الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

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

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle
Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Sécurité fonctionnelle d'une unité industrielle au niveau de la sidérurgie d'AQS

Présenté et soutenu publiquement par :

BOUANDEL ABDERAHIM & BOUSSIS ANIS

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
		IMSI	**Président**
Mr. Guetarni Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI	**Encadrant**
		IMSI	**Examinateur**

Année 2025/2026

Sécurité fonctionnelle d'une unité industrielle au niveau de la sidérurgie d'AQS
RESUME

Ce mémoire porte sur la sécurité fonctionnelle du système de reformeur d'une unité de réduction directe (DRI) au complexe Algerian Qatari Steel (AQS). L'étude s'inscrit dans un contexte sidérurgique marqué par des risques majeurs liés aux gaz inflammables et toxiques, aux pressions élevées et aux températures extrêmes. L'objectif est d'identifier les scénarios accidentels critiques, d'allouer les niveaux SIL requis et de vérifier la fiabilité des fonctions instrumentées de sécurité. La démarche adoptée commence par l'analyse HAZOP afin d'étudier les dérives de pression et de température du reformeur. Elle se poursuit par l'analyse LOPA, utilisée pour évaluer les couches de protection indépendantes et déterminer le niveau de réduction de risque nécessaire. Enfin, les architectures des SIF sont modélisées sous GRIF afin de calculer la probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFDavg). Les résultats montrent que les scénarios de haute pression, basse pression et haute température constituent les cas les plus critiques. Les boucles liées à la pression atteignent le niveau SIL 2, tandis que la fonction de sécurité relative à la température nécessite une amélioration architecturale pour atteindre le SIL 3. Cette étude confirme l'importance d'une approche combinée HAZOP-LOPA-GRIF pour renforcer la maîtrise des risques et la sûreté du reformeur.

Mots clés : Sécurité fonctionnelle ; SIS ; SIF ; SIL ; HAZOP ; LOPA ; GRIF ; DRI ; reformeur ; AQS.

Functional Safety of an Industrial Unit in the Steelmaking Sector at AQS
ABSTRACT

This dissertation focuses on the functional safety of the reformer system in a Direct Reduced Iron (DRI) unit at the Algerian Qatari Steel (AQS) complex. The study is conducted in a steelmaking environment characterized by major hazards related to flammable and toxic gases, high pressures and extreme temperatures. The main objective is to identify critical accident scenarios, allocate the required SIL targets and verify the reliability of the safety instrumented functions. The methodology begins with a HAZOP study to identify pressure and temperature deviations in the reformer. It is then completed by a LOPA analysis to assess the independent protection layers and determine the required risk reduction. Finally, the proposed SIF architectures are modelled using GRIF in order to calculate the average probability of failure on demand (PFDavg). The results show that high pressure, low pressure and high temperature are the most critical scenarios. The pressure-related safety loops meet SIL 2, while the temperature safety function requires an architectural improvement to achieve SIL 3. The work demonstrates the value of combining HAZOP, LOPA and GRIF modelling to improve risk control and ensure safer operation of the reformer system.

Keywords: Functional safety; SIS; SIF; SIL; HAZOP; LOPA; GRIF; DRI; reformer; AQS.

السلامة الوظيفية لوحدة صناعية على مستوى صناعة الحديد والصلب في مجمع AQS

ملخص

يتناول هذا البحث موضوع السلامة الوظيفية لنظام المصلح في وحدة الاختزال المباشر للحديد (DRI) بمركب Algerian Qatari Steel (AQS). تكتسي هذه الدراسة أهمية خاصة لأن هذا النوع من الوحدات يعمل في ظروف صناعية معقدة تتضمن غازات قابلة للاشتعال وسامة، وضغوطا مرتفعة، ودرجات حرارة عالية. يهدف العمل إلى تحديد سيناريوهات الحوادث الحرجة، وتعيين مستويات السلامة المطلوبة (SIL)، ثم التحقق من موثوقية وظائف السلامة الآلية. اعتمدت الدراسة أولا على منهجية HAZOP من أجل تحليل انحرافات الضغط ودرجة الحرارة في المصلح، ثم على منهجية LOPA لتقييم طبقات الحماية المستقلة وتحديد مقدار تخفيض الخطر المطلوب. بعد ذلك تم استعمال برنامج GRIF لنمذجة معماريات وظائف السلامة instrumented SIF وحساب احتمال الفشل المتوسط عند الطلب (PFDavg). بينت النتائج أن سيناريوهات الضغط المرتفع، الضغط المنخفض ودرجة الحرارة المرتفعة هي الأكثر خطورة. كما أظهرت أن حلقات السلامة الخاصة بالضغط تحقق مستوى SIL 2، في حين أن وظيفة السلامة الخاصة بدرجة الحرارة تحتاج إلى تحسين في المعمارية لبلوغ مستوى SIL 3. وتؤكد الدراسة أن الجمع بين HAZOP وLOPA والنمذجة ببرنامج GRIF يساهم في تعزيز التحكم في المخاطر وتحسين سلامة تشغيل نظام المصلح.

الكلمات المفتاحية: السلامة الوظيفية؛ SIS؛ SIF؛ SIL؛ HAZOP؛ LOPA؛ GRIF؛ DRI؛ المصلح؛ AQS.

REMERCIMENT

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donné la force et la facilité pour mener à bien ce travail. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant MR. GUETARNI ISLAM HADJ MOHAMED pour sa précieuse contribution à l'aboutissement de notre mémoire de master, son soutien et ses conseils tout au long de ce processus ont été d'une importance capitale. Nos vifs remerciements vont également aux membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par Leurs propositions. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à tout l'équipe HSE de DRI d'AQS ; MR. FANIT ISMAIL, KHELFAOUI NABIL, KRIOUI HICHAM, NACER et BOUKAOUD ISLEM, et nous sommes fiers d'avoir eu l'opportunité de travailler avec eux et de bénéficier de leurs conseils éclairés. On remercie du fond du cœur tout personne qui a contribué au succès de ce travail et qui nous accompagné tout au long de notre parcours.

DEDICACE

Alḥamdulillāh, c'est par la grâce d'Allah le tout puissant et miséricordieux que ce travail est achevé.

A nos chers parents qui ont toujours été là pour nous, et qui nous ont donné un Magnifique modèle de labeur et de persévérance…

A nos chers frères et sœurs…

A nos familles respectives pour leurs aides et soutient permanents...

A nos meilleurs amis…

A tous ceux qui nous aime et tous ceux que nous aimons…

À tous ceux qui croient en nous et en nos capacités, votre soutien nous a été précieux. Enfin, à nous-mêmes, pour notre persévérance et notre détermination à mener à bien ce projet.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce mémoire soit fini.

B /ABDERAHIM
B /ANIS

LISTE DES ABREVIATIONS

AAE : Analyse par Arbre d'Evénements (Event Tree Analysis).
AC: Courant alternatif (Alternating Current).
ADD : Arbre de Défaillances, méthode utilisée pour l'analyse logique des causes de défaillance.
AI : Analyzer Indicator / indication d'analyseur, utilisé pour les analyseurs de gaz.
AMA : Abréviation des mots en ordre alphabétique.
API : Automate Programmable Industriel.
AQS : Algerian Qatari Steel, complexe sidérurgique étudié.
ARIA : Base de données Analyse, Recherche et Information sur les Accidents.
ASU : Air Separation Unit, unité de séparation de l'air.
BARPI : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels.
BF : Blast Furnace, haut fourneau.
BOF : Basic Oxygen Furnace, convertisseur à l'oxygène.
BPCS : Basic Process Control System, système de contrôle-commande de base.
CCPS : Center for Chemical Process Safety, référence utilisée pour les données LOPA.
CDRI : Cold Direct Reduced Iron, fer préréduit à froid.
CEI : Commission Electrotechnique Internationale.
CIRC : Centre International de Recherche sur le Cancer.
CMS : Conséquence Mitigation System, système d'atténuation des conséquences.
DCS : Distributed Control System, système numérique de contrôle distribué.
DRI : Direct Reduced Iron, fer obtenu par réduction directe.
E/E/PE : Electrical / Electronic / Programmable Electronic, systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables.
EAF : Electric Arc Furnace, four à arc électrique.
ER : Evénement redouté.
ESD : Emergency Shutdown System, système d'arrêt d'urgence.
ESV : Emergency Shutdown Valve, vanne d'arrêt d'urgence.
FDS : Fiche de Données de Sécurité.
FI : Flow Indicator, indicateur de débit.
FIC : Flow Indicating Controller, régulateur-indicateur de débit.
GRIF : Graphical Interface for Reliability Forecasting, logiciel de modélisation et de calcul de fiabilité.
HART: Highway Addressable Remote Transducer, protocol de communication pour instruments.
HAZOP : Hazard and Operability Study, méthode d'identification des dangers et problèmes d'exploitabilité.
HBI : Hot Briquetted Iron, fer préréduit briqueté à chaud.
HDRI : Hot Direct Reduced Iron, fer préréduit à chaud.
HSE : Hygiène, Sécurité et Environnement.
HSLA : High Strength Low Alloy, acier micro-allié à haute résistance.
IE : Evénement intermédiaire dans un arbre de défaillances.
IPL : Independent Protection Layer, couche de protection indépendante.
ISO: International Organization for Standardization.
JORA : Journal Officiel de la République Algérienne.
LD : Linz-Donawitz, procédé de convertisseur à l'oxygène.
LOPA : Layer of Protection Analysis, analyse des couches de protection.
LS : Logic Solver, unité logique de traitement d'un SIS.
LTI : Lost Time Injury, accident avec arrêt de travail.
MIDREX : Procédé industriel de réduction directe du minerai de fer.
MTTF : Mean Time To Failure, temps moyen jusqu'à la première défaillance.
PAH : Pressure Alarm High, alarme de haute pression.

PFD : Process Flow Diagram, schéma de circulation des fluides ; aussi Probability of Failure on Demand selon le contexte fiabilité.
PFH : Probability/Frequency of dangerous Failure per Hour, fréquence de défaillance dangereuse par heure.
PFDavg : Average Probability of Failure on Demand, probabilité moyenne de défaillance à la demande.
PID : Piping and Instrumentation Diagram, schéma tuyauterie-instrumentation ; peut aussi désigner une régulation proportionnelle-intégrale-dérivée selon le contexte.
PI : Pressure Indicator, indicateur de pression.
PSHH: Pressure Switch High High, pressostat très haute pression.
PSLL: Pressure Switch Low Low, pressostat très basse pression.
PSV : Pressure Safety Valve, soupape de sécurité.
PT : Pressure Transmitter, transmetteur de pression.
QRA : Quantitative Risk Assessment, évaluation quantitative des risques.
RF : Reformer, reformeur.
REX : Retour d'expérience.
RIA : Robinet d'Incendie Armé.
RRF : Risk Reduction Factor, facteur de réduction de risque.
RTC : Risque tolérable ou critère de tolérance du risque, utilisé dans l'évaluation LOPA.
SIF : Safety Instrumented Function, fonction instrumentée de sécurité.
SIL : Safety Integrity Level, niveau d'intégrité de sécurité.
SIS : Safety Instrumented System, système instrumenté de sécurité.
SOV: Solenoid Operated Valve, électrovanne.
SRS : Safety Requirements Specification, spécification des exigences de sécurité.
SST : Santé et Sécurité au Travail.
TI : Temperature Indicator, indicateur de température.
TLV : Threshold Limit Value, valeur limite d'exposition.
TRC : Transformation en Refroidissement Continu.
TSH : Temperature Switch High, contacteur de haute température.
TSHH : Temperature Switch High High, contacteur de très haute température.
VFD : Variable Frequency Drive, variateur de fréquence.
WTP : Water Treatment Plant, station de traitement des eaux.
ZSC : Position Switch Closed, détecteur/indicateur de position fermée.
ZSO : Position Switch Open, détecteur/indicateur de position ouverte.

LISTE DES SYMBOLES

α : Phase alpha du fer, ferrite, à structure cubique centrée.
γ : Phase gamma du fer, austénite, à structure cubique à faces centrées.
δ : Phase delta du fer à haute température.
λ : Taux de défaillance [défaillance/h].
μ : Taux de réparation [réparation/h].
R : Risque : produit de la probabilité et de la gravité.
P : Probabilité d'occurrence d'un événement.
G : Gravité des conséquences.
K : Nombre minimal d'éléments devant fonctionner dans une architecture KooN.
N : Nombre total d'éléments disponibles dans une architecture KooN.
t : Temps.
h : Heure, unité utilisée pour les taux de défaillance.
% : Pourcentage.
°C : Degré Celsius, unité de température.
bar : Unité de pression.
dBA : Décibel pondéré A, unité de niveau sonore.
GJ/t : Gigajoule par tonne, énergie spécifique.
Kg : Kilogramme, unité de masse.
mA : Milliampère, unité de courant électrique.
m^3 : Mètre cube, unité de volume.
Nm^3 : Normo mètre cube, volume de gaz ramené aux conditions normales.
ppm : Partie par million, unité de concentration.
ppmv : Partie par million en volume.
C : Carbone, élément principal de l'alliage acier.
Cr : Chrome, élément d'alliage améliorant notamment la résistance à la corrosion.
Fe : Fer.
Fe_2O_3 : Hématite, oxyde de fer réduit dans le procédé DRI.
Fe_3O_4 : Magnétite, oxyde de fer intermédiaire dans la réduction.
FeO : Wüstite, oxyde de fer intermédiaire.
Fe_3C : Cémentite, carbure de fer.
H_2 : Dihydrogène, gaz réducteur.
H_2S : Sulfure d'hydrogène.
H_2SO_4 : Acide sulfurique.
CO : Monoxyde de carbone, gaz réducteur et toxique.
CO_2 : Dioxyde de carbone.
CH_4 : Méthane, constituant du gaz naturel.
Mn : Manganèse, élément d'alliage et désoxydant.
Mo : Molybdène, élément d'alliage.
NaOH : Soude caustique.
Nb : Niobium, élément de micro-alliage.
Ni : Nickel, élément d'alliage.
O_2 : Dioxygène.
Si : Silicium, élément d'alliage et désoxydant.
SiO_2 : Silice cristalline.
Ti : Titane, élément de micro-alliage.
V : Vanadium, élément de micro-alliage.
Zn : Zinc.
RRF = 1 / PFDavg : Relation entre le facteur de réduction de risque et la probabilité moyenne de défaillance à la demande.

R = P × G : Relation fondamentale du risque : risque égal à probabilité multipliée par gravité.

SOMMAIRE

REMERCIMENT iv
DEDICACE v
SOMMAIRE x
LISTE DES FIGURES xiv
LISTE DES TABLEAUX xv
LISTE DES ABREVIATIONS vi
LISTE DES SYMBOLES viii
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE 1 : Généralité sur la gestion des risques au niveau de l'industrie de fer 4
I.1 Introduction 5
I.2 Aperçu de Secteur Sidérurgique : 5
I.2.1 Définition et composition : 5
I.2.2 Histoire et développement de la sidérurgie : 7
I.2.3. Les grands procédés de fabrication de l'acier : 8
I.3 La gestion des risques : 11
I.3.1 Concepts généraux : 11
I.3.2 Les objectifs de la gestion des risques : 12
I.3.3 Principes de la gestion des risques : 12
I.3.4 Démarche de La gestion des risques : 14
I.4 Cadre Réglementaire et Normatif : 15
I.4.1 Législation Algérienne : 15
I.4.2 Standards Internationaux : 16
I.5 Identification des Risques Majeurs en Sidérurgie : 17
I.5.1 Risques liés aux fluides et gaz de process : 17
I.5.2 Risques d'incendie ou explosion : 19
I.5.3 Risques Physiques : Thermiques, Mécaniques, Électriques et Radiations : 20
I.5.4 Risques liés aux poussières : 21
I.6 Routeur d'expérience : 21
I.6.1 Accident 1 : Incendie par combustion spontanée sur un convoyeur de DRI à Gandrange : 21
I.6.1 Accident 2 : Explosion majeure d'un four électrique par contact eau/métal en fusion : 23
I.7 Conclusion : 24
CHAPITRE 2 : Sécurité fonctionnelles et méthodes d'analyses 25
II.1 Introduction 26
II.2 Système instrumenté de sécurité : 26

II.2.1 Définition d'un SIS : 26
II.2.2 Les composant et architecture d'un SIS : 27
II.2.3 Mode de fonctionnement : 29
II.3 Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) : 30
II.4 Le Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) : 31
II.5 Barrière de sécurité : (IPL - Independent Protection Layer) : 32
II.5.1 Le concept de barrière de sécurité : 32
II.5.2 Les types de barrières de sécurité : 33
II.6 Les méthodes d'analyses des risques : 35
II.6.1 Méthode d'allocation SIL : 35
II.6.2 Méthode vérification de SIL : 43
II.7 Conclusion : 48
CHAPITRE III : Présentation générale du complexe AQS et procédure DRI 49
III.1 Introduction 50
III.2 Présentation d'AQS 50
III.2.1 Description : 50
III.2.2 Historique de création : 51
III.2.3 Les unités de complexe : 52
III.3 Processus de DRI : 56
III.3.1 Circulation de flux de gaz : 56
III.3.2 Reforme : 57
III.3.3 Reduction : 58
III.4 Système de reformeur : 59
III.5 Conclusion : 61
CHAPITRE IV : Etude de cas : Système de reformeur 62
IV.1 Introduction 63
IV.2 Analyse des risques par la méthode HAZOP : 63
IV.2.1 Introduction : 63
IV.2.2 Les tableau HAZOP : 63
IV.2.3 Interprétation de tableau HAZOP : 68
IV.3 Application de la méthode LOPA : 68
IV.3.1 Critères d'Acceptation des Risques : 68
IV.3.2 Les fréquences d'occurrence des causes initiatrice : 69
IV.3.3 Les tableau LOPA : 69
IV.3.4 Interprétation des résultats de tableaux LOPA : 73
IV.4 Architectures des SIF : 74
IV.4.1 SIF pour assurer la sécurité contre la haute pression : 75
IV.4.2 SIF pour assurer la sécurité contre la basse pression : 76
IV.4.3 SIF pour assurer la sécurité contre la haute température : 77

IV.5 Conclusions : 80
CONCLUSION GENERALE 81
BIBLIOGRAPHIE 82

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone....6
Figure I.2 : Le Haut Fourneau....8
Figure I.3 : Le Convertisseur à l'Oxygène....9
Figure I.4 : four a arc électrique....10
Figure I.5 : La relation entre Danger et Risque....11
Figure I.6 : Processus de management des risques selon l'ISO 31000....13
Figure I.7 : L'espace du risque....15
Figure II.1 : les composantes d'un SIS....28
Figure II.2 : l'architecture KooN....29
Figure II.3 : fonction instrumentée de sécurité [S.Sklet, 2005]....31
Figure II.4 : Graphique de couches de protection mettant en évidence les IPL proactives et réactives....34
Figure II.5 : La procédure HAZOP....39
Figure II.6 : Démarche à suivre pour crée un arbre de défaillances....46
Figure III.1 : Vue aérienne du site....51
Figure III.2: échelle de temp de création des unités.....51
Figure III.3: Vue aérienne de l'unité DRI.....52
Figure III.4: Four a arc électrique.....52
Figure III.5: Photographie de Laminoir.....53
Figure III.6: Photographie d'Unité traitement de chaux.....53
Figure III.7: Une vue aérienne de Station générale de traitement des eaux.....54
Figure III.8: Photographie d'Unité de séparation de l'air.....55
Figure III.9: Photographie de Système de manutention.....55
Figure III.10: Une vue aérienne de Sous-station électrique.....56
Figure III.11: Schéma de flux de DRI Midrex.....57
Figure III.12: Schéma qui expliquer la réduction.....59
Figure III.13: Vue aérienne du Reformer.....59
Figure III.14: Schéma du Reformer.....60
Figure III.15: Vue de l'intérieur du Reformer.....61
Figure IV.1 : matrice de risques....69
Figure IV.2 : Architectures de SIS par GRIF....75
Figure IV.3 : Les graphes de résultats de PFD....75
Figure IV.4 : Architectures de SIS par GRIF....76
Figure IV.5 : Les graphes de résultats de PFD....77
Figure IV.6 : Architectures de SIS par GRIF....78
Figure IV.7 : Les graphes de résultats de PFD....78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les relation des réductions 10
Tableau I. 2 : Législation Algérienne..... 15
Tableau I. 3 : Standards Internationaux 16
Tableau II.1 : Niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) en fonction des mesures cibles de défaillances 32
Tableau III.1 : Les équations chimiques pour la réduction..... 58
Tableau IV.1 : les donner des fréquences et des PFD..... 69
Tableau IV. 2 : les donner d'Equipment d'Architectures de SIS..... 74

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, l'industrie sidérurgique mondiale ne se limite plus à la simple production de métal ; elle est devenue un véritable levier de souveraineté économique. Pour l'Algérie, cette ambition prend vie à travers le projet stratégique de valorisation du gisement de Gara Djebilet. Cet élan propulse le pays vers une nouvelle ère industrielle, soutenue par des infrastructures de pointe à l'instar. Cependant, transformer le minerai de fer à une telle échelle, notamment via le procédé de Réduction Directe (DRI), implique une gestion des risques d'une complexité sans précédent. Dans ces environnements hautement critiques, où les températures extrêmes côtoient des flux gazeux inflammables et explosifs, la sécurité industrielle ne peut plus reposer sur le seul facteur humain.

C'est ici qu'intervient la Sécurité Fonctionnelle. Encadrée par les référentiels internationaux CEI 61508 et CEI 61511, cette discipline se concentre sur la fiabilité des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables (E/E/PE). On parle alors de Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), dont le rôle est de déployer des Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) pour détecter et neutraliser un danger process avant l'occurrence d'un accident majeur. En Algérie, l'évolution récente du cadre législatif, marquée par la Loi de 2024 relative aux risques majeurs, impose désormais une rigueur nouvelle et une obligation de démonstration mathématique de l'efficacité de ces barrières de sécurité.

Pour répondre à ces exigences réglementaires et opérationnelles, il est indispensable d'adopter une démarche standardisée issue de la norme ISO 31010. Celle-ci débute par une identification minutieuse des dérives thermo hydrauliques par la méthode HAZOP (Hazard and Operability Study). Elle se poursuit par une phase semi-quantitative d'allocation du Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) requis via la méthode LOPA (Layer of Protection Analysis). Enfin, la validation finale de ces boucles de sécurité nécessite l'utilisation d'outils de simulation de fiabilité avancés, tels que le logiciel GRIF, afin de calculer la probabilité de défaillance à la demande (PFD_avg) des SIF face aux contraintes du terrain.

- **Problématique :**

L'exploitation à grande échelle des unités de réduction directe (DRI), bien que performante, expose les installations à des sollicitations thermomécaniques sévères. Au cœur de ce procédé, le système du reformeur constitue l'équipement le plus sensible. Les déviations de pression et de température y sont particulièrement redoutables : une surpression non maîtrisée ou une surchauffe des tubes peut conduire à des ruptures catastrophiques ou à des explosions, si le déploiement de fonctions

instrumentées de sécurité (SIF) est acté pour protéger le reformeur, leur configuration et leur fiabilité réelle soulèvent des questions cruciales. Les conditions d'exploitation extrêmes de la sidérurgie remettent en cause l'efficacité théorique des barrières. Dès lors, la question centrale de ce projet de fin d'études s'énonce ainsi :

« Dans quelle mesure l'application conjointe des approches HAZOP et LOPA, couplée à une modélisation quantitative sous le logiciel GRIF, permet-elle de concevoir et de valider des architectures de SIF capables de garantir durablement les niveaux de sécurité requis (SIL 2 et SIL 3) face aux contraintes du reformeur du complexe AQS ? »

- **Objectif :**

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est de réaliser une étude de vérification du niveau SIL du système reformeur au sein du complexe AQS. Pour y parvenir, notre démarche s'est articulée autour des objectifs spécifiques suivants :

- Identifier qualitativement les scénarios d'accidents majeurs liés aux déviations de pression et de température du reformeur en menant une analyse HAZOP.
- Allouer les niveaux de sécurité cibles nécessaires pour chaque scénario en quantifiant l'apport des couches de protection existantes grâce à la méthode LOPA.
- Modéliser et vérifier quantitativement sous GRIF les architectures des fonctions de sécurité conçues.

Dans le but de traiter la problématique et réaliser ces objectifs, ce mémoire est organisé en quatre chapitres qui sont :

- CHAPITRE I : Généralité sur la gestion des risques au niveau de l'industrie de fer. Ce chapitre introduit le secteur sidérurgique, ses grands procédés de fabrication ainsi que les concepts et démarches de la gestion des risques. Il pose le cadre réglementaire national et normatif international, cartographie les risques majeurs du secteur et analyse des retours d'expérience d'accidents réels.
- CHAPITRE II : Sécurité fonctionnelles et méthodes d'analyses. Consacré aux principes de la sécurité fonctionnelle, ce chapitre définit les concepts de SIS, SIF, SIL et de barrières de sécurité indépendantes (IPL). Il présente également les fondements méthodologiques d'analyse des risques retenus pour l'allocation et la vérification du niveau SIL.
- CHAPITRE III : Présentation générale du complexe AQS et procédure DRI. Ce chapitre est dédié à la description de l'usine d'AQS de Jijel et de ses différentes unités. Il expose en détail

le fonctionnement du processus de réduction directe (DRI), la circulation des flux de gaz, la réforme, la réduction, pour finir sur la description technique du système de reformeur.

- CHAPITRE IV : Etude de cas : Système de reformeur. Ce chapitre constitue la phase pratique et expérimentale de notre travail. Il applique les méthodes HAZOP et LOPA sur le reformeur, détaille les architectures des SIF conçues et présente les résultats des simulations sur le logiciel GRIF pour valider les niveaux SIL 2 et SIL 3 obtenus.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale décrivant le travail réalisé, les résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : Généralité sur la gestion des risques au niveau de l'industrie de fer

I.1 Introduction

Depuis une dizaine d'années, le secteur industriel a modifié radicalement sa manière de voir le risque : il n'est plus considéré comme une fatalité, mais comme un axe stratégique majeur. Actuellement, les sites de production, notamment dans l'industrie du fer et de l'acier, font face à un environnement paradoxal. Pour rester compétitifs, ils doivent améliorer leur productivité tout en gérant des processus techniques de plus en plus complexes. Les méthodes traditionnelles ne peuvent plus gérer les nouvelles vulnérabilités créées par cette avancée technologique.

Dans cette situation, un accident majeur ne se résume plus à un simple arrêt technique ou un dysfonctionnement matériel ; il a un impact direct sur la viabilité économique de l'entreprise, sa réputation et, parfois même, sa survie juridique et opérationnelle. Il est essentiel d'assurer la durabilité avec une gestion des risques efficace, car elle transforme l'aléa en un paramètre régulé pour garantir le développement durable de l'exploitation.

Ce premier chapitre vise à établir les bases théoriques et méthodologiques nécessaires à notre étude. Pour commencer, nous allons définir les concepts essentiels liés à la gestion des risques. Ensuite, nous allons examiner d'abord la production d'acier, puis le cadre réglementaire national, ainsi que les normes internationales qui contrôlent les installations à haut risque. Cette base nous permet de localiser avec précision les dangers spécifiques aux processus sidérurgiques, en particulier ceux liés aux unités de réduction directe. Enfin, nous allons analyser les retours d'expérience concernant les accidents majeurs dans ce secteur d'activité.

I.2 Aperçu de Secteur Sidérurgique :

Pour avoir un aperçu général sur ce secteur, Dans un premier temps, nous définirons précisément la nature et la composition de l'acier. Nous retrouverons ensuite les grandes étapes historiques qui ont marqué le développement de la sidérurgie, pour enfin exposer les principaux procédés de fabrication qui structurent l'industrie actuelle de l'acier à l'échelle mondiale :

I.2.1 Définition et composition :

I.2.1.1 Polymorphisme du Fer et Diagramme d'Équilibre :

L'acier est un alliage fer-carbone contenant moins de 2,06 % de carbone. Sa polyvalence mécanique repose sur le polymorphisme du fer : à température ambiante, le fer alpha (alpha ou ferrite, de structure cubique centrée) dissout très peu de carbone (0,02 % max). À haute température, il se transforme en fer gamma (gamma ou austénite, de structure cubique à faces centrées), capable de dissoudre jusqu'à 2,14 % de carbone. Au refroidissement, le carbone insoluble forme de la cémentite (Fe_3C), dure et fragile. Selon la teneur initiale en carbone, un refroidissement lent de l'austénite

génère différentes proportions de ferrite, de cémentite et de perlite (une structure lamellaire associant ferrite et cémentite qui offre un excellent compromis entre dureté et ductilité). [1], [2]

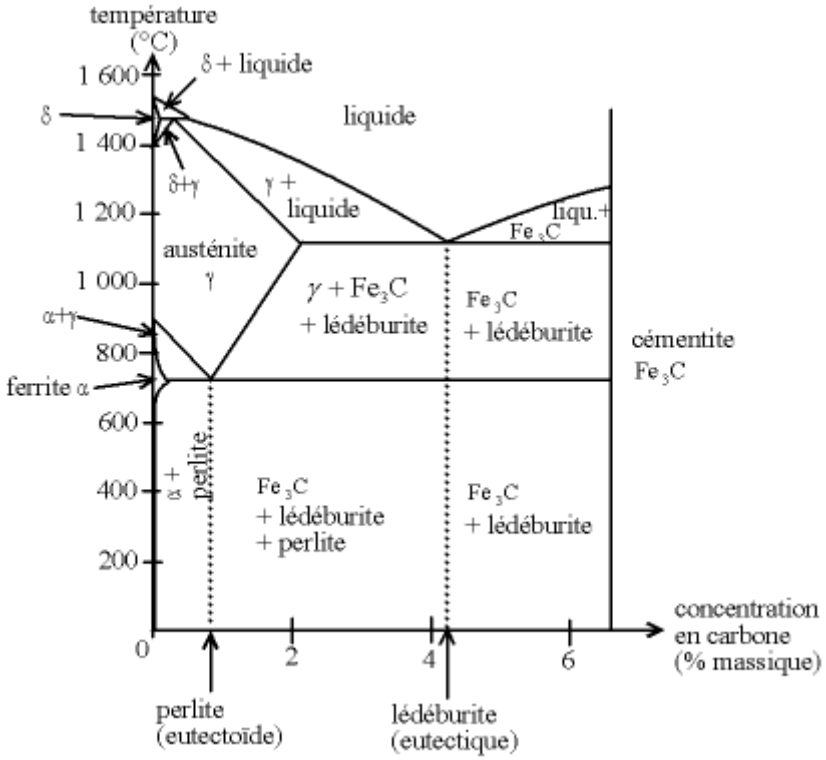


Figure I.1 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [1], [2]

I.2.1.2 Cinétique des Transformations : Approche Phénoménologique et Thermodynamique :

Les processus industriels réels n'atteignant que rarement l'équilibre thermodynamique, la cinétique de refroidissement modifie fondamentalement les mécanismes de transformation de l'austénite. Ces phénomènes dynamiques sont décrits par les diagrammes TTT (maintiens isothermes) et TRC (refroidissement continu). [3] On distingue deux grands types de transformations :

- Transformations diffusionnelles : Régies par la compétition entre la force motrice thermodynamique de sous-refroidissement et la diffusion du carbone (des phénomènes modélisables par l'équation cinétique de Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov), elles engendrent la ferrite, la perlite (dont la finesse dépend de la rapidité du refroidissement) ou la bainite.[3]

- Transformations displacives (sans diffusion) : Lors d'un refroidissement très brutal (trempe), le carbone n'a pas le temps de diffuser, provoquant un cisaillement coopératif du réseau cristallin pour former la martensite. Exceptionnellement dure mais très fragile, la martensite nécessite quasi systématiquement un traitement thermique subséquent de revenu afin d'en relâcher les contraintes internes et de restaurer la ténacité du matériau.[3]

I.2.1.3 L'Ingénierie des Alliages : Synergies Microstructurales :

Outre le carbone, divers éléments d'alliage sont ajoutés pour optimiser les propriétés de l'acier (trempabilité, résistance, inoxydabilité) en interagissant spécifiquement avec les phases du fer [4] :

- Silicium (Si) et Manganèse (Mn) : Désoxydants majeurs. Le manganèse neutralise le soufre (évitant la fragilité à chaud au laminage) et augmente significativement la trempabilité. [5]
- Nickel (Ni) : Élément gammagène (stabilisateur d'austénite) qui ne forme pas de carbure. Il améliore drastiquement la résilience et la ténacité, notamment à basse température. [5]
- Chrome (Cr) et Molybdène (Mo) : Éléments alphagènes et fortement carburigènes, accroissant la résistance à l'usure. Au-delà de 10,5 %, le chrome forme une couche protectrice rendant l'acier inoxydable. [5]
- Aciers micro-alliés (HSLA) : L'ajout d'infimes quantités (< 0,1 %) de titane (Ti), niobium (Nb) ou vanadium (V) forme des précipités nanométriques. Ceux-ci bloquent la croissance des grains lors de la déformation, augmentant simultanément la limite d'élasticité et la ténacité (effet Hall-Petch). [6], [7]

I.2.2 Histoire et développement de la sidérurgie :

L'ère de l'acier industriel de masse débute au milieu du XIXe siècle, supplantant définitivement le fer puddlé, grâce à trois inventions fondamentales [9]:

- Le Procédé Bessemer (1856) : Invention d'une cornue permettant l'affinage pneumatique par insufflation d'air dans la fonte liquide. L'oxydation fortement exothermique des impuretés élève la température de l'acier sans combustible externe. Toutefois, son revêtement interne acide (silice) l'empêche de phosphorer les minerais, rendant cet acier cassant à froid avec les fontes phosphorées européennes. [8]
- L'Invention de Thomas et Gilchrist (1877) : L'adaptation d'un revêtement basique (dolomie) et l'ajout de chaux permettent enfin de neutraliser et de retenir le phosphore dans le laitier. Cette rupture technologique a rendu exploitables les immenses gisements phosphoreux d'Europe (comme la minette lorraine) et permis de revendre le laitier comme engrais agricole (les scories Thomas). [8]
- Le Four Siemens-Martin (1864) : Ce procédé utilise un four à réverbère doté de régénérateurs de chaleur pour atteindre de très hautes températures. Sa grande flexibilité permettait notamment de refondre de la fonte solide et d'énormes quantités de ferrailles recyclées, ce qui a assuré sa domination qualitative jusqu'au milieu du XXe siècle. [8]

I.2.3. Les grands procédés de fabrication de l'acier :

Aujourd'hui, l'industrie sidérurgique mondiale repose sur trois filières de production principales, chacune adaptée aux matières premières disponibles et aux exigences énergétiques.

I.2.3.1. La Filière Intégrée : Haut Fourneau et Convertisseur BOF :

Représentant environ 70 % de la production mondiale, cette filière repose sur un couplage lourd entre la réduction au carbone et l'affinage :

- Bilan matériel : Pour produire une tonne d'acier brut, la filière consomme en moyenne 1370 kg de minerai de fer, 780 kg de charbon (coke), 270 kg de calcaire et 125 kg de ferrailles recyclées. [10]
- Le Haut Fourneau (BF) : Le minerai aggloméré y est enfourné en strates alternées avec le coke métallurgique. Ce dernier sert de combustible, génère le gaz réducteur (monoxyde de carbone) et maintient la perméabilité de la charge. La fonte liquide produite, saturée en carbone, est alors envoyée vers l'aciérie. [10], [11]

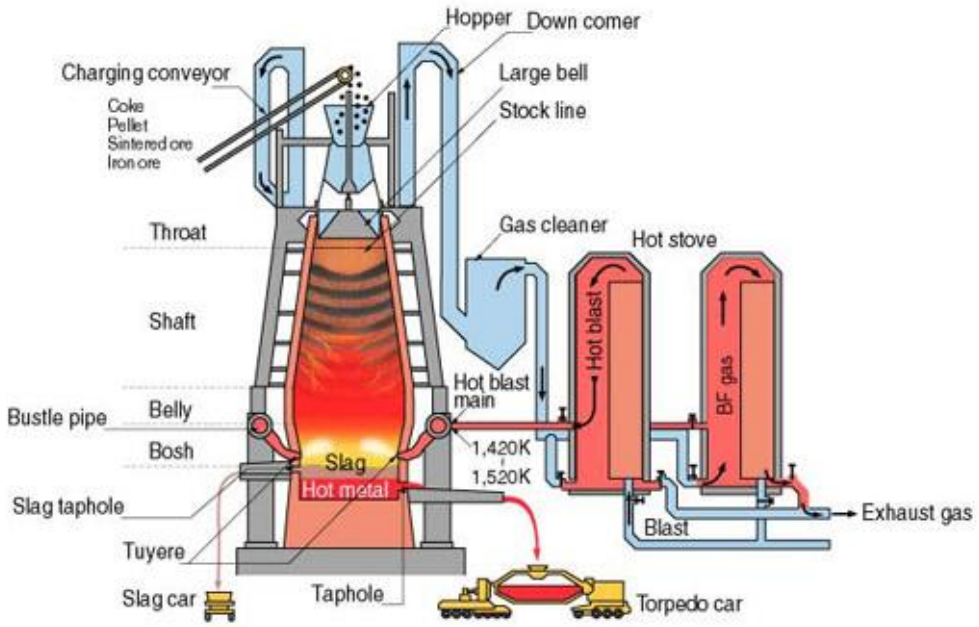


Figure I.2 : Le Haut Fourneau. [10]

- Le Convertisseur à l'Oxygène (BOF ou procédé LD) : L'affinage s'opère par l'injection d'oxygène pur à vitesse supersonique sur le bain de métal en fusion, ce qui évite de dissoudre de l'azote fragilisant dans l'acier. [12]

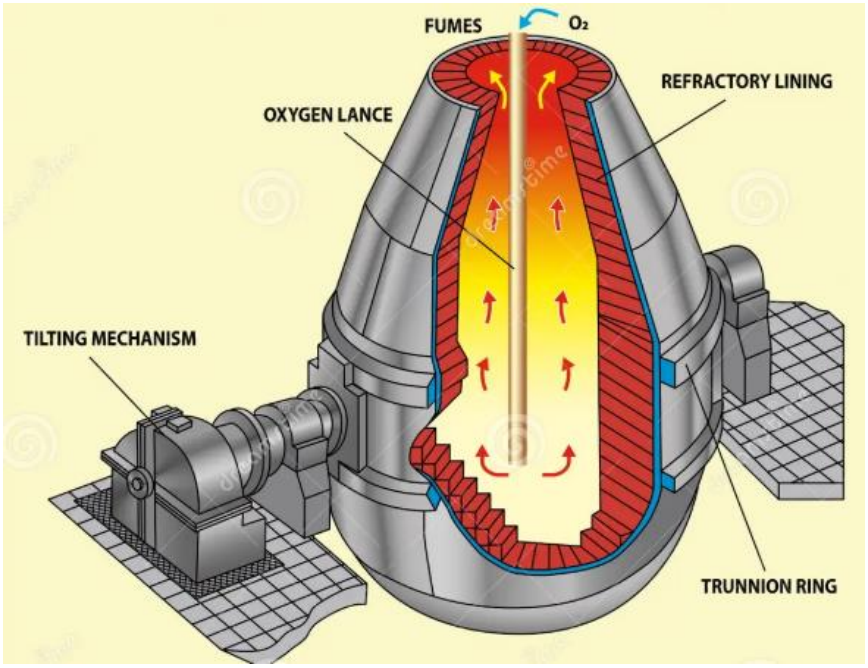


Figure I.3 : Le Convertisseur à l'Oxygène. [12]

- Régulation thermique : L'oxydation du carbone, du silicium et du manganèse génère énormément de chaleur. Pour éviter un emballement thermique, on introduit jusqu'à 25 % de ferrailles froides dans le convertisseur pour refroidir le bain. [10]

1.2.3.2. La Filière Électrique (EAF) et le Recyclage :

La deuxième artère vitale de la sidérurgie, représentant environ 30 % de la production mondiale (et plus de 45 % en Europe), est la filière électrique, centrée sur le Four à Arc Électrique (EAF - Electric Arc Furnace). Autrefois réservée à l'élaboration de petites quantités d'aciers spéciaux, cette technologie a conquis la production de masse. [10]

Son principe fondamental réside dans la fusion de charges métalliques solides par le biais d'un arc électrique de très haute puissance, généré entre de massives électrodes en graphite et la charge elle-même. Cette voie est intrinsèquement liée à l'économie circulaire : elle utilise en moyenne 710 kg de ferrailles recyclées pour 1000 kg d'acier, complétées par des intrants primaires et une consommation électrique d'environ 2,3 GJ/t. Si cette filière permet une flexibilité de production inégalée par rapport à la rigidité des hauts fourneaux, elle est tributaire de la disponibilité et de la qualité des ferrailles. En effet, l'accumulation d'éléments résiduels dits "tramp éléments", comme le cuivre ou l'étain, qui ne s'oxydent pas dans le four électrique, restreint l'usage de cette filière pour la production d'aciers plats très exigeants, à moins de procéder à une dilution avec du fer pur.[13]

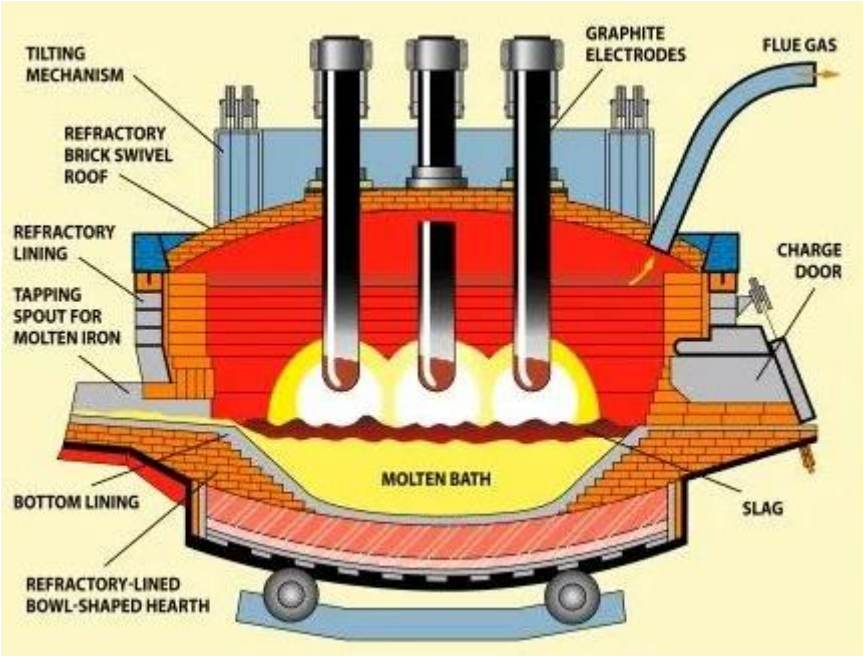


Figure I.4 : four a arc électrique. [13]

1.2.3.3. La Voie de la Réduction Directe (DRI) :

C'est précisément pour fournir une source de fer purifié et contourner la dépendance au coke que la réduction directe (DRI) s'est développée, devenant le maillon technologique le plus dynamique de la sidérurgie moderne. La réduction directe consiste à extraire l'oxygène du minerai de fer à l'état solide, sans passer par la phase liquide, produisant ainsi une "éponge de fer" poreuse (DRI - Direct Reduced Iron, ou HBI - Hot Briquetted Iron pour sa version compactée). [14]

Thermodynamiquement, la désoxydation des hématites (Fe_2O_3) et des magnétites (Fe_3O_4) requiert des agents réducteurs gazeux puissants, principalement le dihydrogène (H_2) et le monoxyde de carbone (CO). La stœchiométrie des réactions indique que la réduction d'une tonne de fer nécessite théoriquement près de 600 normaux mètres cubes (Nm3) de ces gaz. La cinétique de la réaction est conduite à des températures comprises entre 800 °C et 1100 °C, dans des réacteurs de type fours à cuve. La série de réactions successives se résume ainsi :[14]

Tableau I.1 : Les relation des réductions. [14]

Réduction par monoxyde de carbone (CO)	Réduction par hydrogène (H2)
$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$	$3Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O$ $Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3FeO + H_2O$
$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$	$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$

I.3 La gestion des risques :

I.3.1 Concepts généraux :

Pour mener à bien une étude de sécurité sur une installation industrielle, il est primordial d'établir un vocabulaire de référence rigoureux, permettant de distinguer la source d'un problème de ses conséquences. L'ingénierie des risques s'appuie sur les définitions suivantes :

- Le Danger : Dans la littérature HSE, le danger est perçu comme une propriété inhérente à un système ou à un produit. En s'appuyant sur la norme IEC 61508 et les travaux d'Alain Desroches, le danger se définit comme une source de nuisance potentielle. Il englobe toute situation ou élément matériel (comme un gaz sous pression ou une haute température) capable de provoquer des dommages corporels, des destructions d'équipements ou des dégradations de l'écosystème. La norme ISO 45001 (qui a succédé à l'OHSAS 18001) corrobore cette approche en qualifiant le danger de situation susceptible de nuire à la santé

- Le Risque : Contrairement au danger qui est un état latent, le risque implique une exposition. Selon les principes du Guide ISO/IEC 51, le risque est la traduction concrète de la rencontre entre un danger et une cible vulnérable. Il se quantifie mathématiquement en croisant la fréquence (ou probabilité) d'apparition d'un événement redouté avec l'ampleur de ses conséquences. L'ingénierie modélise cette relation par l'équation fondamentale :

Risque (R) = Probabilité (P) × Gravité (G).

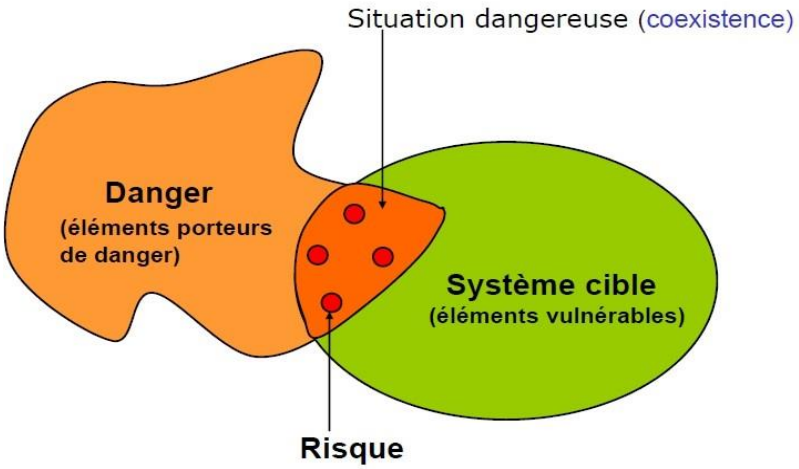


Figure I.5 : La relation entre Danger et Risque. [ISO/IEC 51]

- La Conséquence et le Dommage : Si l'ISO 31000 parle de « conséquence » comme étant le résultat d'un événement affectant les objectifs d'une organisation, le Guide ISO/IEC 51 préfère le terme de « dommage » lorsqu'il s'agit de sécurité physique. Il se définit formellement comme une lésion physique, une atteinte à la santé des personnes, une destruction de biens ou une pollution de l'environnement.

- La Sécurité : L'industrie lourde admet qu'il est techniquement impossible d'éliminer toute source de danger. C'est pourquoi le Guide ISO/CEI 73 définit la sécurité non pas comme l'éradication du risque, mais comme « l'absence de risque inacceptable ». Un système industriel est donc déclaré sûr lorsque les mesures mises en place permettent de confiner le risque résiduel en deçà d'un seuil de tolérance préalablement défini par l'entreprise et la réglementation.

I.3.2 Les objectifs de la gestion des risques :

Selon la norme ISO 31000, l'objectif fondamental de la gestion des risques est la création et la préservation de la valeur. Elle améliore les performances, encourage l'innovation et soutient l'atteinte des objectifs. Appliquée au secteur industriel et aux procédés complexes, cette gestion vise des objectifs plus spécifiques :

- Protéger les personnes et l'environnement : Assurer que les risques d'accidents majeurs (incendies, explosions, dispersions toxiques) sont réduits à un niveau acceptable.
- Garantir la continuité d'exploitation : Prévenir les défaillances des équipements critiques pour éviter les arrêts non planifiés et coûteux.
- Assurer la conformité réglementaire : Répondre aux exigences légales et normatives en matière de sécurité (HSE).
- Optimiser l'allocation des ressources : Identifier les scénarios les plus critiques pour concentrer les investissements de sécurité (par exemple : en dimensionnant correctement les couches de protection indépendantes).

I.3.3 Principes de la gestion des risques :

La norme ISO 31000 :2018 énonce huit principes fondamentaux garantissant l'efficacité et l'efficience du management du risque. Pour être efficace, la gestion des risques doit être :

1) Intégrée : Elle fait partie intégrante de toutes les activités de l'organisation.
2) Structurée et exhaustive : Une approche cohérente conduit à des résultats comparables et fiables.

3) Sur mesure : Le cadre de gestion et les processus sont proportionnés au contexte externe et interne de l'installation étudiée (les enjeux d'une aciérie ne sont pas ceux d'une industrie agroalimentaire).
4) Inclusive : L'implication appropriée des parties prenantes permet que leurs points de vue soient pris en compte.
5) Dynamique : Les risques peuvent apparaître, changer ou disparaître à mesure que le contexte de l'installation évolue (vieillissement des équipements, modification d'une boucle de contrôle).
6) Basée sur la meilleure information disponible : L'évaluation doit tenir compte des données historiques, de l'expérience et des prévisions futures.
7) Prenant en compte les facteurs humains et culturels : Le comportement humain influence considérablement la gestion des risques industriels.
8) Axée sur l'amélioration continue : Le système de gestion s'améliore continuellement grâce à l'apprentissage et à l'expérience

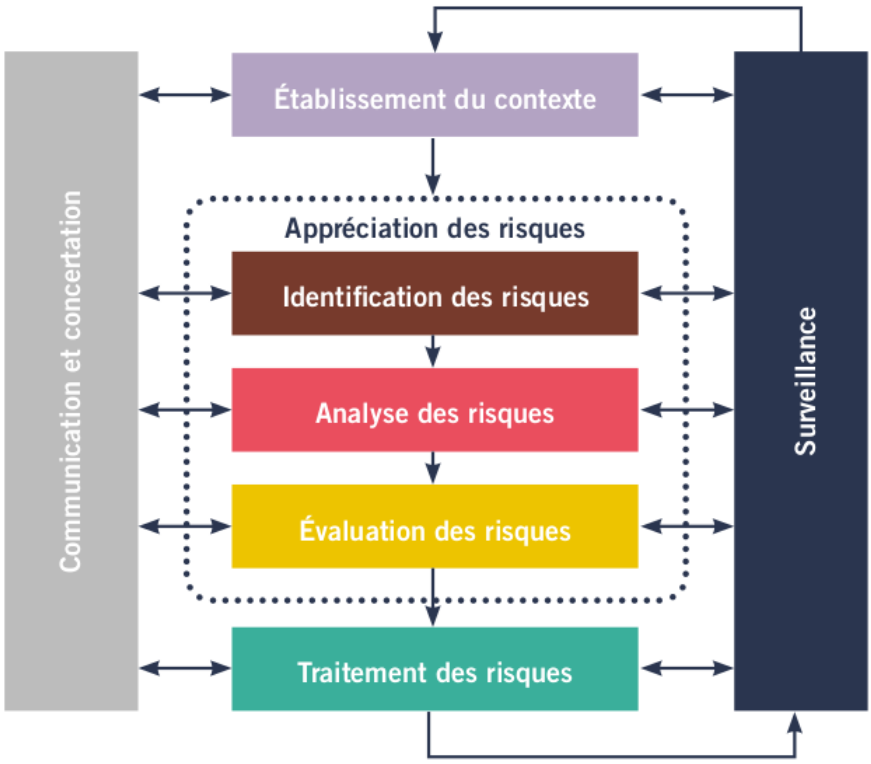


Figure I.6 : Processus de management des risques. [ISO 31000]

I.3.4 Démarche de La gestion des risques :

La mise en œuvre d'une politique de sécurité efficace au sein d'une installation industrielle repose sur une méthodologie rigoureuse et structurée. Conformément à l'architecture globale préconisée par la norme ISO 31000, la gestion des risques s'articule autour d'un processus systématique et itératif.

Le cœur technique de ce processus, qui vise à statuer sur l'acceptabilité d'une situation dangereuse, se décompose en trois phases fondamentales, telles que définies par le Guide ISO/IEC 51 :2014 :

A. L'analyse du risque :

Cette première étape est purement exploratoire et diagnostique. Elle consiste à scruter l'installation ou le système étudié afin d'en extraire toutes les sources de dangers potentielles. L'objectif est de comprendre la mécanique d'apparition d'un accident en identifiant les événements initiateurs et en déterminant les paramètres qui caractérisent le risque, à savoir la probabilité d'occurrence et la gravité potentielle des dommages.

B. L'évaluation du risque :

Il s'agit d'une phase décisionnelle. L'évaluation s'appuie directement sur les grandeurs estimées lors de l'analyse préalable pour statuer sur la viabilité de la situation. L'ingénieur compare le niveau de risque calculé avec des critères d'acceptabilité prédéfinis (souvent représentés par une courbe de tolérance). Cette procédure permet de trancher de manière objective : le risque résiduel est-il tolérable en l'état, ou franchit-il la limite de l'inacceptable ?

C. La réduction (ou maîtrise) du risque :

Lorsqu'un risque est évalué comme inacceptable, l'exploitant a l'obligation d'intervenir. La maîtrise du risque regroupe l'ensemble des dispositions techniques et organisationnelles déployées pour ramener le danger sous le seuil de tolérance. Selon le Guide ISO/IEC 51 :2014, cette stratégie de réduction s'appuie sur deux catégories de mesures compensatoires :

- **Les mesures de prévention :** Elles agissent en amont de l'événement redouté. Leur fonction est de réduire la probabilité (ou la fréquence) d'apparition de la situation dangereuse initiale pour éviter que l'accident ne se déclenche.
- **Les mesures de protection :** Elles interviennent en aval. Si la prévention échoue et que l'événement survient, ces dispositifs ont pour rôle d'en limiter la gravité et d'atténuer l'ampleur des dommages subis par les personnes, les biens ou l'environnement.

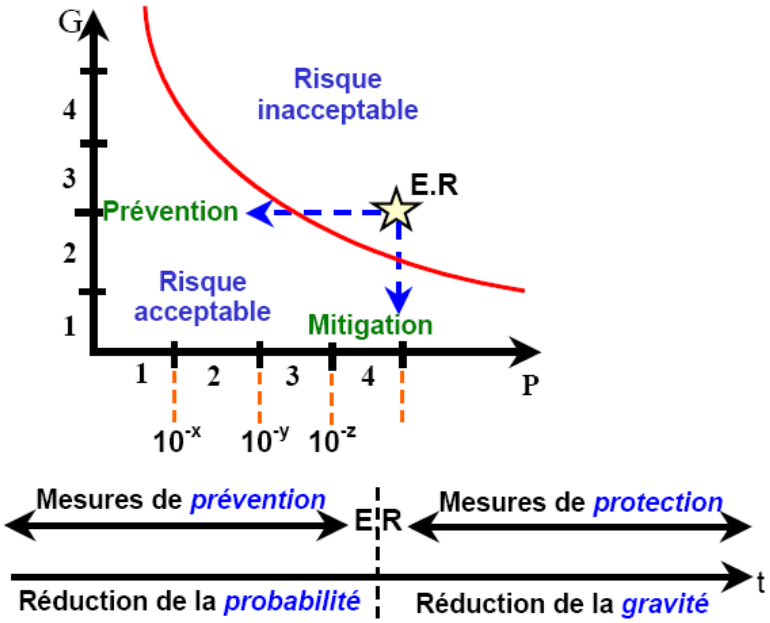


Figure I.7 : L'espace du risque [ISO/IEC Guide 51 :2014]

I.4 Cadre Réglementaire et Normatif :

La gestion des risques ne se fait pas dans un vide juridique. Elle est encadrée par des lois nationales et des standards internationaux qui imposent des obligations de moyens et de résultats.

I.4.1 Législation Algérienne :

L'Algérie a pris conscience très tôt de la nécessité de protéger son tissu industriel et ses citoyens contre les risques technologiques majeurs. Le socle de cette protection repose sur plusieurs textes fondamentaux, para port a journal officiel république algérien (JORA) :

Tableau I. 2 : Législation Algérienne [JORA]

Catégorie	Référence Officielle	Domaine de Risque	Objectif principal
Loi Algérienne	Loi n° 24-04 (26 fév. 2024)	Catastrophes et Risques Majeurs	Nouveau cadre global remplaçant l'ancienne loi de 2004. Axée sur la prévention, l'intervention et la résilience face aux catastrophes (séismes, inondations, risques industriels). Elle rend obligatoire l'intégration des risques dans les plans de développement.

Décret Algérien	Décret exécutif n° 25-132 (27 avr. 2025)	Plans de Prévention	Fixe les modalités pour créer et mettre à jour les plans généraux de prévention. Il définit notamment les zones non constructibles pour protéger les populations.
Loi Algérienne	Loi n° 88-07 (26 jan. 1988)	Santé et Sécurité au Travail (SST)	C'est la loi de base en entreprise. Elle oblige tout employeur à garantir un environnement de travail sain, à identifier les dangers et à fournir les moyens de protection à ses employés.
Loi Algérienne	Loi n° 19-05 (17 juil. 2019)	Risques Incendie et Panique	Définit les règles obligatoires de prévention (détection, évacuation, accessibilité) pour protéger les personnes et les biens, notamment dans les établissements recevant du public.
Loi Algérienne	Loi n° 03-10 (19 juil. 2003)	Risques Environnementaux	Exige des études d'impact environnemental pour tout nouveau projet industriel et applique le principe du "pollueur-payeur".

I.4.2 Standards Internationaux :

Les normes internationales incluent les méthodologies éprouvées pour respecter les impératifs de sécurité et les responsabilités, conformément au cadre législatif national. Même si elles sont fréquemment imposées de manière volontaire, ces normes sont désormais le langage commun et le référentiel universel de l'industrie mondiale pour assurer une démarche de prévention rigoureuse, homogène et proactive.

Tableau I. 3 : Standards Internationaux [ISO / IEC]

Catégorie	Référence Officielle	Domaine de Risque	Objectif principal
Normes internationales.	ISO 31000	Gestion des Risques (Général)	Le standard de référence mondial. Il donne une méthode universelle pour identifier, évaluer et traiter l'incertitude dans n'importe quel domaine ou entreprise.

Normes internationales.	ISO 45001	Management de la SST	Aide les organisations à mettre en place un système de management pour prévenir les accidents de travail et les maladies professionnelles (complète parfaitement la loi 88-07).
Normes internationales.	ISO 14001	Management Environnemental	Cadre pour maîtriser l'impact environnemental des opérations d'une entreprise et se conformer aux exigences légales locales.
Normes internationales.	ISO 22301	Continuité d'Activité	Aide les entreprises à se préparer aux crises (naturelles, cyberattaques, pandémies) pour continuer à fonctionner ou redémarrer rapidement.

I.5 Identification des Risques Majeurs en Sidérurgie :

I.5.1 Risques liés aux fluides et gaz de process :

Le fonctionnement même d'une usine de réduction directe repose sur la circulation continue, à haute température et sous pression, de volumes massifs de gaz réducteurs et de fluides de traitement. Les fuites de ces éléments constituent la première cause d'accidents majeurs dans ces installations.[15]

1.5.1.1. Intoxication au monoxyde de carbone (CO) :

Le monoxyde de carbone est l'un des agents réducteurs primaires générés par le reformage du gaz naturel. Son danger extrême réside dans ses propriétés physiques : il est totalement incolore, inodore et insipide. Sur le plan physiologique, le CO possède une affinité pour l'hémoglobine du sang environ 200 à 250 fois supérieure à celle de l'oxygène, provoquant une hypoxie tissulaire foudroyante. Selon les standards opérationnels, une concentration dépassant 50 ppm constitue un danger grave pour le personnel. Dans les usines DRI, le risque de fuite est particulièrement élevé autour des conduites de gaz d'étanchéité (seal gas), des compresseurs, et sous le réformateur. [15]

1.5.1.2. Inflammabilité et explosibilité de l'hydrogène (H_2) :

La molécule d'hydrogène étant la plus petite existante, elle fuit à travers les joints et les microfissures beaucoup plus rapidement que le gaz naturel. L'hydrogène présente une plage d'inflammabilité extrêmement large (de 4 % à 74 % dans l'air) et une température d'auto-ignition d'environ 570 °C. La moindre étincelle statique peut déclencher une explosion. De plus, la flamme d'hydrogène est presque invisible à la lumière du jour et n'émet que très peu de chaleur radiante, ce qui signifie qu'un travailleur peut s'y exposer sans s'en rendre compte. [15]

1.5.1.3. Fragilisation par l'hydrogène (Hydrogen Embrittlement) :

L'hydrogène sous pression pose un risque métallurgique majeur. Les atomes d'hydrogène peuvent pénétrer le réseau cristallin des aciers (pipelines, parois des réacteurs), s'accumuler dans les défauts de la structure et provoquer une chute drastique de la ductilité du métal. Ce phénomène peut entraîner des ruptures catastrophiques et imprévisibles des conduites. La prévention exige l'utilisation d'alliages spécifiques et parfois de revêtements barrières (comme l'alumine). [15]

1.5.1.4. Espaces clos, anoxie et dégagements du clarificateur :

Le procédé requiert de fréquentes interventions dans des espaces confinés (trémies, silos de stockage, puits du four). L'oxydation naturelle du fer pré réduit consomme l'oxygène de l'air ambiant, abaissant rapidement la concentration d'oxygène en dessous du seuil de survie (19,5 %). Les standards Midrex exigent que toute entrée s'effectue avec un permis de travail, et que les niveaux d'oxygène soient strictement compris entre 20,0 % et 21,0 % avant l'entrée sans appareil respiratoire.

Le périmètre des espaces clos s'étend également à la zone du clarificateur (Clarifier) d'eau de process. Opérant à environ 60 °C, l'eau du clarificateur peut libérer soudainement des gaz dissous ou entraînés, particulièrement du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO_2), créant une atmosphère toxique ou asphyxiante juste au-dessus du bassin et nécessitant une mesure continue des gaz. [15]

1.5.1.5. Le Sulfure d'Hydrogène (H_2S) Toxicité Foudroyante :

Le gaz naturel brut utilisé dans le procédé peut contenir de 350 à 1000 ppmv de sulfure d'hydrogène (H_2S), ce qui nécessite des unités de désulfuration (type LO-CAT) pour abaisser cette teneur entre 2 et 5 ppmv afin de protéger le catalyseur du réformateur. Le H_2S est un gaz mortel par inhalation. Bien qu'il dégage une odeur d'œuf pourri à 0,01 ppm, les fortes concentrations anesthésient rapidement le nerf olfactif, supprimant tout signal d'alerte. Étant plus lourd que l'air, il s'accumule dans les fosses et les tunnels. [15]

1.5.1.6. Toxicité extrême des Métaux Carbonyles (Fer et Nickel) :

Un risque particulièrement insidieux dans les usines DRI est la formation de carbonyles de fer (Fe (CO)_5) et de nickel (Ni (CO)_4). Ces gaz se forment lorsque le monoxyde de carbone (CO) entre en contact avec le fer métallique ou le catalyseur au nickel à des températures relativement basses (jusqu'à ~100 °C pour le fer et ~260 °C pour le nickel). Ces substances sont extrêmement toxiques, suspectées d'être cancérigènes, et mortelles à des concentrations infimes (la limite d'exposition recommandée n'est que de 0,001 ppm pour le carbonyle de nickel). Leur poids moléculaire élevé les fait stagner dans les zones basses. Les procédures interdisent strictement la circulation de gaz contenant du CO lorsque le réformateur est froid pour éviter leur formation. [15]

1.5.1.7. Produits chimiques liquides corrosifs (Traitement des eaux) :

Outre les gaz, l'usine DRI manipule des liquides chimiques dangereux, principalement pour le traitement des eaux et les opérations de maintenance. La soude caustique (NaOH) et l'acide sulfurique (H_2SO_4) sont couramment utilisés. La soude caustique est extrêmement corrosive pour la peau et les yeux (avec un risque rapide de cécité) et peut générer de l'hydrogène gazeux explosif s'il entre en contact avec des métaux légers ou du zinc. L'acide sulfurique est un acide minéral fort qui peut causer des lésions tissulaires irréversibles et des brûlures chimiques très graves en cas de projection. [15]

I.5.2 Risques d'incendie ou explosion :

1.5.2.1. Auto-échauffement et pyrophoricité :

L'extraction de l'oxygène confère au minerai une structure en nid d'abeille dotée d'une immense surface interne. Lorsque le fer pré réduit à froid (CDRI) est exposé à l'air, il se réoxyde de manière fortement exothermique. Le caractère isolant du tas de DRI empêche la dissipation thermique, amorçant une boucle autocatalytique menant à l'auto-ignition (pyrophoricité). Les standards indiquent que le CDRI ne doit pas être stocké dans des silos si sa température dépasse 65 °C, et les tas extérieurs ne doivent pas excéder 1,5 à 2 mètres de hauteur pour éviter cet emballement.[15]

1.5.2.2. Perte d'étanchéité du four (Loss of Furnace Seal) :

Le confinement des gaz combustibles dans le four de réduction est assuré par des "seal legs" (jambes d'étanchéité) supérieures et inférieures, maintenues sous pression par un gaz d'étanchéité. Si le niveau de matériau chute ou si la pression du gaz faiblit, le sceau est rompu, relâchant instantanément des gaz explosifs et hautement toxiques (CO, H_2) dans la zone de chargement ou de déchargement. Ce risque critique est géré par des vannes à guillotine (slide gates) couplées à des capteurs de pression et des sondes nucléaires de niveau.[15]

1.5.2.3. Génération d'hydrogène en milieu humide :

Si le DRI entre en contact avec de l'eau, la corrosion aqueuse du fer entraîne un dégagement massif d'hydrogène gazeux. Dans un silo fermé ou la cale d'un navire, cet hydrogène s'accumule et crée rapidement une atmosphère explosive (dès 4 % en volume). L'utilisation d'eau pour éteindre un feu de DRI est proscrite, sauf en cas d'inondation totale (drenching) en dernier recours, car l'eau vaporisée agit comme un oxydant aggravant la réaction.[15]

I.5.3 Risques Physiques : Thermiques, Mécaniques, Électriques et Radiations :

1.5.3.1. Stress thermique et contraintes physiologiques :

Les environnements de travail autour des réacteurs et des fours à arc électrique (EAF) génèrent une chaleur radiante accablante. Les évaluations ergonomiques (indice WBGT) montrent que ces températures excèdent systématiquement les limites d'exposition tolérables (TLV), induisant une déshydratation sévère. Ce stress provoque épuisement, crampes et "coups de chaleur" (heatstroke), une condition neurologique potentiellement fatale caractérisée par une perte de la capacité du corps à transpirer et à se refroidir.[15]

1.5.3.2. Projections de matières en fusion (Chargement EAF) :

Le déchargement du DRI à chaud (HDRI, ~600 °C) directement dans le four à arc électrique permet de grandes économies d'énergie. Toutefois, si la ferraille ou le DRI chargé contient la moindre trace d'eau ou d'humidité, le contact avec le bain d'acier à 1600 °C provoque une vaporisation instantanée. L'expansion volumique de la vapeur engendre une explosion physique projetant violemment le métal en fusion et les scories hors du four, causant des brûlures mortelles et des incendies secondaires.[15]

1.5.3.3. Rayonnement Nucléaire et Bruit :

Les usines modernes utilisent des sondes nucléaires (à rayons gamma) sur les "seal legs" et les trémies de décharge pour détecter la présence de matière à travers les parois épaisses en acier. Bien que blindées, ces sources exigent des périmètres de sécurité stricts et des procédures de verrouillage/étiquetage obligatoires avant toute intervention. Par ailleurs, le bruit ambiant (compresseurs, cribles) dépasse fréquemment les 85 dBA, rendant le port de protections auditives (bouchons atténuant de 25 à 32 dBA) indispensable pour éviter la surdité professionnelle irréversible.[15]

1.5.3.4. Risques électriques et Électricité Statique :

L'électrisation est un risque grave omniprésent dans ces vastes complexes industriels (moteurs, appareillages de commutation, transformateurs). Un courant alternatif (AC) de seulement 15 mA suffit à provoquer des blessures graves ou la mort. De plus, l'électricité statique générée par le mouvement des bandes transporteuses non conductrices, le transport pneumatique ou la manipulation de poudres peut accumuler une charge très importante. Dans des zones où des poussières de fer ou des gaz inflammables sont présents, la décharge de cette électricité statique sous forme d'étincelle peut déclencher une explosion dévastatrice. Une ingénierie stricte de mise à la terre (grounding et bonding) de tous les équipements fixes et mobiles est incontournable.[15]

1.5.3.5. Machines tournantes et Équipements sous pression :

Les systèmes de manutention (convoyeurs, cribles) et les immenses compresseurs de gaz possèdent d'innombrables pièces en rotation (engrenages, arbres, accouplements) qui présentent un danger

extrême de happement et d'écrasement. Les carters de protection (machine guards) ne doivent être retirés pour maintenance qu'après l'application rigoureuse des procédures de consignation LO/TO (Lock Out, Tag Out, Try Out). Par ailleurs, les défaillances d'équipements sous pression (Pressure Component Failure) dues à une usure ou un mauvais entretien peuvent libérer soudainement d'énormes quantités d'énergie stockée, causant des destructions matérielles massives et des blessures mortelles.[15]

I.5.4 Risques liés aux poussières :

1.5.4.1. Dynamique des explosions de poussières de fer :

Les poussières de fer pré réduit (metallized dust) sont hautement explosives lorsqu'elles sont en suspension. La concentration minimale explosive dans l'air est d'environ 120 grammes/Nm^3. La poussière de fer présente une pression maximale d'explosion (Pmax) de 5,2 bars et un Kst de 50 bar·m/s. Une accumulation de poussière sur les structures (poutres, toits) peut être soulevée par une petite explosion primaire, déclenchant une explosion secondaire généralisée souvent dévastatrice.[15]

1.5.4.2. Silicose et toxicité pulmonaire :

Le minerai de fer brut contient une gangue riche en silice cristalline (SiO2). L'inhalation chronique de ces particules nanométriques provoque la silicose, une fibrose pulmonaire incurable. Ces particules échappent au système de filtration des voies respiratoires, se logent dans les alvéoles et provoquent une inflammation chronique. Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) classe formellement la silice cristalline comme cancérogène pulmonaire.[15]

I.6 Routeur d'expérience :

La transition technologique vers la réduction directe du fer (DRI) substitue un risque environnemental chronique par des risques industriels aigus, exigeant une analyse rigoureuse basée sur l'accidentologie. L'étude des bases de données internationales permet de mettre en évidence les vulnérabilités inhérentes à la manipulation du DRI selon les procédés utilisés.

I.6.1 Accident 1 : Incendie par combustion spontanée sur un convoyeur de DRI à Gandrange (France, 2004) :

Cet événement (répertorié ARIA 28798) illustre les risques majeurs liés à la réactivité thermochimique intrinsèque du produit fini lors de sa manutention.

- **Contexte de l'événement :**

- L'accident s'est produit le 23 décembre 2004 dans une usine sidérurgique utilisant un réseau de convoyeurs à bande pour transporter le minerai de fer pré réduit (DRI) vers les fours de fusion.

- La bande transporteuse impliquée se situait à une hauteur critique de 67 mètres au-dessus du sol.

- **Déroulement et Causes profondes :**

- Le sinistre a été déclenché par l'accumulation et la combustion spontanée de « fines » de DRI (poussières générées par l'attrition mécanique lors du transport).
- Ces fines possèdent une surface spécifique extrêmement élevée, ce qui les rend hautement susceptibles à l'oxydation rapide au contact de l'air.
- Le manque de dissipation thermique a conduit à un emballement exothermique, atteignant le point d'éclair de la bande en caoutchouc et enflammant l'infrastructure.
- La hauteur de 67 mètres a créé un effet de cheminée aérodynamique, attisant violemment les flammes.

- **Intervention et Conséquences :**

- L'intervention a été extrêmement complexe, nécessitant 76 pompiers, car la projection d'eau sur du DRI en surchauffe provoque une réaction chimique générant des flashs d'hydrogène explosifs.
- La structure métallique colossale s'est affaiblie sous l'effet de la chaleur extrême et s'est effondrée.
- Bien qu'il n'y ait eu aucune victime, le bilan économique s'est élevé à plus de 17,5 millions d'euros, dominé par les pertes d'exploitation (53,1 %) et les coûts de reconstruction (38,3 %).

- **Enseignements et Mesures Correctives (REX) :**

- Surveillance thermique : Installation d'un maillage dense de capteurs de température tous les deux mètres au-dessus des bandes pour détecter les gradients annonciateurs d'emballement.
- Maîtrise de l'empoussièrement : Intégration de dépoussiéreurs industriels aux points de chute pour éliminer les fines réactives.
- Infrastructures dédiées : Mise en place d'un réseau de Robinets d'Incendie Armés (RIA) sur les convoyeurs avec une réserve d'eau exclusive de 80 m^3 pour un noyage massif en cas d'urgence.
- Ergonomie : Aménagement de nouvelles sorties de secours le long des galeries.
- Safety by Design (Sécurité inhérente) : L'accident a mis en évidence une violation grave des principes de conception sécuritaire. La présence de postes de travail humains réguliers dans la zone d'action mortelle de la DSC doit être proscrite.
- Automatisation : Une nécessité d'automatiser intégralement le système de décendrage et d'isoler physiquement les zones à haut risque pour éviter l'exposition du personnel.
- Formation : Les opérateurs doivent recevoir une formation basée sur la compréhension physico-chimique du procédé afin de briser le cycle d'ignorance et de permettre une véritable anticipation des risques.

I.6.1 Accident 2 : Explosion majeure d'un four électrique par contact eau/métal en fusion (Cato Ridge, Afrique du Sud, 2008) :

Cet événement (répertorié ARIA 34276 et documenté dans les synthèses du BARPI sur les risques métallurgiques) illustre les conséquences catastrophiques de l'aléa de vaporisation flash (Vapor Explosion) lié aux défaillances des systèmes de refroidissement.

- **Contexte de l'événement :**

- L'accident s'est produit le 24 février 2008 dans une usine métallurgique spécialisée dans la production d'alliages.
- L'installation impliquait un grand four à arc électrique fonctionnant à une température supérieure à 1500°C pour assurer la fusion de la charge métallique.
- La voûte et les parois (virole) du four étaient protégées des contraintes thermiques par un système de refroidissement intensif, utilisant de l'eau sous pression circulant dans des panneaux tubulaires en cuivre ou en acier

- **Déroulement et Causes profondes :**

- Un défaut d'étanchéité, potentiellement causé par l'usure sévère du réfractaire et le perçage consécutif d'un tube de refroidissement, s'est produit à l'intérieur de la cuve du four.
- L'eau sous pression s'est libérée dans l'enceinte et est entrée en contact direct avec le bain d'acier en fusion.
- Le transfert thermique fulgurant a provoqué la vaporisation instantanée de l'eau. L'eau multipliant son volume par environ 1700 lors de son passage à l'état gazeux, ce changement de phase a généré une onde de surpression massive et destructrice.
- Ce phénomène strictement physique s'est doublé d'une réaction d'oxydoréduction : à très haute température, l'eau s'est dissociée au contact du métal (thermolyse), libérant de l'hydrogène gazeux qui a explosé chimiquement au contact de l'oxygène ambiant

- **Intervention et Conséquences :**

- La déflagration a littéralement soufflé la structure du four, projetant des tonnes de métal liquide, de scories incandescentes et de débris structurels à travers l'atelier.
- Le bilan humain a été catastrophique : 6 opérateurs ont été tués sur le coup par les projections et l'onde de choc, et 9 autres travailleurs ont été grièvement brûlés.
- L'intervention a nécessité l'évacuation totale de la zone, et les autorités de l'inspection du travail ont ordonné la fermeture immédiate de l'usine afin d'évaluer le niveau de sécurité global et d'enquêter sur les défaillances matérielles.

- **Enseignements et Mesures Correctives (REX) :**

- Détection précoce (Instrumentation) : Installation obligatoire de systèmes de débitmètre différentielle extrêmement sensibles sur les circuits de refroidissement, capables de déceler une perte d'eau de l'ordre de quelques litres par minute et de déclencher une alarme prioritaire.
- Fonctions de Sécurité Instrumentées (SIS) : Automatisation du processus d'urgence. La détection d'une fuite d'eau doit être asservie à l'arrêt automatique de la puissance électrique, à l'isolement de l'arrivée d'eau et à la vidange (purge) rapide des panneaux, éliminant ainsi le délai de réaction humaine.
- Maintenance prédictive : Instauration de plans de contrôle stricts des revêtements réfractaires et des panneaux de refroidissement (contrôles d'épaisseurs non destructifs par ultrasons, inspections visuelles fréquentes) pour remplacer les équipements avant leur point de rupture.
- Safety by Design (Éloignement du danger) : Renforcement de la salle de contrôle sous forme de "bunker" (vitrages thermiques et blindés anti-souffle) et établissement d'une zone d'exclusion stricte interdisant la présence humaine sur le plancher de coulée pendant les phases de fonctionnement critiques.
- Formation : Sensibilisation approfondie des conducteurs de four à la physico-chimie des accidents liés à l'humidité et au strict respect des consignes d'intervention lors des alarmes de circuit de refroidissement.

I.7 Conclusion :

Ce premier chapitre a établi les fondements théoriques de notre recherche, en soulignant la complexité et les dangers majeurs du procédé de réduction directe (DRI). La gestion des risques devient un véritable enjeu stratégique en raison des conséquences graves des accidents industriels. Il est donc essentiel d'adopter une gestion structurée, en se basant sur les normes internationales et la législation algérienne. Grâce à cette exploration purement conceptuelle, nous sommes maintenant en mesure de prendre les mesures nécessaires pour commencer l'évaluation pratique dans les chapitres suivants.

CHAPITRE 2 : Sécurité fonctionnelles et méthodes d’analyses

II.1 Introduction

Le développement de l'industrie moderne, caractérisé par des procédés de plus en plus complexes, fonctionnant à des pressions et des températures extrêmes, a inévitablement accru le potentiel de dangers majeurs. Historiquement, la gestion de la sécurité industrielle reposait sur une approche réactive : on modifiait les installations après la survenue d'un accident. Les catastrophes industrielles majeures (Flixborough, Seveso, Bhopal, Piper Alpha) ont cependant forcé un changement de paradigme vers une approche systémique et proactive.

C'est dans ce contexte qu'est né le concept de sécurité fonctionnelle. Selon les normes internationales de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), notamment la norme générique CEI 61508 et sa déclinaison pour les industries de procédés CEI 61511, la sécurité fonctionnelle désigne "la partie de la sécurité globale se rapportant au procédé et au système de commande du procédé, qui dépend du fonctionnement correct du Système Instrumenté de Sécurité (SIS) et des autres couches de protection".

La sécurité fonctionnelle repose sur un principe de cycle de vie (Safety Life-Cycle). Elle ne postule pas qu'un système peut être infaillible. Au contraire, elle part du principe que les composants matériels (capteurs, automates, vannes) finiront par tomber en panne, et que des erreurs humaines surviendront. L'objectif est donc de quantifier probabilistiquement ces défaillances et de concevoir des systèmes de protection capables de maintenir ou de ramener le procédé à un "état de sécurité" (Safe State) lorsque ces conditions anormales se présentent. Ce chapitre se propose de disséquer l'architecture des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), de comprendre l'évaluation de leurs performances via les Niveaux d'Intégrité de Sécurité (SIL), et d'analyser les méthodes qualitatives et quantitatives permettant de les dimensionner.[16]

II.2 Système instrumenté de sécurité :

En tant que barrières de sécurité, le système instrumenté de sécurité (SIS) est couramment utilisé dans les industries de procédés. Son objectif est de garantir la sécurité en évitant les événements dangereux qui pourraient causer des dommages aux personnes, aux biens matériels et à l'environnement, et en réduisant leurs répercussions.

II.2.1 Définition d'un SIS :

Un Système Instrumenté de Sécurité (SIS), souvent désigné dans l'industrie sous les termes d'ESD (Emergency Shutdown System) ou de système de verrouillage de sécurité, est un système de contrôle indépendant dédié exclusivement à la sécurité.

La norme CEI 61511 définit, quant à elle, les systèmes instrumentés de sécurité comme « système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité. Un

SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unité loriquet(s) et d'élément(s) terminal (aux) ».

La norme CEI 61508 définit les SIS comme suit : « un système E/E/PE (électrique/électronique/électronique programmable) relatifs aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité ».

Il est essentiel de définir la limite entre le Système de Contrôle Commande de Base (BPCS - Basic Process Control System) et le SIS. Le BPCS est dynamique : il régule en permanence le procédé (contrôle PID, ouverture de vannes de régulation) pour maximiser la production et maintenir les paramètres dans leur plage de fonctionnement normal. Le SIS, par contre, est fondamentalement passif. Il surveille silencieusement le procédé en arrière-plan. Son intervention se fait uniquement lorsque le BPCS perd le contrôle et que les paramètres franchissent des seuils critiques inacceptables (Trip Points).[17]

II.2.2 Les composant et architecture d'un SIS :

Un SIS n'est pas un équipement exclusif ; c'est une chaîne complète d'instrumentation qui va du procédé physique à l'action mécanique finale. Tout dysfonctionnement dans chaque maillon de cette chaîne provoque une défaillance de la sécurité globale. Le SIS se compose de trois sous-systèmes :

II.2.2.A. Les Capteurs (S : Sensors) :

Ce sont les yeux du SIS. Leur mission est de détecter les conditions anormales du procédé, comme la pression, la température, le niveau et la détection de gaz ou de flammes. Pour assurer la sécurité fonctionnelle, il est préférable d'utiliser des transmetteurs analogiques (par exemple 4-20 mA HART) plutôt que des simples pressostats mécaniques, car ils offrent une surveillance continue et des diagnostics avancés (détection de fil coupé, court-circuit).

Redondance des capteurs : Pour augmenter la fiabilité, les capteurs sont souvent multipliés. Une architecture 1oo2 (One out of Two) utilise deux capteurs ; il suffit qu'un seul détecte le danger pour déclencher l'arrêt, ce qui diminue le risque de pannes dangereuses (augmente la sécurité) mais augmente le risque de déclenchements intempestifs (diminue la disponibilité de l'usine).[17], [18]

II.2.2.B. L'Unité de Traitement Logique (LS : Logic Solver) :

C'est le cerveau du SIS, généralement un Automate Programmable Industriel de Sécurité (API de sécurité ou Safety PLC). Contrairement à un automate standard, un API de sécurité possède des microprocesseurs redondants qui vérifient mutuellement leurs calculs. En cas d'incohérence interne,

l'automate se met automatiquement en position de repli sécurisé (Fail-Safe). Pour exécuter le programme de sécurité, le solveur logique lit les entrées, utilise les équations booléennes (logique de vote, temporisations) et commande les sorties.[17], [18]

II.2.2.C. Les Éléments Finaux (FE : Final Elements) :

Ce sont les muscles du SIS. Ils exécutent l'action physique requise pour sécuriser le procédé. Dans plus de 80% des cas dans les industries de procédés, il s'agit de vannes d'arrêt (SDV - Shutdown Valves). L'élément final comprend la vanne elle-même, son actionneur pneumatique ou hydraulique, et l'électrovanne (SOV - Solenoid Operated Valve) qui pilote l'actionneur. Le principe de conception fondamental est le fonctionnement à "sécurité intrinsèque par manque d'énergie" (De-energize to trip) : en cas de coupure de courant ou de perte d'air instrumental, un ressort mécanique force la vanne à se fermer (ou s'ouvrir selon l'état sûr requis).[17], [18]

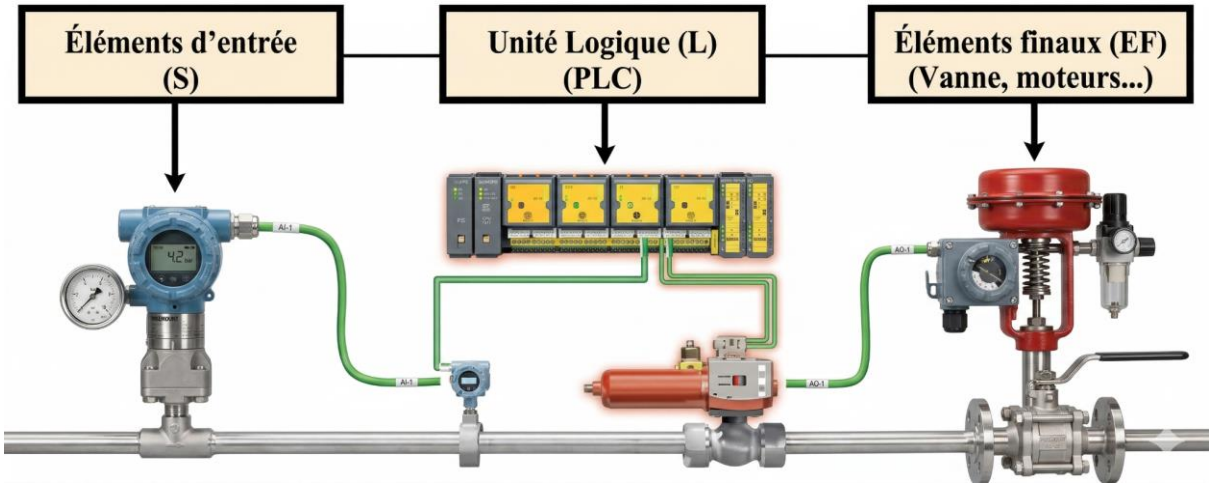


Figure II.1 : les composantes d'un SIS [17], [18]

II.2.2.D. L'architecture d'un SIS :

L'architecture définit également le niveau de redondance et les schémas de vote de ces équipements. Une redondance de type KooN est une redondance dite majoritaire, qui garantit qu'au moins K des N moyens existants sont en état de fonctionner ou en fonctionnement. [19]

Les architectures les plus couramment rencontrées sont les suivantes :

- 1oo1 : Il s'agit d'un système simple, c'est-à-dire non redondant Un seul composant (comme un capteur ou une vanne) est installé, et il est à la fois nécessaire et suffisant pour déclencher l'action de sécurité

- 1oo2 : Dans cette configuration, deux composants sont installés, mais il suffit qu'un seul des deux détecte une anomalie (ou se déclenche) pour que le système passe à l'état de sécurité Cette architecture

est plus sûre que le 1oo1, mais elle a l'inconvénient d'être plus sensible aux déclenchements intempestifs (nuisance trips

- 2oo2 : Deux composants sont installés, et il est impératif que les deux composants s'activent simultanément pour déclencher l'arrêt de sécurité Cette configuration a pour but principal de réduire les déclenchements intempestifs (pour arrêter la production à tort, il faudrait que les deux tombent en panne de manière sûre au même moment) Cependant, elle est considérée comme moins sûre que le 1oo1 car si l'un des deux composants a une défaillance dangereuse, le système ne pourra pas s'arrête

2oo3 : Il s'agit d'un système de vote majoritaire Trois composants sont installés, et l'action de sécurité est déclenchée si au moins deux d'entre eux le demandent Cette architecture est un bon compromis : elle est tolérante aux pannes et peut survivre à la défaillance simple d'un composant (qu'elle soit sûre ou dangereuse) tout en continuant à assurer sa fonction correctement

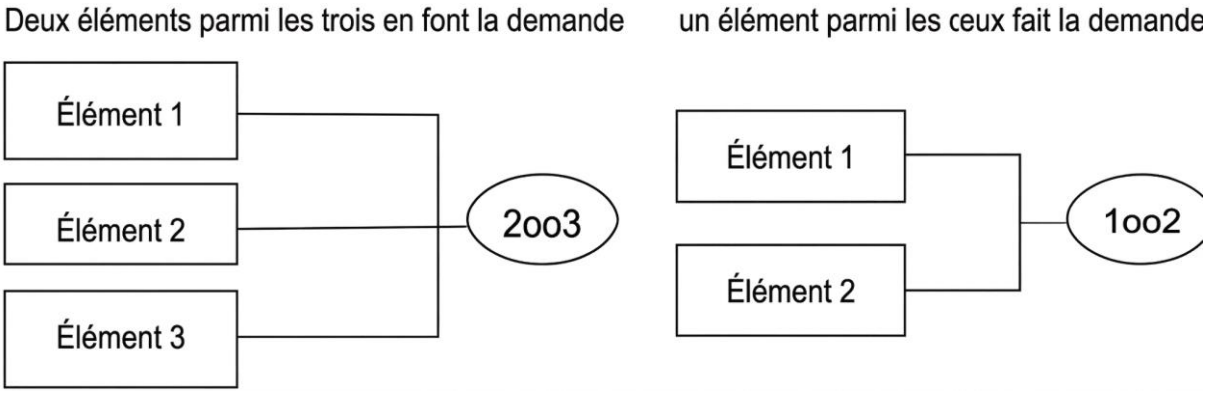


Figure II.2 : l'architecture KooN [19]

II.2.3 Mode de fonctionnement :

La fiabilité d'un SIS est fortement influencée par la fréquence à laquelle on attend de lui qu'il réagisse. La norme CEI 61508 sépare les systèmes de sécurité en deux modes de fonctionnement distincts :

II.2.3.1. Mode à faible sollicitation (Low Demand Mode) :

C'est le mode qui est le plus utilisé dans l'industrie pétrochimique et pétrolière. Dans ce mode, la fréquence des sollicitations de la fonction de sécurité (c'est-à-dire la fréquence à laquelle le procédé dérive vers une condition dangereuse) est inférieure ou égale à une fois par an. Le système est généralement inactif. Il existe un danger lié à la 'panne dormante' ou à une défaillance non révélée : une vanne qui est restée ouverte pendant deux ans pourrait se gripper au moment où nous aurons besoin d'elle. Pour ce mode, on utilise la métrique PFDavg (Probabilité Moyenne de Défaillance à la Sollicitation).[20]

II.2.3.2. Mode à sollicitation élevée ou continu (High Demand / Continuous Mode) :

Ce mode s'applique aux systèmes dont la fonction de sécurité est fortement sollicitée (plus d'une fois par an), voire en permanence, afin de maintenir l'état sûr. On le rencontre souvent dans l'industrie manufacturière, la robotique, ou les systèmes de commande de vol. Dans ce cas, la métrique utilisée est la PFH (Fréquence de défaillance dangereuse par heure).[20]

II.3 Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) :

Il est fréquent de faire une confusion en amalgamant SIS et SIF. Il est essentiel de définir de manière précise la SIF dans le cadre d'un mémoire d'analyse de risques. [21]

- Le SIS représente le matériel physique (hardware) et logiciel (software).
- La SIF (Safety Instrumented Function) représente l'action fonctionnelle de prévention ou d'atténuation d'un danger spécifique.

Une SIF est une boucle de contrôle spécifique qui vise à amener le processus vers un état de sécurité défini par rapport à un événement indésirable spécifique (Hazardous Event).

Exemple détaillé d'une SIF :

- Supposons un ballon séparateur de gaz :

Événement redouté : Surpression qui provoque l'explosion du ballon. SIF 01 : "Prévenir la surpression dans le séparateur (V-100) en fermant la vanne d'alimentation (SDV-101) en moins de 5 secondes, si la pression mesurée par les transmetteurs (PT-101A/B/C) dépasse 50 bar."
Chaque SIF est spécifiée dans un document contractuel extrêmement détaillé appelé SRS (Safety Requirements Specification). Ce document spécifie pour chaque SIF : l'état de sécurité à atteindre, le délai maximal requis (Temps de réponse maximal), l'architecture requise, les tests périodiques (Proof Tests), et surtout, le niveau de performance requis, connu sous le nom SIL.

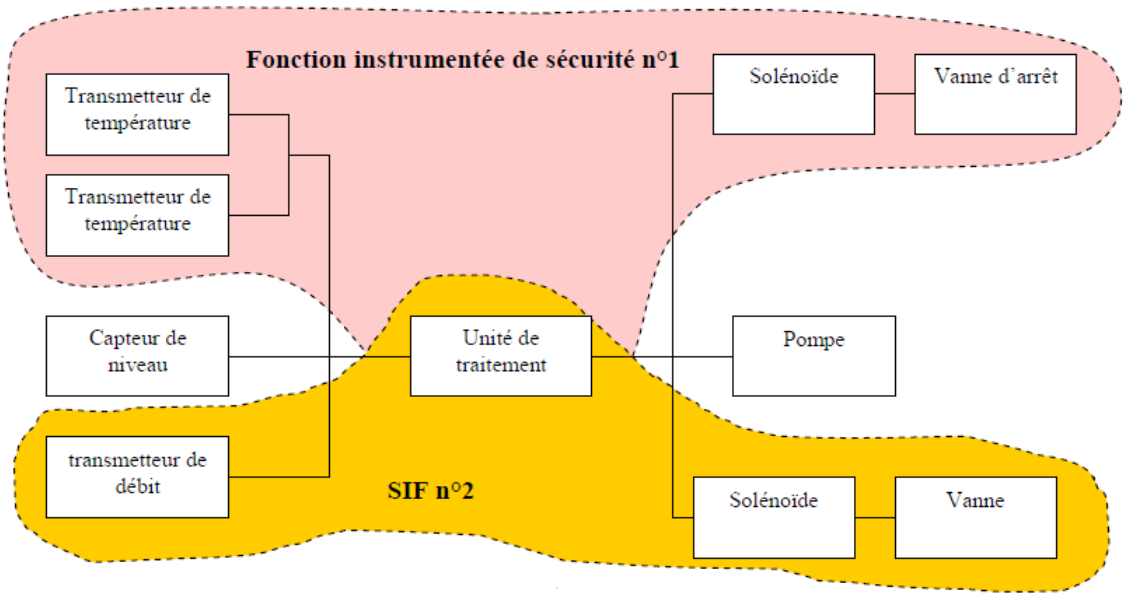


Figure II.3 : fonction instrumentée de sécurité [S.Sklet, 2005]

II.4 Le Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) :

Le SIL, ou Niveau d'Intégrité de Sécurité, est le pilier mathématique de la norme CEI 61508. La mesure statistique du SIL est utilisée pour évaluer la performance requise d'une Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF). Le niveau de réduction du risque (RRF - Risk Reduction Factor) doit être mis en place par la SIF pour réduire le risque intrinsèque du processus à un niveau acceptable pour l'entreprise et la société. Dans les industries de procédés, où les systèmes fonctionnent en mode "faible sollicitation", le SIL est défini par le PFDavg (Probabilité Moyenne de Défaillance à la Sollicitation).[22]

En mathématiques, le facteur de réduction de risque est l'opposé de la probabilité de défaillance :

$$\mathbf{RRF = 1 \div PFD\ avg}$$

Cela signifie que si un procédé à un risque inacceptable qui se produit 1 fois tous les 10 ans, et qu'on installe une SIF avec un PFDavg de 0.01 (RRF de 100), le risque résiduel devient de 1 fois tous les 1000 ans.

La norme CEI 61508 définit quatre niveaux discrets d'intégrité de sécurité (SIL 1 à SIL 4), le SIL 4 étant le niveau d'exigence de fiabilité le plus élevé. Le tableau suivant, tiré de la norme, illustre les exigences pour chaque niveau.[20], [22]

Tableau II.1 : Niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) en fonction des mesures cibles de défaillances [20], [22]

Niveau SIL	PFDavg (Probabilité Moyenne de Défaillance)	RRF (Facteur de Réduction de Risque)	PFH (Fréquence de défaillance dangereuse par heure).
4	10-5 ≤ PFDavg <10-4	De 10001 à 100000	10-9 ≤ PFH<10-8
3	10-4 ≤ PFDavg <10-3	De 1001 à 1000	10-8 ≤ PFH<10-7
2	10-3 ≤ PFDavg <10-2	De 101 à 1000	10-7 ≤ PFH<10-6
1	10-2 ≤ PFDavg <10-1	De 10 à 100	10-6 ≤ PFH<10-5

Les fonctions SIL 1 et SIL 2 sont souvent rencontrées dans l'industrie du pétrole et du gaz (norme CEI 61511). Le SIL 3 est spécifiquement conçu pour les risques d'accidents catastrophiques, entraînant de nombreuses pertes de vies humaines, telles que la surpression extrême dans un réacteur chimique toxique. Quant au SIL 4, il est virtuellement inapplicable dans l'industrie de procédés avec des instruments conventionnels. En cas d'analyse de risque nécessitant un SIL 4, la directive d'ingénierie stricte est de modifier le design physique du procédé (changement de conception inhérente) pour réduire le risque à la source, au lieu de s'en remettre à l'électronique.

II.5 Barrière de sécurité : (IPL - Independent Protection Layer) :

II.5.1 Le concept de barrière de sécurité :

Le modèle du fromage à trous (Modèle de Reason) et la stratégie de 'Défense en Profondeur' sont les fondements de l'approche moderne de la sécurité fonctionnelle. Il ne faut jamais qu'un seul dispositif de sécurité soit utilisé dans un procédé industriel. Il est protégé par plusieurs couches successives appelées Barrières de Sécurité ou IPL (Couches de Protection Indépendantes).[23]

Pour qu'un dispositif de sécurité soit officiellement classé comme une IPL (ce qui est crucial pour la méthode LOPA que nous étudierons plus tard), il doit répondre à des critères stricts définis par la norme CEI 61511.

- Indépendance : L'IPL ne doit pas être affectée par l'événement initiateur qui a causé la déviation, ni par la défaillance d'une autre couche de protection. Par exemple, si la vanne de régulation et la vanne d'arrêt d'urgence partagent la même alimentation pneumatique, elles ne sont pas indépendantes.

- Spécificité : L'IPL doit être capable de prévenir ou de mitiger spécifiquement la conséquence de l'événement redouté visé.

- Audibilité (Auditability) : Il doit être possible de tester et de prouver régulièrement l'efficacité de l'IPL.
- Fiabilité (Dependability) : L'IPL doit avoir une capacité de réduction de risque quantifiable, généralement d'au moins un facteur 10 (PFD $\leq$ 0.1)

II.5.2 Les types de barrières de sécurité :

Les barrières de sécurité (IPL) peuvent être classifiées selon deux axes principaux : leur moment d'intervention par rapport à l'événement dangereux, et la nature de leur fonctionnement.[17]

II.5.2.A. Classification selon le moment d'intervention (Proactive vs Réactive) :

Cette classification repose sur la chronologie de l'accident, c'est-à-dire si la barrière agit avant ou après la perte de contrôle du procédé :

1. Les Barrières Proactives (ou Préventives) :

Les IPL proactives agissent en amont pour éviter l'apparition même de l'événement dangereux (comme une perte de confinement ou une dégradation des équipements). Elles visent à maintenir le procédé dans son domaine de fonctionnement normal ou à l'y ramener. Ces barrières incluent :

- La conception à sécurité intrinsèque (Inherently safer design) : élimination ou réduction des dangers à la source dès la conception.
-Le Système de Commande de Processus de Base (BPCS) : boucle de commande ordinaire dont l'action habituelle est de réguler le processus pour empêcher le scénario de se produire.
-La supervision et les alarmes de processus : alarmes nécessitant une action corrective de l'opérateur, à condition que ce dernier dispose du temps nécessaire et d'une procédure claire pour intervenir efficacement.
-Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) préventifs : systèmes dédiés qui amènent le procédé vers un état de sécurité avant que l'événement redouté ne survienne.

2. Les Barrières Réactives (d'Atténuation) :

Aussi appelées "Systèmes d'Atténuation des Conséquences (CMS - Conséquence Mitigation Systèmes)", les IPL réactives interviennent après le début de l'événement redouté pour réduire les dommages et la gravité des conséquences. Elles ne préviennent pas l'événement, mais en limitent l'impact. Elles incluent :

- Les systèmes d'atténuation mécanique : appareils de limitation de la pression (soupapes de sécurité, disques de rupture, reniflards), les canalisations de trop-plein ou les digues de rétention.

-Les systèmes d'atténuation actifs : les systèmes déluge pour les incendies ou les dégagements de fumée, déclenchés par des détecteurs.

-La réponse d'urgence : les procédures d'évacuation de l'installation, les sirènes d'alarme, et l'intervention des secours au niveau de la communauté

II.5.2.B. Classification selon la nature du fonctionnement (Active vs Passive) :

Cette classification distingue les barrières selon leur besoin en énergie et en actionnement pour remplir leur mission de sécurité :

1. Les Barrières Passives :

Les couches de protection passives sont généralement d'ordre mécanique ou structural. Elles n'ont besoin d'aucune source d'énergie, de détection instrumentée ou de mouvement pour être efficaces une fois installées.

- Exemples typiques : Les murs coupe-feu, les digues de rétention, l'accès limité par des barrières physiques, ou encore la résistance mécanique inhérente des récipients sous pression.

2. Les Barrières Actives :

Les barrières actives nécessitent une chaîne d'actions complète pour fonctionner : une détection de l'anomalie, un traitement logique de l'information, et une action physique (mécanique, électrique ou pneumatique) nécessitant une source d'énergie.

- Exemples typiques : Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) composés de capteurs, de solveurs logiques et d'éléments finaux (comme des vannes d'arrêt), les Systèmes de Commande de Processus de Base (BPCS), ou encore les systèmes de déluge automatisés.

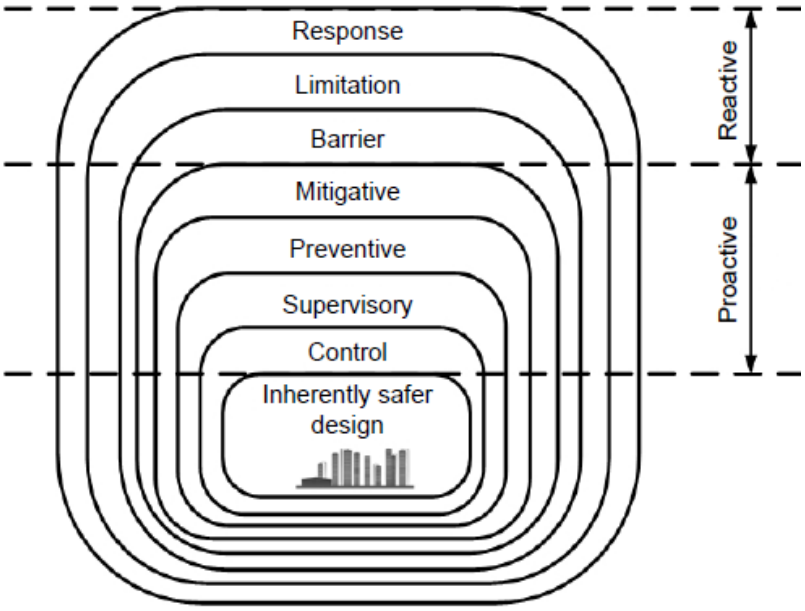


Figure II.4 : Graphique de couches de protection mettant en évidence les IPL proactives et réactives[17]

II.6 Les méthodes d'analyses des risques :

II.6.1 Méthode d'allocation SIL :

L'allocation du Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) est une étape critique dans le cycle de vie des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS). Elle repose sur des méthodes d'analyse des risques structurées qui permettent de déterminer le niveau de réduction de risque requis pour protéger les installations, le personnel et l'environnement. Les deux approches complémentaires pour mener à bien cette allocation sont l'étude HAZOP (Hazard and Operability Studies) pour l'identification des scénarios, et la méthode LOPA (Layer of Protection Analysis), souvent utilisée à la suite de la méthode HAZOP, pour l'évaluation de la réduction du risque par les barrières de sécurité et la spécification du niveau SIL.[24]

II.6.1.1 Méthode HAZOP :

II.6.1.1.1 Définition, objectif et domaine d'application :

La méthode HAZOP est un outil d'analyse des risques formalisé, systémique et semi-empirique, qui a été initialement inventé en 1965 en Grande-Bretagne par la société Imperial Chemical Industries (ICI), Son développement s'est accéléré à la suite d'accidents industriels majeurs, comme la catastrophe de Flixborough en 1974, la transformant en une pratique incontournable pour l'identification des dangers.

HAZOP définit comme l'application d'un examen critique formel et systématique aux intentions du procédé et de l'ingénierie d'une installation afin d'évaluer le potentiel de danger lié à un mauvais fonctionnement ou à une mauvaise utilisation d'équipements, La méthode se caractérise par une démarche de type inductive, partant d'une cause (la déviation) pour aller vers l'effet (la conséquence sur le système)

Les objectifs fondamentaux de la méthode HAZOP sont doubles. Premièrement, elle vise à identifier de manière exhaustive les dangers potentiels dans le système, qu'ils se limitent à la proximité immédiate de l'équipement ou qu'ils s'étendent à l'environnement ; Deuxièmement, elle a pour but l'identification des problèmes d'exploitabilité, c'est-à-dire les causes de perturbations et les déviations de la production susceptibles de nuire à la qualité ou de mener à des dysfonctionnements complexes.

Ses domaines d'application englobent l'industrie pétrolière et gazière offshore, l'industrie nucléaire, le traitement des eaux, l'industrie agroalimentaire, la papeterie, la cimenterie, et même les processus d'évacuation ou d'organisation dans les établissements de santé ;

Elle est particulièrement efficace pour les systèmes "thermo-hydrauliques" continus ou discontinus où des flux de matières et d'énergies sont mis en jeu. [25]

II.6.1.1.2 Principes et notion de base :

- Système : Il s'agit d'un « ensemble de matériels, de logiciels, d'hommes, organisé pour assurer des fonctions données dans des conditions données ». Il englobe l'intégralité du processus industriel, de l'acheminement des produits jusqu'à leur transformation et leur stockage.[26]

- Nœud : C'est un sous-ensemble ou un élément spécifique issu de la décomposition du système étudié, qui réalise une fonction bien définie dans le procédé (par exemple, un équipement comme un réservoir ou une pompe).[25], [26]

- Intention : C'est la description de la façon dont le procédé, les éléments et les caractéristiques doivent se comporter dans un nœud pour être conformes aux attentes et désirs du concepteur, ou à une plage de fonctionnement spécifiée.[26]

- Déviation : C'est un écart par rapport aux intentions initiales de la conception (le design) et de la conduite des opérations.[26]

Mot guide + Paramètre = Déviation

- Paramètre : Il s'agit d'une grandeur physiquement mesurable (comme la température, la pression, le débit) ou d'une action / opération à réaliser, qui caractérise l'intention de la conception.[26]

- Mots guides (ou mots-clés) : Ce sont de simples mots ou de courtes phrases (ex : "pas de", "plus de", "autre que") associés à l'intention dans le but de guider l'équipe, de stimuler le processus créatif et de permettre la découverte des déviations.[26]

- Cause : Ce sont les raisons, les problèmes ou les défaillances (d'origine matérielle, humaine ou externe) pour lesquels une déviation se produit.[26]

- Conséquences : Il s'agit du ou des résultats engendrés par la déviation, ou qui découlent directement de la cause elle-même.[26]

- Protection (Barrière de sécurité) : C'est l'ensemble des dispositions (liées à la conception, la construction, l'exploitation et les urgences) adoptées pour prévenir l'occurrence d'un phénomène dangereux, ou pour en limiter l'étendue et la gravité des conséquences sur les éléments vulnérables. [26] , Il y a des protections qui :
    - Identifient les déviations (détecteurs, alarmes, etc.)
    - Compensent les effets de la déviation (systèmes de contrôle automatique, etc.)
    - Préviennent l'occurrence des déviations (gaz inerte dans les stockages de substances inflammables, etc.)
    - Préviennent l'escalade de la déviation (ESD, etc.)
    - Relayer le procédé des déviations dangereuses (PSV, évent)

Tableau II.2 : model d'un tableau HAZOP

Déviation	Les causes	Les conséquences	Barrière de sécurité existant	Recommandations

II.6.1.1.3 Déroulement HAZOP :

- **Documentation et acteurs :**

La mise en œuvre pratique d'une étude HAZOP est un processus lourd qui nécessite une préparation documentaire méticuleuse et une organisation humaine précise :

- La documentation : L'analyse ne peut s'effectuer qu'à partir de documents techniques à jour et détaillés. Pour les produits, il faut collecter les Fiches de Données de Sécurité (FDS), les caractéristiques thermodynamiques et la cinétique des réactions

Pour le procédé, les éléments cruciaux sont les schémas de circulation des fluides (PFD - Process Flow Diagram) et surtout les schémas d'ingénierie détaillés de type PID (Piping and Instrumentation Diagram) qui modélisent l'installation avec toutes les tuyauteries et l'instrumentation, S'y ajoutent les bilans matières/thermiques, la matrice des sécurités, et les procédures d'exploitation et de maintenance.[27]

- Les acteurs : L'étude est un travail de groupe nécessitant la technique du brainstorming structuré. L'équipe pluridisciplinaire est composée de :

❖ L'animateur HAZOP (Leader) : Il est le garant exclusif de la méthode. Neutre par rapport à la conception, il oriente les débats, formule les déviations, stimule l'équipe pour éviter les impasses et gère le temps

- ❖ Le secrétaire : Fonction parfois assumée par l'animateur pour les petites études, il est chargé de retranscrire en direct les débats dans le tableau d'enregistrement

- ❖ Le chef de projet / Représentant de l'ingénierie : Apporte la vision globale des choix de conception

- ❖ Les experts techniques : Ingénieurs procédés, spécialistes en instrumentation et automatismes, ingénieurs HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) et responsables de la maintenance

L'opérateur de production : Sa présence est vitale, car il possède la connaissance pratique du terrain et du facteur humain

- **Les étapes d'application :**

1.Description de l'intention
2. Choix du paramètre
3. Application d'un mot-clé
4. Formulation de la déviation
5.Recherche des causes
6. Détermination des conséquences
7. Évaluation de la gravité et probabilité
8. Identification des barrières existantes
9. Évaluation du risque résiduel
10. Formulation de recommandation

II.6.1.1.4 Avantages et limites de méthode HAZOP :

- **Avantages :**

- ❖ Le principe de croisement des mots-clés et paramètres garantit une approche hautement systématique, rigoureuse et très exhaustive, limitant le risque d'oubli de scénarios. [24], [25]

- ❖ La confrontation d'idées (brainstorming) au sein d'une équipe pluridisciplinaire stimule la créativité et permet d'identifier des problèmes d'interface inattendus, identifiant des événements qui pourraient autrement rester imprévus. [24], [25]

- ❖ Elle permet de prendre en compte de manière explicite les causes et conséquences des défaillances de composants, de conception et des erreurs humaines.

- **Les limites :**

- ❖ L'HAZOP est une méthode extrêmement consommatrice de temps (et donc coûteuse), exigeant la mobilisation de nombreux experts sur de longues périodes. [24], [25]

- Elle génère un volume documentaire très important et exige des schémas PID finaux et détaillés, ce qui limite son efficacité lors des phases de conception très préliminaires.

- Son approche par décomposition en "nœuds" peut parfois rendre difficile la perception des interactions globales ou des problèmes situés aux interfaces des systèmes complexes.

- Elle se concentre sur la recherche de causes matérielles et a parfois du mal à conceptualiser la complexité comportementale ou l'erreur humaine profonde si l'opérateur n'est pas fortement sollicité lors de l'atelier. [24], [25]

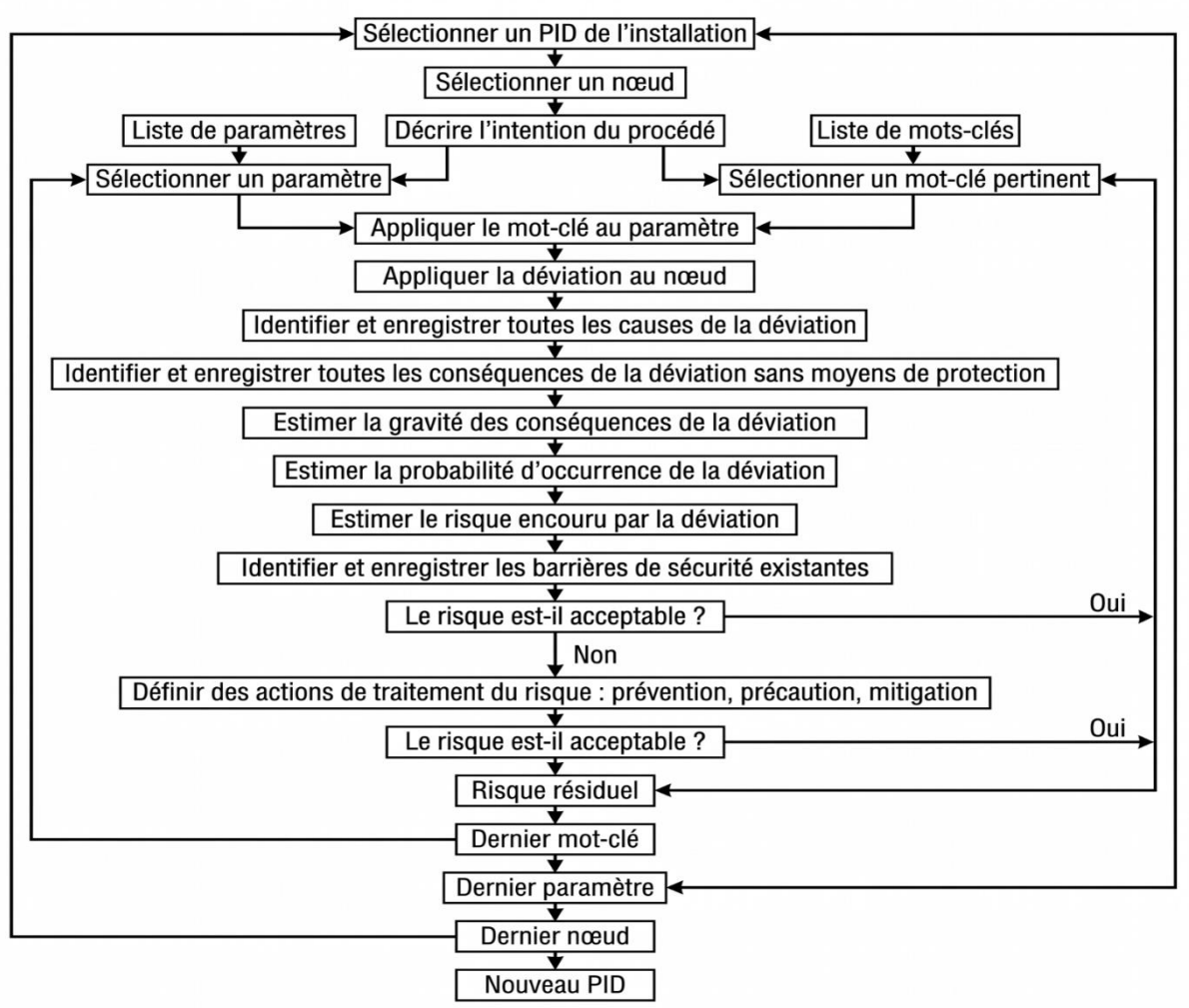


Figure II.5 : La procédure HAZOP [24], [25]

II.6.1.2 Méthode LOPA :

II.6.1.2.1 Définition et objectif :

La méthode LOPA (Layer of Protection Analysis ou Analyse des couches de protection) est une technique d'évaluation semi-quantitative des risques qui se concentre sur l'analyse de la réduction du risque obtenue par un ensemble de moyens de maîtrise , Elle s'inscrit logiquement dans la continuité d'une méthode d'identification qualitative comme l'HAZOP , Conceptuellement, la LOPA peut être considérée comme un cas particulier et simplifié de l'analyse par arbre d'événement (AAE) , Le cœur de la méthode repose sur l'identification d'une paire "cause-conséquence" et sur l'analyse des barrières physiques, technologiques ou procédurales placées entre la cause (l'événement initiateur) et l'effet (la conséquence non souhaitable), L'élément fondamental de la LOPA est le concept de Niveau de Protection Indépendant (IPL - Independent Protection Layer)

L'objectif principal de la LOPA est d'évaluer de manière rationnelle et mathématique si la combinaison des dispositifs de protection existants ou prévus permet de réduire le risque global à un niveau jugé tolérable par l'organisation ou la législation.

Dans la pratique de l'ingénierie de sécurité, la LOPA est la méthode privilégiée pour allouer et spécifier de manière semi-quantitative les Niveaux d'Intégrité de Sécurité (SIL - Safety Integrity Level) requis pour les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), en stricte conformité avec les normes IEC 61508 et IEC 61511.

Elle permet de déterminer la quantité exacte de réduction de risque manquante, qui devra être comblée par l'ajout d'une fonction instrumentée de sécurité, Elle sert également à démontrer aux autorités compétentes que le niveau SIL exigé a bien été atteint

La méthode est utilisée pour hiérarchiser et allouer les ressources budgétaires de l'entreprise vers les niveaux de protection les plus critiques et pour identifier rapidement les opérations ou les équipements qui souffrent d'un déficit de moyens de protection. [23], [24]

II.6.1.2.2 Déroulement :

Étape 1 : Définition générale et définition de l'étape :

Pour commencer, il est important de noter les informations générales de l'étude (membres de l'équipe, date, révision des documents) et de définir clairement les limites du nœud du processus étudié. Le but est de garantir que tous les membres de l'équipe comprennent le fonctionnement du processus et les schémas de circulation fluides.

Étape 2 : Description d'un événement dangereux :

L'équipe décrit l'événement dangereux spécifique sélectionné pour la revue, qui est généralement issu d'une méthode d'identification des dangers préalable telle que l'HAZOP. La description doit expliquer de manière claire, en partant du danger, comment l'événement (la

défaillance ou l'écart) se propage jusqu'à causer une perte de confinement ou une détérioration des équipements, en supposant qu'il n'y ait aucune protection.

Étape 3 : Évaluation de la fréquence de l'événement initiateur :

Les causes qui déclenchent l'événement dangereux sont documentées. On évalue ensuite la fréquence de cet événement initiateur sans prendre en considération les protections (IPL) existantes, en se basant sur les données de l'industrie ou l'expérience de l'installation. Il est possible pour l'équipe de prendre en considération des 'conditions favorables' (ou conditionnelles) indépendantes qui sont nécessaires pour permettre la propagation de l'événement.

Étape 4 : Détermination de la gravité des conséquences de l'événement dangereux et du facteur de réduction de risque (RRF) :

L'évaluation d'un événement dangereux vise à déterminer les conséquences les plus défavorables possibles sur la santé/sécurité du personnel et du public, l'impact environnemental et l'impact économique (perte de biens). En reliant ce degré de gravité à la fréquence de l'événement initial dans une matrice, l'équipe détermine le facteur de réduction de risque (FRF) requis pour réduire le risque du processus à un niveau tolérable.

Étape 5 : Identification des couches de protection indépendantes (IPL) et du facteur de réduction de risque (RRF) :

L'évaluation des risques implique de vérifier si les protections identifiées précédemment satisfont aux critères stricts d'une IPL (spécificité, indépendance, sûreté de fonctionnement, aptitude aux contrôles). Lorsque la protection respecte ces conditions de conception et de gestion, un RRF spécifique lui est attribué, par exemple un RRF de 10 pour un système instrumenté de sécurité de SIL 1**.**

Étape 6 : Identification des systèmes d'atténuation des conséquences (CMS) et du facteur de réduction de risque (RRF) :

Il existe des IPL dont le rôle est spécifique d'atténuer et de réduire la gravité des conséquences de l'événement dangereux une fois qu'il est enclenché ; on les désigne sous le nom de Systèmes d'Atténuation des Conséquences (CMS). Pour évaluer ces CMS tels que les vannes de limitation de la pression, les disques de sécurité et les digues, l'équipe leur attribue un RRF, en s'assurant que le risque de conséquences secondaires lié à leur fonctionnement est également acceptable.

Étape 7 : Détermination de l'écart de risque associé au CMS :

Cette étape permet de vérifier si le CMS fonctionne correctement et remplit la fonction pour laquelle il est conçu (conséquences secondaires). L'équipe évalue la gravité de ces conséquences secondaires (par exemple : surcharge potentielle d'une torche ou contre-pression) et la compare avec la fréquence d'utilisation du CMS pour vérifier que l'écart de risque de ce nouveau scénario secondaire est bien conforme aux critères de risque tolérable.

Étape 8 : Détermination de l'écart de risque associé au scénario :

L'écart de risque du scénario global est calculé. Pour déterminer la fréquence finale de la conséquence, on multiplie la fréquence globale de l'événement initial par les RRF de chaque IPL qui empêche l'événement et de chaque CMS qui le diminue. Les risques restants de ce scénario sont ensuite comparés aux critères de risque pour s'assurer que l'écart global a été comblé et réduit au niveau tolérable.

Étape 9 : Formulation de recommandations lorsque cela est nécessaire :

Si, après l'évaluation, l'écart de risque lié au scénario (ou au CMS) reste inchangé par rapport au niveau de Risque Tolérable (TR), l'équipe doit formuler des recommandations. Il est essentiel que ces recommandations identifient et décrivent de nouvelles fonctions de sécurité supplémentaires, les classent comme un type d'IPL spécifique, et spécifient la réduction de risque supplémentaire exigée (par exemple, l'installation d'une nouvelle fonction SIL 3) pour atteindre l'objectif de sécurité.

II.6.1.2.3 Avantage et limite :

- **Avantage :**

❖ L'avantage majeur de la LOPA est son rapport coût-efficacité. Elle offre une rigueur mathématique et une objectivité supérieure aux méthodes qualitatives subjectives (comme la matrice de risque basique), tout en demandant considérablement moins de temps et d'expertise qu'une Analyse Quantitative des Risques (QRA) ou qu'une modélisation intégrale par arbre de défaillances et d'événements

❖ Elle oblige l'analyste à se concentrer rigoureusement sur les niveaux de protection les plus fiables et critiques, en justifiant chaque barrière

❖ Elle fournit une méthode reconnue, auditable et normée pour déterminer les niveaux SIL des Systèmes Instrumentés de Sécurité (IEC 61511)

- **Limites :**

❖ Le modèle de la LOPA est fondamentalement unidirectionnel : il met l'accent sur une seule paire cause-conséquence à la fois, Les interactions complexes entre de multiples événements initiateurs ou les effets dominos agissant sur différentes parties prenantes ne sont pas bien couvertes par cette méthode simplifiée.

❖ Étant donné qu'elle suppose mathématiquement l'indépendance des barrières, la méthode est particulièrement vulnérable si l'analyste omet d'identifier les défaillances de mode commun (une seule cause initiale ou une utilité partagée qui détruit ou désactive simultanément l'événement initiateur et les barrières de protection censées le contrer).

- ❖ Elle ne s'applique pas aux scénarios très complexes ou pour des phénomènes dynamiques requérant une temporalité fine.

II.6.2 Méthode vérification de SIL :

Une fois le Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL) requis alloué (notamment grâce aux méthodes d'analyse des risques telles que l'HAZOP et la LOPA), l'étape suivante du cycle de vie de sécurité consiste à vérifier que le Système Instrumenté de Sécurité (SIS) conçu permet d'atteindre effectivement cette cible.

La capacité d'une fonction de sécurité à réduire le risque à un niveau acceptable est directement mesurée par sa Probabilité de Défaillance à la Sollicitation (PFD). Les méthodes de vérification de SIL ont donc pour objectif quantitatif d'évaluer la vraisemblance de défaillance du système à partir des probabilités des événements élémentaires (pannes de composants) qui se combinent pour le provoquer. C'est dans ce cadre d'évaluation et de modélisation de la fiabilité que s'inscrivent des méthodes déductives telles que l'Arbre de Défaillances (ADD).

II.6.2.1 Arbre de défaillance ADD :

II.6.2.1.1 Définition et objectif :

L'Arbre de Défaillances (ADD), ou Analyse par Arbre de Panne (AAP), est une méthode d'analyse des risques de type déductive (qui part de l'effet pour rechercher la cause).

Elle part d'un événement final non souhaitable, appelé "événement redouté " ou "événement-sommet", pour remonter vers les causes immédiates et les conditions dont les combinaisons peuvent le produire, La relation logique entre ces différentes causes est représentée graphiquement sous la forme d'une arborescence, qui traduit en réalité une équation booléenne. [9] ، [13]

L'Objectifs de la méthode L'analyse par ADD répond à deux objectifs principaux :

- Objectif qualitatif : Il s'agit de construire une synthèse exhaustive de tout ce qui peut conduire à un événement redouté, d'identifier les scénarios possibles et d'évaluer l'effet d'une modification du système sur la sécurité
- Objectif quantitatif : Il s'agit d'évaluer la vraisemblance (ou la probabilité) de la survenue de l'événement étudié en calculant la probabilité de l'événement de tête à partir des probabilités d'occurrence des événements de base (les défaillances élémentaires)

L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événements analysés. Les calculs reposent sur les équations logiques tirées de la structure de l'arbre de défaillances et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

II.6.2.1.2 Définition des événements :

- L'événement-sommet (ou événement redouté) : Il constitue le point de départ absolu et exclusif de l'analyse par arbre de défaillances, représentant le dysfonctionnement critique ou l'accident majeur dont on cherche à décrire l'occurrence. Placé tout en haut de la représentation graphique, cet événement unique doit réunir de manière exhaustive tout ce qui, et uniquement ce qui, est susceptible de le provoquer. Sa définition, incluant la fonction non accomplie et les conditions environnementales, doit être rigoureusement explicite et précise pour lever toute ambiguïté, car c'est cette définition initiale qui détermine la validité et la pertinence de toutes les conclusions qui seront tirées de l'analyse déductive.
- Les événements intermédiaires : Ces événements représentent des états de défaillance moins globaux que l'événement-sommet, mais qui sont encore trop complexes pour être considérés comme des causes premières. Ils sont le résultat direct d'une combinaison logique (articulée par des connecteurs tels que "ET" ou « OÙ ») de deux ou plusieurs événements de niveau inférieur. Dans la construction de l'arborescence, chaque événement intermédiaire agit comme un nœud de transition : il est appelé à être lui-même décomposé en détail dans la suite de l'arbre, jusqu'à ce que l'on atteigne le niveau de résolution souhaité pour l'analyse.
- Les événements de base (ou événements élémentaires / feuilles) : Un événement de base désigne une panne ou une défaillance fondamentale qui ne se décompose plus en événements plus fins. Couramment appelés « feuilles » car leurs boîtes de représentation se trouvent tout au bout des branches de l'arbre, ils constituent la limite de l'analyse, généralement parce que l'analyste dispose de connaissances ou de données de fiabilité suffisantes à leur sujet. La règle méthodologique la plus importante exige que ces événements de base soient strictement indépendants les uns des autres, une condition impérative pour garantir la validité des calculs de probabilités lors de l'exploitation de l'arbre.
- Les conditions : Bien qu'elles ne constituent pas à proprement parler des événements dynamiques (comme une panne soudaine), les conditions représentent des états physiques, des situations ou des contextes préexistants qui sont indispensables pour qu'un enchaînement de cause à effet puisse se réaliser. Elles conditionnent de manière passive la transmission d'une défaillance d'un niveau à l'autre de l'arborescence. Lors de la construction de l'arbre logique, ces conditions (par exemple, "chaîne A en service") interviennent et sont traitées mathématiquement et graphiquement exactement de la même manière que des événements de base ou intermédiaires.

II.6.2.1.3 Déroulement de ADD :

La construction d'un arbre de défaillance s'effectue pas à pas, de haut en bas, et suit une logique stricte :

- Définition de l'événement-sommet (ER) : Il faut définir l'événement étudié de façon explicite et précise (par exemple, "non-fonctionnement de la pompe" au lieu de juste "pompe") pour éviter les ambiguïtés
- Décomposition logique : L'événement de tête est analysé en identifiant ses causes immédiates et nécessaires, reliées par des portes ET ; OÙ.
- Développement de l'arborescence : Chaque cause intermédiaire est analysée de manière séquentielle en utilisant la même méthode, en se posant la question « comment tel événement peut-il arriver ? »
- Arrêt de la décomposition : La décomposition s'arrête lorsqu'on arrive à des événements de base bien connus pour lesquels on dispose de données de fiabilité (taux de défaillance) ou lorsqu'une analyse plus approfondie devient improductive.

Exploitation et Résultats obtenus : Les résultats issus de l'ADD sont d'une grande valeur pour la vérification du niveau SIL. L'exploitation de l'arbre permet d'obtenir :

- La recherche des coupes minimales : Une coupe minimale est l'ensemble d'événements de base (le chemin critique) strictement nécessaire et suffisant pour produire l'événement-sommet, L'identification de ces coupes permet de repérer les points de défaillance unique (vulnérabilités) et d'apprécier la défense en profondeur du système.
- Le calcul de probabilité : En affectant un taux de défaillance ou une probabilité à chaque événement de base, on calcule de proche en proche (en utilisant l'algèbre booléenne) la probabilité globale de l'événement-sommet, ce qui permet de vérifier si le système atteint la cible SIL requise.
- La hiérarchisation : L'arbre permet d'évaluer la contribution relative (l'importance) de chaque événement de base dans la survenue de l'accident, orientant ainsi les efforts de maintenance ou d'amélioration de la conception.

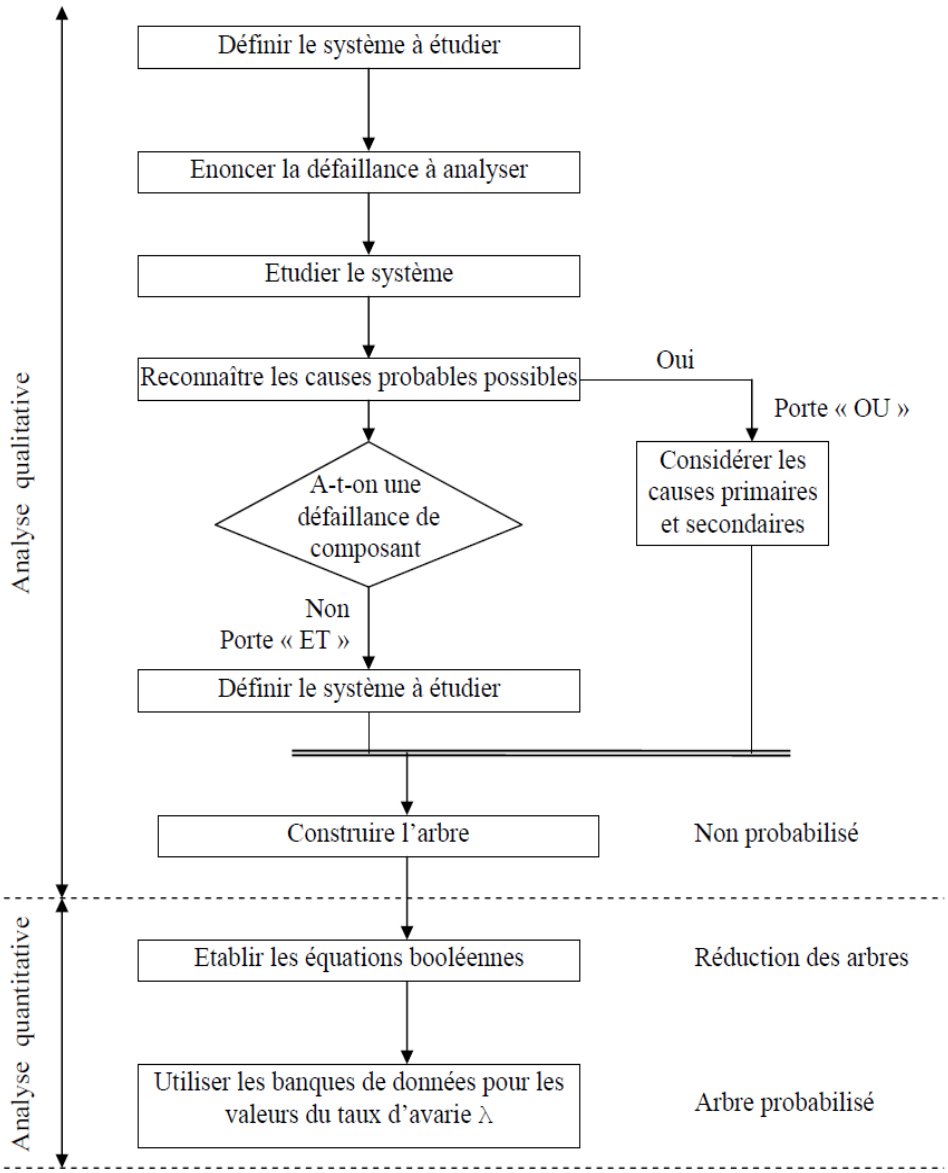
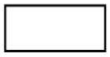
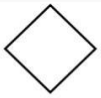
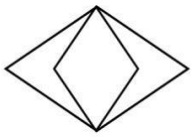
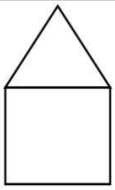


Figure II.6 : Démarche à suivre pour crée un arbre de défaillances [9] ‹ [13]

II.6.2.1.4 Symbole et porte logique de l'arbre de défaillances :

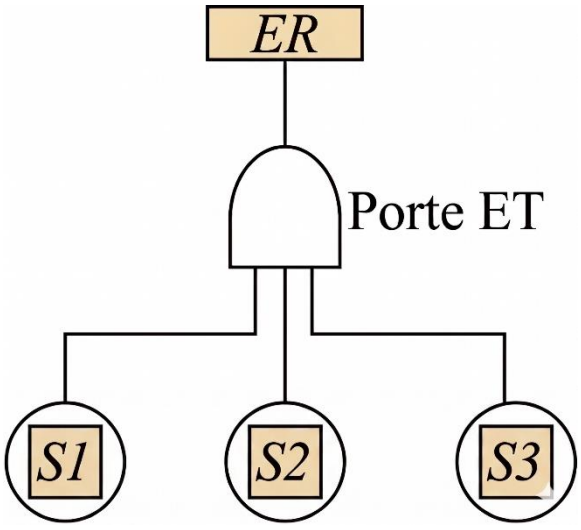
- **Symbolique des événements :**

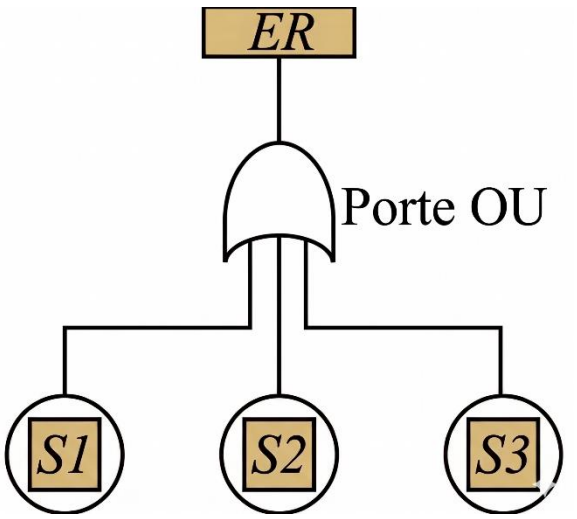
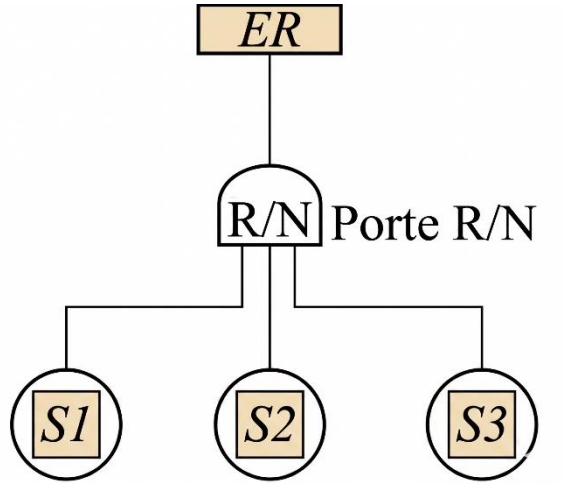
Il y a d'autres types d'événements qui sont définis par la norme. Leur symbole et leurs significations sont indiqués dans le tableau suivant. Leur symbole et leurs significations sont répertoriés dans le tableau ci-dessous

Symbole	Nom	Signification
	Rectangle	Événement redouté ou événement intermédiaire
	Cercle	Événement élémentaire
	Losange	Événement élémentaire dont les causes ne seront pas développées
	Double losange	Événement élémentaire dont les causes seront développées ultérieurement
	Maison	Evénement de base qui se produit normalement pendant le fonctionnement du système

- **Portes logiques :**

La représentation logique des événements intermédiaires à l'origine de l'événement décomposé est assurée par les portes logiques :

Porte ET : L'événement ER ne se produit que si les Événements élémentaires S1, S2 et S3 Existent simultanément	

Porte OU : L'événement ER se produit de manière Indépendante si l'un ou l'autre des Événements élémentaires S1, S2 ou d3 Existe.	
Porte R/N : Si R=1 et N=3 alors il suffit qu'une des Événements élémentaires S1, S2, S3 soient Présents pour que l'événement ER se réalise.	

II.7 Conclusion :

Le cycle de vie de la sécurité se scinde en deux grands défis pour l'ingénieur : l'évaluation du risque (allocation du SIL par des méthodes telles que LOPA) pour définir "ce qu'il faut faire", et l'ingénierie de fiabilité (vérification architecturale et calcul probabiliste du PFDavg) pour prouver "que ce qui a été conçu fonctionnera". Forts de cette base théorique et méthodologique rigoureuse, nous allons pouvoir, dans le chapitre suivant, appliquer ces normes et méthodes de calcul sur le cas d'étude réel de notre installation afin d'optimiser ses boucles de sécurité.

CHAPITRE III : Présentation générale du complexe AQS et procédure DRI

III.1 Introduction

Nous avons établi, dans les chapitres qui précèdent, les principes théoriques et la méthodologie. Ce troisième chapitre est consacré à la mise en pratique de notre étude au sein du complexe sidérurgique Algerian Qatari Steel (AQS). Nous souhaitons situer notre recherche dans le contexte industriel. Nous allons tout d'abord décrire l'entreprise de façon générale en présentant son implantation géographique, son historique de création, la composition de ses différentes unités principales et auxiliaires. Nous allons ensuite étudier son implantation industrielle à travers le procédé de Réduction Directe (DRI). Nous allons décrire en détail la dynamique des flux de matières premières et de gaz, ainsi que les réactions de réduction, puis nous nous concentrerons tout particulièrement sur le système de reformeur, composant technologique essentiel de ce processus. Cette présentation détaillée fournira les bases techniques dont nous avons besoin pour continuer notre étude.

III.2 Présentation d'AQS

III.2.1 Description :

La Société mixte "Algerian Qatari Steel" (AQS) a été créée en décembre 2013 dans le cadre d'un partenariat d'investissement entre la République algérienne et l'État du Qatar. Dotée d'un capital de 58, 610, 000, 000 Dinars Algériens. Elle est détenue à 49% par Qatar Steel International, à 46% par le Groupe Industriel SIDER et à 05% par le Fonds National d'Investissement.

L'AQS est implantée dans la zone industrielle de Bellara, dans la commune d'El-Milia (wilaya de Jijel), à 400 km au nord d'Alger, où elle gère un complexe sidérurgique de 216 hectares.

L'Algérie Qatari Steel joue un rôle crucial dans l'industrie sidérurgique nationale et régionale en raison de son volume de production, de sa fiabilité opérationnelle et de ses progrès techniques.

L'AQS accorde également une grande importance au capital humain, en tant que moteur de croissance économique et de progrès social, notamment en créant un environnement de travail qui favorise la créativité et l'innovation pour ses 1500 employés de différentes disciplines et qualifications.

L'Algérie Qatari Steel joue un rôle clé dans la création de richesse et le soutien du tissu industriel national en satisfaisant les besoins locaux du fer, et en exportant la production excédentaire vers les marchés régionaux et internationaux.

Le Complexe sidérurgique de Bellara est équipé de la technologie mondiale la plus avancée et compte neuf unités de production respectueuses de l'environnement qui assurent une production optimale et la qualité des produits conforme aux normes internationales.



Figure III.1 : Vue aérienne du site

III.2.2 Historique de création :

Le complexe d'acier de Bellara est entré en activité à la fin d'avril 2017, En raison du partenariat selon la règle 51/49 entre CEDAR et le Fonds national d'investissement, Qatar Steel, le complexe a débuté avec une capacité de production annuelle de 2 millions de tonnes de fer destiné à la construction, capacité qui atteindra 5 millions de tonnes à l'avenir. Les travaux ont débuté en mars 2015 avec une superficie de 216 hectares dans la zone industrielle de Bellara à 45 km à l'est de Jijel. Le complexe, commandé par le groupe italien Danieli et le groupe d'États-Unis Midrex et le groupe chinois Sino Steel à la phase de construction, se compose de 10 unités, dont une unité de réduction directe, trois laminoirs, deux fours, une usine de gaz naturel, un transformateur électrique, une usine de chaux et une unité de traitement de l'eau.

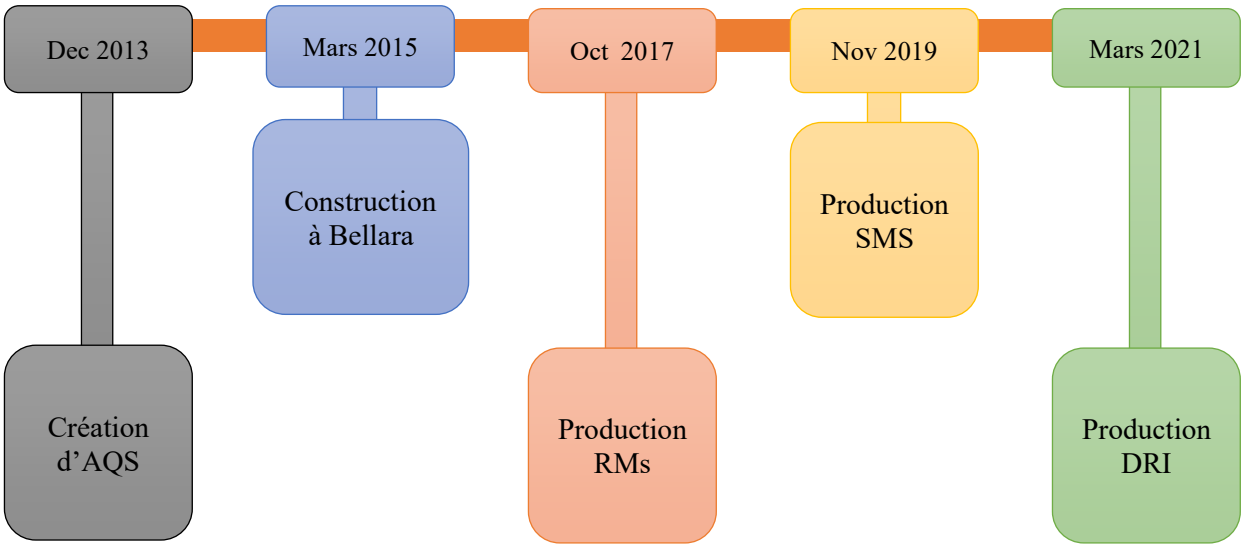


Figure III.2: échelle de temp de création des unités.

III.2.3 Les unités de complexe :

III.2.3.1. Unité principale :

1- Unité de fer a réduction directe (DRI) :

La Société a sélectionné le procédé de réduction directe MIDREX® comme méthode de production pour cette USINE.

Le fer réduit directement (DRI) est le produit de la réduction directe du minerai de fer à l'état solide (l'oxyde de fer (Fe 2 O 3) par le monoxyde de carbone et l'hydrogène dérivé du gaz naturel ou du charbon. Ou le DRI est l'élimination de l'oxygène du fer ou d'autres matériaux à l'état solide et sans fondre

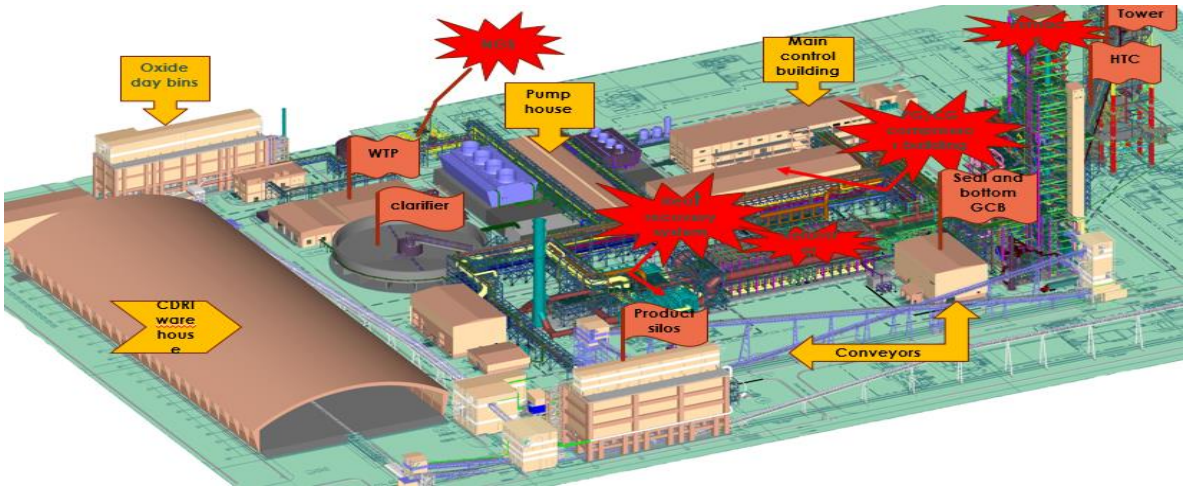


Figure III.3: Vue aérienne de l'unité DRI.

2- Unité de d'acier avec 2 fours (EAF) électrique (SMS) :

La fabrication de l'acier est le processus de production d'acier à partir de minerai de fer et de ferraille. Dans la fabrication de l'acier, des impuretés telles que l'azote, le silicium, le phosphore, le soufre et l'excès de carbone sont éliminées du fer brut, et des éléments d'alliage tels que le manganèse, le nickel, le chrome et le vanadium sont ajoutés pour produire différentes nuances d'acier. Ce projet repose sur la technologie de l'acier au four à arc électrique (1650°C), qui utilise de la ferraille et du fer à réduction directe comme matière principale.

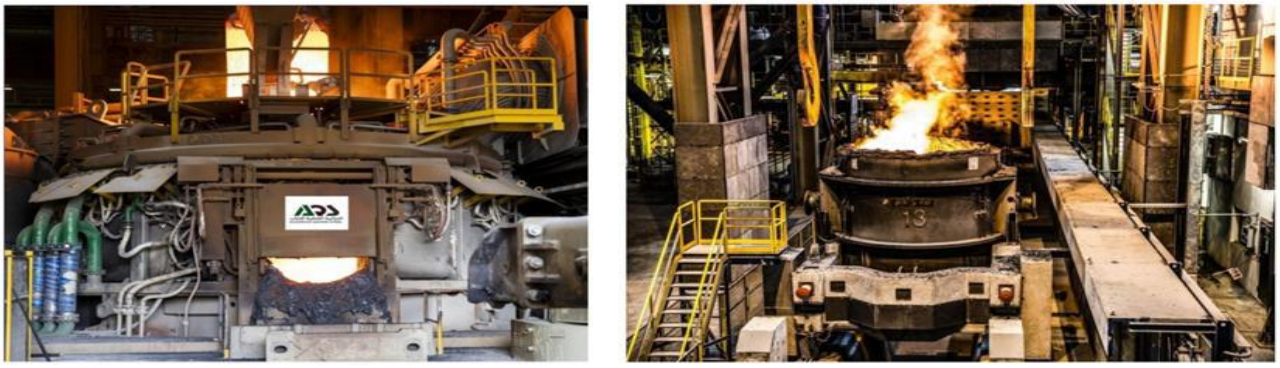


Figure III.4: Four a arc électrique.

Laminoir (Rolling Mill) (RMs):

Le processus de laminage comprend le réchauffage de chaleur de billette (1100°C), les opérations de laminage et de formage. Dans cette unité, la taille, la forme et les propriétés métallurgiques des billettes métalliques sont modifiées par compression répétée de métal chaud entre des rouleaux entraînés électriquement.



Figure III.5: Photographie de Laminoir.

III.2.3.1. Unité auxiliaire :

1- Unité traitement de chaux (LMP) :

L'usine de production de chaux est utilisée pour produire à la fois la chaux rapide et la chaux dolomitique (dolo lime) à partir des matières premières correspondantes en utilisant deux fours. Les produits seront utilisés principalement pour la fabrication d'acier dans le SMS. Une petite partie sera utilisée pour le revêtement de pellets dans l'usine de DRI



Figure III.6: Photographie d'Unité traitement de chaux.

2- Station générale de traitement des eaux (WTP) :

A travers le barrage de Boussiaba (El-Milia) l'AQS obtient ses besoins des eaux nécessaires aux circuits de refroidissement DRI, SMS et RM. Ce dernier doit passer par un certain nombre de traitements au niveau de la station WTP qui supprime les contaminants et les composants indésirables qui rendent l'eau plus acceptable pour l'utilisation final.

Les traitements dans la WTP sont des traitements classiques d'oxydation chimique et physique. La ligne de traitement comporte les opérations suivantes :

- Coagulation.
- Floculation.
- Décarbonisation.
- Clarification
- D'Ajustement du pH.
- Filtration



Figure III.7: Une vue aérienne de Station générale de traitement des eaux.

1- Unité de séparation de l'air (ASU) :

Dans l'unité de séparation d'air (ASU), l'air aspirer de l'atmosphère à travers une cheminée mise en contact avec de l'atmosphère. L'air aspiré est séparé parle procédé de distillation (rectification) aux différents constituants ce qui permet d'obtenir à la fin les gazes suivantes :

L'azote, l'oxygène et l'argon de haute pureté, cette opération passe à travers les étapes :

- Aspiration et le filtrage
- Compression (jusqu' à 32 bar)
- Purification (de CO2 et de la vapeur d'eau …)
- Refroidissement (jusqu'à -160°C)
- Fractionnement d'air (points d'ébullition différents)
- Prélèvement et stockage des gaz.

L'unité ASU couvre les besoins du complexe AQS en gaz industriels, et le taux de production d'oxygène atteint 120000 L par jour avec une pureté supérieure à 95% pour l'usage médical.



Figure III.8: Photographie d'Unité de séparation de l'air.

1- Système de manutention (MHS) :

Cette station joue un rôle essentiel dans le chargement, le déchargement et le stockage des matières premières d'une façon sûre et économique. En conséquence, l'importance de cette station réside dans le fait de facilité le déplacement de minerai de fer au haut de four à cuve et le déplacement d'éponge de fer ou DRI froid au placement de stockage. Elle aide alors la productivité et augmente le rendement.



Figure III.9: Photographie de Système de manutention.

1- Sous station électrique (MRSS) :

La sous-station électrique est l'élément clé des systèmes de production, de transmission et de distribution d'électricité. La sous-station du complexe achemine également l'énergie électrique du réseau public de transport à 400KV au centre de consommation à partir de deux ligne (une ligne fonctionne et l'autre hors service).

La sous-station contient quatre transformateurs 400/33 KV et deux transformateur 33/6,6 KV. Elle transforme la haute tension de 400KV en moyenne tension de 33 KV et de 33 KV à 6,6 KV selon les besoins de chaque unité du complexe.



Figure III.10: Une vue aérienne de Sous-station électrique.

III.3 Processus de DRI :

La société a choisi le procédé de réduction directe MIDREX® comme méthode de production pour cette usine. Le procédé de réduction directe MIDREX® est utilisé pour convertir l'oxyde de fer Fe 2 O 3 en un produit solide, à base de fer élémentaire Fe, qui est appelé fer de réduction directe ou DRI Le DRI est un excellent matériau d'alimentation pour les fours à arc électrique EAF La conversion de l'oxyde de fer en fer élémentaire est appelée réduction du minerai de fer.

Le procédé de réduction directe MIDREX® à base de gaz naturel conventionnel utilise le gaz naturel comme source d'énergie pour fabriquer du DRI.

III.3.1 Circulation de flux de gaz :

- Le gaz de réduction usé, appelé "top Gas", sort près du sommet du four à cuve pour être recyclé vers le système de traitement des gaz.
- Le gaz est ensuite divisé en deux flux qui passent à travers deux lits tassés parallèles et deux ensembles d'éliminateurs de brouillard pour l'élimination des gouttelettes d'eau dans l'épurateur. Ces deux flux sont connus sous le nom de "process Gas" et de "top Gas fuel".
- Après frottage et refroidissement, environ les deux tiers du "clean top Gas" maintenant appelé "process Gas" s'écoulent à travers un ensemble d'éliminateurs de brume à tampon maillé, puis vers l'entrée du premier des deux compresseurs de gaz de procédé centrifuges. Les compresseurs sont en série, le premier compresseur augmente la pression du gaz jusqu'à un niveau intermédiaire et le second amène le gaz à sa pression de décharge finale

- La quantité restante du gaz supérieur propre, désormais appelé Top Gas Fuel, traverse un ensemble d'éliminateurs de brume à tampon maillé, puis brûle dans les brûleurs principaux du réformateur.
- Pour créer du gaz réducteur à partir de « gaz naturel », le gaz naturel doit d'abord être reformé en hydrogène H 2 et monoxyde de carbone CO
- MIDREX REFORMER convertit les effluents gazeux recyclés (CO 2 / H 2 O) du four vertical Midrex, ainsi que le gaz naturel frais, en hydrogène H 2 et monoxyde de carbone CO

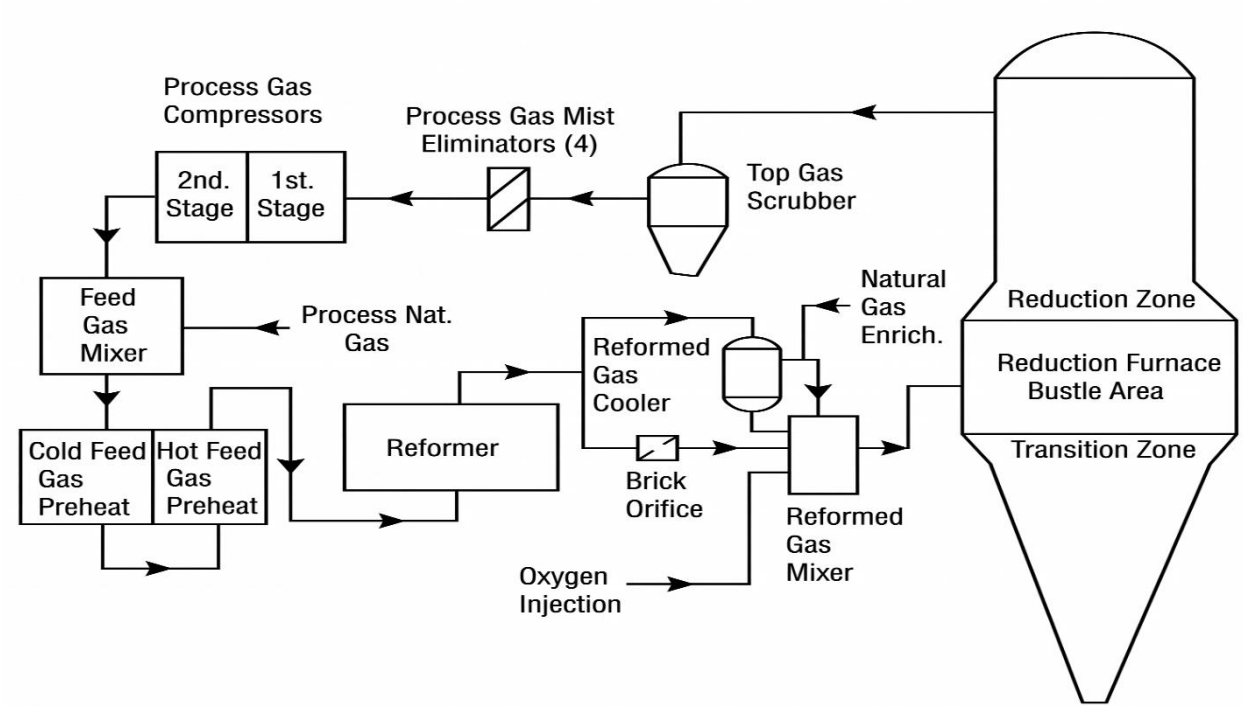


Figure III.11: Schéma de flux de DRI Midrex.

III.3.2 Reforme :

Le gaz réducteur utilisé dans le four de réduction MIDREX est produit par la recirculation d'une partie du « Top Gaz » provenant le four à réduction.

Ce gaz est d'abord nettoyé par le laveur de « Top Gaz », comprimé, mélangé avec du gaz naturel, et passé à travers tubes chauds remplis de catalyseur.

Ces tubes sont chauffés dans une boîte doublée de matériau réfractaire appelée un réformateur.

Les besoins en CO et en H2 pour la réduction sont générés par reformage de gaz naturel avec la vapeur (H2O) et du CO2 à des niveaux élevés de températures.

• Le gaz naturel est principalement du CH4 (méthane).

• les réactions de reforming :

$$CH4 + H2O <--> CO + 3H2$$

$$CH4 + CO2 <-> 2CO + 2H2$$

Les réactions endothermiques qui entraînent une expansion volumétrique (~30 %).
Le reformage catalytique du gaz naturel est réalisé à l'aide d'un catalyseur au nickel dans une plage de températures allant de 900 à 1000 C.

III.3.3 Reduction :

La plupart des oxydes de fer naturels ont la composition chimique du Fe 2 O 3 et contiennent environ 30 atomes d'oxygène en poids. Dans le four à cuve exclusif MIDREX® , l'oxygène lié chimiquement dans l'oxyde de fer est éliminé à température élevée par réaction avec un gaz réducteur contenant du monoxyde de carbone CO et de l'hydrogène H2 pour produire du fer métallisé Fe, du dioxyde de carbone CO2 et de la vapeur d'eau H2O qui sont les sous-produits des réactions.

Le cœur du processus DRI est le four à cuve, il contient trois ensembles de masselottes hydrauliques supérieure, moyenne et inférieure.

Le minerai de fer est réduit directement en fer réduit dans la partie supérieure du four, connue sous le nom de zone de réduction, par contact intime avec des gaz réducteurs chauds d'hydrogène et de monoxyde de carbone qui circulent à contre-courant de l'oxyde de fer descendant. Le gaz réducteur chaud est généré dans le reformeur.

La zone de transition du four est située sous la zone de réduction. Ici, le gaz naturel préchauffé est ajouté directement dans le four en quatre zones d'injection.
Le produit DRI sort du four de réduction par une zone de décharge inférieure conique.
Lorsque le DRI est déchargé du four à froid (température autour de 50 C), le produit est alors connu sous le nom de CDRI.

Lorsque le DRI est déchargé à chaud (température d'environ « 650 ; 700 C » pour une utilisation à chaud dans un atelier de fusion de l'acier), le produit est alors connu sous le nom de HDRI.
Les équations chimiques pour la réduction sont :

Tableau III.1 : Les équations chimiques pour la réduction

Température	Reduction by Carbon monoxyde (CO)	Reduction by hydrogène (H2)
900°C <T< 1 000°C	$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$	$3Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O$ $Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3FeO + H_2O$
1000°C <T<1 050°C	$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$	$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$

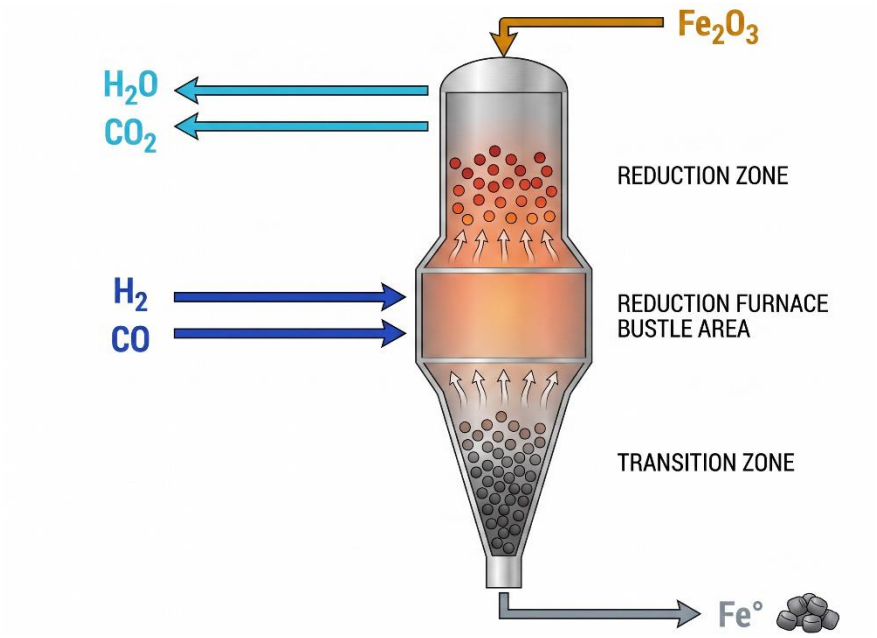


Figure III.12: Schéma qui expliquer la réduction.

III.4 Système de reformeur :

Le reformeur est situé entre le four et la zone de récupération de chaleur (Heat recovery) est Structure en acier réfractaire, étanche au gaz, soudée, contenant tubes de reformage disposés en 8 rangées et 18 baies et brûleurs pour fournir l'énergie requise., qui reçoivent le gaz d'alimentation à partir des collecteurs situés sous le reformeur. Les tubes de reformage sont remplis de catalyseur et s'étendent du toit du reformeur jusqu'au sol. Le reformeur est chauffé à environ 1090-1110°C par des brûleurs situés dans le sol. Les températures élevées dans le reformeur nécessitent que le revêtement soit doublé d'une couverture céramique et d'un matériau réfractaire.

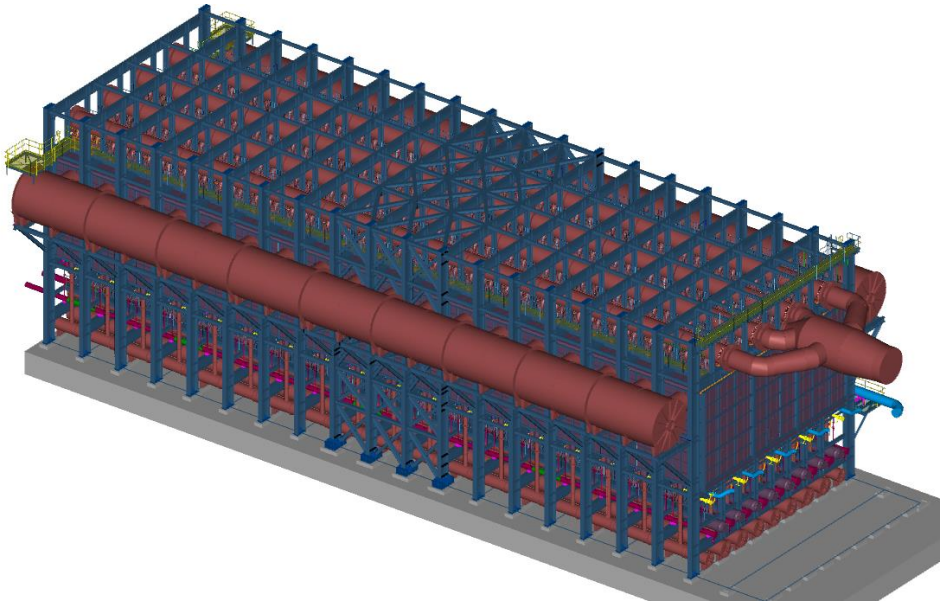


Figure III.13: Vue aérienne du Reformer.

Le gaz d'alimentation pénètre dans le tube de reformage chauffé et réagit en présence du catalyseur alors que le gaz s'écoule vers le haut. Le gaz d'alimentation est reformé pour créer un gaz réducteur ayant des concentrations élevées de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H2). Lorsque le gaz d'alimentation sort du sommet de chaque tube, il est collecté dans les collecteurs de gaz reformé doublés de matériau réfractaire.

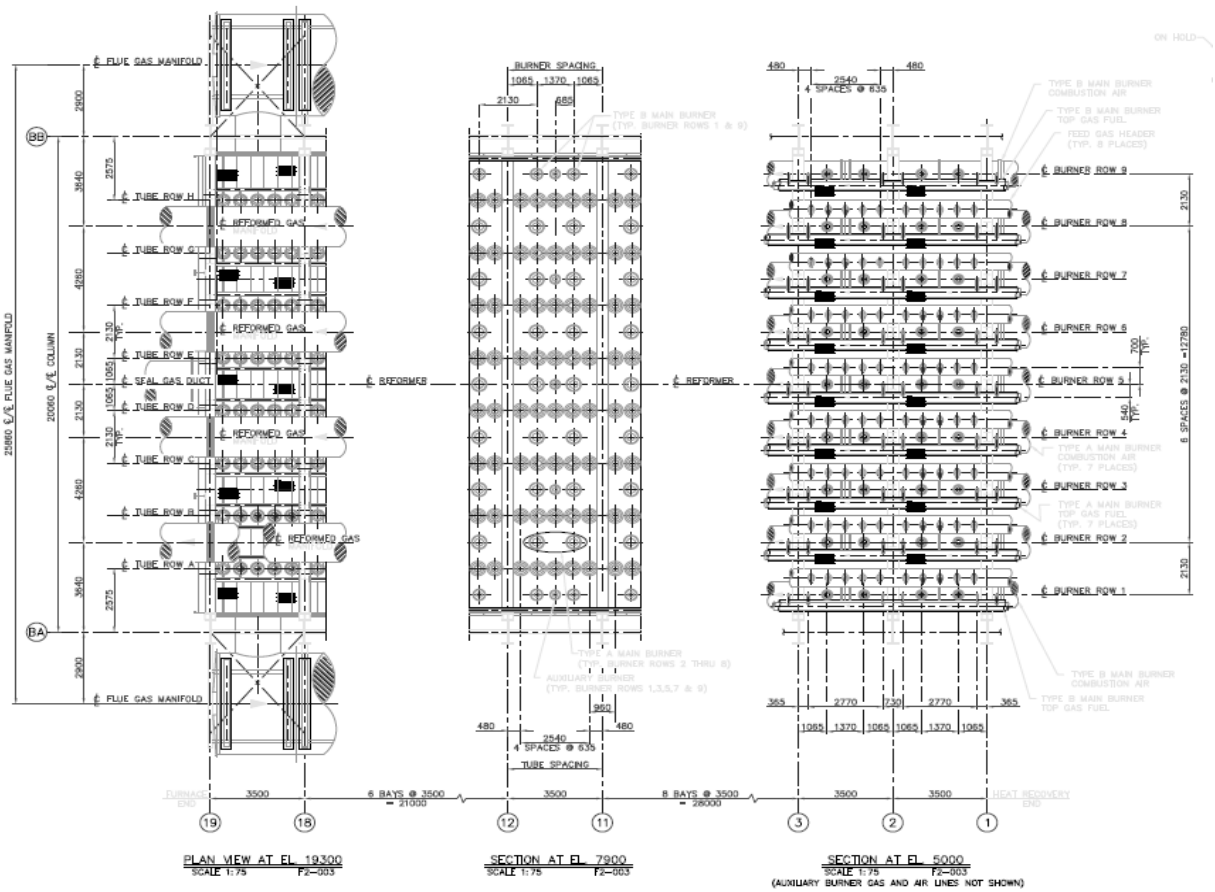


Figure III.14: Schéma du Reformer.

Le reformeur est équipé de brûleurs principaux et de brûleurs auxiliaires. Le ventilateur d'air principal fournit de l'air de combustion préchauffé aux brûleurs principaux, où il est ajouté à un mélange de gaz naturel et de gaz de tête. Le ventilateur d'air auxiliaire fournit de l'air aux brûleurs auxiliaires, où l'air est mélangé au gaz naturel et brûlé.

Les gaz de combustion des brûleurs sont extraits par les sorties de gaz de combustion situées au sommet de chaque baie. Les sorties se connectent à des conduits de chaque côté du reformeur.

La majorité des gaz de combustion est utilisée dans un système de récupération de chaleur pour préchauffer l'air de combustion, le gaz d'alimentation, le combustible gaz de tête et le gaz naturel.

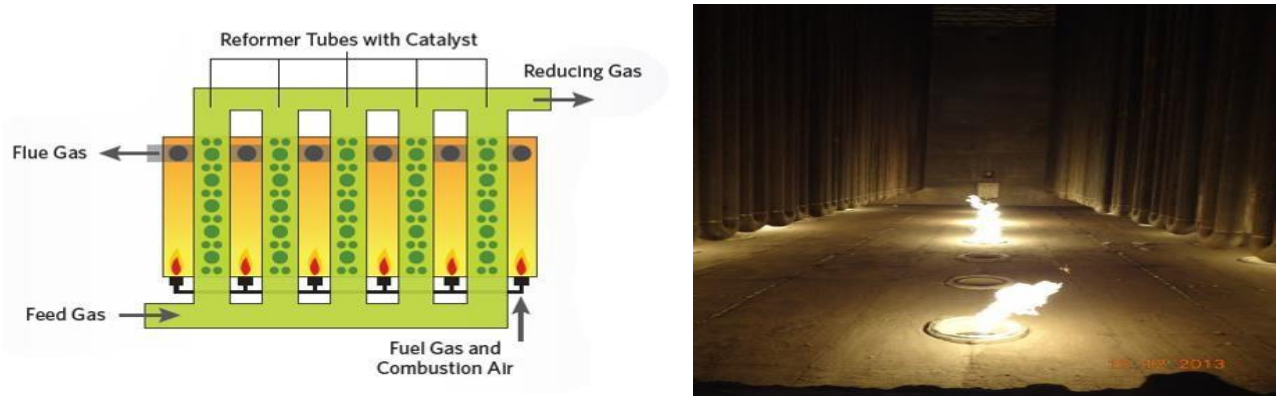


Figure III.15: Vue de l'intérieur du Reformer.

Une partie des gaz de combustion est extraite par le dispositif de prélèvement des gaz de scellement situé sur la paroi côté four du reformeur, et est utilisée comme gaz inerte dans toute l'usine.

Le reformeur est équipé d'une large gamme d'instruments de mesure pour surveiller les données suivantes :

- Températures du toit et du sol
- Pression de la boîte de reformage
- Analyse de l'O2 et du CO des gaz de combustion
- Analyse du CH4 et du CO2 des gaz reformés
- Température des gaz reformés
- Débit des gaz de process et du gaz naturel de process vers le reformeur.

III.5 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de comprendre l'environnement industriel du complexe Algerian Qatari Steel (AQS) et de comprendre les fondements de son processus de réduction directe (DRI). L'analyse des flux de gaz, associée à l'analyse des réactions de réduction et à la description détaillée du système de reformage, a montré l'importance essentielle de ces équipements dans la chaîne de production. Une compréhension d'ensemble de ce procédé technique est une étape nécessaire de notre recherche. Elle pose les fondations nécessaires pour aborder le chapitre suivant, dédié à la partie pratique de notre étude, où nous pourrons appliquer la méthode Hazop et Lopa pour obtenir le SIL requis.

CHAPITRE IV : Etude de cas : Système de reformeur

IV.1 Introduction

L'analyse des risques d'une installation industrielle repose sur un large éventail d'outils et de méthodes. Qu'elles soient appliquées individuellement ou de manière combinée, ces approches permettent de répondre précisément aux objectifs de sécurité fixés. Elles sont généralement classées selon plusieurs typologies : déductives ou inductives, qualitatives ou quantitatives.

Ce quatrième chapitre est dédié à l'évaluation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) des systèmes de protection du reformeur de l'usine d'AQS (Algerian Qatari Steel) à Jijel, système qui a été décrit en détail dans le chapitre précédent. La démarche adoptée s'articule en trois temps : d'abord, une analyse qualitative des scénarios d'accidents potentiels est réalisée via la méthode HAZOP. Ensuite, l'étude s'oriente vers une approche semi-quantitative avec l'application de la méthode LOPA afin de déterminer le niveau SIL requis. Enfin, le logiciel GRIF est exploité pour évaluer le SIL réel du système et valider la conformité de ses architectures de sécurité.

IV.2 Analyse des risques par la méthode HAZOP :

IV.2.1 Introduction :

La méthode HAZOP est une méthode qualitative systématique qui détecte les déviations d'un processus en combinant des mots-guides et des paramètres physiques. L'application du reformeur Midrex d'AQS est d'une grande importance car cet équipement thermique essentiel opère sous des contraintes élevées et manipule des gaz hautement inflammables. Cette étude permet une cartographie précise des couples causes-conséquences pour éviter des accidents majeurs tels que les explosions ou la rupture des tubes.

IV.2.2 Les tableau HAZOP :

Nœud : boitier de Reformeur RF-A40				
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Recommandations
1-Haute pression	Dysfonctionnement de PC-B07, les aubes de guidage des ventilateurs haute température des gaz de combustion restent fermées, l'alimentation en air principal est à haut débit, le débit de gaz de haut fourneau est élevé, dysfonctionnement des ventilateurs haute température des gaz de combustion CP-C40.1A/.2A.	Libération de gaz de combustion chaude et de combustible, flamme s'étendant à l'extérieur du boitier de reformeur	1.Indication de PC-07 avec PAH. 2.PT-C07 PSHH ferme B-07.1 sur l'alimentation en air principal vers le reformeur, arrête l'alimentation en air vers les brûleurs principaux. 3.ST-C40.2 avec indication de vitesse, SSL3 pour ST-C40.1/.2 ouvre la vanne de dérivation C41 qui reste ouverte jusqu'à ce que la vitesse augmente au-dessus du SSL pour ST-C40.1/.2. 4.Indication PIC-C41.1/C41.2 uniquement pour perte d'aspiration. 5.Les aubes de guidage des ventilateurs haute température sont équipées de ZSO/ZSC-C41.2A/B. 6.PT-C07.1 et PT-C07.2 avec des alarmes élevées. 7.Analyseur O2 AI-C10 avec alarme. 8.Analyseur de CO AI-C09 avec alarme. 9.Analyseur O2 sur le gaz de scellement AI-DI18.2 avec alarme.	Effectuer une revue et déterminer s'il est nécessaire d'avoir les deux ventilateurs de gaz de combustion, CP-C40.1A/.2A, en Service pour faire fonctionner l'usine. Déterminer comment le reformeur sera équilibré s'il ne fonctionne qu'avec un seul ventilateur de gaz de combustion.

2-Basse pression	Défaillance de l'entraînement à vitesse variable (VFD) pour atteindre la vitesse maximale, dysfonctionnements de PC-C07 qui s'ouvrent.	Défaillance de la brique réfractaire dans le reformeur entraînant une défaillance du carter, possible incendie interne et explosion dans le reformeur.	1.PI-C07.1/.2 en alarme basse 2.PSLL sur PT-C07.1/.2 PSLL ferme B07.1, arrêtant l'alimentation en air principal vers les brûleurs principaux 3.AI-D18.2, ASH indiquant une teneur élevée en O2 dans le gaz de scellement.	
3-Haute température	Débit de gaz d'alimentation faible, panne de TC- B19.	Dommage aux tubes entraînant une libération de gaz inflammable dans le boîtier du reformeur, des fuites de bride pouvant entraîner une exposition de personnel à des gaz chauds et toxiques et des risques de blessures, entraînant une LTI (Lost Time Injury)	1.TI-B21.1-.20 situé sur le toit du reformeur, TSH et TSHH qui arrête les brûleurs principaux (la logique de vote est 5oo20) 2.FI-A19 mesure le débit de gaz de processus si le problème n'est pas une défaillance du transmetteur de débit. 3.TC-B19 réduira le gaz naturel et l'air vers les brûleurs pour réduire la température 4.FI-A39 indique seulement. 5.TI-A84.2/TI-A84.3 TSHH déclenchera le brûleur principal du reformeur (situé sur l'en-tête de gaz d'alimentation). 6.TI-B19.1/B19.2 alarme haute.	Effectuer une revue et déterminer s'il est nécessaire d'avoir les deux ventilateurs de gaz de combustion, CP-C40.1A/.2A, en service pour faire fonctionner l'usine. Déterminer comment le reformeur sera équilibré s'il ne fonctionne qu'avec un seul ventilateur de gaz de combustion.

4-Basse température		Aucune conséquence d'intérêt	.	
5- Déséquilibre de température	Répartition inégale de la chaleur due à la défaillance du ventilateur chaud CP-C40.1/.2	Dommages aux tubes entraînant la libération de gaz inflammables dans le carter du reformeur, des fuites de brides entraînant une exposition possible du personnel à des gaz chauds et toxiques, LTI (lésions corporelles graves)	1. La durée de l'événement devrait être à long terme pour atteindre la conséquence d'intérêt. 2. Les opérateurs peuvent ajuster l'air des brûleurs auxiliaires tout en surveillant la différence de température du TI-B21.1-.20 (situé sur le toit du reformeur).	
6- Haute chute de pression	Dépôt de carbone sur les surfaces internes des tubes.	Dommages aux tubes entraînant la libération de gaz	1.La durée de l'événement devrait être à long terme pour atteindre la conséquence d'intérêt.	

		inflammables dans le carter du reformeur, des fuites de brides entraînant une exposition possible du personnel à des gaz chauds et toxiques, LTI (lésions corporelles graves)	2.PDI-A01 avec une alarme élevée.	

IV.2.3 Interprétation de tableau HAZOP :

À l'issue de l'application de de la méthode HAZOP, on peut dire que le Reformer est sujet à beaucoup risques majeurs qui peuvent entraîner des dégâts humains et matériels, et des pertes de production.

D'après le tableau HAZOP, nous constatons plusieurs accidents potentiels, notamment : fuites, incendies, explosions.

La méthode HAZOP nous a permis également d'évaluer les différents scénarios d'accidents, nous pouvons aussi constater que les paramètres physiques les plus critiques dans le Reformer sont essentiellement le risque de haute et basse pression et le risque de haute température.

IV.3 Application de la méthode LOPA :

La méthode LOPA est une méthode semi-quantitative qui identifie les scénarios d'accident et leur fréquence, l'identification des IPLs, l'estimation du risque, et l'examen des mesures de contrôle des risques existantes sur la base des critères d'acceptation. Le but principal de cette méthode dans notre application est de déterminer le niveau de SIL requis pour un système instrumenté de sécurité au niveau de reformeur.

Trois scénarios ont été choisi à partir d'étude HAZOP pour l'application de méthode LOPA :

- Haute température dans le boitier de reformeur.
- Haute pression dans le boitier de reformeur.
- Basse pression dans le boitier de reformeur.

IV.3.1 Critères d'Acceptation des Risques :

Pour déterminer le niveau SIL requis pour une SIF, on évalue le risque en l'absence de SIF et on le compare aux critères applicables de tolérance du risque. La détermination d'une fréquence tolérable pour chaque conséquence résultant d'un événement déclencheur est essentielle pour choisir le SIL. La fréquence tolérable pour une conséquence de danger spécifique est déterminée sur la base de la matrice de risques et des critères d'acceptation des risques.

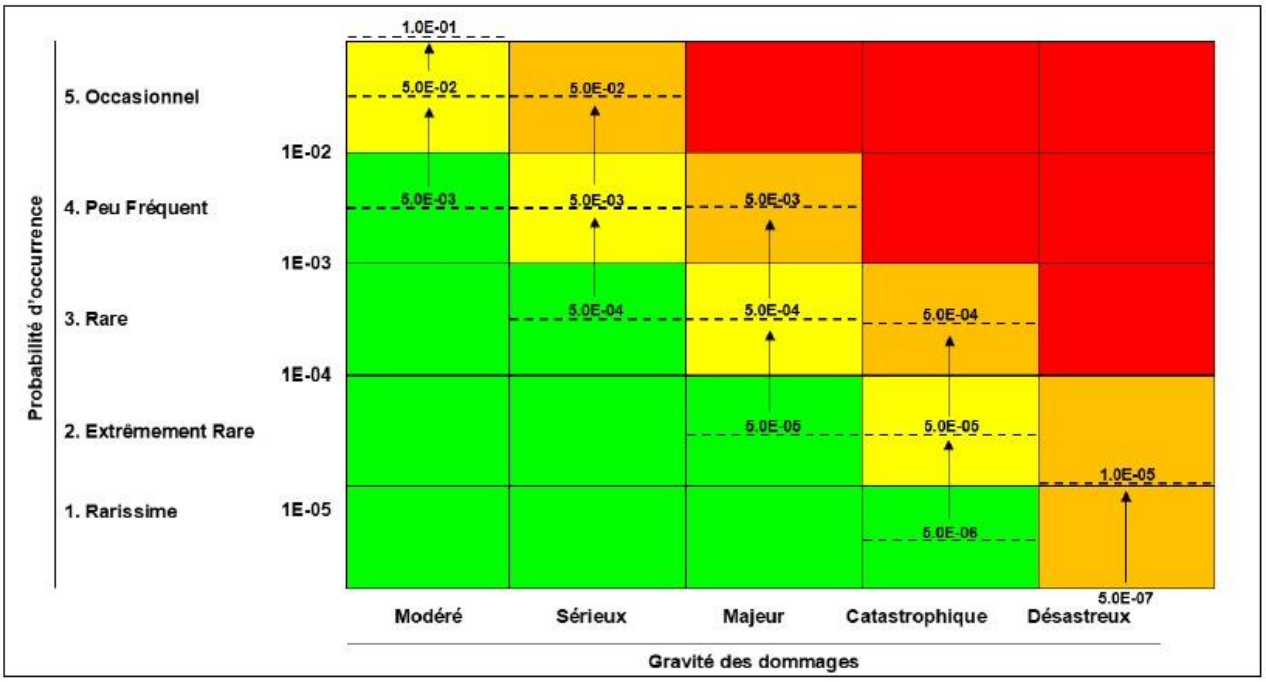


Figure IV.8 : matrice de risques

IV.3.2 Les fréquences d'occurrence des causes initiatrice :

Tableau IV.1 : les donner des fréquences et des PFD

Donnée utilisée dans LOPA	Valeur	Référence défendable
Défaillance boucle BPCS / contrôle	**0,1 /an**	CCPS-EGPC
Défaillance ventilateur / blower / compresseur	**0,1 /an**	CCPS-EGPC
Défaillance régulatrice de pression	**0,1 /an**	CCPS-EGPC
Déclenchement intempestif safety control / alarm / interlock	**0,1 /an**	CCPS-EGPC
Boucle de contrôle utilisée comme IPL	**PFD = 0,1**	CCPS-EGPC
Réponse opérateur à condition anormale	**PFD = 0,1**	CCPS-EGPC
Temps à risque pour procédé continu	**1 /an**	CCPS-EGPC
Temps à risque pour opération <10 % du temps	**0,1 /an**	CCPS-EGPC
Fréquence cible pour conséquence catastrophique	**1,0E-05 /an**	CCPS-EGPC
Fréquence cible pour conséquence désastreuse	**1,0E-06 /an**	CCPS-EGPC

IV.3.3 Les tableau LOPA :

IV.3.3.1 Haute température dans le boitier de reformeur :

		Description	Freq. (/yr)	Prob. / PFD
Scenario definition	Scenario description	Surchauffe extrême du carter du reformeur RF-A40 due à la perte du débit de gaz d'alimentation (perte de l'effet de refroidissement endothermique). La température de la voûte et des tubes peut monter rapidement au-delà de 1200°C. Cela entraîne une défaillance catastrophique (rupture par fluage) des tubes catalytiques suite au dépassement de leurs limites de conception métallurgique qui provoquer un explosion		
	Risk Tolerance Criteria (RTC)	RTC pour Sévérité 4 (Catastrophique / Décès multiples) selon la Matrice de Risques.	5.00E-06	
	Initiating Event (IE)	Défaillance de la boucle de régulation TC-B19 entraînant un bas débit de Feed Gas	0.1	
	Enabling Events (EE)	Le four est en marche normale de production (100% du temps).		1
	Conditional Modifiers (CM)	La présence de personnel est estimée à 10% (0,1). Les opérateurs de terrain effectuent des rondes de routine dans la Zone B et pourraient s'approcher des instruments locaux ou des brûleurs du reformeur en cas de défaillance du contrôle de température.		0.1
		La probabilité de blessures de Sévérité 4 (mortelles) . La fuite de gaz H2/CO hautement inflammable directement dans une enceinte en combustion garantit une inflammation immédiate et une explosion catastrophique.		1
IPLs	DCS / BPCS action	TC-B19		1
	Operator Response to Alarm	L'opérateur acquitte l'alarme, diagnostique la perte de refroidissement et prend le contrôle manuel pour fermer/réduire l'air de combustion (FIC-A39) et le gaz de chauffe (FIC-A81/82)		1
	Mechanical IPL	IPL indépendante mécanique ou process		0.1
	Other IPLs	Non Applicable		1
Result	Mitigated Event Frequency	1.00E-03		
	Target met?	No (Mitigated Event Freq > RTC)		
	Risk Reduction required	200		
	PFD required	0.01		

IV.3.3.2 Haute pression dans le boitier de reformeur :

		Description	Freq. (/yr)	Prob. / PFD
Scenario definition	Scenario description	Surpression rapide et sévère dans le carter du reformeur RF-A40 due à la perte du tirage (extraction). La pression devient positive, provoquant un phénomène de Roll-out (débordement massif de flammes et de gaz de combustion à 1000°C par les orifices et joints de l'enveloppe).		
	Risk Tolerance Criteria (RTC)	RTC pour Sévérité 4 (Catastrophique / Décès multiples) selon la Matrice de Risques.	5.00E-05	
	Initiating Event (IE)	Défaillance de la boucle de régulation de pression (PC-B07) bloquant les aubes de guidage en position fermée, ou arrêt intempestif des ventilateurs d'extraction (CP-B07).	0.1	
	Enabling Events (EE)	Le four est en marche normale de production (100% du temps).		1
	Conditional Modifiers (CM)	Probabilité de Sévérité 4 (Inflammation/Brûlures graves) : car exposition directe aux flammes de combustion.		1
		Présence de personnel dans la zone extérieure immédiate : 10% (0,1).		0.1
IPLs	DCS / BPCS action	PC-B07		1
	Operator Response to Alarm	L'opérateur acquitte l'alarme, prend le contrôle manuel pour fermer/ouvrir les aubes des ventilateur CP-B07		1
	Mechanical IPL	Non Applicable		1
	Other IPLs	Non Applicable		1
Result	Mitigated Event Frequency	1.00E-02		
	Target met?	No (Mitigated Event Freq > RTC)		
	Risk Reduction required	200		
	PFD required	0.01		

IV.3.3.3 basse pression dans le boitier de reformeur :

		Description	Freq. (/yr)	Prob. / PFD
Scenario definition	Scenario description	Chute brutale de la pression (création d'un vide extrême) dans le carter du reformeur due à une extraction hors de contrôle (aspiration maximale). Les briques réfractaires internes sont aspirées et s'effondrent. Le carter en acier nu, exposé à 1100°C, fond et se déchire. L'infiltration massive d'air (Oxygène) dans l'enceinte remplie de gaz de synthèse chaud (H2/CO) provoque une explosion interne catastrophique.		
	Risk Tolerance Criteria (RTC)	RTC pour Sévérité 4 (Catastrophique / Décès multiples) selon la Matrice de Risques.	5.00E-05	
	Initiating Event (IE)	Défaillance de la boucle de contrôle de tirage PC-C07 forçant l'ouverture totale des aubes ou l'accélération à 100% (VFD) des ventilateurs d'extraction CP-C40	0.1	
	Enabling Events (EE)	Le four est en marche normale de production (100% du temps).		1
	Conditional Modifiers (CM)	La présence de personnel est estimée à 10% (0,1). Les opérateurs effectuent des rondes de routine dans la Zone B/C près du reformeur.		0.1
		La probabilité de blessures de Sévérité 4 (mortelles) en raison du mélange immédiat air/gaz de synthèse chaud et de l'explosion de l'enceinte.		1
IPLs	DCS / BPCS action	PC-C07 et CP-C40 et C41		1
	Operator Response to Alarm	L'opérateur acquitte l'alarme, prend le contrôle manuel pour fermer/ouvrir les aubes des ventilateur CP-B07		1
	Mechanical IPL	Non-Applicable		1
	Other IPLs	Non-Applicable		1

Result	Mitigated Event Frequency	1.00E-02
	Target met?	No (Mitigated Event Freq > RTC)
	Risk Reduction required	200
	PFD required	0.01

IV.3.4 Interprétation des résultats de tableaux LOPA :

Haute température :

Ce scénario évalue la surchauffe extrême de l'enceinte provoquée par une défaillance de la boucle de régulation TC-B19, entraînant une perte du débit de gaz d'alimentation et de son effet de refroidissement endothermique. Sans protection adéquate, la température dépasse rapidement les 1200C, provoquant la rupture par fluage des tubes catalytiques et une explosion immédiate du gaz H_2 et CO, Le calcul du tableau LOPA montre que les barrières actuelles ne suffisent pas à atteindre la fréquence cible de sécurité. Pour combler cet écart, la méthode exige l'intégration d'une SIF ayant un Facteur de Réduction de Risque (RRF) de 200.

PFD SIS = Fréquence tolérable selon la matrice / Fréquence intermédiaire totale

PFD SIS = 5.00E-06 /1.00E-02 = 5.00E-04

Selon la norme CEI 61511, cette fonction doit obligatoirement être de niveau SIL 3.

Haute pression :

Ce scénario analyse la surpression rapide à l'intérieur du boitier causée par une perte de l'extraction des gaz de combustion (suite à une défaillance du contrôleur PC-B07 ou à un arrêt intempestif des ventilateurs CP-B07). Cette accumulation de pression engendre un phénomène de débordement massif et violent de flammes à 1000 C à travers les joints et orifices du reformeur, exposant directement le personnel aux alentours, Le calcul du tableau LOPA montre que les barrières actuelles ne suffisent pas à atteindre la fréquence cible de sécurité. Pour combler cet écart, la méthode exige l'intégration d'une SIF ayant un Facteur de Réduction de Risque (RRF) de 200.

PFD SIS = Fréquence tolérable selon la matrice / Fréquence intermédiaire totale

PFD SIS = 5.00E-05 /1.00E-02 = 5.00E-03

Selon la norme CEI 61511, cette fonction doit obligatoirement être de niveau SIL 2.

Basse pression :

Ce scénario examine l'impact d'une extraction hors de contrôle (aspiration maximale) due à une défaillance de la boucle PC-C07 ou à une accélération maximale à 100% du ventilateur CP-C40. Le vide extrême généré aspire et effondre les briques réfractaires internes ; la tôle d'acier du carter se retrouve alors nue face à une température de 1100C}, ce qui provoque sa déchirure. L'infiltration massive d'air (oxygène) dans cette enceinte saturée de gaz de synthèse chaud entraîne une explosion interne destructrice, Le calcul du tableau LOPA montre que les barrières actuelles ne suffisent pas à atteindre la fréquence cible de sécurité. Pour combler cet écart, la méthode exige l'intégration d'une SIF ayant un Facteur de Réduction de Risque (RRF) de 200.

PFD SIS = Fréquence tolérable selon la matrice / Fréquence intermédiaire totale

PFD SIS = 5.00E-05 /1.00E-02 = 5.00E-03

Selon la norme CEI 61511, cette fonction doit obligatoirement être de niveau SIL 2.

IV.4 Architectures des SIF :

L'application de la méthode LOPA sur le reformeur a permis d'évaluer de manière quantitative l'efficacité des barrières de sécurité actuelles face aux trois risques majeurs du procédé (thermique, surpression et dépression). Pour ces trois scénarios, qui présentent tous un niveau de gravité maximal (Sévérité 4), l'analyse mathématique démontre que les couches de protection de base (régulations du DCS et interventions des opérateurs sur alarme) sont insuffisantes pour ramener le risque à un niveau tolérable. L'objectif de sécurité n'étant pas atteint, la méthode LOPA impose l'implémentation de Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) indépendantes pour chaque scénario.

Nous avons proposé trois Architectures de SIF pour chaque scénario d'étude et calculer le SIL réel par logiciel GRIF, pour la validation par rapport au SIL requis.

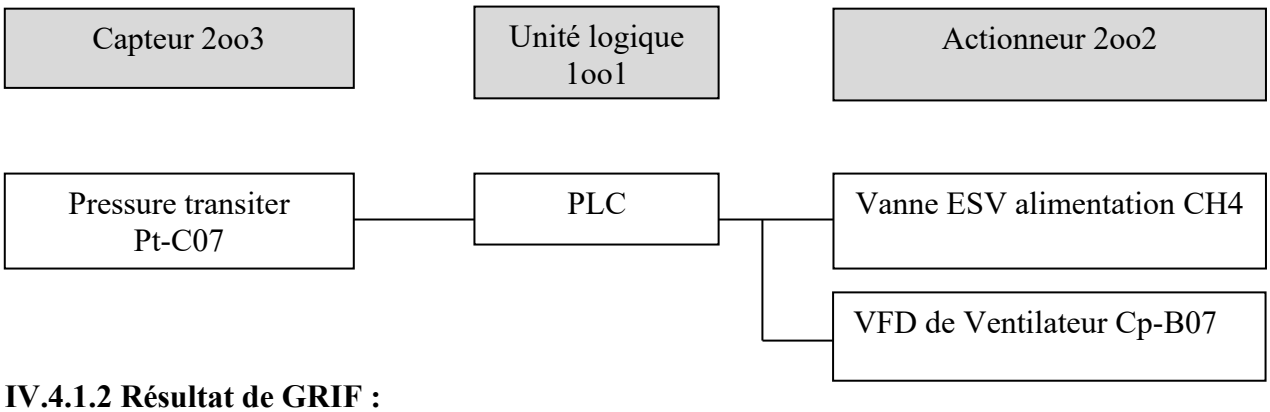
Le Tableau 07 explique les paramètres d'Equipment qu'on à utiliser pour l'obtention du SIF :

Tableau IV. 2 : les données d'Equipment d'Architectures de SIS

Composant	Type de composant	λDU per 10^6 hrs	λDD per 10^6 hrs	λSU per 10^6 hrs	λSD per 10^6 hrs	β	Référence
Ti	Electroniques (B)	0.3	0.4	0.9	0.4	5	PDS Reliability Data Dossier
Pt	Electroniques (B)	0.3	0.5	0.4	0.1	5	PDS Reliability Data Dossier
PLC	Electroniques (B)	0.7	1.1	1.4	0.4	5	PDS Reliability Data Dossier
ESV	Mécaniques (A)	2.1	0.9	2.1	0.2	5	PDS Reliability Data Dossier
VFD de Ventilateur	Electroniques (B)	0.18	0.82	0.25	0.55	5	Exida SERH

IV.4.1 SIF pour assurer la sécurité contre la haute pression :

IV.4.1.1 Architectures :



IV.4.1.2 Résultat de GRIF :

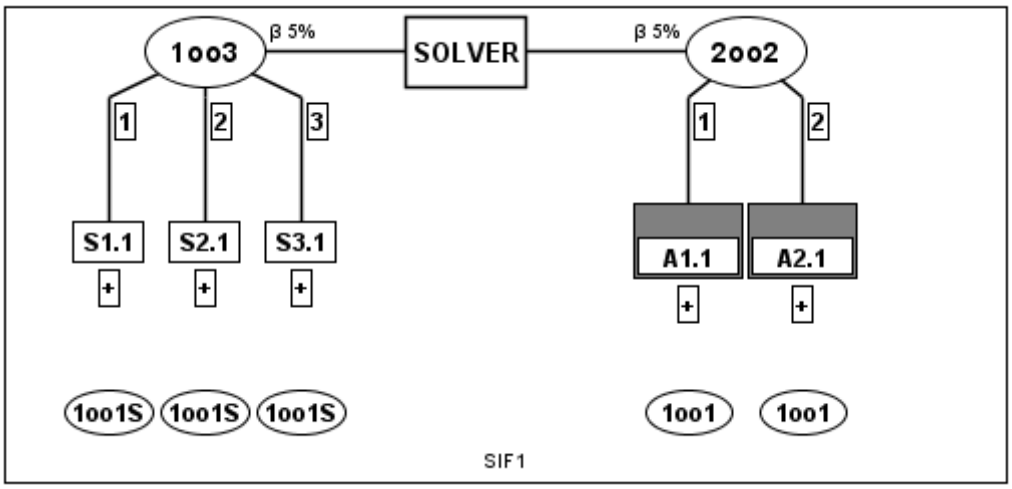


Figure IV.2 : Architectures de SIS par GRIF

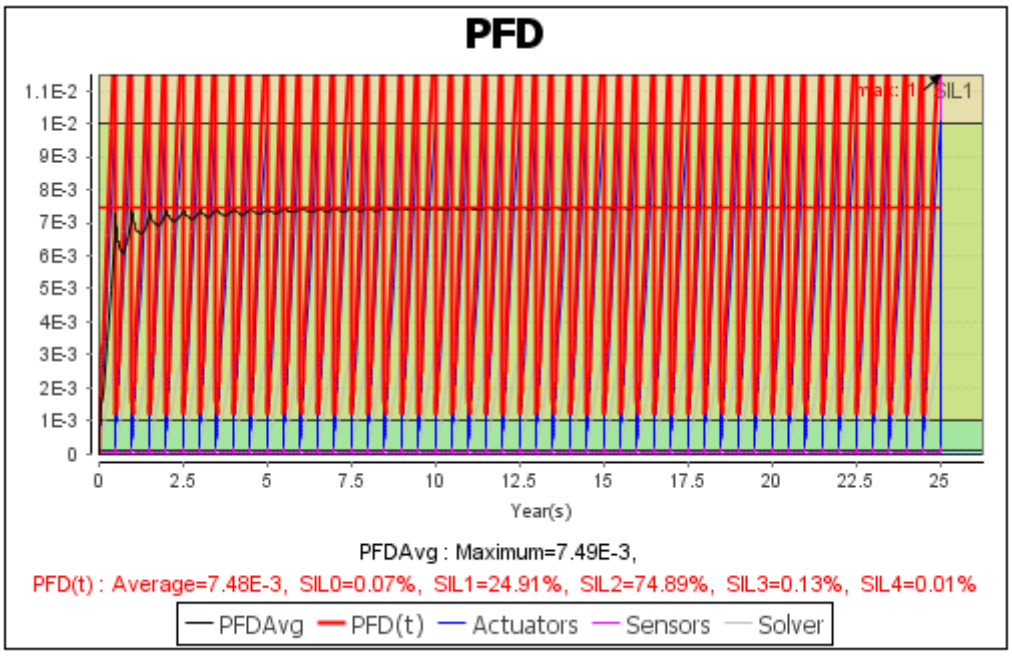


Figure IV.3 : Les graphes de résultats de PFD

IV.4.1.3 Interprétation des résultats :

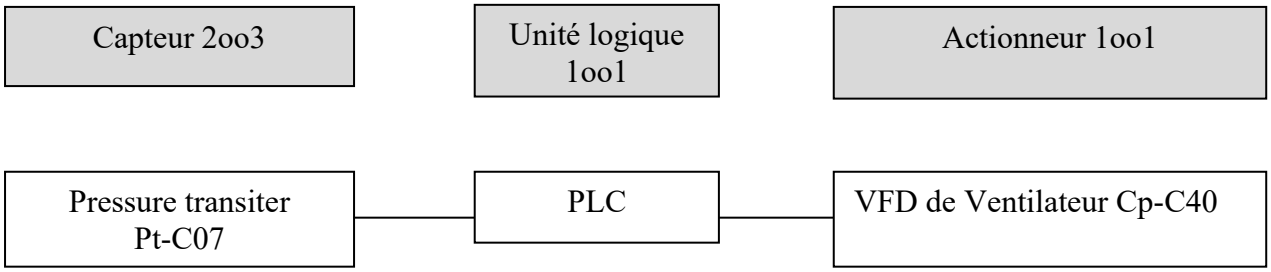
Le SIS se compose de :

- Trois pressure transiter (2oo3) de type B.
- Une unité logique PLC de type B (1oo1).
- Deux actionneurs (2oo2), une vanne d'alimentation de CH4 ESV de type A et un VFD de ventilateur CP-B07 de type B.

En utilisant les informations du tableau 4.6 et des résultats par logiciel GRIF (figure 4.3). Nous pouvons définir le SIL réel du SIS étudié dans notre système. Le résultat du PFD moyen est 7.48 E-3, ce qui indique que le SIL réel de notre SIS est de SIL 2, Comparé au résultat du SIL requis qui est obtenu par l'utilisation de méthode LOPA, c'est un SIL2. Donc cet Architectures qui nous proposer répondre aux exigences de notre SIS, et valider

IV.4.2 SIF pour assurer la sécurité contre la basse pression :

IV.4.2.1 Architectures :



IV.4.2.2 Résultat de GRIF :

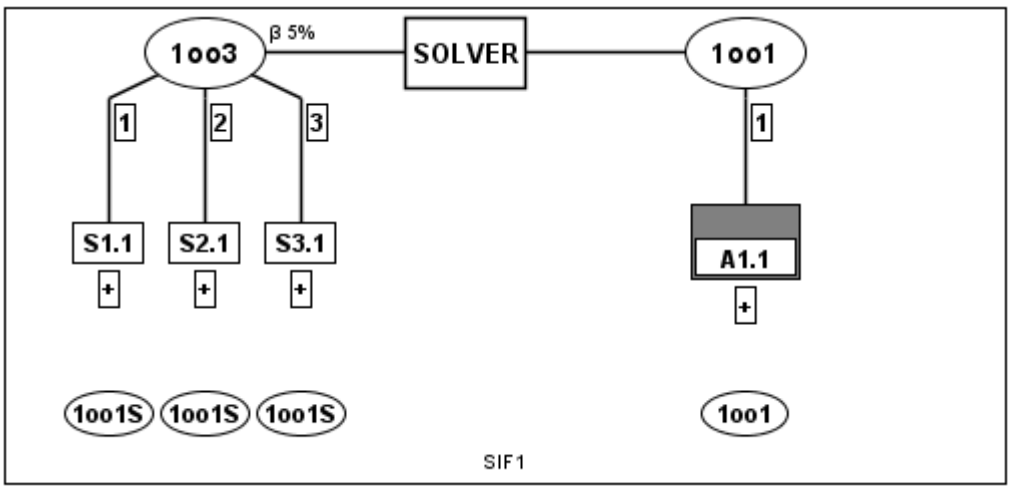


Figure IV.4 : Architectures de SIS par GRIF

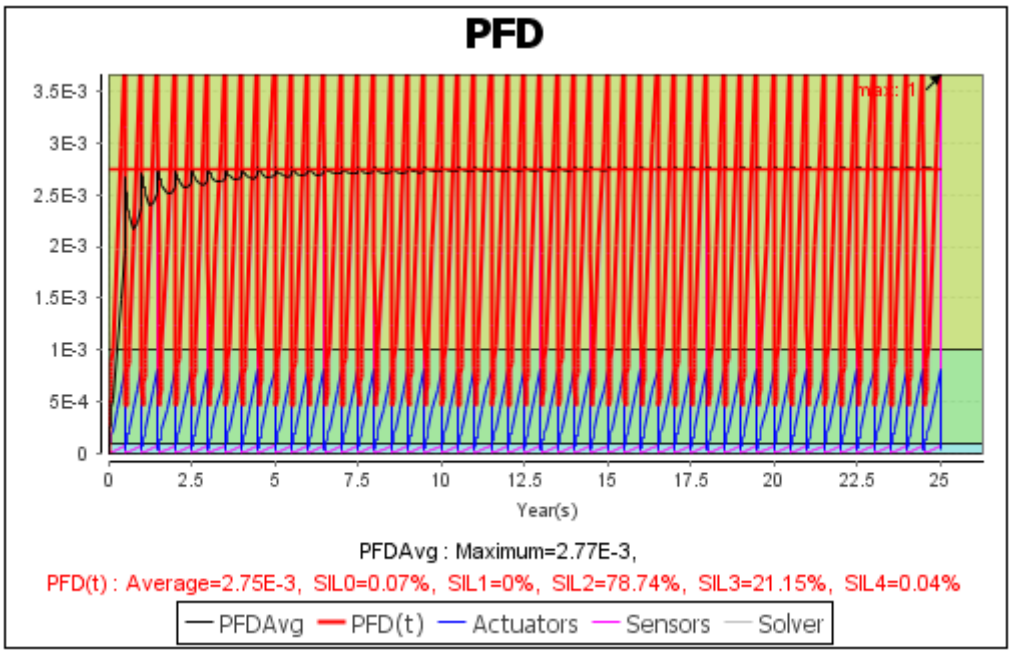


Figure IV.5 : Les graphes de résultats de PFD

IV.4.2.3 Interprétation des résultats :

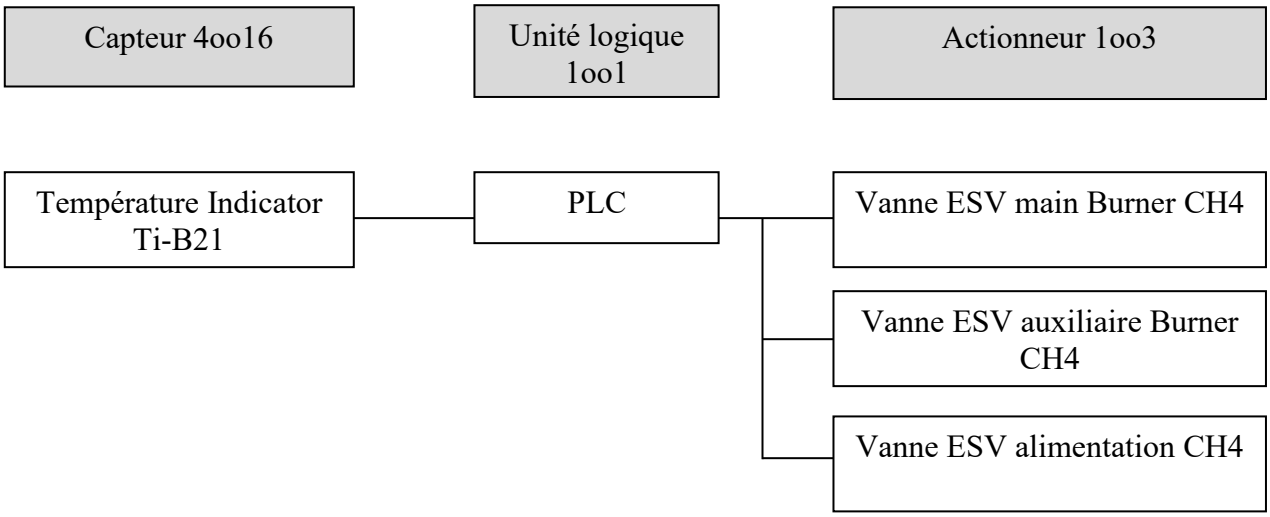
Le SIS se compose de :

- Troi pressure transiter (2oo3) de type B.
- Une unité logique PLC de type B (1oo1).
- Un actionneur (1oo1) VFD de ventilateur CP-C40 de type B.

En utilisant les informations du tableau 4.6 et des résultats par logiciel GRIF (figure 4.3). Nous pouvons définir le SIL réel du SIS étudié dans notre système. Le résultat du PFD moyen est 2.77E-3, ce qui indique que le SIL réel de notre SIS est de SIL 2, Comparé au résultat du SIL requis qui est obtenu par l'utilisation de méthode LOPA, c'est un SIL2. Donc cet Architectures qui nous proposer répondre aux exigences de notre SIS, et valider

IV.4.3 SIF pour assurer la sécurité contre la haute température :

IV.4.3.1 Architectures :



IV.4.3.2 Résultat de GRIF :

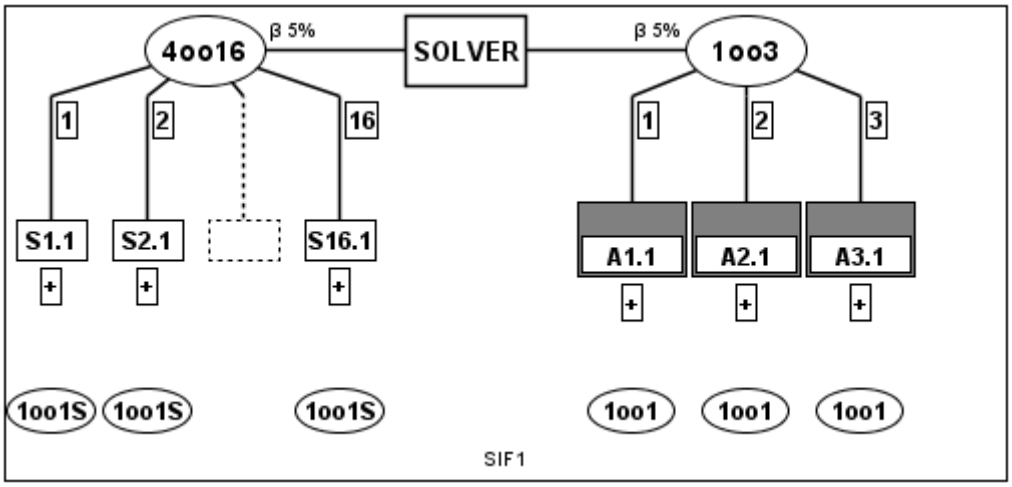


Figure IV.6 : Architectures de SIS par GRIF

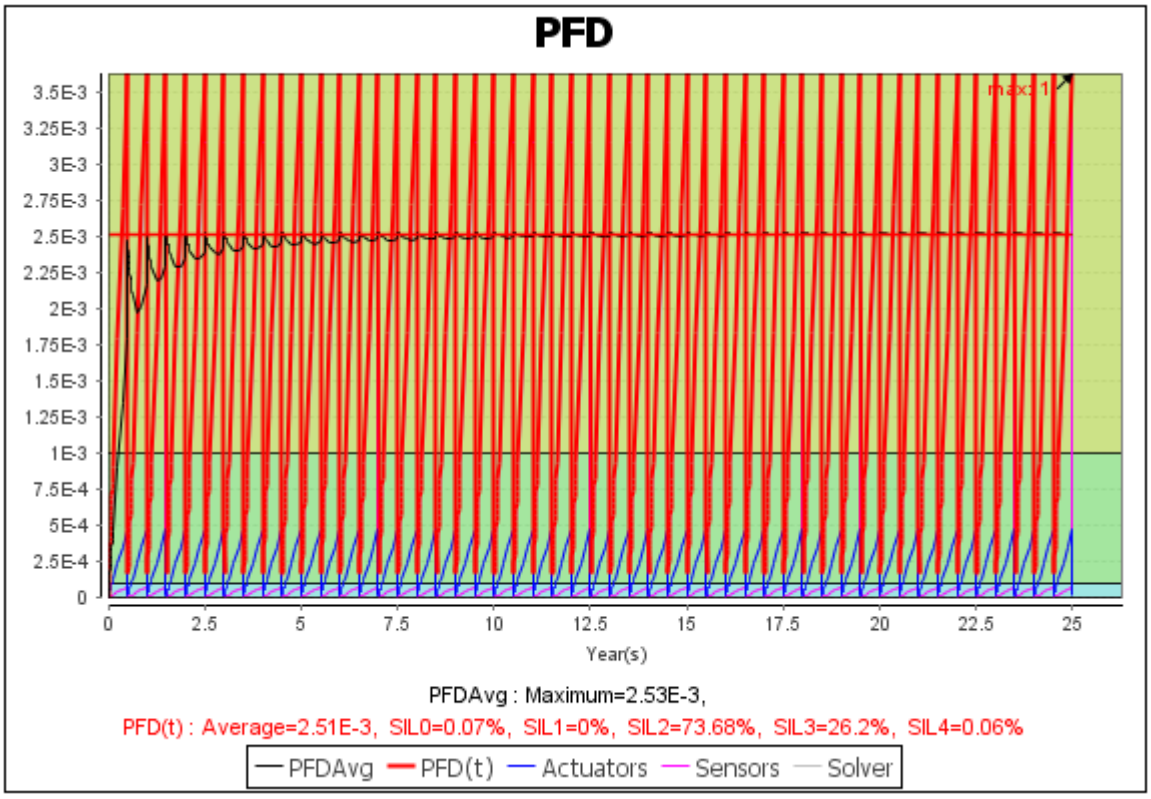


Figure IV.7 : Les graphes de résultats de PFD

IV.4.3.3 Interprétation des résultats :

Le SIS se compose de :

- Seize température Indicator (4oo16) de type B.
- Une unité logique PLC de type B (1oo1).
- Troi actionneur (1oo3), les vanne ESV de type A.

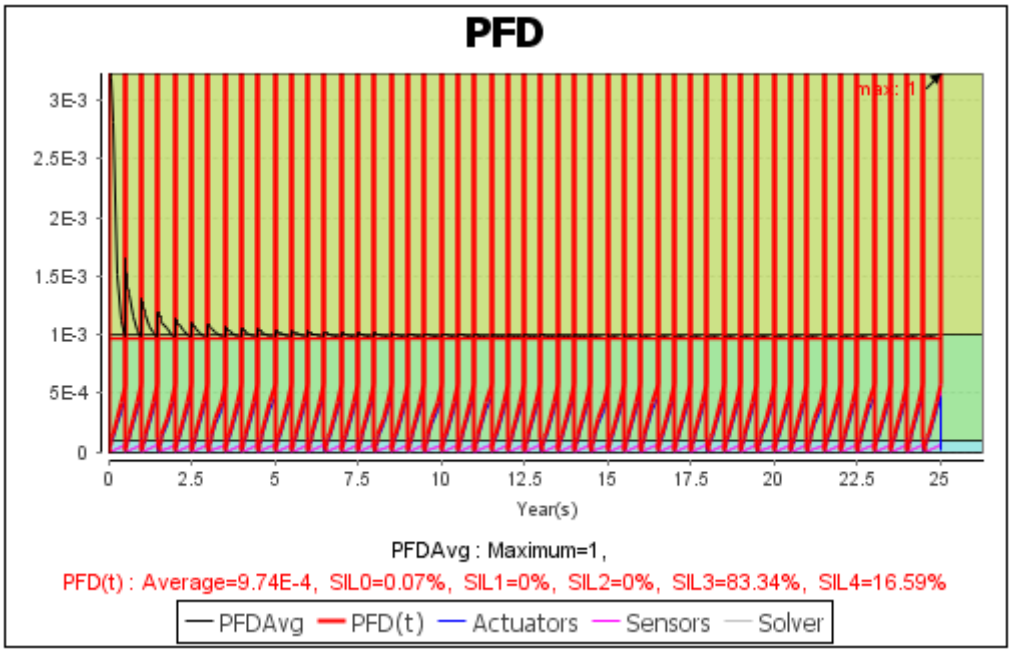
En utilisant les informations du tableau 4.6 et des résultats par logiciel GRIF (figure IV.7). Nous pouvons définir le SIL réel du SIS étudié dans notre système. Le résultat du PFD moyen est 2.53E-3, ce qui indique que le SIL réel de notre SIS est de SIL 2, Comparé au résultat du SIL requis qui est obtenu par l'utilisation de méthode LOPA, c'est un SIL3.

Comme nous pouvons constater, le SIL réel n'est pas suffisant pour répondre aux exigences de notre SIS, pour cela nous proposons de modifier l'architecture du SIS en modifiant la fiabilité de solveur (PLC) par un autre qui plus fiable et répondre à nos exigences.

Le tableau suivant afficher les nouvelles valeurs qui nous utiliserons :

PLC	Electroniques (B)	0.01	0.99	0.2	0.8	5	Exida SERH

Nouvelle résultat :



Nouvelle interprétation :

Les résultats montrent que le PFD moyen atteint 9.94E-4, et que Le système a également atteint un niveau SIL 3. Donc, SIL requis = SIL réel, cette modification d'Architectures qui nous proposer répondre aux exigences de notre SIS, et valider.

Ces observations soulignent les efforts déployés pour renforcer la sécurité et réduire les risques liés au fonctionnement du système.

IV.5 Conclusions :

Ce chapitre a permis d'analyser et de vérifier l'intégrité de sécurité (SIL) du système de reformeur étudié. En utilisant les méthodes HAZOP et LOPA, nous avons identifié les scénarios d'accidents potentiels liés aux déviations de pression et de température, et alloué le niveau de sécurité requis (SIL3). Nous avons également pu concevoir des architectures de SIF adaptées et proposer des modifications sur la fiabilité des équipements. L'évaluation quantitative menée sous le logiciel GRIF a fourni des résultats significatifs sur l'efficacité des architectures proposées pour garantir le niveau de SIL 3 vu qu'on a obtenu SIL 2 et SIL 3 .

En résumé, cette recherche a activement contribué à l'amélioration du niveau de sécurité du reformeur, grâce à une modélisation et une analyse approfondie du SIL.

CONCLUSION GENERALE

Ce projet de fin d'études a fait l'objet de contrôler la sécurité fonctionnelle d'une unité hautement stratégique et critique : le réformateur dans une unité (DRI) d'une installation de sidérurgie. Face aux risques majeurs de surpression, de sous-pression et de températures extrêmes inhérents à ce procédé thermochimique, l'objectif principal était de concevoir, d'évaluer et de garantir la fiabilité des barrières de sécurité instrumentées selon les exigences rigoureuses des normes internationales CEI 61508 et CEI 61511.

La méthode employée a permis de structurer une analyse complète de l'ingénierie des risques, divisée en trois étapes :

L'analyse qualitative (HAZOP) : Elle a permis d'identifier de manière exhaustive les déviations de procédé potentielles, de cartographier les scénarios accidentels redoutés et de mettre en évidence l'importance vitale des fonctions de régulation et de protection.

L'analyse semi-quantitative (LOPA) : En confrontant les fréquences des causes initiatrices aux critères d'acceptabilité des risques industriels, la méthode LOPA a permis de définir objectivement les objectifs de performance de sécurité, allouant une cible exigeante de niveau SIL 3 pour les Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) les plus critiques.

La vérification quantitative sous GRIF : constitué le cœur opérationnel de la validation de nos trois architectures. Pour les deux boucles de sécurité liées à la pression, les simulations numériques ont démontré la conformité directe avec les objectifs de l'étude en validant un niveau SIL 2 sans qu'aucune modification ne soit nécessaire. En revanche, pour la boucle de sécurité dédiée à la température, l'architecture initiale ne permettait d'atteindre qu'un niveau SIL 2 alors que les exigences de sécurité réclamaient un niveau SIL 3. C'est en proposant une modification ciblée sur la fiabilité du Logic Solver (PLC) que nous avons réussi à éliminer ce goulot d'étranglement, optimisant ainsi le système pour valider mathématiquement l'atteinte du niveau SIL 3 requis pour la protection du reformeur.

Enfin, ce travail démontre qu'une gestion performante des risques industriels concilie impérativement la rigueur de la conception technique et la réalité de la fiabilité des équipements sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.-P. Coheur, *Les diagrammes fer-carbone*. Université de Liège, 1992.

[2] M. F. Ashby et D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design: Atom packing in crystals*, 4th éd. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2012.

[3] A. M. Habraken, « Cinétique des transformations, diagrammes TTT et TRC », *Sér. Métallurgie*, 1992.

[4] Techniques de l'Ingénieur, « Éléments d'alliage présents dans les aciers », *Base Doc. Matér. Métaux Alliages Ferr.*, 2024, [En ligne]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/

[5] Techniques de l'Ingénieur, « Constitution des alliages et éléments d'addition », *Base Doc. Matér. Étude Propr. Métaux*, 2024, [En ligne]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/

[6] H. S. Jiao, N. Q. Zhao, P. Nash, S. S. Guo, et J. J. Li, « Microstructures and mechanical properties of Nb–Ti–C alloys », *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 489, nº 1-2, p. 352-358, 2008, doi: 10.1016/j.msea.2007.12.029.

[7] N. H. Baker, « Role of vanadium in microalloyed steels », *Ironmak. Steelmak.*, vol. 43, nº 4, p. 264-307, 2016, doi: 10.1080/03019233.2015.1108867.

[8] Wikipédia, « Histoire de la production de l'acier ». 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_production_de_l'acier

[9] Innovations en Sidérurgie, « Un Convertisseur Bessemer dans une aciérie allemande ». 2026.

[10] World Steel Association, « Fact sheet: Steel and raw materials », World Steel Association, Fact Sheet, 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://worldsteel.org/

[11] R. Magri, *Élaboration des aciers*. in Cahiers du CESSID. CESSID (Centre d'Études Supérieures de la Sidérurgie), 2010.

[12] M. Olette, C. Gatellier, et J.-P. Riboud, *Métallurgie secondaire : outils et procédés*. Techniques de l'Ingénieur / CESSID, 2009.

[13] IEEFA, « Steel Fact Sheet », Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Fact Sheet, 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://ieefa.org/

[14] Midrex Technologies, Inc., Idom, et Paul Wurth, « New Steel Complex in Bellara: DRI Plant - Training Manual », Algerian Qatari Steel (AQS), Bellara, Algeria, Training Manual P1-DRI-MTI-G-GGGG-TM-G005 / 3863-TM-001, avr. 2020.

[15] Midrex Technologies Inc., Paul Wurth, et SMS group, *Safety Manual: Algerian Qatari Steel - New Steel Complex in Bellara*. Algerian Qatari Steel, 2018.

[16] International Electrotechnical Commission, « IEC TR 61508-0:2005 – Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 0: Functional safety and IEC 61508 », IEC, Geneva, Switzerland, Technical Report, 2005.

[17] P. Gruhn et H. Cheddie, *Safety Instrumented Systems: Design, Analysis, and Justification*, 2nd éd. Research Triangle Park, NC: ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

[18] International Electrotechnical Commission, « IEC 61511-1:2016+AMD1:2017 – Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming requirements », IEC, Geneva, Switzerland, International Standard, 2017.

[19] M. A. Lundteigen, « Assessment of hardware safety integrity requirements », in *Proceedings of the 30th EDREDA Seminar*, Trondheim, Norvège, juin 2006.

[20] International Electrotechnical Commission, « IEC 61508-4:2010 – Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 4: Definitions and abbreviations », IEC, Geneva, Switzerland, International Standard, 2010.

[21] International Electrotechnical Commission, « IEC TR 61511-0:2018 – Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 0: Functional safety and IEC 61511 », IEC, Geneva, Switzerland, Technical Report, 2018.
[22] « Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité », Commission Électrotechnique Internationale (IEC), Norme IEC 61508, 2010.
[23] International Electrotechnical Commission, « IEC 61511-3:2016 – Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity levels », IEC, Geneva, Switzerland, International Standard, 2016.
[24] Organisation internationale de normalisation, « ISO 31010:2019 – Management du risque - Techniques d'évaluation des risques », ISO, Genève, Suisse, Norme internationale, 2019.
[25] M. Royer, « HAZOP : une méthode d'analyse des risques - Présentation et contexte », *Tech. Ing.*, vol. Base documentaire : Méthodes d'analyse des risques, nº SE4030, 2012.
[26] Y. Mortureux, « Arbres de défaillance, des causes et d'événement », *Tech. Ing.*, vol. Base documentaire : Méthodes d'analyse des risques, nº SE4050, 2012.