



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : SOFRANI ALI.

BENBOUZID SALAH EDDINE.

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hygiene Et Securite Industrielle.

OPTION : Hygiene Et Securite Industrielle.

Thème

**Applicabilité de la méthode LOPA dans la
détermination des SIL dans les industries à risque
élevé : cas de four de Rebouillage H-201**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
HADJADJ Asma	MCB	Président
BOUARAR Fahima	MCB	Examineur
AOUADJ Sarra	MCB	Encadreur

Promotion : 2023/2024

Remerciement

Avant tout, nous remercions LE DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour terminer ce travail.

Nos sincères remerciements sont pour notre encadreur : Mme. AOUADJ SARRA Maître de Conférences B à l'Université De Amar Thledji Laghouat pour tous ses aides, ses orientations, ses conseils pertinentes, ses critiques constructives et renseignements durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.

Nous souhaitons tout particulièrement remercier vivement les membres du Jury qu'ils ont accepté d'évaluer notre travail; Dr. HADJADJ Asma à l'Université de Amar Thlidji Laghouat et Dr. BOUARAR Fahima à l'Université Amar Thlidji Laghouat

Enfin, que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, soient assurés de notre profonde gratitude.

Merci à tous

Liste des tableaux

01	Les différents niveaux de SIL pour un mode de fonctionnement à faible sollicitation.	08
02	Les différents niveaux de SIL pour un mode de fonctionnement à forte sollicitation.	09
03	Exemple de tableau LOPA.	16
04	Représentation des portes logiques.	22
05	Descriptions des paramètres du graphe de risque.	24
06	Paramètres du graphe de risque.	26
07	Grille d'analyse de la justification des mesures de maîtrise du risque.	27
08	Principe de signalisation des composantes.	39
09	Alarmes et descriptions.	39
10	Caractéristiques du Four Rebouilleur H-201.	40
11	Analyse fonctionnelle et structurelle.	41
12	Feuille de présentation HAZOP	44
13	Grille de criticité adoptée par SH DP HRM	48
14	Fréquences des évènements initiateurs.	49
15	Probabilités de défaillance à la demande des IPLs.	50
16	Le SILs selon le mode de fonctionnement des fonctions ou systèmes de sécurité.	52

Liste de figure

01	Courbe de farmer	05
02	Structure d'un SIS.	07
03	Structure générale de la norme IEC 61508.	12
04	Les normes sectorielles de l'IEC 61508.	13
05	Couches de protection : réalité – idéal.	16
06	Différentes couches de protection suivant LOPA.	19
07	Schématisation d'un arbre de défaillance.	21
08	Graphe de hiérarchisation du risque présenté dans la norme CEI 61511-3	25
09	Procédure de BORA conventionnelle.	29
10	Situation géographique " Hassi R'mel ".	34
11	le champ gazier de Hassi R'mel.	36
12	Vue de face du four H201.	37
13	Tableau local.	38
14	Les différents scénarios d'accidents.	51
15	Réduction du risque par l'utilisation d'une fonction de sécurité faiblement sollicitée.	52
16	Représentation graphique des mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction.	53

Liste des Abréviations

AdE	Arbre d'événement
Add	L'Arbre De Défaillance
BORA	Barrier and Operational Risk Analysis
CCPS	Center of Chemical Process Safety.
DDB	Diagramme De Décision Binaire
E/E/EP	Électrique / Électronique / Électronique Programmable.
EUC	Equipment Under Control.
OHSAS	Occupational Health and Safety Assessment Series
LOPA	Layer of Protection Analysis
PFD	Probability of Failure on Demand
PFDavg	Probability of Failure on Demand Average
PFH	Probability of Failure per Hour
SdF	Sûreté de Fonctionnement
SIF	Safety Instrumented Function
SIL	Safety Integrity Level
SIS	Safety Instrumented System.

Tables de matières

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale:	01
1. Problématique	01
2. Objectifs	02
3. Organisation du manuscrit	02

Partie Théorique

Chapitre I : Concepts Généraux

Introduction	04
1. Notion De Sécurité.	04
2. Notion De Risque (mesure de risque- risque acceptable).	04
3. Sécurité Fonctionnelle.	05
4. Le Concept De Système Instrumente De Sécurité SIS.	06
4.1. Constitution D'un SIS.	06
4.2. Fonction Instrumentée De Sécurité (SIF).	07
4.3. Définition De SIL.	08
conclusion	09

Chapitre II : méthode de détermination de SIL et référentiel normatif

Introduction.	11
1. Norme IEC 61508.	11
1.1. Domaine d'application.	11
1.2. Structure Générale De La Norme.	11
1.3. Objectifs De La Norme.	13
2. Norme IEC 61511	14
2.1. Domaine d'application.	14
2.2. Structure Générale De La Norme.	14
2.3. Objectifs De La Norme.	14
3. Méthodes D'évaluation De SIL.	14
3.1. La Méthode LOPA.	15
3.1.1. Origine De LOPA.	15
3.1.2. Objectif De LOPA.	15
3.1.3. Les Etapes De LOPA.	17
3.1.4. Notion de couches de protection.	19
3.1.5. Avantage De La Méthode LOPA.	19
3.1.6. Limite De La Méthode LOPA.	20
3.2. L'Arbre De Défaillance (Add)	20
3.2.1. Constitution.	21
3.2.2. Méthodes De Réduction Des Arbres De Défaillance.	22
a. Méthode Des Coupes Minimales.	23
b. Méthode De Diagramme De Décision Binaire(DDB).	23

3.3.	Graphe De Risque.	23
3.3.1.	Synthèse Du Graphe De Risque.	24
3.3.2.	Mise En Œuvre Du Graphe De Risque.	25
3.3.3.	Etalonnage Du Graphe De Risque.	26
3.4.	La Grille De Criticité.	27
3.5.	La Méthode BORA.	28
3.5.1.	Déroulement De La Méthode BORA.	28
3.5.2.	Avantages Et Limites De La Méthode BORA.	29
3.6.	Hazard and Operability Study (HAZOP).	30
	Conclusion.	31

Partie pratique

Chapitre III : Application de la méthode LOPA sur le four de Rebouillage H 201

	Introduction	34
1.	Présentation de la région de Hassi R'mel	34
1.1.	Situation géographique	34
1.2.	Développement du champ de Hassi R'mel	35
1.3.	La capacité de production actuelle	36
1.4.	Installations gazières de Hassi R'mel.	36
1.5.	Présentation du Module (MPP0).	36
2.	Description générale du four de Rebouillage H 201	37
2.1.	les différentes parties du Four.	37
2.2.	Alarmes, sécurité, signalisations	38
a.	Tableau local	38
b.	Signalisations	39

c. Alarme	39
d. Salle de contrôle	40
2.3. Rôle du Four de Rebouillage H-201	40
2.4. Analyse structurelle et fonctionnelle.	41
3. Evaluation des risques liés au four et identification des scénarios d'accidents possible.	43
4. Application de méthode LOPA au four rebouilleur H-201.	48
5. Discussion des résultats.	53
Conclusion.	53
Conclusion générale.	55
Références bibliographiques	57

Introduction

Les installations industrielles dans le domaine du pétrole & gaz présentent des risques pour les personnes, l'environnement et les équipements, d'où la nécessité de mettre en œuvre des systèmes de mise en sécurité de ces installations à risque pour le respect des exigences réglementaires.

La Sécurité fonctionnelle consiste à identifier les défaillances spécifiques dangereuses qui conduisent à des risques non maîtrisables qui peuvent causer des catastrophes humaines et matérielles, Les appareils dont l'échec contribue à chacun de ces risques est identifié et habituellement dénommé «relatif à la sécurité».

La sécurité, ce n'est évidemment pas que de l'organisation c'est aussi des méthodologies et des moyens techniques à suivre. Parmi ces méthode la méthode LOPA (Analyse des barrières de sécurité) qui permettent d'évaluer de manière quantifiée ou semi-quantifiée la probabilité d'occurrence des accidents

Problématique :

Puisque la sécurité et la santé des travailleurs et la protection de l'environnement sont des exigences essentielles pour les employeurs, les systèmes de sécurité prennent une place primordiale dans les équipements de travail et ceci pour des différents domaines aussi variés que les Industries.

Dans l'industrie moderne, pétrolière plus précisément, le risque majeur susceptible de survenir au niveau des installations pétroliers et compte tenu de l'activité du secteur hydrocarbures et l'incendie et / ou l'explosion. Ce travail consiste à évaluer le risque potentiel dans le « Module 0 » de Hassi R'Mel.

Cette étude a été réalisée sur le système Four de Rebouillage H-201 du MPP0 à Hassi R'mel Ayant pour objectif l'évaluation de la fiabilité, et l'identification des mesures de sécurité nécessaires pour atteindre un niveau de sécurité spécifique. Le référentiel normatif fournit des directives et des critères pour appliquer la méthode LOPA de manière cohérente et conforme aux normes internationales.

LOPA se concentre sur l'évaluation des couches de protection individuelles qui préviennent les incidents majeurs dans un système. Elle identifie les différentes barrières de protection et évalue leur fiabilité pour déterminer si elles sont suffisantes pour réduire les risques à un niveau acceptable.

En appliquant ces méthodes au four H-201, il faudra mieux comprendre les risques associés à son fonctionnement et mettre en place des mesures de sécurité appropriées pour prévenir les accidents et protéger les travailleurs et l'environnement.

Objectifs :

Les objectifs prévus de ce mémoire sont :

- ✓ Utiliser une méthode d'évaluation des SIL, notamment la méthode LOPA, pour la détermination des SIL dans les industries à risque élevé.
- ✓ Identifiez les scénarios accidentels possibles liés au fonctionnement du four H-201.
- ✓ Évaluez la probabilité de chaque scénario et les conséquences potentielles.

Organisation du manuscrit :

Le présent mémoire comporte principalement deux parties :

- Parité théorique traitant les concepts généraux liés à la sécurité dans un premier chapitre puis la détermination de SIL et référentiel normatif dans un deuxième chapitre.
- Partie pratique consacrée à l'application de la méthode LOPA, à l'évaluation du SIL sur un système industriel « four H-201 » au site choisi pour réaliser le stage pratique (module MPP0).

Concepts

Généraux

CHAPITRE I

Introduction :

Actuellement les industries sont confrontées à des accidents industriels majeurs qui menacent leur pérennité et remettent en cause leurs objectifs, Face à ce défi, les industries déploient beaucoup d'efforts pour éviter ces accidents.

Dans les études de sécurité, l'étude de dangers reste l'outil d'information privilégié. Il doit permettre d'identifier les dangers que peut présenter l'exploitation de l'installation et les moyens de réduire la probabilité et les effets des potentiels de dangers.

Diverses sécurités doivent être mises en œuvre. Ces types des sécurités utilisent des moyens contribuant soit à la prévention soit à la protection pour minimiser les conséquences d'un dysfonctionnement.

Dans ce chapitre, nous présenterons les concepts de base, Il vise à donner une vision générale sur la sécurité et risque, et les différents aspects qui composent Système Instrumente De Sécurité.

1. Notion de sécurité:

La sécurité est un état où les dangers, et les conditions pouvant provoqué des dommages d'ordre physique, psychologique ou matériel sont contrôlés [30].

Pour toute installation industrielle, il est nécessaire de définir les situations dangereuses, puis de prendre les mesures destinées à supprimer les risques d'accident [2].

2. Notion de risque :

Selon Villemeur, le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences[36].

Selon OHSAS 18001, un risque est la combinaison de la probabilité et de la (des) conséquence (s) de la survenue [31]. Selon Gouriveau, le risque peut être défini par l'association d'événements causes et conséquences d'une situation donnée.

De manière plus formelle, un risque peut être mesuré par sa criticité, qui est fonction de sa probabilité et de sa gravité :

$$C = P \times G$$

Le critère de Farmer [12]. Permet de définir les notions de risque acceptables et inacceptables (figure 01).

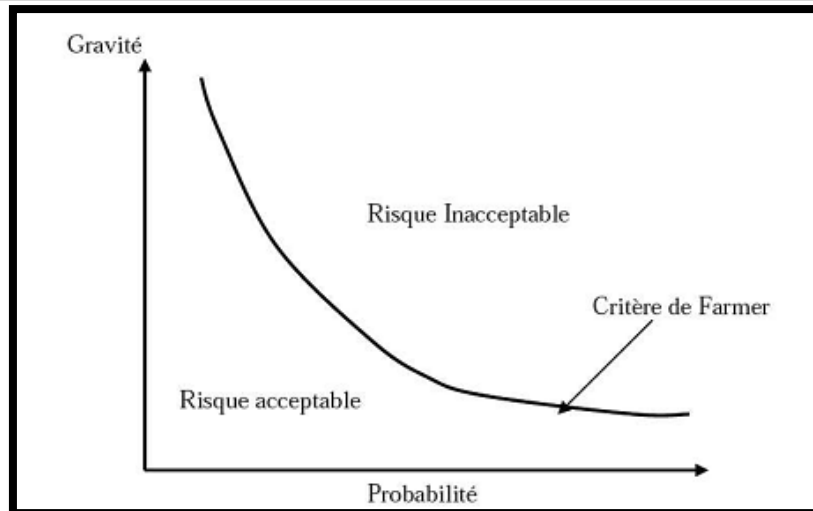


Figure 01 : Courbe de farmer [12].

La courbe de Farmer permet une classification du risque en deux sous-ensembles disjoints, correspondant au domaine du risque acceptable et à celui du risque inacceptable.

2.1. Mesurer de risque :

Deux méthodes sont employables principalement pour mesurer un risque :

- ✓ **Une méthode quantitative :** le risque étant mesuré par la combinaison entre sa probabilité de survenance et son impact. cette approche repose notamment sur des données observées.
- ✓ **Une méthode qualitative :** à partir d'une évaluation à dire d'expert, soit par les personnes les plus en contact avec le risque, en appréciant son importance (criticité).

2.2. Risque acceptable :

Ce terme a connu beaucoup d'intervention, on prend par exemple ces définitions: « Un risque est acceptable en référence à un objectif de sécurité donné » [15], et « L'acceptation du risque dépend des critères de risques retenus par la personne qui prend la décision » [24].

3. Sécurité fonctionnelle:

La sécurité fonctionnelle a pour objet de contrôler les risques inacceptables qui pourraient provoquer des accidents dangereux. Elle couvre les systèmes mettant en œuvre des solutions de protection appliquées dans plusieurs domaines : mécanique, électrique, électronique, électronique programmable, hydraulique, optique, . . . [33].

Selon la norme IEC 61061 [18], la sécurité fonctionnelle est le sous-ensemble de la sécurité globale se rapportant à la machine et au système de commande de la machine qui dépend du fonctionnement correct des systèmes électriques de commande relatifs à la

sécurité, des systèmes relatifs à la sécurité basés sur une autre technologie et des dispositifs externes de réduction de risque.

Suivant la norme IEC 61508 [19], la sécurité fonctionnelle est le sous-ensemble de la sécurité globale qui dépend du bon fonctionnement d'un système ou d'un équipement en réponse à ses entrées.

4. Le Concept de Système Instrumente de Sécurité SIS :

Les SIS sont une composante essentielle des dispositifs de prévention des installations industrielles. La définition des fonctions de sécurité, la conception, la maintenance, et la modification des systèmes doivent assurer la disponibilité et la fiabilité de la fonction de sécurité en toute circonstance. Les meilleures pratiques disponibles dans le management des SIS ont été décrites dans la norme IEC 61511 [20] pour les industries de procédé.

La norme IEC 61508 [19] définit quant à elle les systèmes relatifs aux applications de sécurité par : un système E/E/EP (électrique/électronique/électronique programmable) relatif aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité.

La norme IEC 61511 [20] définit les systèmes instrumentes de sécurité de la façon suivante : système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité (SIF). Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unités logique(s) et d'élément(s) terminal (aux).

4.1. Constitution d'un SIS :

Un SIS est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) assurant la mise en état de sécurité des procédés lorsque des conditions prédéterminées sont atteintes. Il se compose de n'importe quelle combinaison de trois sous-systèmes (capteurs, unité logique et éléments terminaux) voir le Figure 02. [16].

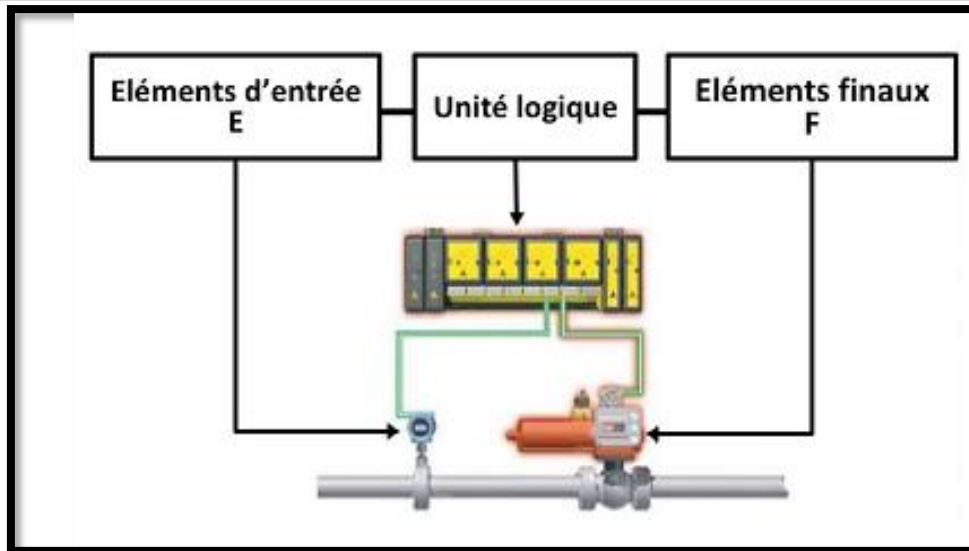


Figure 02 : Structure d'un SIS [20].

- **Une couche capteur (Sensor) :** elle est constituée d'un ensemble d'éléments d'entrée (ex : capteurs, détecteurs) qui surveillent l'évolution des paramètres physico-chimiques représentatifs du comportement du procédé (température, pression, niveau...)[29] .
- **Une couche unité logique LS (Logic Solver) :** ce sous-ensemble d'éléments logiques réalise le processus de prise de décision qui s'achève par l'activation du troisième sous-système FE (Final Élément) [23]. Le sous-système LS peut être un automate programmable ou un micro-ordinateur doté de logiciels spécifiques.
- **Une couche actionneur FE :** Elle agit directement (ex : vannes d'arrêt d'urgence) ou indirectement (ex : vannes solénoïdes) sur le procédé pour neutraliser sa dérive en mettant, en général, le système à l'arrêt (état sûr) au terme d'un délai qui doit être spécifié pour chaque fonction de sécurité [23].

4.2. Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) :

Une fonction instrumentée de sécurité (SIF) est réalisée par un système instrumenté de sécurité (SIS). Un SIS contient généralement plusieurs SIF [8].

Une fonction instrumentée de sécurité (SIF) est une fonction qui a été intentionnellement conçue pour protéger l'EUC (Equipment Under Control) contre une demande spécifique. Le SIF est mis en œuvre par un SIS et dispose d'un niveau d'intégrité de sécurité (SIL) spécifique.

L'un des objectifs d'une fonction instrumentée de sécurité est de mettre l'EUC dans un état sûr ou de maintenir l'EUC dans un état sûr lorsqu'une demande survient afin de protéger les personnes, l'environnement et les biens matériels [5].

4.3. Définition de SIL :

SIL est l'acronyme de « Safety Integrity Level », C'est une représentation statistique de l'intégrité du S.I.S. en cas de demande générée par le Process.

La notion de SIL s'applique au système de sécurité dans sa globalité, et non pas à un élément ou sous-ensemble de celui-ci. Néanmoins, certains fournisseurs de matériel en font aujourd'hui un argument commercial.

Pour un mode de fonctionnement à faible sollicitation (ou à la demande), la correspondance entre le niveau de SIL et la PFD est présentée dans le Tableau 01, Ce mode de fonctionnement est typique des systèmes de sécurité qui sont « activés » uniquement sur dépassement de valeurs seuils (dérive du mode de fonctionnement normal d'une installation).

Pour un mode de fonctionnement à forte sollicitation, la correspondance entre le niveau de SIL et la fréquence de défaillances dangereuses visée par heure est présentée dans le tableau 02. Ce mode de fonctionnement est typique des systèmes qui agissent en permanence pour réduire un risque. Lorsque la fréquence des demandes de fonctionnement sur un système relatif à la sécurité est plus grande qu'une par an, ou supérieure à la fréquence des tests périodiques, ce système est considéré répondre au critère de forte sollicitation (demande élevée ou mode continu) [3].

Tableau 01. : Les différents niveaux de SIL pour un mode de fonctionnement à faible sollicitation.

Niveau d'intégrité SIL	Probabilité de défaillance dangereuse par ans	Facteur de réduction du risque
SIL 1	10^{-1} à 10^{-2}	10 à 100
SIL 2	10^{-2} à 10^{-3}	100 à 1000
SIL 3	10^{-3} à 10^{-4}	1000 à 10000
SIL 4	10^{-4} à 10^{-5}	10000 à 100000

Tableau 02. : Les différents niveaux de SIL pour un mode de fonctionnement à forte sollicitation.

Niveau d'intégrité SIL	Probabilité de défaillance dangereuse par ans	Facteur de réduction du risque
SIL 1	10^{-5} à 10^{-6}	10 à 100
SIL 2	10^{-6} à 10^{-7}	100 à 1000
SIL 3	10^{-7} à 10^{-8}	1000 à 10000
SIL 4	10^{-8} à 10^{-9}	10000 à 100000

Conclusion :

Ce chapitre a souligné la présentation du cadre générale des travaux de ce mémoire, Nous avons tout d'abord examiné les définitions des termes fondamentaux dans le domaine de la sécurité, le risque, et nous avons cherché à faire le lien entre ces différents termes.

Les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) sont des barrières techniques qui ont pour rôle de mettre un procès dans une situation de sécurité. Ceux sont ces systèmes qui font l'objet de notre travail de mémoire. Les éléments essentiels de la norme CEI 61508, liées à ces systèmes, sont étudiés et présentés dans le chapitre suivant.

**Méthode De
Détermination
De SIL Et
Référentiel
Normatif**

Chapitre II

Introduction :

Dans l'industrie, la source prédominante de danger est le processus lui-même à travers ses déviations incontrôlées, qui sont toujours possibles. L'ampleur de ces écarts est normalement limitée, régulée par un système de contrôle, qui peut néanmoins échouer. Dans ce cas, l'action de régulation défaillante du système de commande est remplacée par une intervention d'un opérateur et/ou de systèmes de sécurité.

À travers le cadre des systèmes industriels, la sécurité consiste à mettre en œuvre des moyens évitant l'apparition de dangers.

Dans ce contexte, Nous avons discuté la démarche générale de l'évaluation de SIL, ainsi que les méthodes qualitatives et quantitatives de leur détermination.

1. Norme IEC 61508 :

La norme IEC61508 est une norme internationale qui porte plus particulièrement sur les systèmes E/E/PE, c'est-à-dire les systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables de sécurité. La norme propose une approche opérationnelle pour mettre en place un système de sécurité E/E/PE, en partant de l'étude des exigences de sécurité (avec une définition du périmètre couvert, une analyse et une évaluation du risque) et en prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie du système E/E/PE. Un désintéret de cette norme est d'être générique et donc d'être applicable dans tous les secteurs où la sécurité peut être traitée avec des systèmes E/E/PE: industries manufacturières, industries des processus continus, pharmaceutiques, nucléaires, ferroviaires, etc..[19] .

1.1.domaine d'application :

La norme CEI 61508 s'applique aux systèmes de sécurité électriques, électroniques ou électroniques programmables destinés à exécuter des fonctions de sécurité. Elle concerne les applications pour lesquelles un défaut des systèmes exerce une influence considérable sur la sécurité des personnes, de l'environnement et des installations.

1.2.Structure générale de la norme :

Cette norme comprend 7 parties (figure 03), afin de couvrir les multiples aspects des systèmes E/E/PE:

- ✓ 61508-1: Prescriptions générales.
- ✓ 61508-2: Prescriptions propres aux systèmes E/E/PE.
- ✓ 61508-3: Prescriptions relatives au logiciel.

- ✓ 61508-4: Définitions et abréviations.
- ✓ 61508-5: Exemples de méthodes pour déterminer le niveau d'intégrité de la sécurité.
- ✓ 61508-6: Guides pour l'application des parties 2 et 3 de la norme.
- ✓ 61508-7: Tour d'horizon des techniques et des mesures.

Signalons que la partie 6 est seulement informative. Les méthodes qui y sont données ne sont pas obligatoires.

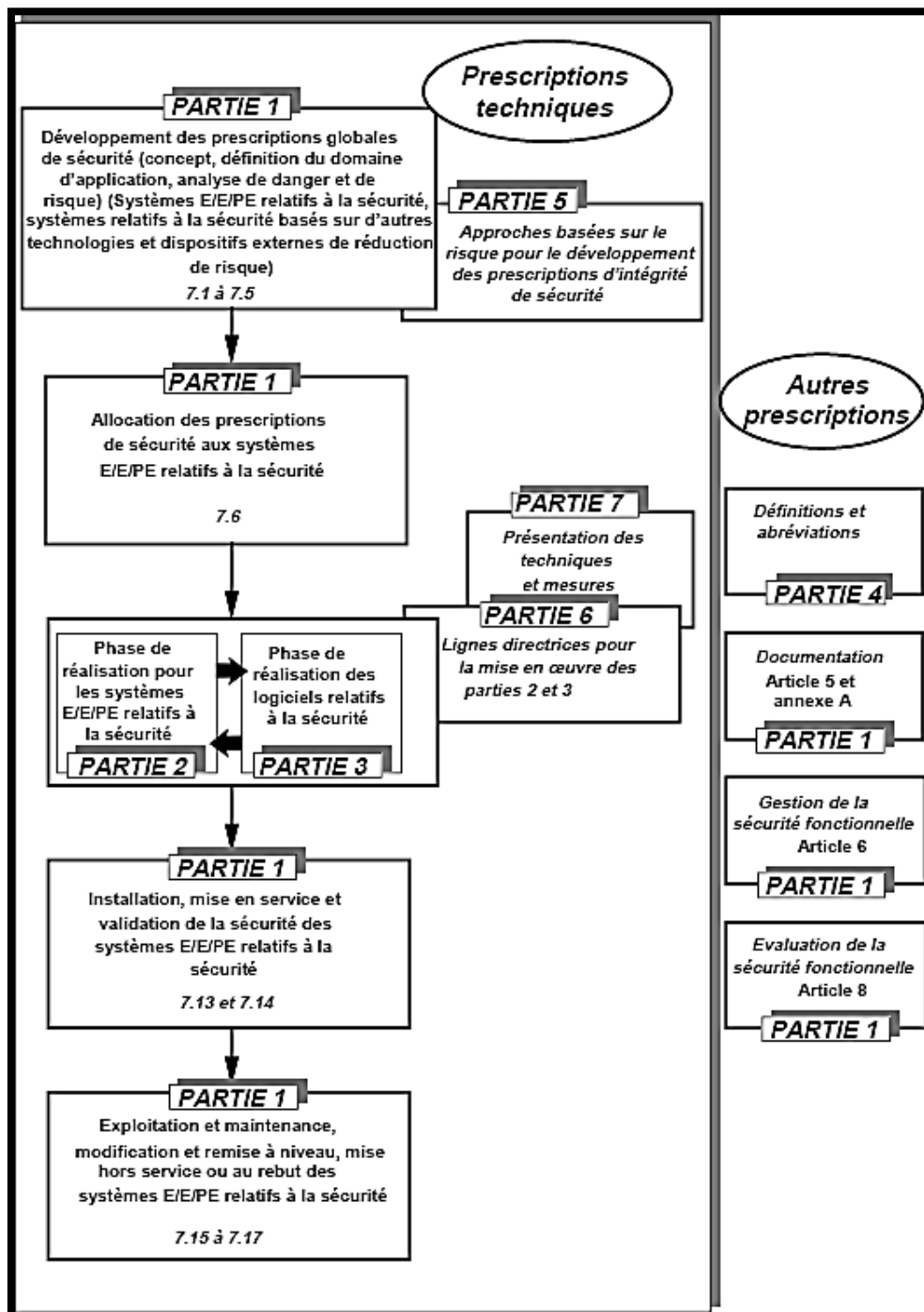


Figure 03 : Structure générale de la norme IEC 61508 [19]

La complexité de la norme IEC 61508 [19]. À conduit ses concepteurs à développer des normes relatives `à des secteurs bien précis (ex : machines, processus industriels, Ferroviaire, centrales nucléaire . . .). La figure 04 montre la norme IEC 61508 générique ainsi que ses normes filles selon le secteur d'activité concerné Elle influence le développement des systèmes E/E/EP et les produits concerné par la sécurité dans tous les secteurs [38].

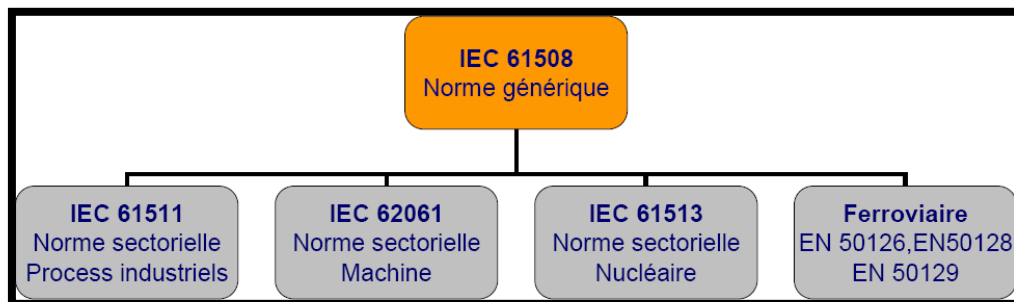


Figure 04 : Les normes sectorielles de l'IEC 61508 [35]

1.3.Objectifs de la norme : L'IEC 61508 a pour but de :

- Fournir le potentiel des technologies E/E/PE pour améliorer à la fois les performances économiques et de sécurité,
- Permettre des développements technologiques dans un cadre global de sécurité,
- Fournir une approche système, techniquement saine, suffisamment flexible pour le futur.
- Fournir une approche basée sur le risque pour déterminer les performances des systèmes concernés par la sécurité.
- Fournir une norme générique pouvant être utilisée par l'industrie, mais qui peut également servir à développer des normes sectorielles (par exemple : machines, usines chimiques, ferroviaires ou médicales) ou des normes produit (par exemple : variateurs de vitesse).
- Fournir les moyens aux utilisateurs et aux autorités de réglementation d'acquérir la confiance dans les technologies basées sur l'électronique programmable,
- Fournir des exigences basées sur des principes communs pour faciliter :
 - ↗ une compétence améliorée de la chaîne d'approvisionnement des fournisseurs de sous-systèmes et de composants à des secteurs variés,
 - ↗ des améliorations de la communication et des exigences (c'est-à-dire de clarifier ce qui doit être spécifié),
 - ↗ le développement de techniques et de mesures pouvant être utilisées par tous les secteurs, augmentant de ce fait la disponibilité des ressources,

↗ le développement des services d'évaluation de la conformité si nécessaire.[19]

2. Norme IEC 61511 :

2.1. Domaine d'application :

La norme IEC 61511 définit les exigences pour les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) basés sur la technologie E/E/PE, couvrant leur spécification, conception, installation, exploitation et entretien pour assurer leur mise en œuvre sécurisée. Elle s'applique également aux autres technologies utilisées pour les unités logiques des SIS, ainsi qu'aux capteurs et éléments terminaux, garantissant au niveau de sécurité approprié dans les processus industriels.

2.2. Structure Générale De La Norme :

La norme IEC 61511 comprend les parties suivantes (figure 03) :

- **Partie 1** : Cadre, définition, exigences pour le système, le matériel et le logiciel.
- **Partie 2** : Lignes directrices pour l'application de l'IEC 61511-1.
- **Partie 3** : Guide pour la détermination des niveaux d'intégrité de sécurité requis.[20]

2.3. Objectifs De La Norme :

- ✓ De réaliser une évaluation des dangers et des risques pour identifier les exigences globales de sécurité.
- ✓ D'effectuer une allocation des exigences de sécurité au(x) système(s) instrumenté(s) de sécurité.
- ✓ D'être inscrite dans un cadre applicable à toutes les méthodes instrumentées qui permettent d'obtenir la sécurité fonctionnelle.
- ✓ De détailler l'utilisation de certaines activités, telles que la gestion de la sécurité, qui peuvent être applicables à toute méthode permettant d'obtenir la sécurité fonctionnelle.

3. Méthodes D'évaluation De SIL.

Cinq méthodes pour déterminer le niveau de sécurité :

Les normes internationales de sécurité fonctionnelle CEI 61508 et CEI 61511 définissent une démarche d'analyse du niveau d'intégrité d'un système de sécurité. Elles autorisent, suite à une analyse de risque, la détermination du niveau d'intégrité de sécurité requis (SIL) pour une fonction instrumentée de sécurité. La norme CEI 61511 décrit différentes méthodes de détermination de SIL, mais aucune n'est à privilégier. L'INERIS détaille ici deux approches qualitatives, le "graphe de risque" et la "grille de criticité" ainsi que les trois approches

quantitatives “LOPA” (Layer of Protection Analysis) et “l’arbre de défaillance” et la méthode BORA. [8]

3.1. La méthode LOPA :

3.1.1. Origine de LOPA :

La méthode LOPA (Layer Of Protection Analysis) est une méthode intégrée semi quantitative d’analyse probabiliste des risques. Elle a été initiée par le Center for Chemical Process Safety (CCPS) sur la base du modèle des couches de protection .[9]

➤ A la fin des années 1980, le Chemical Manufacturers Association (maintenant American Chemistry Council) publie « Responsible Care Process Safety Code of Management Practices » qui introduit la notion de couches de protection et qui recommande de les prendre en considération dans le cadre du système de management.

➤ En 1993, le Center of Chemical Process Safety (CCPS) introduisait dans le « Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes » la méthode LOPA. Dans cet ouvrage, la méthode décrite était à un stade d’avancement préliminaire, mais était déjà proposée comme alternative pour déterminer le niveau de SIL des SIF.[32]

➤ En octobre 1997, lors du congrès international à Atlanta sur les méthodes d’analyses de risques organisé par le CCPs, le besoin de publier un ouvrage présentant la méthode LOPA a émergé des différentes présentations et discussions.

En parallèle, en Europe et aux États-Unis, les normes relatives au SIL (respectivement les normes IEC 61508/61511 et ISA S84.01) étaient en pleine évolution et dans leurs premières versions, aucune de ces normes ne recommandait la méthode LOPA pour déterminer le niveau de SIL des SIF. Pour faire face aux évolutions normatives mais aussi méthodologiques initiées pour certaines par des industriels, en 1998, le CCPs décida de réunir des industriels et des experts en risques afin de démarrer un groupe de travail sur la méthode LOPA. Pour rendre accessible au grand public cette méthode, le CCPs publia en 2001 l’ouvrage «Layer Of Protection Analysis» (LOPA). De ce fait, la méthode LOPA est souvent considérée comme une Méthode d’analyse de risques récente. [6].

3.1.2. Objectif de LOPA :

Comme de nombreuses autres méthodes d’analyse des risques, l’objectif principal de la méthode LOPA est d’évaluer s’il existe un nombre suffisant de barrières de protection contre un scénario d’accident, étant donné que ces barrières ne sont pas infaillibles en réalité. (Figure 05).

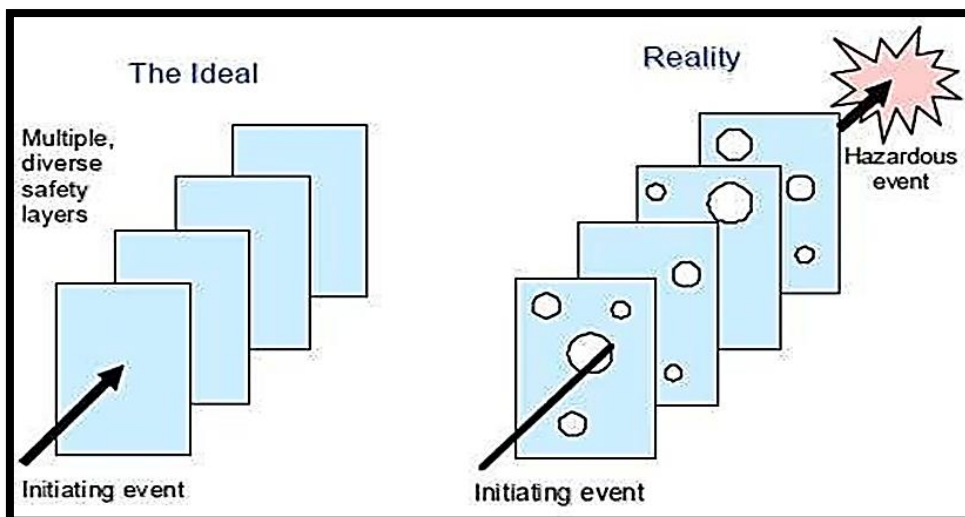


Figure 05 : Couches de protection : réalité - idéal [13].

Contrairement aux techniques d'évaluation des risques purement qualitatives, l'analyse des couches de protection (Tableau 03) permet d'estimer la fréquence d'un événement redouté.

Tableau 03 : Exemple de tableau LOPA.

Danger combattu : Eclatement du réacteur							
FIS : Mise en sécurité du réacteur sur dérive de la température (emballement thermique)							
Objectif de Sécurité	Evénement initiateur		Couches de protection				Fréquence résultante
			BPCS(Conduite régulation)	FIS	Dispositif d'atténuation (soupape)	Dispositif de protection	
Fréq. /an	Désignation	Fréq./an	PFDavg	PFDavg	PFDavg	PFDavg	
10 ⁻⁵	Défaillance boîte froide (Présence de polluant)	10 ⁻¹	10 ⁻¹	10 ⁻³ (SIL 3)	1	1	10 ⁻⁵
10 ⁻⁵	Défaut vapeur HP (Gaz trop chaud)	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁻¹ (SIL 1)	10 ⁻¹		10 ⁻⁵
10 ⁻⁵	..						

La méthode LOPA est une méthode semi-quantitative développée dans l'optique:

- ✓ De juger de l'adéquation entre les barrières mises en œuvre et le niveau de risque visé. de statuer sur le besoin de mise en œuvre de nouvelles barrières.
- ✓ De définir les « exigences » minimales sur la probabilité de défaillance des barrières à mettre en place dans le cas où les barrières existantes ne permettraient pas de justifier d'un risque acceptable.
- ✓ D'évaluer la fréquence d'occurrence résiduelle d'un scénario d'accident.
- ✓ Déterminer les niveaux de SIL requis pour les fonctions instrumentées de sécurité (SIF).

Cette méthode intègre toutes les couches de protection de l'entreprise, tant organisationnelles que techniques. La méthode LOPA évalue la réduction du risque en analysant la contribution des différentes couches (qui englobe l'ensemble des barrières depuis la conception du procédé jusqu'aux mesures de secours) en cas d'accident. L'ouvrage du CCPs introduit la notion de barrière de sécurité indépendante (IPL). Dans le cadre de l'application de la méthode, seules les barrières de sécurité qui vérifient les conditions pour être retenues comme IPL sont à valoriser dans le calcul de la fréquence d'occurrence résiduelle du scénario [6].

3.1.3.les étapes de LOPA :

Le principe de la méthode LOPA consiste, après le préalable indispensable d'une classique analyse qualitative des risques (HAZOP, arbres...), à quantifier les fréquences d'occurrence des événements initiateurs et les probabilités de défaillances associées à chaque couche de protection pour évaluer le risque de façon probabiliste discrète. La méthode LOPA est structurée en six étapes [26]:

1. identification des conséquences des scénarios" a pour objet de recenser les scénarios dont l'impact est significatif en termes de gravité et des conséquences. Cette étape permet de fait de limiter le nombre de scénarios à étudier et donc de réduire la durée de l'étude LOPA.
2. "Sélection et développement des scénarios" consiste, à partir de l'inventaire réalisé précédemment et à l'aide des outils classiques d'analyse qualitative des risques (HAZOP, arbres...), à préciser claire mentales étapes des scénarios et à représenter chaque scénario par le schéma du nœud papillon.
3. " identification de l'ensemble des événements initiateurs et évaluation de leurs fréquences" propose, sur la base de l'analyse détaillée des scénarios retenus, d'identifier l'ensemble des Evénements Initiateurs (EI) dont la réalisation est

susceptible de conduire à l'Événement Redouté Central. L'évaluation de la fréquence des EI est estimée à l'aide des valeurs d'occurrence déduites du retour d'expérience, des données issues de la littérature ou des dires d'experts. [28]

4. " identification des fonctions et barrières de sécurité et évaluation de leurs probabilités de défaillances" permet pour chaque scénario d'identifier toutes les mesures permettant de prévenir le cheminement du scénario menant à l'ERC en considérant les critères de qualification des dispositifs retenus en particulier celui de couche de protection indépendante (IPL Independent Protection Layer). Une valeur de la probabilité de défaillance est ensuite associée à chaque barrière de sécurité en remarquant que cette étape de la méthode LOPA fait explicitement référence aux niveaux d'intégrité SIL (Safety Integrity Level) de la norme IEC61511-3. a souligné la difficulté d'identifier la véritable indépendance des couches de protection et indiqué une procédure d'évaluation dans le cas où les barrières ne sont pas indépendantes. Il faut aussi remarquer que cette étape permet la prise en compte de l'ensemble des barrières qu'elles soient techniques, humaines ou organisationnelles [37]. Par exemple, à proposer la méthode LOPAFH pour améliorer l'estimation des probabilités de défaillances des barrières humaines [7].
5. "Estimation de la probabilité d'occurrence de l'Événement Redouté Central (ERC)" constitue la synthèse des étapes précédentes. Cette étape permet de calculer la probabilité d'occurrence de l'ERC en combinant les probabilités d'occurrence des EI et les probabilités de défaillances des couches de protection et d'atténuation.

La fréquence d'un scénario d'accident est donnée par l'équation suivante [9]:

$$f_i^c = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \dots \times PFD_{ij} \quad (II.1)$$

PFD_{ij} = la fréquence de risque acceptable/ f_i^c

Où:

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

f_i^I : Fréquence de l'événement initiateur.

PFD_{ij} : Probabilité de défaillance à la demande de l'ième IPL qui oppose la survenance de la conséquence.

6. Evaluation du risque par rapport à des critères de maîtrise des risques" implique de s'assurer que le risque est bien maîtrisé par rapport à des critères préalablement définis. [28].

3.1.4. Notion de couches de protection :

La méthode LOPA introduit la notion de couches de protection. Elle repose sur le principe que les moyens mis en œuvre dans le but de réduire les risques sont nombreux et diversifiés. Ces différents moyens sont prévus pour intervenir de manière graduelle dans le temps. En d'autres termes, ces différentes couches vont être « sollicitées » tour à tour avec pour objectif de « stopper » le déroulement du scénario d'accident ou d'en réduire les effets.

Les huit couches de protection définies dans la méthode LOPA sont [1]:

- ✓ Conception de procédé « sûr » et la conception des équipements.
- ✓ Conduite du procédé.
- ✓ Alarmes et interventions humaines.
- ✓ Systèmes instrumentés de sécurité (sis).
- ✓ Sécurités physiques.
- ✓ Protections post-décharge.
- ✓ Plans d'urgence internes.
- ✓ Plans d'urgence externes.

Le concept de couches de protection est présenté en figure 06.

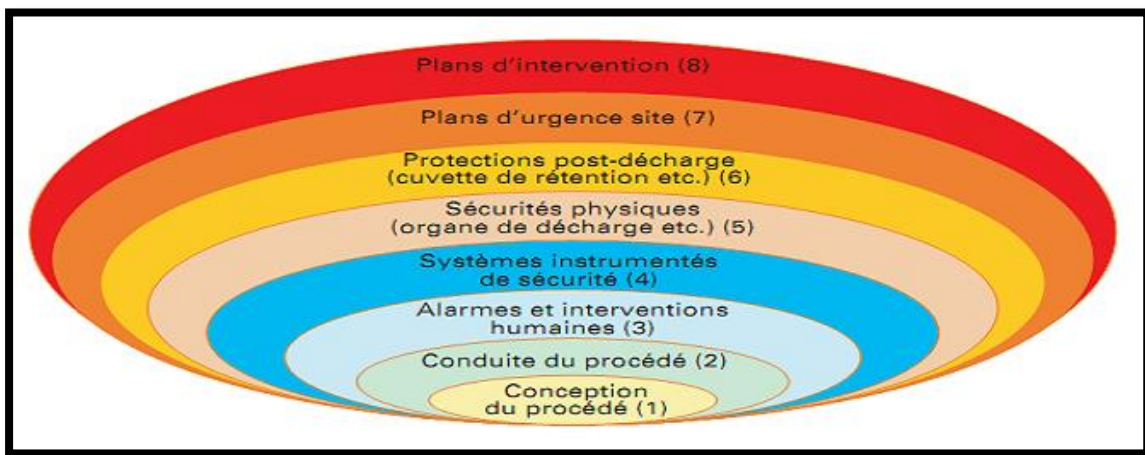


Figure 06 : Différentes couches de protection suivant LOPA.

3.1.5. Avantage de la méthode LOPA :

LOPA présente les avantages suivants:

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

- ✓ En la comparant à d'autres méthodes d'analyse des risques telle que l'arbre de défaillance, la méthode LOPA exige moins du temps et moins de coûts pour sa réalisation. Cette caractéristique lui confère la possibilité d'être appliquée à un grand nombre de scénarios qui sont quantitativement difficiles à évaluer.
- ✓ Elle aide les établissements à décider si le risque est acceptable ou inacceptable.
- ✓ Elle permet aussi de déterminer le SIL associé au SIS.
- ✓ LOPA est un outil d'estimation des conséquences aux limites [25].

3.1.6.Limite de la méthode LOPA :

Cependant LOPA présente des limites :

- ✓ LOPA est un outil qui ne peut pas être appliqué pour tous les scénarios d'accidents surtout ceux qui présentent des combinaisons de défaillances.
- ✓ LOPA est une méthode ne pouvant pas répondre à des quantifications rigoureuses entachées d'incertitude, les ordres de grandeurs utilisées par LOPA peuvent donner lieu à des résultats erronés.
- ✓ En pratique, il est souvent difficile de résumer une probabilité de défaillance en seule valeur numérique (par exemple 10⁻²/an).
- ✓ L'objectivité et la signification des résultats de LOPA dépendent fortement de la qualité des données historiques disponibles. Cependant, statistiquement parlant, il est souvent difficile de trouver des données fiables d'où la nécessité de faire appel à d'autres sources tels que les jugements d'experts. [4].

3.2.L'Arbre de défaillance (AdD) :

L'arbre de défaillances (AdD) a été introduit en 1962 chez Bel Téléphone Laboratoires, dans le cadre d'une évaluation de la sécurité du système de lancement du missile intercontinental « Minuteman ». Aujourd'hui, l'arbre de défaillance est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour les études de risque et de fiabilité. Une analyse par l'AdD peut être qualitative ou/et quantitative, en fonction des objectifs attendus. Les résultats possibles de l'analyse peuvent, par exemple, être:

- ✓ Une liste des combinaisons possibles de facteurs environnementaux, d'erreurs humaines et de défaillances de composants pouvant entraîner un événement critique dans le système.
- ✓ La probabilité que l'événement critique se produira pendant un intervalle de temps spécifié.[16]

L'AdD est basé principalement à l'identification des causes qui peuvent amener un événement indésirable jusqu'à l'arrive à un niveau basic et non composable des causes, à l'aide d'une structure graphique arborescente et symbolisée (Figure 07) [38].

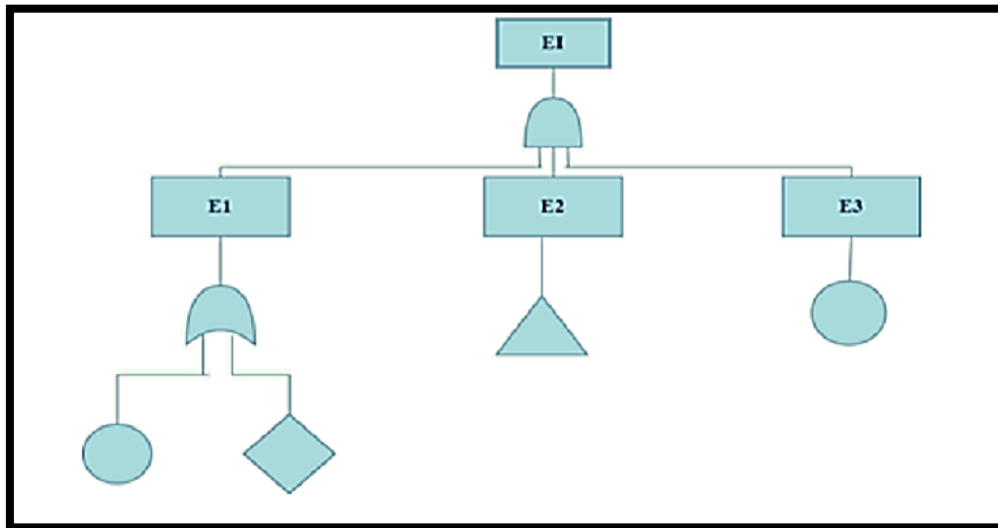
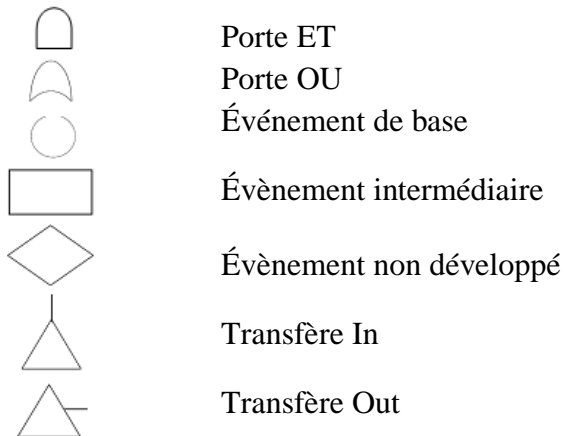


Figure 07 : Schématisation d'un arbre de défaillance. [17].

Avec



3.2.1. Constitution :

L'arbre de défaillances est constitué de trois types d'évènements : les évènements de base, l'évènement non désiré (indésirable) et les évènements intermédiaires. La combinaison d'évènements de base mène vers l'évènement non désiré. Les évènements sont combinés par les portes classiques "ET" et "OU", ou les portes k/n (k parmi n).

Les portes logiques lient les évènements par des relations de causalité. Les principales portes logiques sont représentées dans le tableau 04 [29].

Tableau 04 : Représentation des portes logiques [29] .

Symbole	Nom	Signification
	Porte 'ET'	L'événement sommet S de la porte 'ET' est généré si tous les événements d'entrée sont présents simultanément.
	Porte 'OU'	L'événement sommet S de la porte 'OU' est généré si l'un au moins des événements d'entrée est présent.
	Porte ' k/n '	L'événement sommet S est généré si au moins k parmi n événements d'entrée sont présents.

Dans un arbre de défaillances constitué uniquement de portes 'OU' (respectivement 'ET'), la probabilité d'occurrence de l'évènement indésirable (Sommet) est donnée par l'équation 1 (respectivement 2) :

$$Ps(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i(t)) \quad (II.2)$$

$$Ps(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) \quad (II.3)$$

n est le nombre d'évènement de base, $P_i(t)$ la probabilité de défaillance du i^{ime} composant à l'instant t et $PS(t)$ la probabilité de défaillance du système.

3.2.2.Méthodes de réduction des arbres de défaillance :

L'analyse des systèmes complexes par les arbres de défaillances conduit généralement à des arbres de taille importante ce qui rend le calcul des probabilités difficile, d'où la nécessité des méthodes de réduction comme la méthode des coupes minimales (CM) et celle des diagrammes de décision binaire (DDB) [34].

a) Méthode des coupes minimales :

Une coupe est un ensemble d'évènements qui entraîne l'évènement indésirable, c'est à- dire, la panne de l'élément de la coupe entraîné la panne du système. Une coupe minimale est la plus petite combinaison l'évènement entraînant l'évènement indésirable Ainsi, par définition si un des évènements d'une coupe minimale ne se produit pas, l'évènement indésirable ne se réalise pas, donc c'est une coupe qui ne contient aucune autre coupe.

b) Méthode de diagramme de décision binaire (DDB):

Le diagramme de décision binaire est une représentation des fonctions booléenne basée sur le théorème de Boole, en particulier la décomposition de Shannon. Cette dernière est définie par la conjonction ternaire " Si Alors Sinon " 'If-Then-Else' (ITE).

En 1993, Rauzy a proposé un codage binaire des arbres de défaillances. Chaque évènement est transformé en une variable booléenne x qui vaut 1 si l'évènement s'est produit et 0 sinon. Les portes logiques sont directement traduites en connecteurs logiques.

En choisissant un ordre total sur les variables et en appliquant récursivement la décomposition de Shannon, la table de vérité de toute formule peut être représentée graphiquement par un arbre binaire. Chaque nœud interne de cet arbre code une formule f et peut se lire comme un opérateur si-alors-sinon.

Le DDB est une structure de données qui permet de représenter de façon compacte les relations entre variables booléenne [34], Il est devenu incontournable pour les outils de vérification. Il permet d'analyser l'arbre et de déterminer les coupes minimales.

Le DDB utilisé pour l'analyse d'un arbre de défaillances est connu plus correctement sous le nom d'un DDB Rangé, Réduit. Le DDB est dans sa forme minimale, et Rangé indique que les variables apparaissent dans le même ordre sur chaque trajectoire [34].

3.3.Graphe De Risque :

La méthode qualitative la plus utilisée pour déterminer le niveau de SIL est la méthode dite du « graphe de risque » [10]. Quand cette méthode est adoptée, un certain nombre de paramètres de simplification sont introduits pour décrire la nature de la situation dangereuse lorsque les systèmes relatifs à la sécurité sont défaillants ou non disponibles. Un paramètre est choisi parmi quatre groupes caractéristiques du risque et les paramètres sélectionnés sont alors associés pour décider du niveau de SIL des systèmes relatifs à la sécurité.

Ces quatre paramètres permettent de faire une gradation significative des risques et contiennent les facteurs clés d'appréciation du risque.

3.3.1.Synthèse du graphe de risque :

La procédure simplifiée s'appuie sur l'équation suivante : $R = f \times C$

Où : R est le risque en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité, f est la fréquence de l'événement dangereux en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité et C'est la conséquence de l'événement dangereux.

La fréquence de l'événement dangereux f est supposée être le résultat de trois facteurs exerçant une influence :

- Fréquence et durée d'exposition dans une zone dangereuse.
- La possibilité d'éviter l'événement dangereux.

La probabilité que l'événement dangereux se produise en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité. C'est ce qu'on appelle la probabilité d'occurrence non souhaitée.

On obtient les quatre paramètres de risque suivants :

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

Tableau 05: Descriptions des paramètres du graphe de risque [10].

Paramètre		Description
conséquence	C	Nombre d'accidents mortels et/ou de blessures graves pouvant résulter de l'occurrence de l'événement dangereux. Déterminé en calculant les nombres d'accidents dans la zone exposée lorsque celle-ci est occupée en tenant compte de la vulnérabilité à l'événement dangereux.
occupation	F	Probabilité que la zone exposée soit occupée. Déterminée en calculant la fraction de temps d'occupation de la zone. Il convient de prendre en compte la possibilité d'une probabilité accrue de personnes se trouvant dans la zone exposée afin de rechercher les situations anormales pouvant exister lors de la progression vers l'événement dangereux
Probabilité d'éviter le phénomène dangereux	P	Probabilité que des personnes exposées peuvent éviter la situation de phénomène dangereux qui existe si la fonction instrumentée de sécurité échoue à la sollicitation. Dépend s'il existe des méthodes indépendantes d'alerte des personnes exposées au phénomène dangereux et s'il existe des moyens pour y échapper

Taux de demande	W	Nombre de fois par an que l'événement dangereux se produit si aucun système instrumenté de sécurité n'a été adapté. Peut être déterminé en considérant toutes les défaillances pouvant générer l'événement dangereux et en estimant le taux global d'occurrence
-----------------	---	---

3.3.2. Mise en œuvre du graphe de risque :

Le graphe de risque consiste à hiérarchiser les niveaux de sécurité à partir de quatre paramètres liés à la conséquence du risque sur le personnel ou l'environnement (C), à la fréquence d'exposition au risque (F), à la possibilité d'éviter le danger (P) et à la probabilité d'occurrence du danger (W) tels que présenté sur la figure 08.

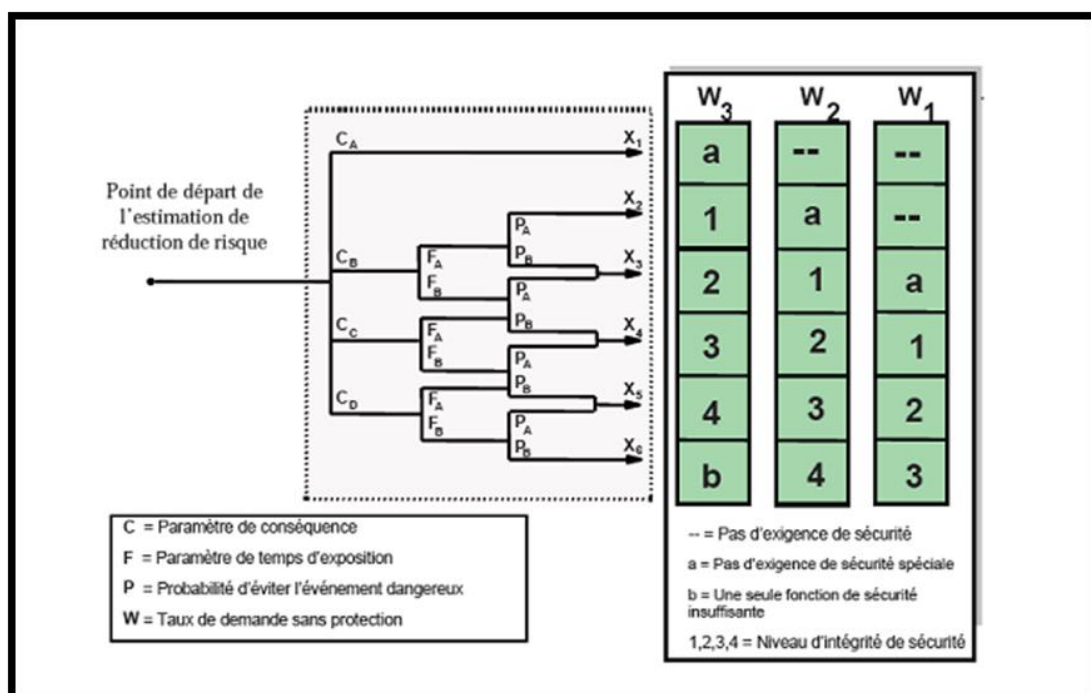


Figure 08: Graphe de hiérarchisation du risque présenté dans la norme CEI 61511-3 [33].

La classification repose sur une hiérarchisation en 6 classes d'exigences graduées de "a" à "b" en passant par SIL1 à SIL 4. La catégorie "a" correspond alors à "aucune exigence particulière de sécurité" tandis que la catégorie "b" correspond à une situation inacceptable (le système instrumenté est insuffisant). [27].

Un exemple de classification des paramètres du graphe de risques est montré au tableau 06 :

Tableau 06 : Paramètres du graphe de risque [5].

Paramètre		Description
Conséquences	C _A	Incident mineur.
	C _B	Effets réversibles.
	C _C	Effet létaux limités au site.
	C _D	Effets létaux en dehors du site.
Exposition	F _A	Exposition rare dans la zone considérée.
	F _B	Exposition fréquente dans la zone considérée.
Possibilité d'éviter le danger	P _A	Possible sous certaines conditions
	P _B	Impossible
Taux de sollicitations	W ₁	Faible probabilité (Accident pouvant se produire)
	W ₂	Probabilité moyenne (Accident déjà observé).
	W ₃	Probabilité élevée (Accident fréquent, observé plus d'une fois).

3.3.3. Etalonnage du graphe de risque :

Les objectifs de la procédure d'étalonnage sont les suivants :

- Décrire tous les paramètres afin de permettre à l'équipe chargée d'établir le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) de porter des jugements objectifs fondés sur les caractéristiques de l'application.
- Garantir que le SIL choisi pour une application répond aux critères de risque définis par la société et qu'il tient compte de risques provenant d'autres sources.
- Permettre de vérifier la procédure de sélection des paramètres.

L'étalonnage du graphe de risque est une procédure qui consiste à attribuer des valeurs numériques aux paramètres du graphe de risque. Ceci constitue la base pour l'évaluation du risque lié au procédé et permet de déterminer l'intégrité requise de la fonction instrumentée de sécurité faisant l'objet de l'étude. A chacun des paramètres est attribuée une plage de valeurs de sorte que, lorsque ces paramètres sont combinés, ils permettent d'effectuer une évaluation nuancée du risque qui existe en l'absence de la fonction particulière de sécurité.

De ce fait, on détermine une mesure du degré de confiance à attribuer à la fonction instrumentée de sécurité. Le graphe de risque se rapporte à des combinaisons particulières de paramètres de risque et de niveaux d'intégrité de sécurité. La relation entre les combinaisons de paramètres de risque et de niveaux d'intégrité de sécurité est établie en considérant le risque tolérable associé aux dangers spécifiques [5].

3.4. La Grille de criticité :

Cette méthode consiste à positionner les différents scénarios d'accidents (sans prendre en considération les barrières de sécurité) sur une matrice de criticité, puis à déterminer les critères pour passer d'une situation dangereuse à une situation acceptable grâce aux barrières de sécurité mises en place. Les échelles de gravité et de probabilité des événements permettent de classer les différents risques répertoriés sur la grille de criticité. Chaque exploitant doit définir, en fonction des spécificités de son établissement, la grille de criticité qui semble la mieux adaptée. Dans le cas d'un site ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement), l'exploitant peut se reposer sur les échelles de gravité et de probabilité des deux arrêtés datant du 21/09/05 et également sur la grille de criticité (Tableau 07) issue de la circulaire d'application de l'arrêté relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Comme il n'est pas possible d'éliminer tous les risques potentiels, il est nécessaire de définir des critères d'acceptabilité en 3 zones :

- Une zone de risque élevé inacceptable car trop dangereux et/ou trop fréquent, figurée par le mot «NON».
- Une zone de risque intermédiaire, figurée par le sigle «MMR» (Mesures de Maîtrise des Risques), pour lesquels il convient d'ajouter des barrières de sécurité pour réduire le risque.
- Une zone de risque acceptable, qui ne comporte ni «NON» ni «MMR» [2].

Tableau 07 : Grille d'analyse de la justification des mesures de maîtrise du risque.

Probabilité \ Gravité	E	D	C	B	A
Désastreux	Non partiel / MMR2*	NON 1	NON 2	NON 3	NON 4
Catastrophique	MMR 1	MMR 2*	NON 1	NON 2	NON 3
Important	MMR 1	MMR 1	MMR 2*	NON 1	NON 2
Sérieux			MMR 1	MMR 2	NON 1
Modéré					MMR 1

Si les effets et/ou la probabilité estimée conduisent à un positionnement de l'accident en dehors des zones de risques "accepté", il est nécessaire de rajouter d'autres barrières de

sécurité. Dans le cadre de la norme CEI 61511, les barrières de sécurité complémentaires seront des fonctions instrumentées de sécurité (FIS). Ces FIS devront conduire à ce qu'aucun risque "inacceptable" ne subsiste. Une barrière instrumentée de sécurité agit généralement sur la fréquence de l'événement redouté, elle n'intervient pas sur la dangerosité de l'accident. Ainsi, la barrière tend à décaler vers la gauche la probabilité d'occurrence de l'accident. Ramené aux niveaux d'un SIL, le décalage d'une case vers la gauche correspond à SIL 1 (réduction du risque d'un facteur 10), de 2 cases à SIL 2 et ainsi de suite.

Cette règle implique que la discrétisation en probabilité soit d'une décade par classe.

Cette approche est simple à mettre en œuvre et le positionnement des scénarios d'accident est aisé.

Elle est utilisable sur des technologies opérationnelles depuis une période représentative et ne peut s'appliquer à des procédés nouveaux sans retour d'expérience. A l'instar du graphe de risques, cette méthode trouve sa difficulté dans le calibrage de la matrice [2].

3.5. La Méthode BORA :

La méthodologie BORA ou l'analyse des barrières et des risques opérationnels (Barrier and Operational Risk Analysis) est un projet de recherche mené dans la période 2003-2006 développée à l'Université Norvégienne de Sciences et Technologies (NTNU). Son objectif est de faire une analyse détaillée et quantitative de la performance des barrières BORA permet de quantifier la probabilité de défaillance (PFDavg) des barrières de sécurité mais permet également de prendre en compte les facteurs techniques, opérationnels et organisationnels, qui influent sur la performance des barrières. Ces derniers sont utilisés pour ajuster la probabilité des défaillances de base conduisant à l'échec de la barrière.

La méthodologie BORA combine plusieurs outils : le bloc diagramme barrière (BDD) qui permet de situer la fonction de la barrière de sécurité dans le scénario d'accident, l'arbre de défaillance (AdD) utilisé pour identifier les défaillances et la séquence de ces derniers qui conduisent à l'échec de la barrière et finalement, le diagramme d'influence qui permet d'identifier les facteurs influençant la performance et de corriger la probabilité des événements de base. La méthode BORA est implémentée selon les étapes explicitées ci-après. [8].

3.5.1. Déroulement de la méthode BORA :

La démarche généralement retenue pour mener une analyse par la méthode BORA est illustrée par la figure 09. Cette démarche est basée sur différents modèles génériques de risque qui sont communément utilisés dans l'évaluation des risques.

La même figure (figure 09). Montre les principales étapes d'élaboration de cette méthode et leur relation séquentielle.

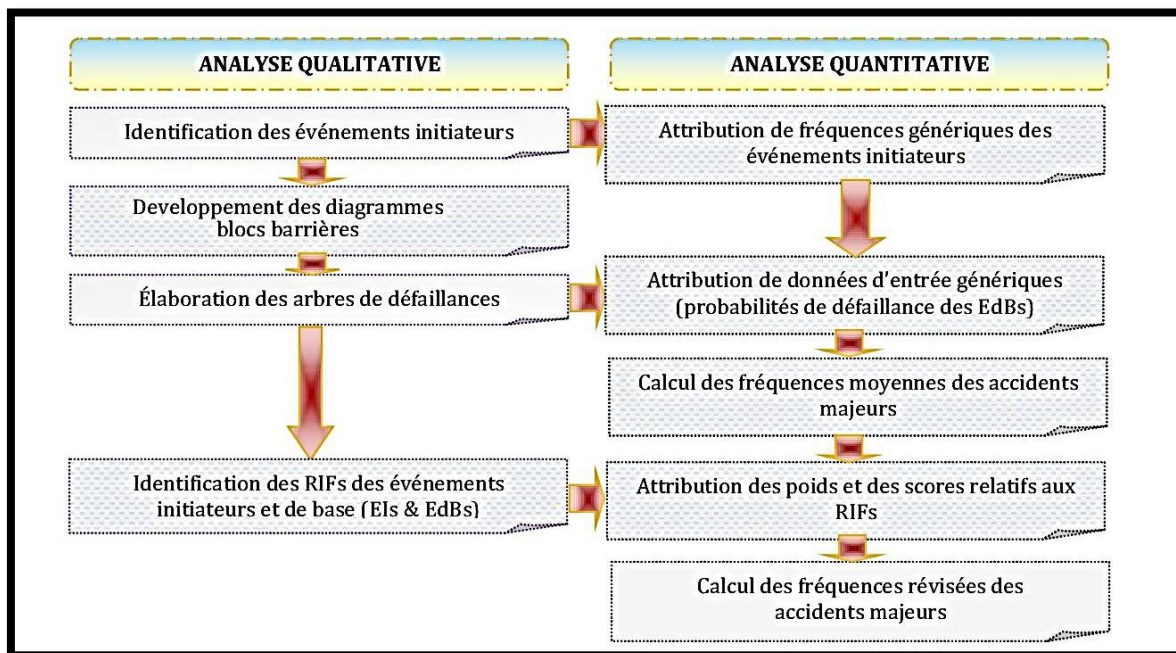


Figure 09 : Procédure de BORA conventionnelle.

3.5.2. avantages et limites de la méthode BORA :

BORA présente les avantages suivants :

- BORA est un outil très pratique et flexible permettant de déterminer les facteurs d'influence des risques qui peuvent altérer les performances des barrières de sécurité.
- BORA prend en compte les facteurs opérationnels (humains, techniques et organisationnels) tels que sont rarement pris en compte dans les autres approches.
- Sa robustesse réside dans son caractère combinatoire d'analyse qui est à la fois qualitatif et quantitatif, inductif et déductif en combinant les connaissances de base des méthodes, arbre de défaillances, arbre d'évènements et le diagramme de fluence des risques.
- BORA offre une nouvelle vision améliorée d'analyse des risques et d'évaluation des performances des barrières de sécurité en introduisant une analyse des facteurs d'influence du risque en attribuant aux RIFs des "Poids" et des "Scores".
- BORA est une approche déterministe complémentaire qui permet d'analyser les barrières de sécurité en profondeur à travers d'une évaluation purement expertisée qui est considérée comme un appui de son aspect déterministe.

Cependant BORA présente certaines limites:

- Les RIFs ne sont pas toujours indépendants (influence des RIFs entre eux), alors que leur estimation ne tient pas en compte cette dépendance. ce qui rend leur évaluation incertaine quelque part.
- Les facteurs d'influence du risque (RIFs) ne sont pas toujours bien définis. notamment, dans le cas des facteurs externes ayant une influence sur les performances des barrières de sécurité.
- L'objectivité et la robustesse des résultats de BORA dépendant fortement, d'une part, de la qualité du jugement d'experts. cependant, il est souvent difficile de trouver un jugement d'experts pertinent dépourvu de toute incertitude.

3.6. Hazard and Operability Study (HAZOP):

La méthode HAZOP est un outil qualitatif très utilisé en particulier dans l'industrie pétrochimique. Généralement HAZOP représente une extension de l'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE). Elle consiste à détecter des problèmes potentiels qui peuvent causer un écart par rapport à la conception d'origine et à voir les causes et les conséquences de ces écarts. Cette méthode est mise en œuvre à la fin de phase de conception et précisément au début de phase de réalisation des systèmes industriels puisqu'elle s'appuie sur les plans de circulation des fluides et les schémas détaillés PID (Piping and instrumentation diagram) du système étudié [21] [11]

Son déroulement est comme suit:

Après avoir décomposé le système en parties (lignes de circulation), tous les paramètres associés au fonctionnement du système doivent être identifiés, généralement les paramètres rencontrés concernent la température, la pression, le débit et le temps [21]. Ces derniers peuvent subir des contraintes intrinsèques ou extrinsèques qui vont rendre anormal le fonctionnement du système.

Citons par exemple:

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

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

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

différents scénarios d'accidents.

Conclusion :

Les normes de sécurité fonctionnelle IEC 61508 et IEC 61511 définissent une démarche d'analyse du niveau d'intégrité des sécurités (SIL) d'un système. Elles permettent de définir le niveau SIL qui doit être atteint par un SIS qui réalise la fonction des sécurités suite une analyse de risque. Plus le SIL à une valeur élevée plus la réduction Du risque est importante.

Dans le chapitre suivant, nous avons choisi la méthode semi-quantitative LOPA pour l'objet d'une étude d'application sur un système industriel (Four de Rebouillage H-201).

Partie pratique

Application de la

Méthode LOPA

Sur le four

De Rebouillage

H-201

Chapitre III

Introduction :

L’Algérie occupe une place importante dans l’ensemble des pays traitement de Gaz. Toutefois ces dernières années, les établissements industriels ont connu une augmentation rapide du nombre d’accidents industriels majeurs où les incendies et les explosions occasionnant des impacts et des effets graves sur les personnes, les biens et l’environnement.

Afin d’éviter de tels phénomènes dangereux, la SONATRACH a essayé de renforcer nombre d’outils ou l’analyse des risques au niveau de ces sites. Pour notre étude, la méthode LOPA est la méthode utilisée sur le système Four de Rebouillage H-201 au niveau de MPP0 de Hassi R’mel.

1. Présentation de la région de Hassi R'mel

1.1. Situation géographique :

Le gisement de Hassi R'mel est situé entre les wilayas de Ghardaïa et Laghouat, dans cette région relativement plate du Sahara l’altitude moyenne est d’environ de 750 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (140 mm/an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% en hiver.

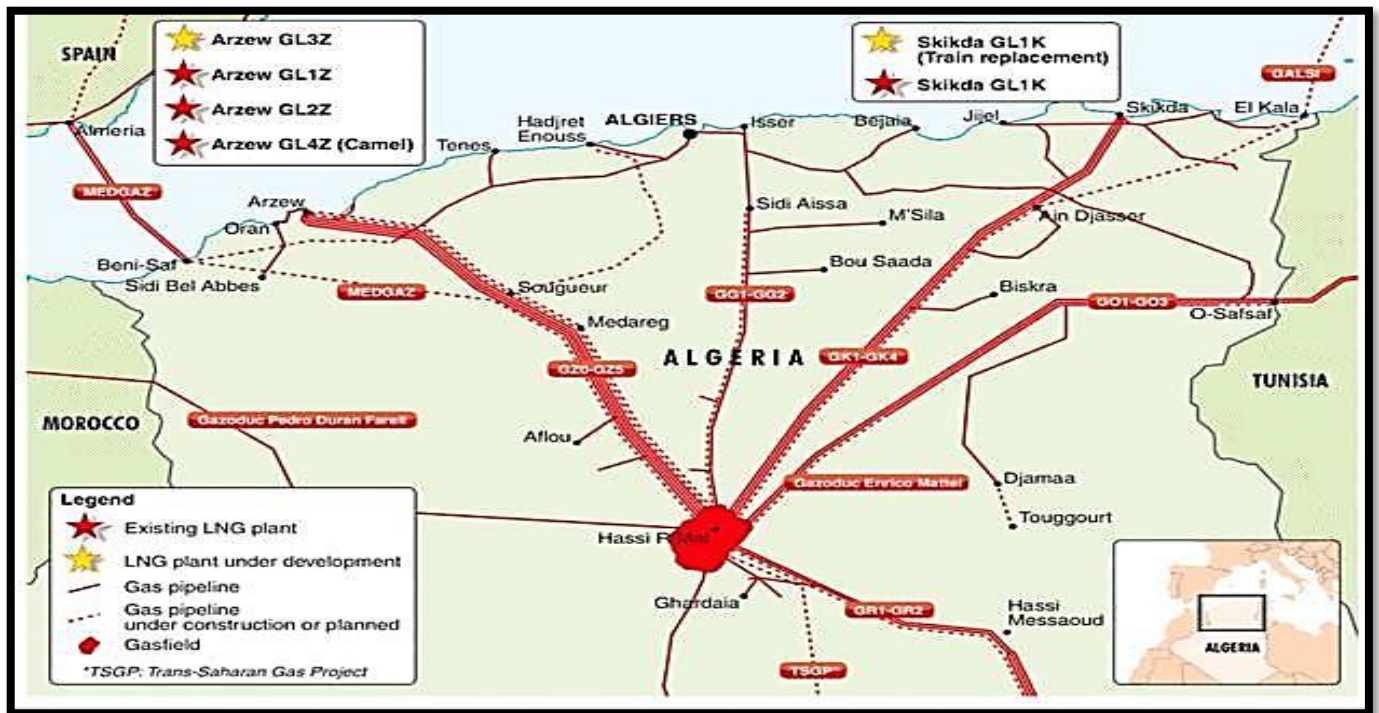


Figure 10 : Situation géographique “ Hassi R'mel ” [Plan Interne d’Intervention SONATRACH ,2010]

1.2. Développement du champ de Hassi R'mel :

La première compagnie intéressant la région a eu lieu en 1951, le forage du premier puits d'exploitation a eu lieu en 1952 à quelques Km de BERRIANE.

Dans le champ de Hassi R'mel, le premier puit HR1 a été foré en 1956 sous le sommet de l'anticlinal que constitue le gisement de Hassi-R'mel. Ce puit a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât dans le trias gréseux à une pression de 310 ATM et 90°C.

La profondeur atteinte est de 2332m, révélant la présence d'un réservoir de gaz humide. Le développement de Hassi R'mel s'est trouvé étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves recelées par ce gisement, plus de 2000 milliards de m³ ont constitué un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays.

Des étapes importantes ont marqué le développement du champ de Hassi-R'mel :

De 1957-1960 : furent forés huit autres puits pour la délimitation du gisement et l'évaluation des réserves estimées initialement à 2 800 milliards de m³, sous une superficie de 3500 kilomètres carrés.

1961 : Mise en exploitation de 02 unités de traitement de gaz d'une capacité de 1.3 milliards de m³ par an.

1969 : Mise en exploitation de 04 unités supplémentaires pour augmenter la capacité à 4 milliards m³ par an.

Le 24-02-1971 : Nationalisation historique des hydrocarbures qui permet l'augmentation de la capacité de traitement de Hassi R'mel à 14 milliards de m³ par an.

1975 : SONATRACH : met en œuvre un plan directeur de développement pour augmenter la capacité de production à 94 milliards de m³ par an et maximiser la récupération des hydrocarbures liquides par un recyclage partiel du gaz.

1985 : Réalisation et mise en œuvre de l'usine des communs pour récupérer les gaz moyenne et basse pression et produire le GPL à partir des modules 0 et 1.

Juin 1987 : Démarrage du centre de traitement de gaz CTG/Djebel-Bissa d'une capacité de 1,4 milliards m³ par an.

Avril 1999 : Démarrage de la Station de récupération des gaz associés (SRGA) d'une capacité de 1,4 milliards m³ par an.

Janvier 2000 : Démarrage du centre de traitement de gaz CTG/HR-Sud d'une capacité de 2,4 milliards m³ par an.

2003 : Réalisation du projet Boosting qui est sensé d'augmenter la pression d'entrée des modules dans le but est de maximiser la récupération des liquides.

1.3. La capacité de production actuelle

Le développement final du champ a permis d'atteindre les capacités de production suivantes : 100 milliards de mètre cubes de gaz par an, 12 millions de tonne de condensât par an, 3.5 millions de tonnes de GPL par an, 700 milles de tonnes de pétrole brut par an.

1.4. Installations gazières de Hassi R'mel :

La nature de l'effluent et l'homogénéité du réservoir ont conduit au choix d'un modèle de développement basé sur un schéma d'exploitation alterné, comportant trois zones d'exploitation (Nord, Centre et Sud) entre lesquelles ont été intercalée deux zones de Réinjection. cinq modules de traitement de gaz (0, 1, 2, 3, et 4) et un station de BOOSTING.

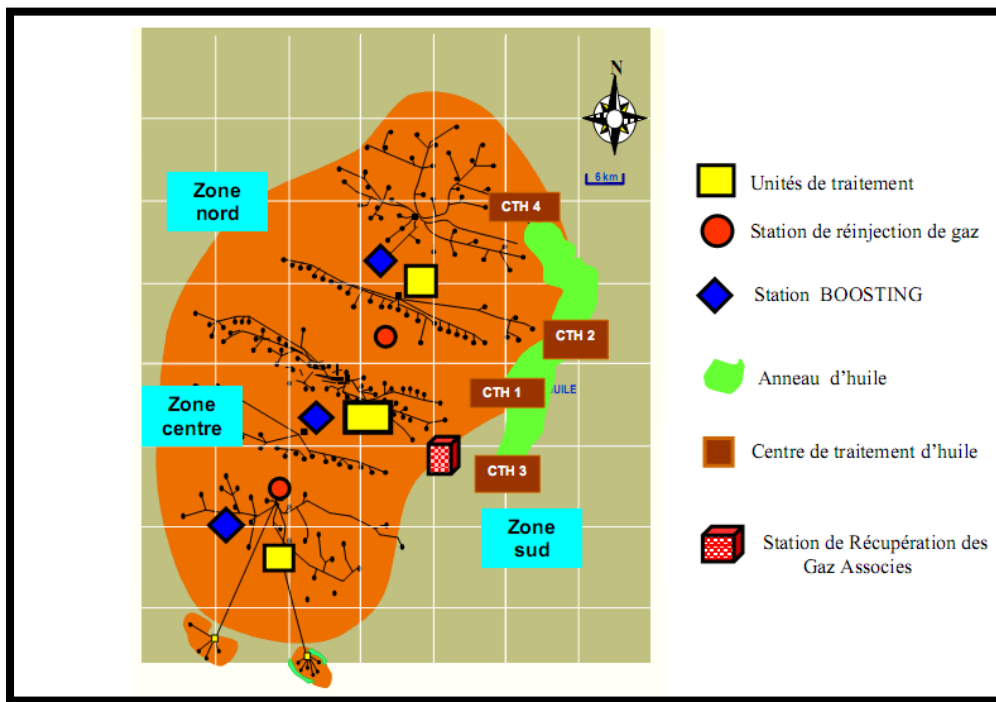


Figure 11 : le champ gazier de Hassi R'mel.

1.5. Présentation du Module (MPP0) :

Le Module (0), désigne une installation de traitement de gaz. Il est le premier à être construit à Hassi Ramel par les français en 1961 avec deux unités seulement.

En 1971 à 1973 il y a la construction et mise en service de six unités identiques qui permettent, actuellement, de sépare le condensât et la récupération de gaz de vente.

Dès 1983 à 1986 il y a la construction et mise en service de la phase B (train) par un contrat signé entre l'entreprise nationale SONATRACH et l'entreprise Japonaise JGC Corporation, qui permet de stabilisé le condensât et la récupération de GPL.

Le MPP (0) a une mission importante au niveau de la région de Hassi R'mel, comme tous les autres modules, car il traite en moyenne plus de 30 millions de m³/jour de gaz brut.

Le MPP(0) est alimenté par 16 puits qui sont situés dans zone centrale de Hassi R'mel et regroupés dans trois collecteurs : E4(HR :11,16,12,23 et 57), E5(HR : 53,54,32,33,10 et 43) et W7(HR : 15,18,19 et 20). A l'entrée du Module les collecteurs sont regroupés dans un MANIFOLD qui va aller vers le Boosting pour une augmentation de pression jusqu'à 120 bars en moyenne.

Le module est constitué de différents services qui veillent à maintenir un bon régime de fonctionnement veillent à maintenir un bon régime de fonctionnement de l'usine.

On distingue :

- ✓ Service De Sécurité.
- ✓ Service Maintenance.
- ✓ Service Exploitation.

2. Description générale du de Rebouillage four H 201 :

2.1.les différentes parties du Four :

a. Partie rebouilleur :

Cette partie contient les éléments nécessaires pour l'allumage du four.

- ✓ 12 bruleurs pilotes.
- ✓ 12 bruleurs principaux.



Figure 12 : Vue de face du four H201.

b. Description du circuit fuel gaz :

Le fuel gaz passe par deux circuits différents :

- **Circuit pilote :** Le passage de fuel gaz dans ce circuit est commandé par les vannes tout ou rien (SDV 241, SDV 251, SDV 231 et SDV 271-1 à 12), la pression du fuel gaz est contrôlée par une vanne PCV 221.
- **Circuit bruleur principal :** Le passage du fuel gaz dans ce circuit est commandé par les vannes tout ou rien (SDV 211, SDV 221, SDV 231 et FV 281-1 à 12) et une vanne de débit FCV 271.

La présente spécification concerne la séquence de démarrage, les sécurités, et les différentes consignes relatives aux fours rebouilleurs : H201 A /B/C.

Le principe de démarrage et de conduite de chaque four est la suivante :

- Mise en condition de démarrage et allumage des pilotes et bruleurs en local par action manuelles sur les organes locaux, ou sur la face avant du tableau de commande local.
- Conduite du four depuis la salle de contrôle par surveillance des diverses indications de températures, pressions, débit, ainsi que les différentes alarmes présentes au tableau de contrôle.

La seule action possible depuis la salle de contrôle concernant les sécurités est l'arrêt du four par action sur bouton poussoir de **Mise Hors Service** du four. Cette action à pour conséquences de fermer les vannes automatiques d'alimentation en gaz des pilotes et des bruleurs.

2.2. Alarmes, sécurité, signalisations :**a. Tableau local :**

Figure 13 : tableau local.

b. Signalisations :

Un certain nombre de signalisations sont reportées sur le tableau local afin de faciliter le démarrage et la surveillance du four depuis la salle de contrôle.

Tableau 08: Principe de signalisation des composantes.

Circuit	Composant	Nombre de composant	Position
Pilote	Electrovanne	12	Fermée
	Electrovanne d'alimentation	3	Ouverte
Bruleur	Vanne manuelle	12	Ouverte
	Electrovanne d'alimentation	3	Fermée
/	Registre de la cheminée		Ouverte
			Fermée
air	Vantelles d'arrivée		Ouverte
Pilote	Détecteur de flamme	12	Présence individuelle de flamme
air	Ventilation	1	Arrêt
		1	En cours
		1	autorisation
Pilote	Allumage Pilote	1	autorisation
Bruleurs	Allumage bruleurs	1	autorisation

c. Alarme :

Seules les alarmes ayant des actions de sécurité sont signalées au tableau local, enparallèle avec la signalisation du tableau de salle de contrôle.

Tableau 09 : Alarmes et descriptions.

Alarme	code	description
PAHH	201	Pression très haute gaz combustible.
PALL	201	Pression très basse combustible.
PAHH	231	Pression très haute sortie condensat.
TAHH	231	Température très haute sortie condensat.
FSSL	201	Débit très bas condensat.
TAHH	281	Température très haute entre convection /radiation.
TAHH	271	Température très haute fumées.
HRS	/	Arrêt d'urgence, hors service SDC (Salle De Contrôle).
BAL	201	Arrêt manque de flammes.
BAL	211	Ouverture bruleur non autorisé.
BAL	221	Alarme défaut de flammes.

Ces alarmes sont regroupées sur un ensemble de verrines, sur la partie supérieure du tableau local, au-dessus des différents boutons poussoirs, commutateurs, voyants, utilisés pour les

séquences d'automatisme.

d. Salle de contrôle :

La seule action de sécurité accessible au tableau de la salle de contrôle est la mise hors service du four, soit pour des conditions de sécurité en cas d'arrêt d'urgence, soit pour un arrêt normal à distance. Cet arrêt est toujours suivi d'actions locales, pour la mise en sécurité du four, par fermeture manuelle de toutes les vannes d'alimentation de gaz sur les circuits pilotes et brûleurs.

Toutes les indications de mesures, tous les enregistrements, sont faits uniquement en salle de contrôle. Aucune mesure analogique n'est indiquée localement sur le tableau situé au pied du four. Les seules indications locales sont données par les manomètres et thermomètres situés directement sur les tuyauteries, ou sur le four.

Les alarmes sont regroupées dans une centrale d'alarmes qui actionne le circuit Klaxon en cas de situation anormale.

2.3.Rôle du Four de Rebouillage H-201 :

L'équipement étudié est un Rebouilleur de colonne. Celui-ci se présente sous la forme d'un four dans lequel du fuel gaz est brûlé pour réchauffer le liquide en pied passant dans un serpentín.

Le condensat (température environ 150°C) venant du fond de la colonne T-201 est envoyé au moyen des pompes P- 201A/B, au Four de Rebouillage H-201 à travers 10 passes pour être chauffé après son passage par deux zones : La zone de convection puis la zone de radiation qui travaillent respectivement à environ 350 °C & 550 °C.

Le fluide sortant du rebouilleur, partiellement vaporisé à environ 180 °C, est renvoyé à la colonne pour assurer le rebouillage nécessaire à son fonctionnement.

Les caractéristiques de ce Four sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Caractéristiques du Four Rebouilleur H-201[Rapport d'inspection équipement SONATRACH, 2013]

Caractéristiques	valeurs
équipement	rebouilleur
substance	Gaz/ condenst
T service (°C)	180
T calcul (°C)	370
P service fuel gas (barg)	1.5
P service (barg)	25
P calcul (barg)	27.5
Volume (m ³)	33

2.4. Analyse structurelle et fonctionnelle

Pour une meilleure compréhension du système faisant l’objet de notre étude, nous avons opté pour la description du système. Cette dernière se fait à travers une analyse structurelle et fonctionnelle qui semble indispensable. Le but de cette analyse est de décomposer le système en identifiant les différentes fonctions qui composent chaque partie du système étudié.

Le tableau 11 résume tous les résultats obtenus par cette analyse :

Tableau 11 : Analyse fonctionnelle et structurelle.

Système	Sous-système		Equipement		Composant	
	Code	Description	Code	Description	Code	Description
	SS ₁	Sous-système de circuit d'alimentation du rebouilleur.	E ₁₁	Circuit comburant (Fuel Gaz) assure l'alimentation en combustible.	C ₁₁₁	FCV271 : contrôle la température de sortie du circuit condensat.
					C ₁₁₂	PCV 211 : vanne de contrôle de pression du gaz.
					C ₁₁₃	12 pilotes : garantissent une flamme continue pour l'amorçage du fuel gaz SDV241/251.
					C ₁₁₄	FV281-1 à 12 : 12 brûleurs (réalise la combustion de fuel gaz)..
	E ₁₂	Circuit liquide (Condensat) : assure l'alimentation en huile des échangeurs.	C ₁₂₁	Pompes P201 A/B/C pour pomper le condensat à l'entrée du four.		
			C ₁₂₂	Vanne FV33 : régule le débit de condensat.		
			C ₁₂₃	Serpentin : assure la circulation et l'échauffement du condensat.		
E ₁₃	Circuit d'air : assure une meilleure combustion.	C ₁₃₁	K201 : Soufflantes d'air			
SS ₂	Sous-système de contrôle des paramètres du procédé.	E ₂₁	Contrôle de débit (Contrôle le débit du liquide à l'entrée du four).	C ₂₁₁	DCS (SOLVER) : Adaptation du débit de condensat à l'entrée de four par action sur la vanne FV 33.	

					C ₂₁₂	FT 33 : Débitmètre, mesure le débit du liquide à l'entrée du four.
			E ₂₂	Contrôle de la température du liquide à l'intérieur et à la sortie du four.	C ₂₂₁	DCS (Solveur) : adaptation de la température du liquide à la sortie du four par action sur la vanne TV201.
					C ₂₂₂	TI (Thermocouple) : mesure la température du liquide à la sortie du four.
					C ₂₂₃	TI : Indicateurs de température locale.
	SS ₃	Sous-système d'alarmes : conçu pour alerter l'opérateur par un signal audio-visuel.	E ₃₁	FAL 201 : alarme de bas débit du condensat à l'entrée du four. PAL/ PAH 231 : alarme de basse/ haute pression de fuel gaz.	C ₃₁₁	FT 201 (Débitmètre) : mesure le débit du liquide à l'entrée de four. PT 231 (Transmetteur de pression) : mesure de la pression de fuel gaz.
					C ₃₁₂	DCS : Adaptation de la mesure de température, débit et pression à une alarme audio-visuelle dans la salle de contrôle.
	SS ₄	Sous-système d'arrêt d'urgence qui met le four à l'état d'arrêt avec la coupure de l'alimentation en fuel gaz.	E ₄₁	FALL 201 : alarme de très bas débit du condensat. à l'entrée du four. PALL/PAHH 201 : alarme de très basse ou très haute pression de fuel gaz.	C ₄₁₁	FT 201 : Débitmètre. PT 201 : Transmetteur de pression. BAL : 12 Détecteurs de flamme (Ultraviolet).
					C ₄₁₂	SDV211/ SDV221 : Isolement de la ligne de gaz combustible.

3. Évaluation des risques liés le four et identification des scénarios d'accidents possible :

- ✓ Élaboration d'une étude HAZOP sur le système "Four Rebouilleur" :

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

Le tableau de HAZOP (12) montre ces différentes causes et conséquences et barrières de sécurités existantes au niveau du four rebouilleur H-201.

Tableau 12 : Feuille de présentation HAZOP.

SYSTEME ÉTUDIÉ : Four Rebouilleur H-201									
N°	Mot-guide	Élément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protections	Commentaires	Mesures à prendre	Responsable des mesures
1	NE PAS FAIRE/MOINS	Débit de condensât	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne FICA-136V	Pas du liquide dans H-201, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- Opérateurs - FICAL-136 - FZL-137			
				Mauvais fonctionnement de FICA-136V	Pas du liquide dans H-201, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FICAL-136 - FZL-137			
				Mauvaise manipulation sur l'une des vannes.	Pas de débit dans l'un des pass du H-201, température élevée, endommagement de serpentin (incendie) & arrêt d'unité	- FI-138 - TRAH-121-3 - FICAL-136 - FZL-137			

Tableau 12 : Feuille de présentation HAZOP (suite).

SYSTEME ÉTUDIÉ : Four Rebouilleur H-201									
N°	Mot-guide	Élément	Déviatiion	Causes possibles	Conséquences	Protections	Commentaires	Mesures à prendre	Responsable des mesures
2	PLUS	Température de condensât	Plus de température	Mauvais fonctionnement de la vanne TRCA-109V, combustion importante dans H-201	Température élevée à la sortie du H-201, endommagement possible du serpentin	- TI-135 - TRAH-121-3~6 - TRCAH-109 - TZH-108			
3	MOINS	Température de condensât	Moins de température	Mauvais fonctionnement de TRCA-109V, faible combustion dans H-201	Basse température à la sortie de H-201, passage possible de produit en OFF-SPEC	- TI-135		Envisager l'installation d'une alarme de basse température du condensât en sortie.	

Tableau 12 : Feuille de présentation HAZOP (suite).

SYSTEME ÉTUDIÉ : Four Rebouilleur H-201									
N°	Mot-guide	Élément	Déviaton	Causes possibles	Conséquences	Protections	Commentaires	Mesures à prendre	Responsable des mesures
4	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvais fonctionnement des vannes.	Pas de fuel gaz pour H-201, basse température à la sortie de H-201, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - FRAL-142 - TRCA-109			
				Mauvais fonctionnement de la vanne.	Pas de fuel gaz pour H-201, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-201, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142			
					Dégagement de fuel gaz en atmosphère, explosion possible & arrêt d'unité	- TRCA-109			

Tableau 12 : Feuille de présentation HAZOP (suite).

SYSTEME ÉTUDIÉ : Four Rebouilleur H-201									
N°	Mot-guide	Élément	Déviations	Causes possibles	Conséquences	Protections	Commentaires	Mesures à prendre	Responsable des mesures
4	NE PAS FAIRE/ MOINS	Débit de gaz combustible	Pas/ Moins de débit	Mauvaise manipulation sur la vanne manuelle à l'entrée/sortie de TRCA-109V	Pas de fuel gaz pour H-201, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-101, passage possible de produit en OFF-SPEC	- Opérateurs (locaux) - PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142 - TRCA-109			
				Mauvais fonctionnement de TRCA-109V.	Pas de fuel gaz pour H-201, basse pression de fuel gaz, basse température à la sortie de H-201, passage possible de produit en OFF-SPEC	- PAL-126 - PZL-127 - FRAL-142			

4. Application de méthode LOPA au four rebouilleur H-201 :

Étape 1: Établissement des critères d’acceptabilité :

Dans notre cas, l’évaluation d’acceptabilité de la gravité des conséquences des scénarios d’accidents et des fréquences des conséquences réduites sera faite par référence à la grille de criticité suivante (tableau 13) :

Tableau 13 : Grille de criticité adoptée par SH DP HRM [SONATRACH, 2008].

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

Étape 2 : Analyse des scénarios :

La méthode LOPA s'inspire les différents éléments de ses scénarios à partir des résultats fournis par l'HAZOP (TAB. 12).

Les scénarios retenus sont:

- Endommagement du serpentin (incendie) & arrêt d'unité.
- Dégagement du fuel gaz dans l'atmosphère, incendie & arrêt du processus.
- Haute pression à l'intérieur du four H-201, explosion & arrêt du processus.

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

- Défaillance de la vanne FICA-136V.
- Défaillance de l'opérateur (Mauvaise manipulation sur l'une des vannes HXC- 907V/908V)
- Défaillance de la vanne HXC-907V/908V.

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

Étape 3: Estimation des fréquences des événements initiateurs :

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

Tableau 14 : Fréquences des évènements initiateurs.

	Fréquences (/an)
scénario 1	1,00E-01
scénario 2	3,01E-2
scénario 3	3,01E-3

Étape 4: Identification des couches de protection indépendantes :

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

Les couches de protection indépendantes retenues dans notre étude sont les suivantes:

- Alarme & Opérateur.

- Système d'arrêt d'urgence.
- Trappe.

Les probabilités de défaillance à la demande de ces couches de protection sont données par le tableau (15).

Tableau 15 : Probabilités de défaillance à la demande des IPLs.

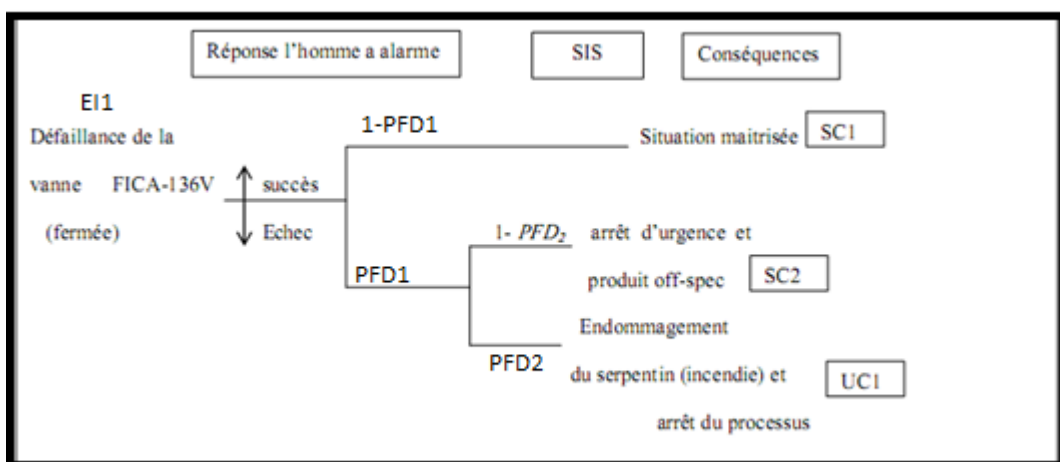
IPL	PFD
Alarme & opérateur	1,09E-01
SIS	1,00E-02
Trappe	3,16E-03

À noter que ces probabilités sont estimées en se référant à plusieurs sources telles que, la norme IEC 61511 [20], un ouvrage référence du Centre of Chemical Process Safety [9] et des données fournies par le concepteur du système.

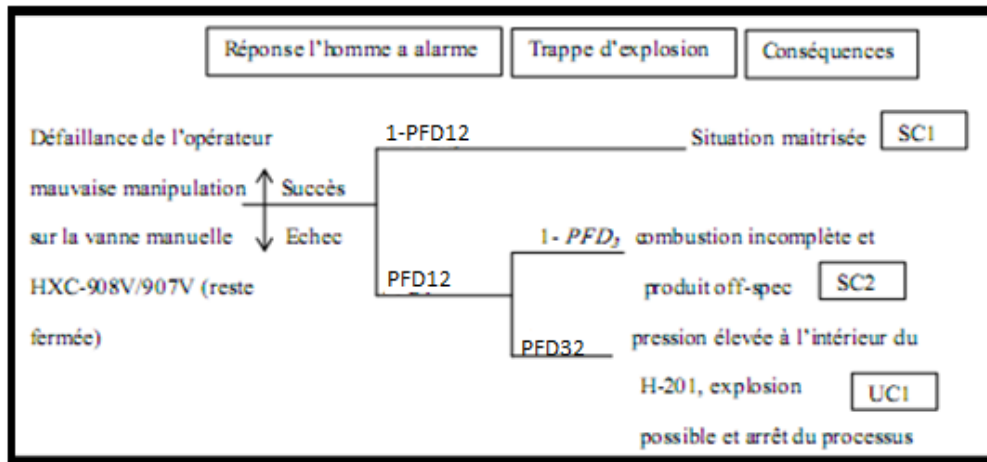
Étape 5 : Identification des scénarios d'accidents et détermination de leurs fréquences :

a) Élaboration des scénarios :

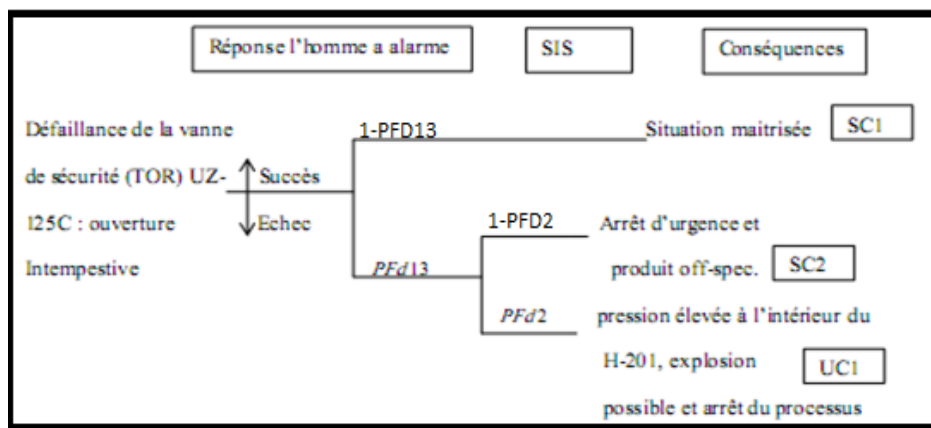
Les scénarios d'accidents issus de LOPA sont représentés par des Arbres d'Événements (AdE) (voir Chap. II). Le choix de ce modèle nous permet de représenter clairement l'enchaînement des événements, en précisant leurs fréquences et par conséquent la fréquence des scénarios correspondants.



Scénario 1



Scénario 2



Scénario 3

Figure 14 : Les différents scénarios d'accidents.

b) Calcul de la fréquence de la conséquence réduite de chaque scénario d'accident

La fréquence des conséquences réduites des scénarios d'accidents 1, 2 et 3, est calculée en utilisant l'équation (voir étape 5 de LOPA chap. II). Les opérations du calcul sont comme suit:

Scénario 1 : $f_1^c = 1,09E-04 /an.$

Scénario 2 : $f_2^c = 1.03E-05/an.$

Scénario 3 : $f_3^c = 3,28 E-06 /an.$

Étape 6: Évaluation des scénarios d'accidents par rapport aux critères d'acceptabilité :

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

mise en place des IPLs.

À partir des fréquences F_{np} et F_t , la norme IEC 61508 (IEC 61508, 2000) détaille la manière dont cette méthode peut être utilisée pour déterminer le SIL d’une fonction de sécurité faiblement sollicitée. La probabilité moyenne de défaillance à la demande de cette fonction (PFD_{avg}) est déterminée selon la procédure illustrée à la figure 15. Dans cette figure, il est clairement mis en évidence que le risque initial (risque inhérent au système opérationnel, qualifié de EUC–Equipment Under Control– dans la norme) est réduit jusqu’à un risque toléré, par le biais du facteur PFD_{avg} . La valeur de ce facteur est bornée par la réduction du risque minimum à apporter, c’est-à-dire par l’inverse du facteur de réduction de risque RRF. Compte tenu de la valeur de PFD_{avg} retenue, le SIL de la fonction peut ensuite être déterminé à partir du tableau 16.

Tableau 16 : Le SILs selon le mode de fonctionnement des fonctions ou systèmes de sécurité.

Niveaux d’intégrité De sécurité	Faible sollicitation	Demande continue / Forte sollicitation
	Probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFD_{avg})	Probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFH)
SIL4	$10^{-5} \leq PFD_{avg} < 10^{-4}$	$10^{-9} \leq PFH < 10^{-8}$
SIL3	$10^{-4} \leq PFD_{avg} < 10^{-3}$	$10^{-8} \leq PFH < 10^{-7}$
SIL2	$10^{-3} \leq PFD_{avg} < 10^{-2}$	$10^{-7} \leq PFH < 10^{-6}$
SIL1	$10^{-2} \leq PFD_{avg} < 10^{-1}$	$10^{-6} \leq PFH < 10^{-5}$

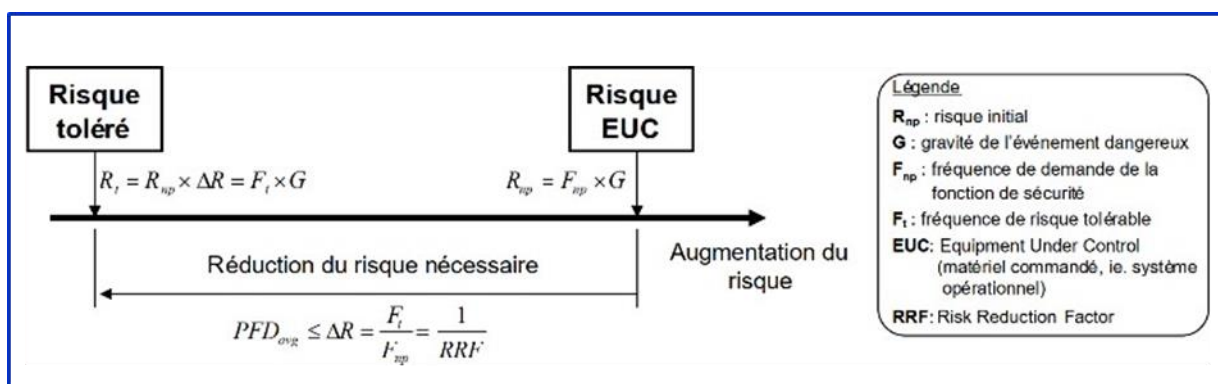


Figure 15 : Réduction du risque par l’utilisation d’une fonction de sécurité faiblement sollicitée.

5. Discussion des résultats :

Dans ce chapitre, après avoir calculé les niveaux SIL pour les trois scénarios et en se référant au scénario d'accident avec des fréquences allant de « presque intolérable » jusqu'à « tolérable », nous avons vu comment le PFD requis varie en fonction de la différence entre les fréquences floues et la fréquence tolérables, Figure 16.

- SIL 2 si RRF : $\alpha = [0(\text{inférieur}) ; 0.2(\text{inférieur})]$.
- SIL 1 si RRF : $\alpha = [0.2(\text{inférieur}) ; 0.8(\text{supérieur})]$.
- Pas de SIL si RRF : $\alpha = [0.8(\text{supérieur}) ; 0(\text{supérieur})]$.

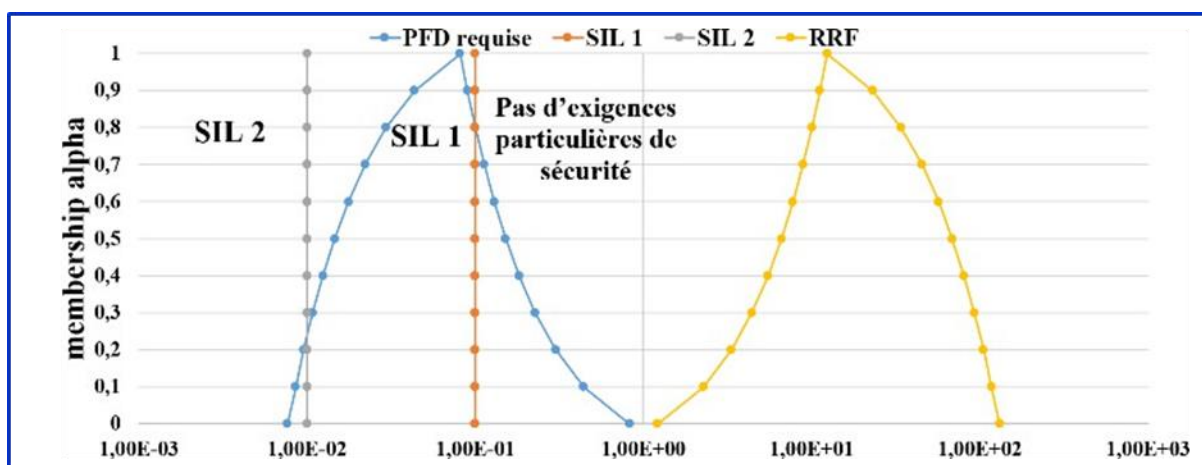


Figure 16: Représentation graphique des mesures de possibilité et de nécessité liées à la réduction.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons proposé une étude analytique du système Four de Rebouillage H-201 au niveau de MPP0.

L'application de la méthode LOPA cela nous a permis de comprendre les différents scénarios d'accidents possibles, les fréquences d'évènements initiateurs ainsi que les probabilités de défaillances des différentes couches de protections existantes.

Cette application démontre comment le PFD requis varie en fonction de la différence entre les fréquences floues et la fréquence tolérables.

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont porté sur l'applicabilité de méthode LOPA dans la détermination des SIL dans les industries à risque élevé. Le système industriel choisi comme étude de cas était un four de Rebouillage H-201. Elle se concentre sur l'évaluation des couches de protection indépendantes qui préviennent les incidents majeurs dans un système.

Nous avons abordé en premier lieu les concepts clés tels que la sécurité, le risque et Système Instrumente de Sécurité SIS, et avons cherché à faire le lien entre ces différents termes. Ensuite montré comment il est désormais possible de mettre en œuvre des fonctions de sécurité des fonctions de sécurité à l'aide de systèmes E/E/PE.

Ensuite nous avons présenté les méthodes quantitatives et qualitative de l'évaluation le niveau d'intégrité de sécurité et choisi la méthode semi-quantitative LOPA pour faire notre étude sur un système industriel de traitement de Gaz au niveau de MPP0 à Hassi R'mel (four de rebouillage H-201).

Dans le cadre de la méthode LOPA, un aspect important concernant les données quantitatives est celui de l'incertitude et l'imprécision. Nous avons présenté quelques scénarios de traitement de cet aspect.

L'analyse des couches de protection (LOPA) a été choisie pour servir de cadre méthodologique pour notre travail. Avant la démarche, nous avons fait une analyse fonctionnelle et structurelle du système étudiée (le four de rebouillage H-201).

L'identification des scénarios d'accidents majeurs est faite par la méthode HAZOP. Ces derniers sont analysés par la méthode LOPA afin d'identifier et d'évaluer les barrières de sécurité mises en place pour faire face à ces scénarios.

Cette étude nous a permis d'appliquer les méthodes d'analyse des risques que nous avons étudié sur un cas pratique réel.

Selon les résultats nous pouvant confirmer l'applicabilité de la méthode LOPA sur des systèmes industriels à risque élevé. Cependant, les données utilisées (telles que les PFD et les probabilités d'occurrence des évènements) sont tirées de la littératures, ce qui pourrait affecter la fiabilité des résultats obtenus et ainsi l'appréciation des risques.

Nous avons aussi pu confirmer l'applicabilité des deux méthodes HAZOP (méthode

qualitative) et LOPA non seulement pour une meilleure identification risques et définition des scénarios d'accidents mais aussi pour une hiérarchisation et appréciation des risques optimales.

Comme résultat de recherche, nous pouvons conclure que le système de sécurité utilisé dans les entreprises algériennes actuellement nécessite une attention particulière et une révision générale touchant le système de détection, le système de supervision ou le facteur humain, le système de refroidissement, le système de drainage et le système d'extinction d'incendie. Ces barrières assurent les fonctions suivantes: surveillance, détection et alarme de température, suppression des incendies. La moindre défaillance de ces barrières peut provoquer un accident.

Enfin, il serait intéressant d'exploiter d'autres méthodes pour la détermination des SIL en présence d'informations imparfaites sur l'état de fonctionnement du système.

Références Bibliographique

1. Aboub. A, Benhania. A, (2021). Analyse des risques industriels d'une station de service, Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
2. Adjadj, et Charpentier, (2014). Allocations de SIL requis des fonctions instrumentées de sécurité d'une installation lorsque l'analyse de risques est incomplète, Congrès International Qualita, fineris-00973256v1f, Tanger, Maroc.pp.207-214. Mar 2007.
3. Assadi. M, Foul. B, (2015). Evaluation de la performance des systèmes instrumentent de sécurité système d'arrêt d'urgence automatique du four rebouilleur h201, Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI, Ecole Nationale Polytechnique, 2015.
4. A. S. Markowski. (2007). Piping Risk Assessment (pfLOPA), ELSEDIM RO, May 2007, pp. 15-16.
5. Asklou, N (2019). Contribution à la maîtrise des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), Thèse de Doctorat, Université d'Oran 2,2019.
6. Ayache. N, Mebarek. A, (2019). Maitrise et prévention des risques industriels majeurs Etude de cas : bac de stockage d'ammoniac, Mémoire Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2019.
7. Baybutt, (2002). Layers of protection analysis for human factors (LOPA-FH). Process Safety Progress, 21(2):119–124, 2002.
8. Bouziane H, Hasrouri F, (2018). Évaluation de la performance de système instrumenté de sécurité (application sur un ballon de gaz combustible de l'UTBS-HMD), Mémoire d'ingénieur d'état, Département MRIE.2018.
9. CCPS,(2001). Layers of protection analysis (LOPA). simplified process risk assessment. CCPS-AIChE, New-York (USA), 2001.
10. CEI_61508 (2010). Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Part 1-7. Geneva: International Electro technical Commission.
11. CEI 61882, (2001). Études de danger et d'exploitabilité (Études HAZOP) – guide d'application 2001.
12. Farmer, F. R., (1967). Siting criteria : a new approach. Atom, chapter 128, page152166, 1967.
13. Cheddie & Gruhn, (2006). Safety instrumented systems: design, analysis, and justification. ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society. p 306.

14. Gouriveau R. (2003). Analyse de risques, formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision [Thèse de doctorat]. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
15. GT Aspects sémantiques du risque, (1997). Vocabulaire lié au risque à travers une analyse bibliographique. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) - Observatoire de l'Opinion sur les Risques et la Sécurité.
16. Hamaidia, M, (2019). Contribution à l'allocation et à la vérification des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) à l'aide des réseaux bayésiens, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, p23.
17. Hammouya A, (2021). HAMMOUYA Amel, Contribution à l'amélioration des barrières de sécurité dans un système industriel, Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, p 38.
18. IEC 61061, (1998). Stratifiés de bois densifiés, non imprégnés, à usage électrique. Geneva, Switzerland: International Electronically Commission.
19. IEC 61508, (1998). Functional safety of electrical/ electronic/ programmable electronic (e/e/pe) safety related systems. International Electro technical Commission (IEC).
20. IEC61511, (2003). Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector.
21. INERIS, ARAMIS, (2004). Développement d'une méthode intégrée d'analyse des risques pour la prévention des accidents majeurs, rapport final, Septembre 2004.
22. INERIS DRA 73, (2005). INERIS DRA-73, Evaluation des Barrières Techniques de Sécurité, Rapport oméga-10, 2008.
23. Innal, F, (2008). Contribution à la modélisation des systèmes instrumentent de sécurité et à l'évaluation de leurs performances Analyse critique de la norme CEI 61508. PhD thesis, Université Bordeaux I, France.
24. ISO/CEI Guide 73, (2002). Management du risque – Vocabulaire – principes directeurs pour les inclure dans les normes. ISO/CEI.
25. Kirkwood and B. Tibbs, (2005). Kirkwood and B. Tibbs, Developments in SIL determination, compute. & Cont. Eng. Journal. vol. 16, 2005, pp. 21-27.
26. Laurent, (2011). Sécurité des procédés chimiques: Connaissances de base et méthodes d'analyse de risques. Tech & Doc Lavoisier, Paris, France, 2011.
27. Lanternier B, Adjadj A, (2008). Allocation de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis conformément à la norme CEI 6151, Institut Nationale de l'Environnement Industriel et des Risques, DCE/LEEL Verneuil en Halatte – France, 2008.

28. Laurent, A, (2023). André Laurent Eléments d'évaluation dynamique quantitative des risques des procédés École d'ingénieur. France. 2023, pp.122. hal-04315383.
29. Mechri, W, (2011) .Walid Mechri, Evaluation de la performance des Systèmes Instrumentés de Sécurité à paramètres imprécis, Université de Tunis El-Mana, Français, 2011, p 21.
30. Mondiale de la Santé, O, (1998). Rapport sur la santé dans le monde 1998. La vie au 21ème siècle: une perspective pour tous, Genève.
31. OHSAS 18001, (2007). Système de management de la santé et de la sécurité au travail Spécification. British Standard Occupational Health and Safety Assessment Series. 2007.
32. Oudihat, K, (2015). évaluation des barrières de sécurité d'un procede industriel application de la méthode LOPA sur un four de rebouillage h- 201 – mpp1 – sonatrach /dp/hrm. Projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI, Alger 2015.
33. Rabah. B, (2013). Rabah Bilal, Etude de l'implémentation des Systèmes Instrumentés de Sécurité par des méthodes semi-quantitatives dans un environnement de connaissances imparfaites, Mémoire Magistère, Université El-Hadj Lakhdar – Batna, 2013.
34. Rauzy, A, et al, (2006). Assessment of safety integrity levels with fault trees. In ESREL Estoril, Portugal.
35. Rauzy, A, et al, (2007). Rauzy,A., Gauthier,J., and Leduc, X Assessment to flarge automatically generated fault trees by means of binary decision diagrams.Journal of Risk and Reliability. Professional Engineering Publishing .,221(2):95105
36. Villemeur A. (1992), Reliability, Availability, Maintainability And Safety Assessment. Chichester: Wiley; 1992.
37. R.J.Stack, (2009). Evaluation independent protection layers. Process Safety Progress, 28(4):317–324, 2009.
38. Sallak, M, (2007). Evaluation de paramètres de sureté de fonctionnement en présence d'incertitude et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentes de sécurité. PhD thesis, Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2007.

Dédicace

A ma chère famille du petit au grand

A mes enseignants et professeurs du primaire à l'université

A toutes mes amis

Je dédie ce modeste travail.

ALI SOFRANI

Dédicace

A ma chère famille du petit au grand

A mes enseignants et professeurs du primaire à l'université

A toutes mes amis

Je dédie ce modeste travail.

BEN BOUZID SALAH EDDINE

Résumé :

La méthode LOPA (Layer of Protection Analysis) est souvent utilisée dans l'industrie pour évaluer les risques et déterminer les mesures de sécurité nécessaires. Ce travail a pour but d'attribuer des SIL dans les industries à risque élevé sur le système four H-201.

En appliquant cette méthode au four H-201 à risque élevé, vous pouvez identifier les lacunes dans les mesures de sécurité existantes et recommander des actions correctives pour réduire les risques à un niveau acceptable.

À cet effet, on a sélectionné des scénarios d'accidents pour déterminer le niveau d'intégrité de sécurité par la méthode LOPA.

Les résultats et l'analyse des scénarios ont abouti à :

- SIL 2 si RRF : $\alpha = [0(\text{inférieur}) ; 0.2(\text{inférieur})]$.
- SIL 1 si RRF : $\alpha = [0.2(\text{inférieur}) ; 0.8(\text{supérieur})]$.
- Pas de SIL si RRF : $\alpha = [0.8(\text{supérieur}) ; 0(\text{supérieur})]$.

Mots-clés : LOPA, four H-201, SIL, sécurité, risque.

الملخص:

غالبا ما يتم استخدام طريقة LOPA (تحليل طبقة الحماية) في الصناعة لتقييم المخاطر و تحديد تدابير السلامة اللازمة.

يهدف هذا العمل الى تقييم SIL في الصناعات عالية المخاطر على نظام الفرن H-201. من خلال تطبيق هذه الطريقة على الفرن H-201 عالي المخاطر، يمكن تحديد الثغرات في تدابير السلامة الحالية و التوصية بالإجراءات التصحيحية لتقليل المخاطر الى مستوى مقبول. لتحقيق هذه الغاية، تم اختيار سيناريوهات الحوادث لتحديد مستوى السلامة باستخدام طريقة تحليل طبقات الحماية.

اسفرت النتائج و تحليل السيناريوهات عن:

- [اقل) 0.2 ; α (اقل) 0] RRF : اذا كان SIL2
- [اقل) 0.8 ; α (اقل) 0.2] RRF : اذا كان SIL1
- [اقل) 0 ; α (اقل) 0.8] RRF : اذا كان SIL لا يوجد

الكلمات المفتاحية: LOPA ,فرن H-201 ,SIL , الحماية, الخطر.

Abstract:

The LOPA (layer of protection analysis) method is often used in industry to assess risks and determine necessary safety measures. this work aims to complete SIL in high risk industries on the H-201 furnace system.

by applying this method to the high-risk H-201 furnace, you can identify gaps in existing safety measures and recommend corrective actions to reduce risks to an acceptable level. To this end, accident scenarios were selected to determine the level of safety integrity using the LOPA method.

The results and scenario analysis resulted in several SIL such that the highest is what judges the risk to be unacceptable.

SIL 2 si RRF : $\alpha = [0(\text{lower}) ; 0.2 (\text{lower})]$.

- SIL 1 si RRF : $\alpha = [0.2(\text{lower}) ; 0.8 (\text{super})]$.
- Pas de SIL si RRF : $\alpha = [0.8 (\text{super}) ; 0 (\text{super})]$.

Keywords: H-201 oven, SIL, safety, risk, SIS.