir les objectifs associés à l'analyse. La méthodologie mise en œuvre pour l'AMDEC comprend les étapes suivantes :

- Définition du système : HIPPS.
- Découpage du système en sous-systèmes.
- Identification des modes de défaillance pour chaque sous-système.
- Identification des causes de défaillance.
- Évaluation des effets de défaillance.
- Détermination des méthodes de détection des défaillances.
- Évaluation du niveau de risque "criticité" en prenant en compte la gravité, la probabilité et la détection.

Le tableau AMDEC IV.3 est utilisé comme support de travail lors de cette étape. Il permet de récapituler toutes les défaillances identifiées, leurs effets, leurs causes et les actions à entreprendre.

Pour mener à bien cette étude, nous nous appuyons sur les éléments suivants :

- L'expertise du personnel du département sécurité.
- Les rapports d'anomalies et d'inspections réalisés de manière mensuelle.
- Les retours d'expérience recueillis.

Ces supports de travail nous permettent d'obtenir des informations précieuses pour l'analyse et de prendre des mesures appropriées pour prévenir les défaillances et assurer la sécurité du système.

IV.4.2. Analyse fonctionnelle

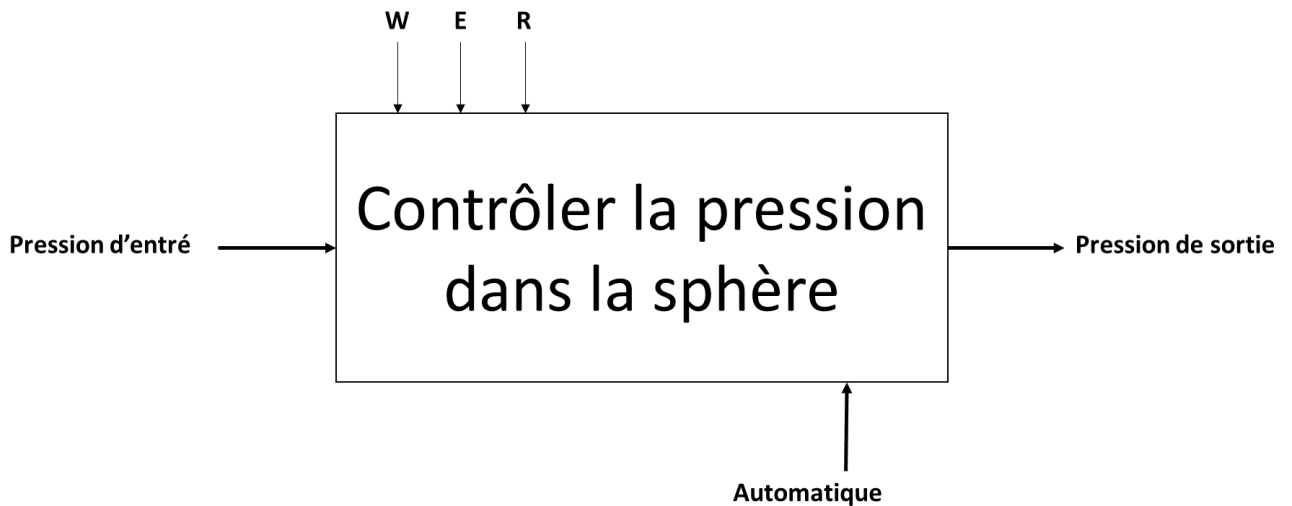


Figure IV. 3 Fonction principale du système

W : énergie électrique, électromagnétique, pneumatique.

E : système marche automatiquement.

R : réglage du temps entre la détection et le démarrage de système d'extinction.

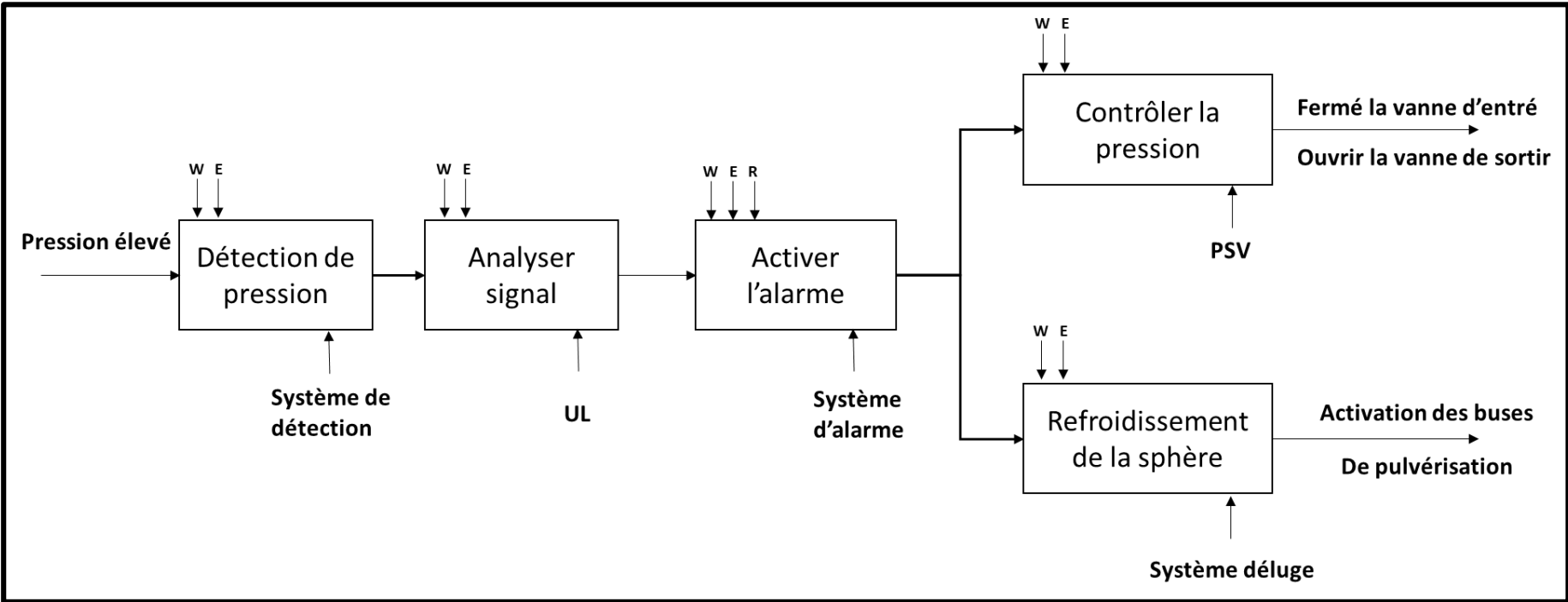


Figure IV. 4 analyse fonctionnelle de système.

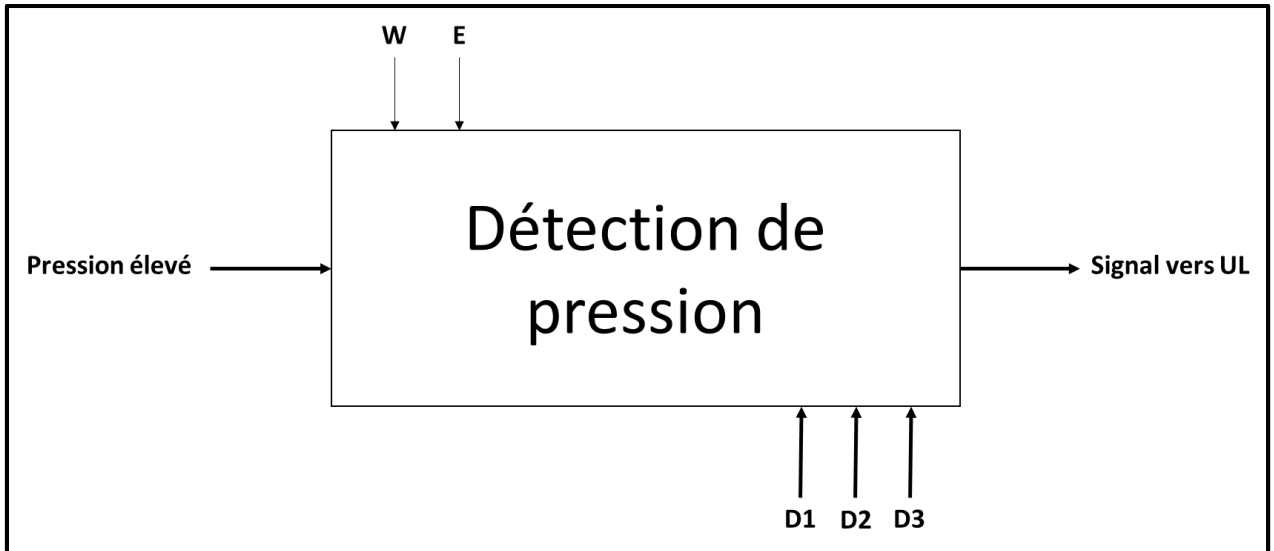


Figure IV. 5 Système de détection

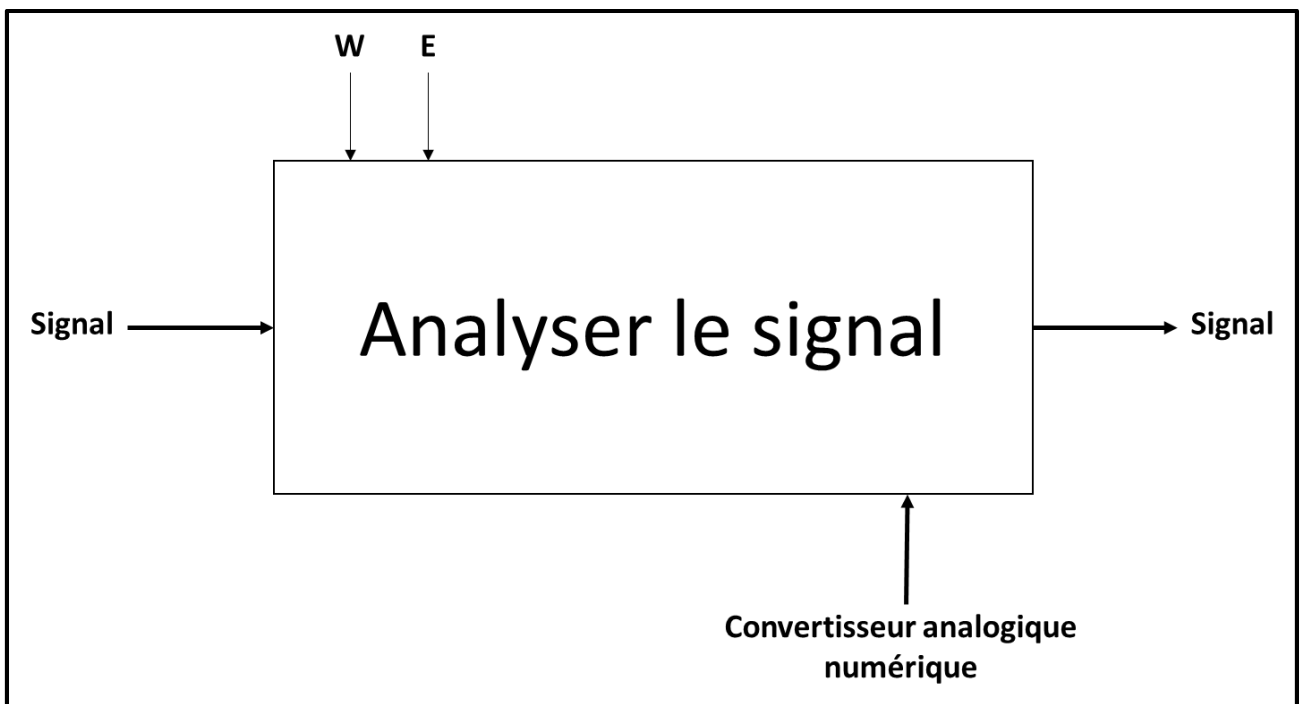


Figure IV. 6 Unité logique

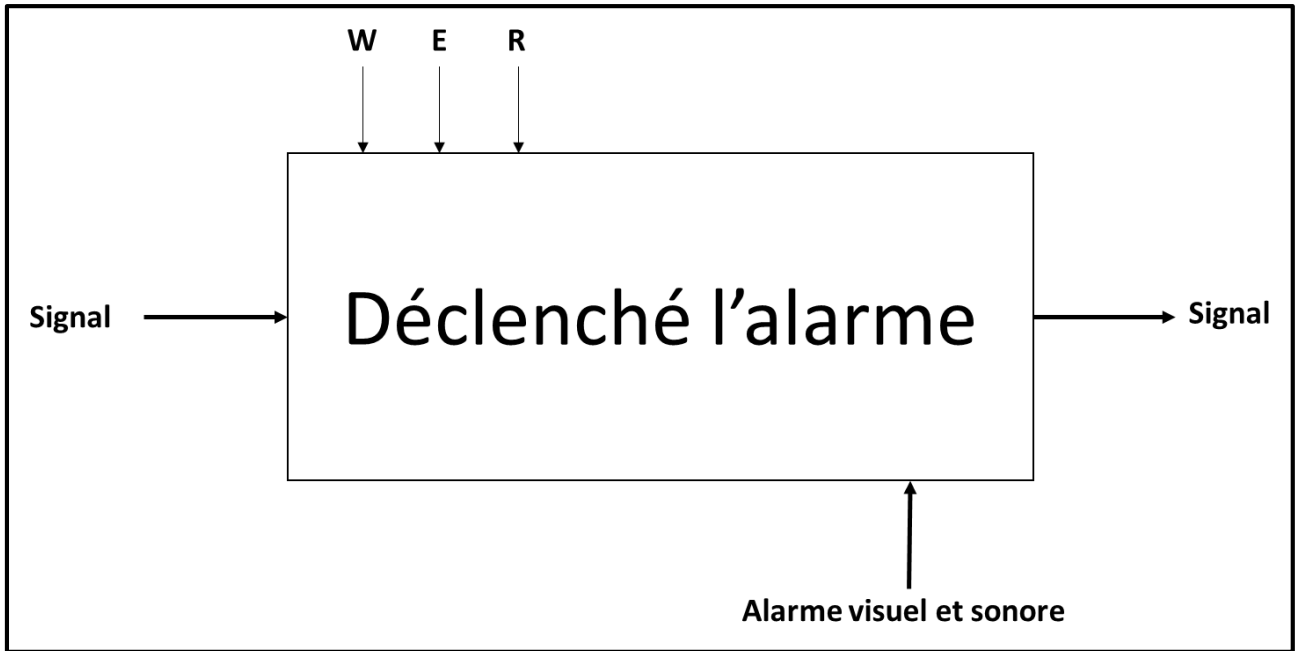


Figure IV. 7 Système d'alarme

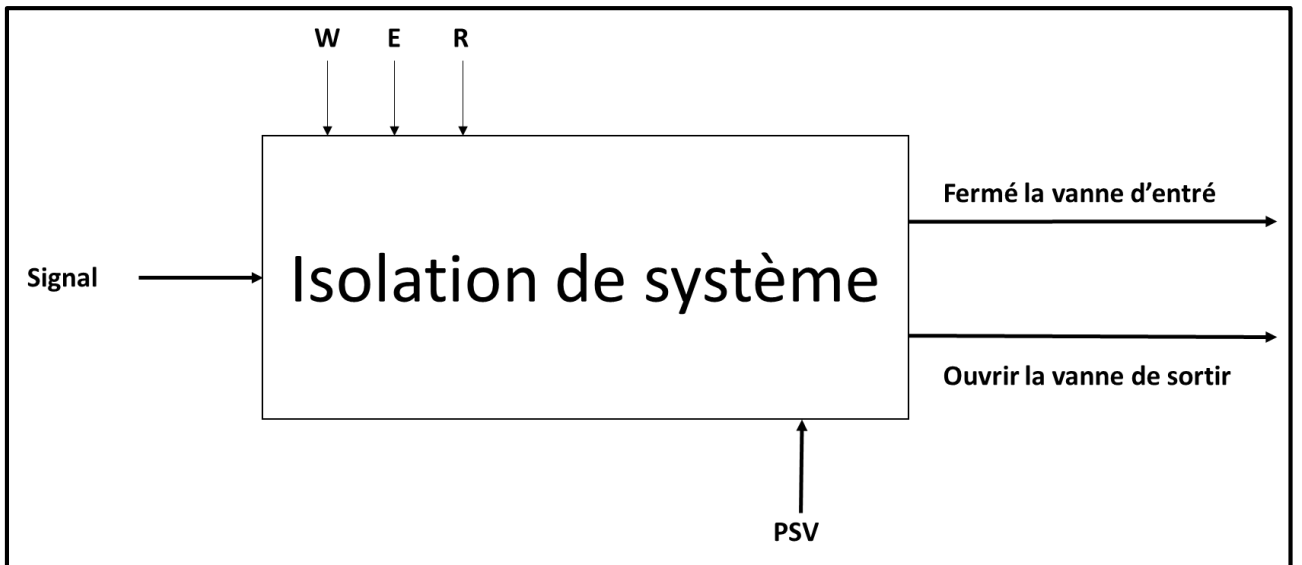


Figure IV. 8 PSV

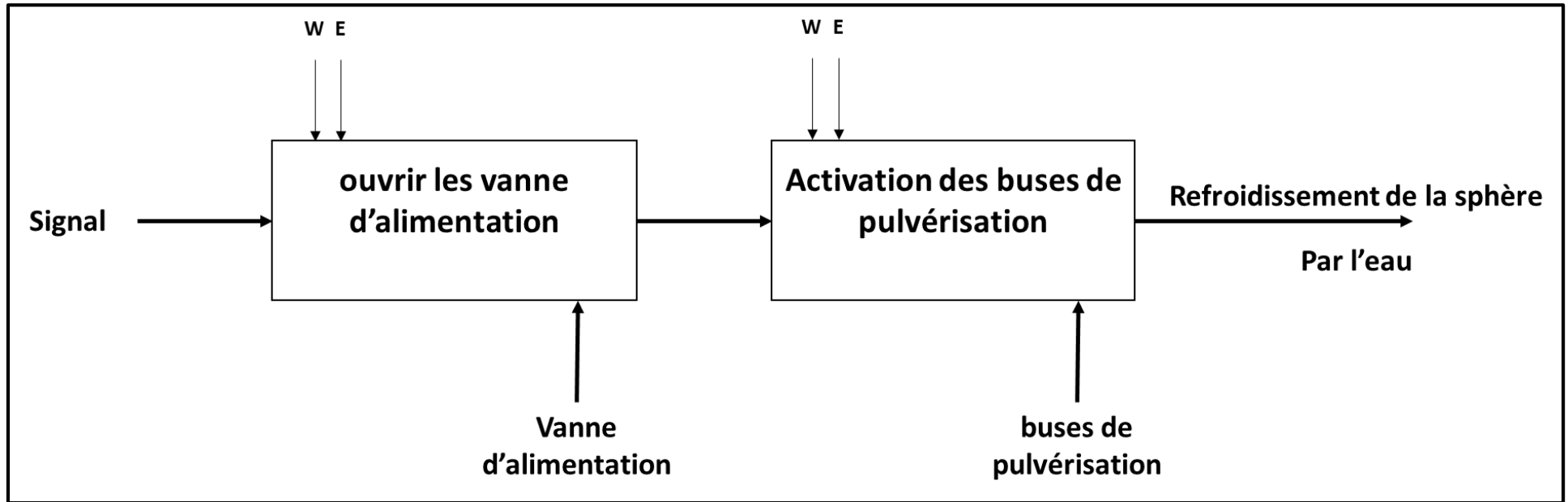


Figure IV. 9 Vanne déluge

IV.4.3. Analyse des défaillances

En utilisant l'approche AMDEC, nous serons en mesure d'identifier les pannes et les défaillances critiques, de les analyser et de proposer des solutions appropriées, en nous basant sur l'historique des pannes potentielles des composants du four de cimenterie. Pour commencer, nous allons établir une échelle de notation pour les différents critères choisis : la fréquence (F), la détectabilité (D) et la gravité des défaillances (G). L'indice de criticité (C) sera ensuite calculé pour chaque défaillance en multipliant les notes correspondantes de ces trois critères : $C = G \times F \times D$.

Chacun de ces critères sera évalué selon une échelle de notation comprenant 4 niveaux, tant pour la fréquence que pour la détection et la gravité des défaillances. Le tableau suivant présente le barème de notation de la criticité utilisé :

Tableau IV. 2 Grille de cotation

Indice de Gravité	Critère G
1	Défaillance mineure : Arrêt de production inférieur à 2 minutes
2	Défaillance significative : Arrêt de production de 2 à 20 minutes, au report possible d'intervention
3	Défaillance moyenne : Arrêt de production de 20 à 60 minutes
4	Défaillance majeure : Arrêt de production de 1 à 2 heures
Indice de Fréquence	Critère F
1	Défaillance rare: Moins d'une défaillance par an
2	Défaillance possible : Moins d'une défaillance par trimestre
3	Défaillance fréquente : Moins d'une défaillance par semaine
4	Défaillance très fréquente : Plusieurs défaillances par semaine
Indice de la non-Détection	Critère D
1	Visuelle à coup
2	Visuelle après l'action de l'opérateur
3	Difficilement détectable
4	Détection impossible

Tableau IV. 3 matrice de criticité

G F	1	2	3	4	D
1	1	2	3	4	1
2	4	8	12	16	2
3	9	18	27	36	3
4	16	32	48	64	4

	Zone 1	Risque acceptable
	Zone 2	Risque a surveiller
	Zone 3	Risqué inacceptable

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

IV.4.4. Analyse AMDEC

Au cours de cette section, notre objectif sera de compléter les tableaux AMDEC conformément aux instructions que nous avons précédemment évoquées dans le chapitre. [48]

Tableau IV. 4 Analyse AMDEC

Elément		Mode de défaillance	Causes	Effets	Système: HIPPS				Page
					Criticité				Action corrective
					F	G	D	C	
Système détection	détecteur	<ul style="list-style-type: none"> indication erroné Perte de signal vers l'unité logique Réponse lente du détecteur 	<ul style="list-style-type: none"> défaillance de capteur Câblage défectueux ou cassé Panne de l'alimentation électrique Usure ou vieillissement du détecteur 	<ul style="list-style-type: none"> Mauvaise surveillances de la pression, explosion ou rupture des installation 	2	3	4	24	<ul style="list-style-type: none"> Calibrage et vérifications régulières. Maintenance préventive. Renforcer la surveillance de pression.
Système d'action	vanne d'entré	<ul style="list-style-type: none"> Bloqué ouverte Gel de la vanne en raison de températures extrêmement basses 	<ul style="list-style-type: none"> défaut mécanique erreur humain défaut de contrôle commande corrosion Accumulation d'humidité dans la vanne qui gèle et bloque le mouvement 	<ul style="list-style-type: none"> sur Remplissage de la sphère, augmentation de la pression Incapacité de la vanne à s'ouvrir ou à se fermer complètement 	1	2	3	6	<ul style="list-style-type: none"> Inspections pour blocages et défauts. Formation pour éviter erreurs humaines. Contrôle-commande et prévention corrosion. Vérification remplissage sphère.

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

				en raison de l'obstruction causée par la glace.					
	Vanne de sortie	<ul style="list-style-type: none"> • Bloquée fermée • Gel de la vanne en raison de températures extrêmement basses 	<ul style="list-style-type: none"> • défaut mécanique • erreur humain • défaut de contrôle commande • corrosion • Accumulation d'humidité dans la vanne qui gèle et bloque le mouvement 	<ul style="list-style-type: none"> • augmentation de la pression, explosion 	3	3	2	18	<ul style="list-style-type: none"> • Inspections pour blocages et défauts. • Formation pour éviter erreurs humaines. • Contrôle-commande et prévention corrosion. • Sécurité contre explosions.
	Vanne déluge	<ul style="list-style-type: none"> • Bloqué fermé • Problèmes de fonctionnement des actionneurs de la vanne • Défaillance du système de contrôle/comman de de la vanne déluge 	<ul style="list-style-type: none"> • défaut mécanique • erreur humain • défaut de contrôle commande • corrosion • problème électrique 	<ul style="list-style-type: none"> • l'eau ne s'écoule pas • pas de maîtrise des radiations et flux thermiques du a l'explosion 	4	3	1	12	<ul style="list-style-type: none"> • Inspections pour blocages et défauts. • Maintenance préventive régulière. • Contrôle-commande et prévention corrosion. • Assurer écoulement de l'eau.
Système d'analyse	Unité logique	<ul style="list-style-type: none"> • retard de réception • erreur de logiciel 	<ul style="list-style-type: none"> • problème de transmission de signal entre le détecteur et l'unité logique 	<ul style="list-style-type: none"> • le non maîtrise de situation 	2	1	3	6	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction retard et erreurs. • Vérification transmission de signal.

IV.4.5. Calcul de criticité

Tableau IV. 5 Criticités cumulées

N° de défaillance	Criticité	Cumul de criticité	Cumul du Pourcentage
1	24	24	36.36%
2	18	42	63.64%
3	12	54	81.82%
4	6	60	90.91%
5	6	66	100%
Total	66		

Suite à ce tableau nous allons tracer le diagramme de Pareto "diagramme ABC":

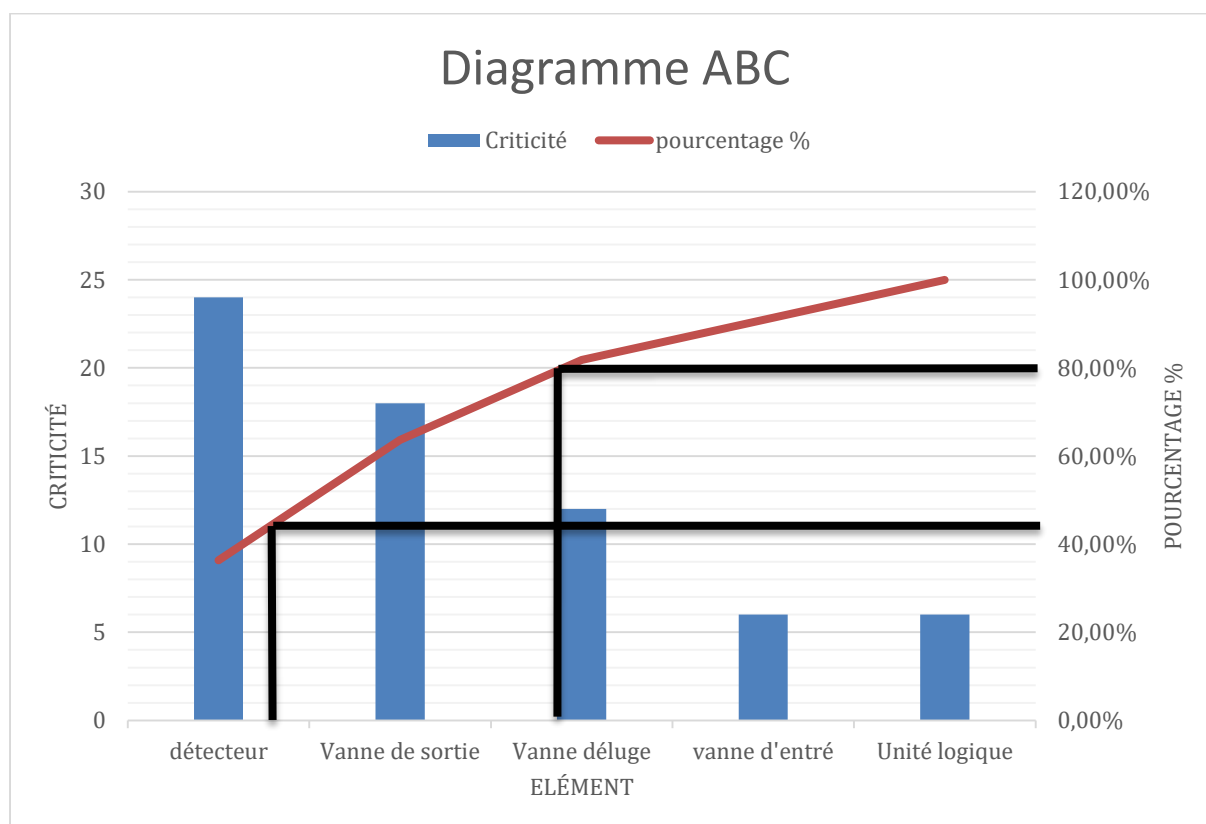


Figure IV. 10 Diagramme ABC des criticités

D'après les données présentées dans le diagramme ABC, nous pouvons déduire que la première panne représente 45% de l'importance totale du système nécessitant une intervention. En d'autres termes, il s'agit de la panne la plus cruciale pour le bon fonctionnement du système.

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sûreté de fonctionnement sur le système HIPPS

- Zone A est 1/5 → 20 % des défaillances présente 45% de la criticité
- Zone B est 1/5 → 20% des défaillances présente 35% de la totalité de la criticité
- Zone C est 3/5 → 60 % des défaillances présente 20% de la totalité de la criticité

Synthèse

En se basant sur le tableau AMDEC présenté précédemment, il a été possible de classer les modes de défaillance des pannes pertinentes en fonction de leur niveau de criticité. Nous avons établi des niveaux de criticité qui indiquent les mesures correctives à prendre, comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 6 Tableau des actions correctives HIPPS

Niveau de criticité	Organes	Action corrective
Criticité entre $1 \leq C < 12$	<ul style="list-style-type: none">• Unité logique• vanne d'entrée	<ul style="list-style-type: none">• Aucun changement de conception n'a été apporté et une maintenance préventive régulière est effectuée.
Criticité entre $12 \leq C < 18$	<ul style="list-style-type: none">• Vanne déluge	<ul style="list-style-type: none">• Optimisation des performances de la composante• Application régulière d'une maintenance préventive.
Criticité entre $18 \leq C < 64$	<ul style="list-style-type: none">• Vanne de sortie• Détecteurs	<ul style="list-style-type: none">• Révision de la conception des sous-ensembles et choix des éléments pour surveillance particulière maintenance Préventive conditionnelle.• Remise en cause complète de la conception et les composants du système.

IV.5. Approche de l'étude de l'arbre de défaillance (ADD):

Cette méthode implique une représentation graphique des multiples causes d'un événement dangereux, permettant ainsi de visualiser les relations entre les défaillances des équipements, les erreurs humaines et les facteurs environnementaux pouvant conduire à des accidents. Il est également possible d'inclure des facteurs liés aux aspects organisationnels.

IV.5.1. Élaboration de l'analyse des risques par l'ADD:

L'analyse des risques selon cette méthode comporte les étapes suivantes:

Première étape: Définir de manière explicite et précise l'événement principal, c'est-à-dire la défaillance, afin que l'arbre construit réponde aux attentes de l'étude.

Deuxième étape: Décrire l'ensemble des événements qui peuvent engendrer l'événement principal, en utilisant des combinaisons logiques (conjonction ou disjonction). Des événements intermédiaires, moins globaux que l'événement principal, apparaîtront, ainsi qu'un connecteur logique les reliant à l'événement principal.

Étapes suivantes: Décrire successivement l'ensemble des ramifications permettant d'expliquer les niveaux précédents (à l'aide d'événements et de connecteurs logiques) jusqu'à avoir répertorié toutes les causes connues. Il s'agit de répéter la deuxième étape jusqu'à obtenir les événements de base, qui ne se décomposent plus en événements plus spécifiques.

En suivant cette démarche, nous pourrions obtenir une représentation claire des différentes causes de défaillance et des liens entre elles, permettant ainsi d'identifier les mesures de prévention et de réduction des risques nécessaires pour assurer la sécurité et la fiabilité des équipements étudiés.

IV.5.2. Analyse par ADD :

Données d'étude de fiabilité du système à mousse :

Avant d'entamer une analyse par arbre de défaillance il est nécessaire d'avoir Les données de fiabilité de chaque équipement susceptible d'être défaillant tel que (taux de défaillance, taux de réparation, période de test...) c'est données sont sélectionnées selon Instrument Society of America (ISA) standard ISA-TR18.2.2-2016 [49] regroupées dans le tableau IV-7:

Tableau IV. 7 les données de (λ et MTTR) des composants

Sous-système	Composants	λ	MTTR
Système détection	Détecteur 01	3,42E-06	4
	Détecteur 02	3,42E-06	4
	Détecteur 03	3,42E-06	4
Système d'analyse	Unité logique	8,5E-07	9,8
Système d'action	Vanne déluge	8,85E-06	15
	PSV	2,031E-05	9,3

Construction de l'arbre

La construction de l'arbre se compose des éléments suivants :

L'événement redouté est défini comme étant une explosion.

Les sous-systèmes incluent :

- Le système de détection, comprenant les détecteurs 01, 02 et 03.
- Le système d'analyse, représenté par une unité logique.
- Le système d'action, qui comprend une vanne déluge et une PSV.

Les schémas suivants illustre la construction de l'arbre de défaillance à l'aide du logiciel Isographe Reliability Workbench.

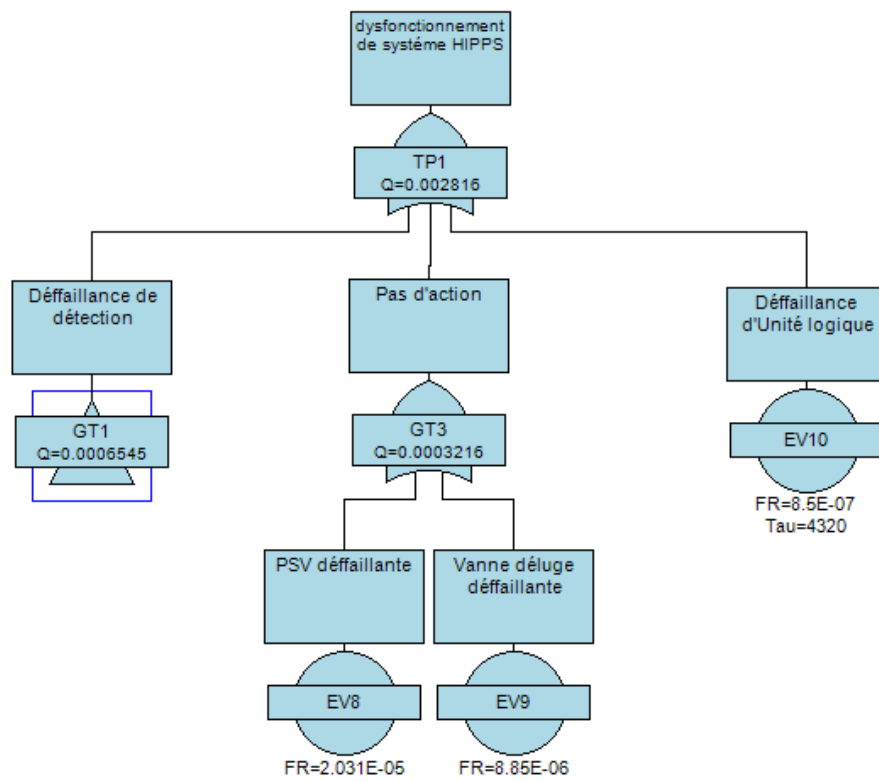


Figure IV. 11 Arbre de défaillance de dysfonctionnement de système HIPPS

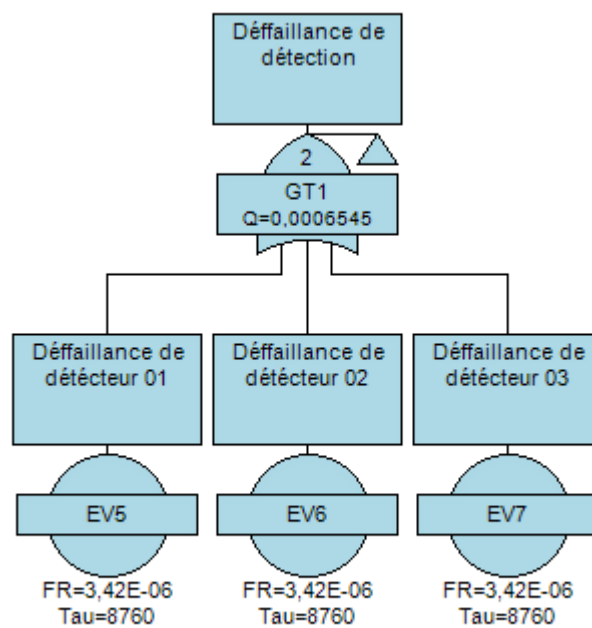


Figure IV. 12 Arbre de défaillance du sous-système de détection

IV.5.3. Facteurs d'importance et coupes minimal :

Tableau IV. 8 Facteurs d'importance et coupes minimal

Sous-Système	équipement	NO	Fussell-vesely	Birnbaum
Système détection	• D1	• 1	• 0,6667	• 0,02969
	• D2	• 2	• 0,6667	• 0,02969
	• D3	• 3	• 0,6667	• 0,02969
Système d'analyse	• UL	• 1	• 0,6536	• 1
Système d'action	• Vanne déluge	• 1	• 0,4128	• 1
	• PSV	• 2	• 0,5872	• 1

D'après les résultats obtenus par l'ADD on constat que l'indisponibilité du système est estimée à 2,82% ce qui signifie que le système a une disponibilité importante due à la maintenance immédiate mais si en analyse beaucoup plus les éléments qui sont prioritisé pour la maintenance on distingue que c'est les détecteurs avec $F_v = 0.667$ malgré que leurs disponibilités est importante

Et sachant que d'après l'étude de sensibilité voir le tableau IV 9 on constate qu'ils représente les éléments que le système et le moins sensible quelque soit le nombre d'itération

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sureté de fonctionnement sur le système HIPPS

Tableau IV. 9 Gate sensitivity results for parameter Unavailability and sensitivity parameter Failure rate

Target	Source Type	Source ID	Source Description	x 1E-06	x 1E-05	x 0.0001	x 0.001	x 0.01	x 0.1	x 1	x 10	x 100	x 1000	x 10000	x 100000	x 1000000	x 10000000
TP1	Primary Event	EV5	Défaillance de détecteur 01	0.002383	0.002383	0.002383	0.002383	0.002387	0.002427	0.002816	0.006352	0.02232	0.03059	0.03147	0.03156	0.03157	0.03157
TP1	Primary Event	EV6	Défaillance de détecteur 02	0.002383	0.002383	0.002383	0.002383	0.002387	0.002427	0.002816	0.006352	0.02232	0.03059	0.03147	0.03156	0.03157	0.03157
TP1	Primary Event	EV7	Défaillance de détecteur 03	0.002383	0.002383	0.002383	0.002383	0.002387	0.002427	0.002816	0.006352	0.02232	0.03059	0.03147	0.03156	0.03157	0.03157
TP1	Primary Event	EV8	PSV défailante	0.002628	0.002628	0.002628	0.002628	0.00263	0.002647	0.002816	0.004508	0.02112	0.1611	0.6547	0.9499	0.9947	0.9995
TP1	Primary Event	EV9	Vanne déluge défailante	0.002684	0.002684	0.002684	0.002684	0.002685	0.002697	0.002816	0.004006	0.01575	0.1196	0.5715	0.9301	0.9925	0.9992
TP1	Primary Event	EV10	Défaillance d'Unité logique	0.000976	0.000976	0.000976	0.000978	0.000994	0.00116	0.002816	0.01918	0.1644	0.7354	0.9729	0.9973	0.9997	1
TP1	Failure Model	D	detecteur de pression	0.002163	0.002163	0.002163	0.002163	0.002167	0.00221	0.002816	0.0241	0.4741	0.9355	0.9935	0.9993	0.9999	1
TP1	Failure Model	FM2	vann déluge	0.002684	0.002684	0.002684	0.002684	0.002685	0.002697	0.002816	0.004006	0.01575	0.1196	0.5715	0.9301	0.9925	0.9992
TP1	Failure Model	FM3	PSV	0.002628	0.002628	0.002628	0.002628	0.00263	0.002647	0.002816	0.004508	0.02112	0.1611	0.6547	0.9499	0.9947	0.9995

D'après ces résultats on constat qu'il est important d'élaborer une étude beaucoup plus détaillé avec une méthode qui prend en considération le multi état dans la configuration des types de maintenance.

IV.6. Analyse par chaîne de markov

Les différents cas de système :

- **S1** (D1 D2 D3): D1 marche, D2 marche, D3 marche.
- **S2** (D1' D2 D3): D1 panne, D2 marche, D3 marche.
- **S3** (D1 D2' D3): D1 marche, D2 panne, D3 marche.
- **S4** (D1 D2 D3'): D1 marche, D2 marche, D3 panne.
- **S5** (D1' D2' D3): D1 panne, D2 panne, D3 marche.
- **S6** (D1 D2' D3'): D1 marche, D2 panne, D3 panne.
- **S7** (D1' D2 D3'): D1 panne, D2 marche, D3 panne.
- **S8** (D1' D2 'D3'): D1 panne, D2 panne, D3 panne.

IV.6.1. Graphe de markov 1

Nous avons proposé que : la réparation se fait lorsqu'un des détecteurs. Ou bien deux soit réparer après la panne. Les résultats sont sur le tableau IV.9

Le graphe de Markov ci-dessous montre les résultats de notre proposition :

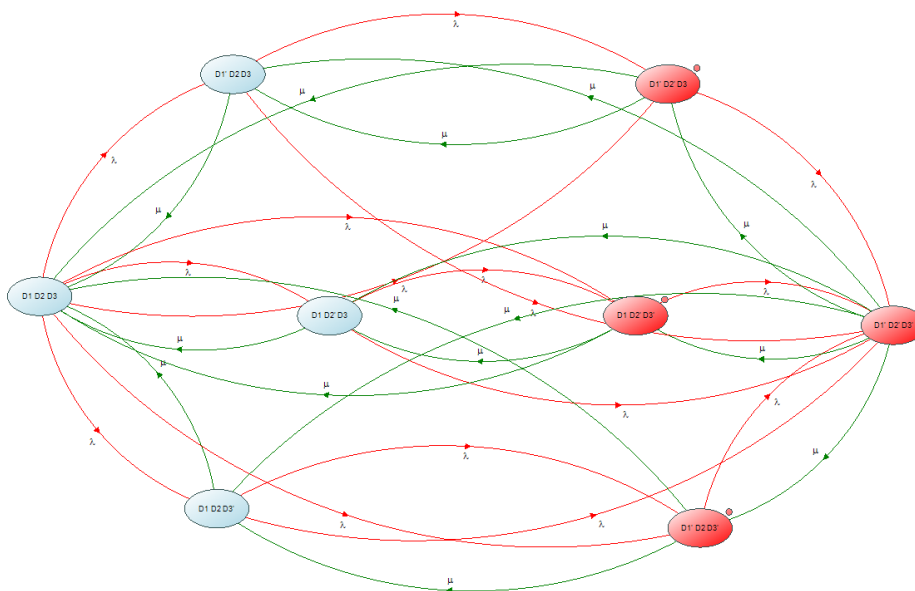


Figure IV. 13 Chaîne de Markov 1 de système de détection

Synthèse :

Ce graphe de Markov présente les 8 cas et les transitions de passage d'un cas à un autre du détecteur D1, D2, D3.

Nous répartirons notre graphe en deux phases:

- Phase 1: Système marche (S1, S2, S3, S4)
 - Phase 2: Système panne (S5, S6, S7, S8)
- De S1 vers le S2 par la transition de défaillance D1 ou vers le S5 par la transition de défaillance D1 et D2 et on revient de S2 ou S5 vers le cas 1 par la transition de réparation.
 - De S1 vers le S3 par la transition de défaillance D2 ou vers le S6 par la transition de défaillance D1 et D3 et on revient de S3 ou S6 vers le S1 par la transition de réparation.
 - De S1 vers le S4 par la transition de défaillance D3 ou vers le S7 par la transition de défaillance D2 et D3 et on revient de S4 ou S7 vers le S1 par la transition de réparation.
 - De S2 vers le S5 par la transition de défaillance D2 ou vers le S8 par la transition de défaillance D2 et D3 et on revient de S5 ou S8 vers le S2 par la transition de réparation.
 - De S3 vers le S6 par la transition de défaillance D3 ou vers le S8 par la transition de défaillance D1 et D3 et on revient de S6 ou S8 vers le S3 par la transition de réparation.
 - De S4 vers le S7 par la transition de défaillance D1 ou vers le S8 par la transition de défaillance D1 et D2 et on revient de S7 ou S8 vers le S4 par la transition de réparation.
 - S5 vers le S8 par la transition de défaillance de D3 et en revient parla transition de réparation de S8 vers le S5.
 - S6 vers le cas8 par la transition de défaillance de D1 et en revient par la transition de réparation de S8 vers le S6.
 - S7 vers le cas8 par la transition de défaillance de D2 et en revient par la

transition de réparation de S8 vers le S7.

Les résultats d'indisponibilité obtenus par cette configuration sont comme suite

$$U(t) = 8.074 \times 10^{-6}$$

IV.6.2. Graphe de markov 2

Par cette configuration Nous avons proposé que : pas de réparation possible lorsque les trois détecteurs sont simultanément en panne. Les résultats sont sur le tableau IV.9

Le graphe de Markov ci-dessous montre les résultats de notre proposition :

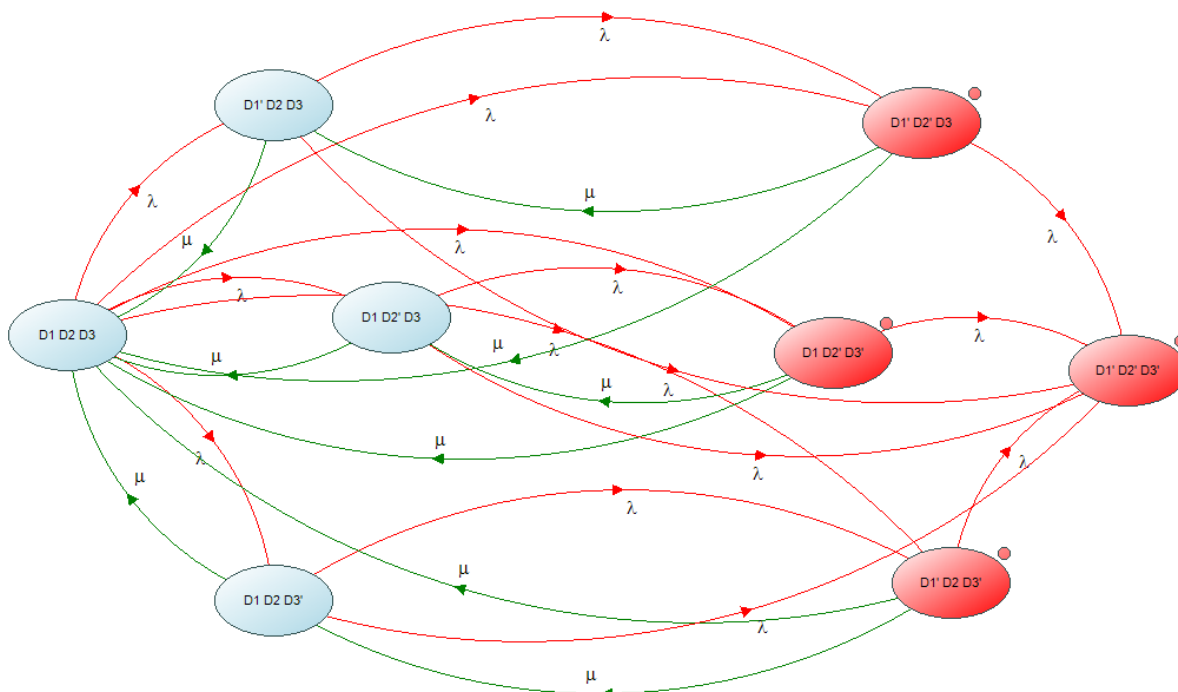


Figure IV. 14 Chaîne de markov 2 de système de détection

Dans ce graphe de Markov nous remarquons que:

- Les transitions de réparation sont absentes entre S8 vers S5 S6 S7 et entre S8 vers S2 S3 S4.

$$U(t) = 2.29 \times 10^{-5}$$

CHAPITRE IV : L'application des méthodes de la sureté de fonctionnement sur le système HIPPS

Synthèse : U(t=87600h)

ADD	Markov 1	Markov 2	Sans maintenance
$U = 6.54 \times 10^{-4}$	$U = 8.074 \times 10^{-6}$	$U = 2.29 \times 10^{-5}$	$U = 8.48 \times 10^{-2}$

Par la comparaison de ces résultats nous constatant que la bonne planification de la maintenance joue un rôle primordiale sur la disponibilité du système est que atravaire l'analyse par ADD on ne peut pas vraiment constater ces différences d'où l'intérêt d'une analyse par un système a multi-états.

IV.7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'approfondir notre compréhension des modes de défaillances associés aux composants du système HIPPS, en mettant l'accent sur leur criticité et les conséquences potentiellement contribuant à l'indisponibilité du système. L'application de méthodes d'analyse reconnues, telles que l'AMDEC avec le diagramme Pareto, l'Analyse d'arbre de défaillance (AdD) et les chaînes de Markov, a joué un rôle essentiel dans l'évaluation de la criticité des modes de défaillances identifiés.

Grâce à ces méthodes, nous avons identifié les causes sous-jacentes des défaillances, ce qui nous a permis de proposer des mesures correctives appropriées pour réduire la criticité des modes de défaillance et améliorer la fiabilité du système HIPPS. En outre, l'analyse de la sensibilité du système HIPPS a été réalisée afin d'identifier les facteurs les plus influents sur sa performance globale ainsi l'importance de la méthode à multi-états comme les chaînes de Markov pour l'obtention des résultats précis permettant de prendre de bonnes décisions sur la planification de la maintenance.

Conclusion général

Cette étude approfondie du système HIPPS dans une sphère GPL a permis d'analyser la sûreté de fonctionnement et d'évaluer les performances d'un important système instrumenté de sécurité. Les méthodes d'analyse utilisées ont fourni des résultats probabilistes, tels que le facteur d'importance et l'indisponibilité du système, permettant de quantifier sa fiabilité.

L'analyse de la sensibilité du système a permis de mettre en évidence les facteurs critiques qui affectent sa performance et d'identifier les équipements où des améliorations peuvent être apportées. Les résultats obtenus ont fourni des indications précieuses pour l'optimisation du système.

Cette étude souligne l'importance de la sûreté de fonctionnement dans les systèmes critiques tels que le HIPPS, qui jouent un rôle essentiel dans la protection contre les risques de pression élevée. La compréhension approfondie de la performance de ces systèmes et la capacité à les optimiser peuvent contribuer à renforcer la sécurité des installations et à minimiser les incidents ainsi que le choix des bonnes méthodes de sûreté de fonctionnement permettant la bonne prise de décision.

À la fin, cette étude a fourni des informations précieuses sur le système HIPPS dans un processus de GPL, en mettant en évidence les aspects clés de sa sûreté de fonctionnement et en proposant des pistes d'optimisation sur tout par la bonne planification de la maintenance. Ces résultats peuvent servir de base solide pour la prise de décisions concernant l'amélioration et la fiabilité des systèmes similaires dans l'industrie.

Bibliographie

- [1] ISO31010. Commission électrotechnique internationale. Version 2019.
- [2] Alain Desroches, « Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité », France, 1995, P1.
- [3] IEC 61508, « Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic (E/E/PE) safety related systems », International Electro-Technical Commission (IEC), 1998
- [4] Pierre David Pierre, « Management des Risques Industriels », Année 2010 R 2011, Grenoble INP, génie industrielle, P13.
- [5] F.R Farmer, Sitting criteria: a new approach. Atom,1967
- [6] Nouhed Achouri, apport de la logique floue á l'analyse de criticité des risques industriels, Mémoire de Magister en Hygiène et Sécurité Industrielle soutenue à L'université Université Hadj Lakhdar de Batna, 2009, P6-7.
- [7] DIHAHC. Document de Matrice sur le site scribd
- [8] Islam Hadj Mohamed, GUETARNI. Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage. Thèse de doctorat LMD en Sécurité industrielle et Environnement. Oran: Université d'Oran 02, 06 mai 2019.
- [9] VILLEMEUR, Alain. Livre de Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité- facteurs humains informatisation. Edition EYROLLES, Paris ,1988.
- [10] Ahmed BELLAOUAR, M. A. Salima BELLEUMI, «polycopi FMD», Algérie, 2013.
- [11] BIROLINI, Alessandro. Livre de Reliability Engineering Theory and Practice. Fifth Edition Springer, Italy, 2007.
- [12] BELLAOUAR,Ahmed, BELEULMI, Salima. Cour de fiabilité maintenabilité disponibilité. Université Constantine 1. Faculté des Sciences de la Technologie Département Génie des Transports. Année Académique 2013-2014
- [13] Islam Hadj Mohamed, GUETARNI. Cour de module Evaluation par Simulation en Sûreté de Fonctionnement des Systèmes en contexte Dynamique et Hybride. Université d'Oran 02, 2021.
- [14] : BOULAHLIB, Amir Islem, KASRI, Sid Ali. Mémoire d'étude de fiabilité d'un système anti incendie à mousse dans un site industriel. Pour l'obtention de diplôme de Master. Université Oran 2 Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle. Année 2019/2020.
- [15] GRIF 2014 Arbre de défaillance Version 31 Mars 2014

[16] H. Hadj Mabrouk, Introduction à la sécurité et à l'analyse des risques technologiques et humains, 3eme Symposium International sur la Maintenance et la Maitrise des Risques, Rabat, 2010.

[17] G. Landy, AMEDC : guide en pratique, Livre, Afnor, 2007.

[18] CHAFAI mahfoud said, « reliability assessment and improvement of the electrical, control and instrumentation systems of a cement plant baking process using FMECA », 2009

[19] <https://qualite.ooreka.fr/comprendre/amdec> consulté le 17/04/2023

[20] M. Thomas, Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines, Livre, Presses de l'Université du Québec, Canada, 2012.

[21] B.DEBRAY, S.CHAUMETTE, S.DESCOURIERE, V.TROMMETER, Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle, INERIS, 2006.

[22] Y. Sahraoui .Evaluation de performance de la sureté de fonctionnement par l'utilisation des réseaux de files d'attente. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master.de L'Université de Msila, 2012

[23] Flaus, J.M. Risk analysis : socio-technical and industrial systems. Wiley-ISTE. ISBN: 978-1-84821-492-7 2013

[24] Michel ROYER, ECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR l'expertise technique et scientifique HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte, 01/03/2012

[25] Michel, Royer. (2009). HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte. [Article de base documentaire]. Techniques de l'ingénieur Systèmes d'information et de communication, base documentaire : (réf. article : se4030) Document délivré le : 23/06/2014 Pour le compte : 7200100403 - techniques ingénieur // marie LESAVRE // 217.109.84.129.

[26] Djaout I. Méthodes d'analyse des risques dans les entreprises générant des produits à risques. Centrale Paris ; 2009.

[27] PR LOUNIS ZOUBIDA. Cours de module AED. IMSI –UNIV –ORAN 2.

[28] Kumar, Ajay; Analysis system safety; Pollution Engineering; Newton; June 2000; v 32; i 6; pp 46-49.

[29] https://elearning.univ-msila.dz/moodle/pluginfile.php/327577/mod_resource/content/1/chap%2006%20arbre%20de%20défaillance.pdf consulté le 09/05/2023

[30] DOSSIER TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR l'expertise technique et scientifique de référence. Arbres de défaillance, des causes et d'événements. Par Yves MORTUREUX

[31] Ali bennacer zohra , etude de la fiabilite et la sécurité du poste a poudre ANSUL, Mémoire en prévention intervention, université d'oran 2 année 2018/2019

[32] A. Ghenai, Évaluation de la fiabilité des systèmes embarqués dès la phase de conception par réseaux de Pétri temporels étendus, Thèse de Doctorat en Sciences de L'Université Constantine 2.

[33] Malik MEGDICHE. Sûreté de fonctionnement des réseaux de distribution en présence de production décentralisée. Sciences de l'ingénieur. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2004.

[34] Amel DEMRI. Contribution à l'évolution de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle. Laboratoire de sûreté de fonctionnement, Qualité et organisation. ANGERS 2009.

[35] <https://www.arbre-analyste.fr/>

[36] Doctorat de l'Université de Lorraine le 25/02/2021 "Évaluation d'indicateurs de sûreté de fonctionnement d'architectures de contrôle-commande dans un contexte dynamique et incertain" par Grâce BOYER

[37] Health and safety directive ALARP www.hse.gov.uk

[38] MECHRI W., (2011). « Evaluation de la performance des systèmes instruments de sécurité à paramètres imprécis ».Thèse de doctorat

[39] Sallak M., (2007). «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. Doctorat de l'institut national polytechnique de lorraine

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

[41] ISO, « Management du risque : Vocabulaire, Principes directeurs pour l'utilisation dans les normes », Organisation internationale de normalisation, 2002.

[42] Norme CEI 61513, Centrales nucléaires : Instrumentation et contrôle commande des systèmes importants pour la sureté, Prescriptions générales pour les systèmes. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse; 2001.

[43] EN50126 (1999). Railway applications. The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).

[44] cour M. Benomar, Institut de maintenance et sécurité industrielle, Les systèmes instrumentés de sécurité 2020-2021

[45] Mkhida, A, Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des Systèmes Instrumentés de Sécurité intégrant de l'Intelligence. PhD thesis, Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2008.

[46] [Schonbeck, M., Rausand, M. et J « Human and organisational factors in the operational phase of safety instrumented systems : A new approach », 2010].

[47] Zicht (1900). HIPPS - Products of Mokveld - Mokveld. [Online] Retrieved from: <http://www.mokveld.com/en/7/products-of-mokveld-/products/14/hipps> [Accessed: 11 Feb 2013].

[48] Manuel Opérateur GP1Z

[49] Instrument Society of America (ISA) standard ISA-TR18.2.2-2016