



# Université du 20 Août 1955 SKIKDA

## Institut des sciences et techniques Appliquées (ISTA-SKIKDA)

Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolières et Gazières

### TITRE DE MEMOIRE :

**Application de la méthode AdD et STPA sur le transport  
convoyeur à chaud dans AQS- Bellara**

Présenté et soutenu publiquement le : 30/06/2025

Par :

Mohamed BENNACEUR.

Devant le jury :

Président :	Dr. Hichem BOUNEZOUR	U- 20 Août 1955. Skikda
Encadreur:	Pr. Youcef ZENNIR	U- 20 Août 1955. Skikda
Examineur :	Dr. El-arkam MECHHOUD	U- 20 Août 1955. Skikda
Examineur :	Dr. Sofiane MOUATS	U- 20 Août 1955. Skikda

2<sup>ème</sup> Promotion Juillet 2025





# Université du 20 Août 1955 SKIKDA

## Institut des sciences et techniques Appliquées (ISTA-SKIKDA)

Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolières et Gazières

**TITRE DE MEMOIRE :**

**Application de la méthode AdD et STPA sur le  
transport convoyeur à chaud dans AQS- Bellara**

**Présenté et soutenu publiquement le : 30/06/2025**

**Par :**

Mohamed BENNACEUR.

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	Dr. Hichem BOUNEZOUR	U- 20 Août 1955. Skikda
<b>Encadreur:</b>	Pr. Youcef ZENNIR	U- 20 Août 1955. Skikda
<b>Examineur :</b>	Dr. El-arkam MECHHOUD	U- 20 Août 1955. Skikda
<b>Examineur :</b>	Dr. Sofiane MOUATS	U- 20 Août 1955. Skikda

**2<sup>ème</sup> Promotion juin 2025**

## DEDICACE

Je dédie humblement ce travail, fruit de longues heures d'efforts, de persévérance et de sacrifices, à tous ceux qui ont été la lumière sur mon chemin, le soutien silencieux dans les moments de doute, et la force tranquille qui m'a permis d'aller jusqu'au bout...

À mes parents bien-aimés,

Vous qui ne m'avez jamais refusé une prière sincère, un mot d'encouragement ou une présence rassurante. Vous avez porté le poids des années pour me voir réussir. Ce travail est avant tout le vôtre, car vous êtes la source de mon courage, de ma patience et de mes valeurs. Mille mercis ne suffiraient jamais à exprimer ce que je vous dois.

À mes frères,

Merci d'avoir toujours été là, discrets mais présents, prêts à tendre la main et à offrir un mot de soutien au moment où j'en avais le plus besoin. Votre présence m'a offert une stabilité précieuse et un réconfort inestimable.

À mes amis chers,

Compagnons de route dans ce long parcours, merci pour votre écoute, votre entraide, vos sourires spontanés et vos encouragements sincères. Vous avez été des piliers dans les moments les plus difficiles, et je vous en suis profondément reconnaissant(e).

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, m'ont soutenu ou simplement souhaité du bien, je vous dédie ce travail avec une gratitude infinie et un profond respect.

## **REMERCIEMENTS**

Louange à Dieu, Le Tout-Puissant, qui m'a guidé, soutenu et accordé la patience ainsi que la force nécessaire pour mener à bien ce modeste travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, le Professeur Youcef ZENNIR, pour ses conseils avisés, son accompagnement constant et sa disponibilité tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son soutien ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères vont également à Monsieur Ismail FANIT et monsieur Khalid LARID, mon encadrants de stage, pour son encadrement sur le terrain, sa bienveillance, ainsi que son appui technique et humain tout au long de la période de stage.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants de l'Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA), pour la qualité de leur enseignement et leurs efforts constants tout au long de mon parcours universitaire.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes chers parents, pour leur patience, leurs prières, leurs encouragements et leur soutien inconditionnel durant toutes ces années.

Mes remerciements vont également à mes frères, pour leur présence, leur compréhension et leur appui dans les moments les plus difficiles.

Enfin, je remercie du fond du cœur mes amis fidèles, pour leur solidarité, leur entraide et leur motivation continue tout au long de ce parcours.

À vous tous, je dédie ce travail avec respect et gratitude.

<b>Les tableaux</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 2.1.</b> Représentation de la méthode de L`APR	24
<b>Tableau 2.2.</b> Représentation de la méthode AMDE ou de la méthode AMDEC	27
<b>Tableau 2.3.</b> Exemple de tableau pour l'HAZOP	28
<b>Tableau 2.4.</b> Mots-clés pour HAZOP	28
<b>Tableau 2.5.</b> Matrice de criticité	33
<b>Tableau 3.1.</b> L`influence des éléments d`additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers.	58
<b>Tableau 4.1.</b> Les actions de contrôle dangereux.	77
<b>Tableau 4.2.</b> Les contraintes du contrôleur	79
<b>Tableau 4.3.</b> Probabilités associées aux événements de base.	86

## Liste des figures :

<b>Les Figures</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 2.1.</b> Plan de gestion des risques	20
<b>Figure 2.2.</b> Approches d'analyse de risque	21
<b>Figure 2.3.</b> Typologies et Approches des méthodes d'analyse de risque	22
<b>Figure 2.4.</b> Classification des risques	24
<b>Figure 2.5.</b> Représentation de l'arbre de défaillance	25
<b>Figure 2.6.</b> Représentation de l'arbre des causes	26
<b>Figure 2.7.</b> Représentation de l'arbre d'événement	26
<b>Figure 2.8.</b> module de Méthode d'analyse de risque	29
<b>Figure 2.9.</b> les étapes de la méthode STPA	31
<b>Figure 2.10.</b> exemple de Control Structure Diagramme	32
<b>Figure 2.11.</b> Classification des risques	34
<b>Figure 3.1.</b> Vue du complexe	37
<b>Figure 3.2.</b> Localisation par points cardinaux de (AQS)	38
<b>Figure 3.3.</b> Le produit Fil Machine	40
<b>Figure 3.4.</b> Le produit Rond à Béton	40
<b>Figure 3.5.</b> Le produit billette	41
<b>Figure 3.6.</b> Le produit le CDRI	41
<b>Figure 3.7.</b> Le produit le Chaux	42
<b>Figure 3.8.</b> Ferrailles	43
<b>Figure 3.9.</b> Billes de fer pré réduit	43
<b>Figure 3.10.</b> La fonte	44
<b>Figure 3.11.</b> Le four d'unité de production CDR I	45
<b>Figure 3.12.</b> L'unité de production d'acier avec deux aciéries électriques (SMP)	46
<b>Figure 3.13.</b> Laminoir (Rolling Mill)	46
<b>Figure 3.14.</b> L'unité de séparation d'Air (ASU)	47
<b>Figure 3.15.</b> L'unité de traitement de chaux	47
<b>Figure 3.16.</b> Station de récupération et de transport des matières premières	48
<b>Figure 3.17.</b> Station générale de traitement des eaux (WTP)	48

<b>Figure 3.18.</b> Sous-station électrique (MRSS)	49
<b>Figure 3.19.</b> Processus de production d'une opération de fabrication d'acier à four	50
<b>Figure 3.20.</b> Schéma du four à arc électrique	51
<b>Figure 3.21.</b> Chargement de la ferraille dans le four	52
<b>Figure 3.22.</b> Alimentation de pré réduit DRI	53
<b>Figure 3.23.</b> L'extraction des scories	55
<b>Figure 3.24.</b> Schéma de principe de la coulée continue	60
<b>Figure 3.25.</b> Coupe transversale d'un convoyeur de transport à chaud	62
<b>Figure 3.26.</b> Composition du système convoyeur	66
<b>Figure 3.27.</b> P&ID de convoyeur Piping and instrumentation diagramme	66
<b>Figure 4.1.</b> Convoyeur de transport à chaud à cause du système de gaz d'étanchéité	71
<b>Figure 4.2.</b> Diagramme de contrôle de transport convoyeur	76
<b>Figure 4.3.</b> Bloc diagramme fonctionnel	85
<b>Figure 4.4.</b> Modélisation dans un logiciel AdD comme GRIF	88
<b>Figure 4.5.</b> Unavailability Average Uagv	88
<b>Figure 4.6.</b> Modélisation dans un logiciel AdD comme GRIF	92
<b>Figure 4.7.</b> Unavailability Average Uagv	92

## Liste des abréviations

<b>Abréviations</b>	<b>Signification</b>
<b>SST</b>	Santé et sécurité au travail.
<b>MP</b>	Maladies Professionnelle.
<b>RP</b>	risques professionnels.
<b>STPA</b>	System theoretic process analyses.
<b>ADD</b>	Arber des défaillances
<b>AQS</b>	Algerian Qatar Steel
<b>FCR</b>	Les fibres céramiques réfractaires
<b>APR</b>	L'analyse préliminaire des risques
<b>MOSAR</b>	Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques
<b>AMDEC</b>	L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité
<b>HAZOP</b>	Hazard and Operability Study
<b>QSI</b>	Qatar Steel International.
<b>FNI</b>	Fonds National d'Investissement.
<b>DRI</b>	Direct Reduced Iron
<b>HBI</b>	Hot Briqueted Iron.
<b>WTP</b>	Water treatment plant
<b>ASU</b>	Air séparation unit .
<b>P&amp;ID</b>	Piping and instrumentation diagramme.
<b>SDF</b>	La sûreté de fonctionnement.

# Sommaire

Dédicace

Remerciements

Liste des tableaux ..... I

Liste des figures..... II

Liste des abréviations..... III

Résumé..... IV

Introduction Générale ..... 1

## Chapitre 1 : Généralités sur les risques professionnels

1.1 Introduction..... 4

1.2 Termes & définitions ..... 4

1.3 Concepts de risque professionnel..... 5

1.4 Les différents types de risque à complexe métallique ..... 11

1.5 des risques professionnels liés au transport par convoyeur à chaud..... 15

1.6 Conclusion ..... 16

## Chapitre 2: Les méthodes d'analyse des risques

2.1 Introduction..... 18

2.2 La gestion de risque..... 18

2.3 Méthodes d`analyse du risque..... 21

2.4 Evaluation du risque ..... 33

2.5 Conclusion ..... 35

## Chapitre 3 : généralité sur l`entrepris

3.1 Introduction ..... 37

3.2 Définition de l`Entreprise ..... 37

3.3 Localisation d`entreprise..... 38

3.4 Historique ..... 38

3.5 Les Objectifs d`entreprise ..... 39

3.6 Les produits ..... 39

3.7 Les matières premières utilisées ..... 42

3.8 Le processus l`entreprise ..... 44

3.9 La fabrication de l'acier ..... 49

3.10 Convoyeur de transport à chaud ..... 62

<b>3.11 Conclusion .....</b>	<b>68</b>
------------------------------	-----------

## **Chapitre 4: application de la méthode Add et STPA**

<b>4.1 Introduction :.....</b>	<b>70</b>
--------------------------------	-----------

<b>Objectif de cette pratique : .....</b>	<b>70</b>
---	-----------

<b>4.2 Les étapes application de la méthode Add sur le système de transport convoyeur</b>	<b>Error! Bookmark n</b>
---	--------------------------

<b>4.3 P&amp;ID utilisé dans l'application :.....</b>	<b>71</b>
---	-----------

<b>4.4 Application Add sur P&amp;ID : .....</b>	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
---	-------------------------------------

<b>4.5 Application de la méthode STPA sur le système de transport convoyeur à chaud : .</b>	<b>71</b>
---	-----------

<b>4.6 Conclusion : .....</b>	<b>92</b>
-------------------------------	-----------

<b>Conclusion Générale : .....</b>	<b>96</b>
------------------------------------	-----------

## **Références Bibliographies**

## **Tableau des matières**

## **Résumé**

## الملخص

تهدف هذه المذكرة إلى المساهمة في تحسين منظومة الأمن الصناعي داخل المركب الجزائري-القطري للحديد والصلب ببلارة (ولاية جيجل). في ظل تعقيد الأنظمة الصناعية الحديثة، أظهرت أساليب تحليل المخاطر التقليدية محدوديتها. لذلك، تم اعتماد منهجية مزدوجة تعتمد على STPA (التحليل النظمي للعمليات) AdD (شجرة تحليل الأعطال). تسمح STPA بالكشف عن المخاطر الناتجة عن التفاعلات البشرية والتنظيمية داخل النظام، بينما تركز AdD على تحديد الأعطال الفنية المحتملة. وقد مكّن تطبيق هذا النهج على وحدة حساسة من المركب (مثل وحدة الاختزال المباشر أو الدرفلة) من فهم أفضل لسيناريوهات المخاطر، واقتراح توصيات عملية لتعزيز السلامة والموثوقية داخل النظام المدروس.

**الكلمات المفتاحية:** الأمن الصناعي STPA، AdD، شجرة تحليل الأعطال، تحليل المخاطر، صناعة الحديد والصلب، بلارة

## Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la sécurité industrielle au sein du complexe sidérurgique algérien-Qatarien de Bellara, situé dans la wilaya de Jijel. Face à la complexité croissante des systèmes industriels modernes, les méthodes classiques d'analyse des risques montrent leurs limites. Pour y remédier, nous avons adopté une approche combinée fondée sur la STPA (System-Theoretic Process Analysis) et l'AdD (Analyse des Défauts). La STPA permet d'identifier les défaillances issues des interactions système et humaines, tandis que l'AdD cible les défauts techniques potentiels. L'application de cette démarche sur une unité critique du complexe (ex. : réduction directe ou laminoir) a permis une meilleure compréhension des scénarios de risques et la formulation de recommandations concrètes pour renforcer la sécurité et la fiabilité du système étudié.

**Mots-clés :** sécurité industrielle, STPA, AdD, analyse des risques, sidérurgie, Bellara.

## Abstract

This thesis focuses on improving industrial safety at the Algerian-Qatari steel complex of Bellara, located in the Jijel province. In the face of increasing system complexity, traditional risk analysis methods have shown significant limitations. To address this, we adopted a hybrid approach combining STPA (System-Theoretic Process Analysis) and AdD (Defect Analysis). STPA helps identify system and human-interaction-based failures, while AdD targets potential technical defects. Applying this integrated approach to a critical production unit (e.g., direct reduction or rolling mill) provided deeper insight into risk scenarios and led to concrete recommendations for enhancing system safety and reliability.

**Keywords:** industrial safety, STPA, AdD, risk analysis, steel industry, Bellara

### Introduction générale

La sécurité industrielle constitue un pilier fondamental dans toute installation de production, car elle vise à protéger les individus, préserver les équipements et assurer la continuité des activités. Avec l'évolution rapide des technologies et la complexité croissante des systèmes industriels, les risques auxquels ces systèmes sont confrontés ne se limitent plus aux défaillances techniques. Ils englobent également les aspects organisationnels, humains et les interactions entre les composants du système. Cette réalité impose l'adoption d'approches d'analyse des risques plus globales, intégrées et efficaces [1].

Dans ce contexte, l'industrie sidérurgique se distingue comme l'un des secteurs les plus exposés, en raison de la multiplicité de ses étapes de production, de la sensibilité de ses équipements, et de sa forte consommation énergétique. En Algérie, le complexe sidérurgique algérien-qatarien de Bellara, situé dans la wilaya de Jijel, représente l'un des projets industriels les plus modernes et intégrés du pays. Il regroupe plusieurs unités clés telles que la réduction directe, la fusion, et le laminage, rendant la gestion des risques une tâche aussi critique que complexe [3].

Malgré la modernité de ses installations, la sécurité de son fonctionnement ne peut être assurée par des méthodes classiques d'analyse des risques. D'où la nécessité d'intégrer des approches analytiques plus avancées. Dans ce cadre, cette étude propose la combinaison de deux méthodes complémentaires : la méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis), qui permet une analyse systémique prenant en compte les interactions humaines, techniques et organisationnelles, et la méthode AdD (Analyse des Défauts), orientée vers la détection des pannes techniques potentielles et l'évaluation de leurs effets [1] [2].

Ainsi, cette recherche se propose de répondre à la problématique suivante : comment peut-on exploiter de manière complémentaire les méthodes STPA et AdD afin d'améliorer l'analyse des risques industriels au sein du complexe algéro-qatarien de Bellara ? Pour ce faire, trois hypothèses sont avancées : premièrement, la méthode STPA permet de révéler des lacunes du système difficilement identifiables par les approches classiques ; deuxièmement, l'AdD permet une analyse fine et ciblée des défaillances au niveau des zones critiques identifiées grâce à la STPA ; troisièmement, la combinaison des deux méthodes offre une amélioration globale du système de sécurité industrielle. L'objectif principal de cette étude est donc de construire un cadre méthodologique combiné pour l'analyse des risques, de

l'appliquer à une unité réelle du complexe de Bellara, et d'en tirer des recommandations concrètes pour renforcer la fiabilité et la sécurité du processus industriel [1].

Pour atteindre ces objectifs, notre travail s'articule autour de quatre chapitres principaux :

- le premier chapitre : traite des risques professionnels et de leur impact dans le milieu industriel
- le deuxième chapitre : présente et compare les méthodes d'analyse des risques, notamment STPA et AdD
- le troisième chapitre : est dédié à une présentation générale du complexe algérien-quatari de Bellara
- le quatrième chapitre : est consacré à l'application concrète des méthodes STPA et AdD sur le système de transport par convoyeur à chaud.

A la fin une conclusion générale et perspective

# **Chapitre1 : Généralités sur les risques professionnels**

## 1.1 Introduction

Les risques professionnels sont des éléments inévitables qui accompagnent toute forme d'activité économique. Ils revêtent une diversité de formes et de manifestations, susceptibles de compromettre la santé, la sécurité et le bien-être des travailleurs, ainsi que la viabilité environnementale et la continuité opérationnelle des entreprises. Par conséquent, il est impératif d'approfondir notre compréhension de ces risques, en identifiant leurs multiples facettes et en évaluant leurs impacts potentiels. En élaborant des stratégies de gestion adaptées, nous sommes en mesure de préserver un environnement de travail qui favorise à la fois la sécurité physique et la santé mentale, assurant ainsi le bien-être général de tous les intervenants impliqués dans le processus. Dans ce chapitre, nous aborderons quelques termes et définitions ainsi que tout ce qui concerne les risques professionnels.

## 1.2 Termes & définitions

- **Danger:** source, situation, ou acte ayant un potentiel de nuisance en termes de lésion corporelle ou d'atteinte à la santé, ou une combinaison de ces éléments [3].
- **Identification des dangers :** processus visant à reconnaître qu'un danger existe et à définir ses caractéristiques [3].
- **Risque :** combinaison de la probabilité de la survenue d'un ou plusieurs événements dangereux ou expositions à un ou à de tels événements et de la gravité des lésions corporelles ou de l'atteinte à la santé que cet événement ou cette/ces exposition(s) peuvent causer [3].
- **Atteinte à la santé :** état physique ou mental défaillant identifiable, résultant de et/ou aggravé par une activité professionnelle et/ou une situation professionnelle [3].
- **Incident :** tout événement en lien avec le travail lors duquel une lésion corporelle ou une atteinte à la santé (indépendamment de la gravité) ou un accident mortel s'est produit, ou aurait pu se produire [3].
- **Accident de Travail :** Tout accident ayant entraîné une lésion corporelle, imputable à une cause soudaine extérieure et survenu au moment où la victime était sous la dépendance de son employeur [4].
- **Scénario de danger :** Situation de danger à laquelle, nous pouvons associer des événements possibles la rendant potentiellement dangereuse pour la santé et la sécurité des travailleurs [4].

- **Source de danger** : Situation dans laquelle les personnes sont soumises au danger ou dans laquelle elles sont susceptibles de subir les conséquences d'un aléa redouté [4].
- **Domage** : Préjudice physique ou mental subi par un opérateur. Dégâts matériels infligés à une installation ou à l'environnement.
- **Santé et sécurité au travail (SST)** : conditions et facteurs qui affectent, ou pourraient affecter, la santé et la sécurité des employés ou d'autres travailleurs (y compris les travailleurs temporaires et le personnel détaché par un sous- Chapitre I : Généralités sur Les risques professionnel 11 traitant), des visiteurs, ou de toute autre personne présente sur le lieu de travail [3].
- **Lieu de travail** : lieu sous le contrôle de l'organisme où une personne doit se trouver ou se rendre pour son travail.
- **Partie intéressée** : individu ou groupe, présent à l'intérieur ou à l'extérieur du lieu de travail, concerné ou affecté par la performance SST d'un organisme [3].
- **Risque acceptable** : risque qui a été ramené à un niveau tolérable par l'organisme au regard de ses obligations légales et de sa politique SST [3].
- **Risque résiduel** : Désigne un risque qui subsiste alors que des mesures de prévention ont été prises [3].
- **Non-conformité** : non-satisfaction d'une exigence [5].
- **Audit** : processus méthodique, indépendant et documenté, permettant d'obtenir des preuves d'audit et de les évaluer de manière objective pour déterminer dans quelle mesure les critères d'audit sont satisfaits [5].
- **Événement indésirable** : événement résultant du travail ou se produisant pendant le travail et qui conduit ou peut conduire à des traumatismes et pathologies [5].
- **Action corrective** : action visant à éliminer la ou les causes d'une non-conformité ou d'un événement indésirable et à éviter qu'ils ne réapparaissent [5].
- **Maladie Professionnelle** : Est la conséquence directe de l'exposition d'un travailleur à un risque, ou résulte des conditions dans lesquelles il exerce son activité professionnelle [4].

### 1.3 Concepts de risque professionnel

Le risque professionnel est une éventualité permanente de toutes les situations de travail, plus ou moins probable et dommageable selon la nature du travail et les conditions

dans lesquelles l'activité professionnelle est exercée. Les conséquences éventuelles du risque professionnel peuvent revêtir deux formes : l'accident du travail (AT) ou la maladie professionnelle (MP) [6].

### 3.1. Le risque professionnel

C'est la cause capable de provoquer une lésion ou une atteinte à la santé. Les risques sont évalués selon deux critères : probabilité de l'évènement non souhaité et gravité du dommage causé, par son intensité et/ou son étendue (matrice carrée « aléa \* enjeu »). Les causes professionnelles sont très diverses et peuvent être relatives à une énergie mal maîtrisée (mécanique, électrique, thermique ...), des chutes de hauteur, des postures contraignantes, l'utilisation de produits chimiques, des contraintes psychologiques... Le risque global d'une situation de travail donnée est la sommation de toutes les conséquences des événements non souhaités qu'elle est susceptible d'engendrer, affectées de leur probabilité[6].

### 3.2. Classification des risques

Les risques professionnels peuvent être classés selon qu'ils sont :

- **Mécaniques** : heurts par les parties mobiles en mouvement des machines, écrasement par des chutes d'objets ou des véhicules, coupures et perforations par les outils de travail, projections de particules solides (copeaux de métal, de bois, de roche) ou de matière incandescente, contraintes posturales et visuelles contraignantes et gestes répétitifs ... [6].
- **Physiques** : vibrations produites par les engins, niveau sonore trop élevé, température trop forte ou trop basse, intempéries pour les travaux extérieurs (humidité, vent...), niveau d'éclairage, qualité de l'air sur le lieu de travail (poussières ...), courant électrique, incendie et explosion ... [6].
- **Chimiques** : exposition à des substances chimiques par inhalation, ingestion ou contact cutané, produits gazeux, liquides ou solides, cancérigènes, mutagènes, toxiques, corrosifs, irritants, allergisants... [6].
- **Biologiques** : exposition à des agents infectieux (bactériens, parasitaires, viraux, fongiques) et allergisants par piqûre, morsure, inhalation, voie cutanée muqueuse ...
- **Radiologiques** : existence de radiations ionisantes et radioéléments, de rayonnements laser, de radiations UV et IR, rayonnements électromagnétiques divers... [6].

- **Psychologiques** : agression physique ou verbale sur le lieu de travail par un client /élève/patient, harcèlement moral ou sexuel par un supérieur hiérarchique, stress managérial, charges mentales excessives (travail permanent sur écran ...)[6].

### 3.3. Les facteurs de risque professionnel

Un facteur de risque est un élément qui peut révéler le danger et entraîne la survenue du risque. Le facteur de risque augmente la probabilité du dommage, c'est-à-dire celle de la concrétisation du risque. Il y a facteurs techniques, humains, et des facteurs organisationnels[6].

- **Facteurs techniques** : normes de sécurité des machines, ergonomie du poste de travail, toxicité des produits utilisés, ventilation et éclairage des locaux, signalisation et balisage des zones à risques ...[6]
- **Facteurs humains** : information, formation et expérience des travailleurs, respect des consignes de sécurité ... [6].
- **Facteurs organisationnels** : méthodes de management, exigences de productivité et de qualité... Les facteurs de risque sont collectifs (ils concernent tous les travailleurs exposés) ou individuels (aspects comportementaux ou médicaux, comme l'acuité visuelle, la sensibilité allergique ...) [6].

### 3.4. Les fiches de risques

#### 3.4.1. Risques de chute de plain-pied :

Ce sont des risques d'accident liés à des glissades, trébuchements, faux pas et autres pertes d'équilibre sur une surface plane, c'est-à-dire une surface ne présentant pas de différence de niveau ou une différence de niveau très réduite telle que trottoir, petite marche ou plan incliné. Les chutes avec dénivellation sont des chutes de hauteur. Chapitre I : Généralités sur Les risques professionnel 13 Les chutes de plain-pied sont souvent considérées comme des accidents bénins mais sont la deuxième cause des accidents du travail et peuvent avoir de graves conséquences [7].

#### 3.4.2. Risques de chute de hauteur

Ce sont des risques d'accident liés à la perte d'équilibre d'une personne au droit d'une dénivellation et à sa chute dans le vide. Des situations présentant ce risque peuvent se trouver dans le milieu naturel ou dans une construction ; elles peuvent aussi résulter de l'utilisation d'un équipement d'accès ou de travail en hauteur. Les accidents par chute de hauteur ont souvent des conséquences particulièrement graves [7].

### **3.4.3. Risques liés aux circulations internes de véhicules et d'engins**

Ce sont des risques d'accident liés au heurt d'une personne par un véhicule ou un engin (deux-roues, voiture, camion, chariot de manutention...) ou à la collision de véhicules entre eux ou contre un obstacle, au sein de l'entreprise. Ce sont des risques dont les conséquences peuvent être graves (à cause de la vitesse ou de la masse impliquée) [7].

### **3.4.4. Risques routiers en mission**

Ce sont des risques liés aux déplacements dans le cadre de missions professionnelles. Ils concernent l'utilisation d'une voiture légère, d'un véhicule utilitaire, d'un deux-roues motorisé ou non, ou d'un poids lourd. Les salariés sont exposés à un risque important d'accident sur la route. Au-delà des risques de dommages corporels, ils sont exposés également en permanence à des risques physiques (vibrations, bruit), posturaux, chimiques et psychosociaux qui doivent être pris en compte.

### **3.4.5. Risques liés à la charge physique de travail**

La charge physique est source d'accidents du travail (traumatiques, cardiovasculaires...) et de maladies professionnelles. Elle peut contribuer à l'apparition de fatigue, douleurs, gênes fonctionnelles, atteintes de l'appareil locomoteur, voire d'inaptitudes au travail. Les facteurs qui influencent ces risques sont liés au contenu du travail (efforts physiques, fréquence des gestes, fluctuation d'activité...), à l'organisation du travail (cadence, contrainte temporelle...), et à l'environnement physique (aménagement des postes de travail, chaleur...) et social (possibilité d'entraide...) [8].

### **3.4.6. Risques liés à la manutention mécanique**

Ce sont des risques d'accident liés à la charge manutentionnée (chute, heurt, renversement), au moyen de manutention (rupture, défaillance) et aussi à la circulation des engins de manutention. Ce sont des risques dont les conséquences peuvent être graves (masse, vitesse, hauteur...) [7].

### **3.4.7. Risques liés aux produits chimiques, aux émissions et aux déchets**

Ce sont des risques d'intoxication, d'allergie, de brûlure, ... par inhalation, ingestion ou contact cutané de produits chimiques mis en œuvre ou émis sous forme de gaz, de particules solides ou liquides. Dans certaines conditions, c'est un risque de déclarer une maladie professionnelle à long terme [7].

### **3.4.8. Risques liés aux agents biologiques**

Ce sont des risques d'infection, d'allergie ou d'intoxication liés à la présence de microorganismes sur les lieux de travail. La transmission peut se faire par voie respiratoire,

par pénétration à travers la peau ou les muqueuses ou par ingestion. Ce sont des risques qui peuvent avoir des conséquences graves dans certaines professions [8].

#### **3.4.9. Risques liés aux équipements de travail**

Ce sont principalement des phénomènes dangereux qui peuvent être à l'origine de blessures (écrasements, coupures, perforations...) par l'action mécanique d'éléments de machines, d'outils, de pièces, de charges, ou par projection de matériaux solides ou de fluides. Cependant, les équipements de travail présentent de nombreux autres risques tels que ceux liés aux énergies, aux températures extrêmes, aux rayonnements, au bruit, aux émissions de substances dangereuses et à une mauvaise prise en compte des principes ergonomiques (voir les fiches correspondantes) [9].

#### **3.4.10. Risques liés aux effondrements et aux chutes d'objets**

Ce sont des risques d'accident qui sont liés à la chute d'objets depuis un niveau supérieur, à l'effondrement des matériaux, ou à celui d'une structure [9].

#### **3.4.11. Risques et nuisances liés au bruit**

Ce sont des risques d'accident du travail ou de maladie professionnelle suite à une exposition excessive au bruit. L'oreille peut subir des atteintes lorsqu'elle est soumise soit quotidiennement à une forte dose de bruit, soit à un bruit soudain de très forte intensité. Dans le premier cas, la surdité se développe insidieusement au cours des années. Dans le second cas, il peut y avoir un traumatisme sonore aigu ou, comme dans le premier cas, le développement d'une surdité qui s'accroîtra au fil des expositions à ces bruits de très forte intensité. La surdité est irréversible. Le bruit a aussi des effets extra-auditifs. Il peut provoquer stress et fatigue et masquer des signes utiles indiquant un danger (consignes orales, bruit de véhicules, signaux d'alarme...) [8].

#### **3.4.12. Risques liés aux ambiances thermiques**

Ce sont des risques qui peuvent engendrer des plaintes pour inconfort (insatisfaction, fatigue...) et des risques d'atteintes à la santé (malaises, dermatoses...) qui peuvent provoquer des gelures, hyperthermie, coup de chaleur... [7].

#### **3.4.13. Risques d'incendie et d'explosion**

Ce sont des risques présents dans toutes les entreprises et dont les conséquences peuvent être graves, tant pour les salariés que pour les installations. Les atteintes à la santé sont diverses : brûlures, blessures, intoxication par la fumée, rupture de tympan, voire mort immédiate [9].

#### **3.4.14. Risques liés à l'électricité**

Ce sont des risques d'accident (brûlure, électrisation, électrocution) consécutifs à un contact avec une pièce conductrice sous tension (accidentellement ou non) ou à la création d'un arc électrique lors de la manipulation d'un équipement électrique (sectionneur ou disjoncteur, par exemple). Ces risques sont présents dans toutes les entreprises [9].

#### **3.4.15. Risques liés aux ambiances lumineuses**

L'éclairage naturel et l'éclairage artificiel sont des éléments essentiels de bien-être et de réduction des risques au travail. L'éclairage artificiel doit être conçu en compensation des variations de l'éclairage naturel pour répondre aux besoins du travail réel et pour réduire le risque d'accident lors des circulations de piétons et de véhicules. De manière générale, l'éclairage ne doit pas être générateur d'éblouissements gênants, de contrastes de luminance fatigants, voire de reflets ou d'ombres portées, lesquels sont susceptibles, notamment, de renforcer la survenue de troubles muscle squelettiques [9].

#### **3.4.16. Risques liés aux rayonnements**

Ce sont des risques d'atteinte à la santé dont la nature et la gravité dépendent du type de rayonnement et du niveau d'exposition. Il existe trois grandes familles de rayonnements à prendre en compte en milieu professionnel : les champs électromagnétiques, les rayonnements optiques artificiels et les rayonnements ionisants [7].

#### **3.4.17. Risques psychosociaux**

Les risques psychosociaux concernent les situations de travail où sont présents du stress, des violences internes (dont le harcèlement moral et sexuel) ou externes (agressions, conflits, tensions avec le public ou la clientèle). Ce sont des risques qui peuvent être induits par l'activité elle-même ou être générés par l'organisation et les relations de travail ; c'est ce que l'on appelle les facteurs de risques psycho- sociaux : intensité et temps de travail, exigences émotionnelles, manque d'autonomie, rapports sociaux au travail dégradés, conflits de valeur, insécurité de la situation de travail... Les risques psychosociaux peuvent affecter la santé physique (maladies cardiovasculaires, troubles muscle squelettiques...) ou mentale (troubles anxieux, dépression, suicide, tentatives de suicide...) [8].

#### **3.4.18. Risques liés aux vibrations**

Ce sont des risques de maladies professionnelles liées à deux modes d'exposition : les vibrations transmises à l'ensemble du corps, notamment lors de la conduite de véhicules, et les vibrations transmises aux membres supérieurs, lors de l'utilisation de machines tenues ou portées à la main. Pour les conducteurs, l'exposition aux vibrations favorise l'apparition de

douleurs au dos. Pour les opérateurs de machines portatives, l'exposition aux vibrations de la machine peut conduire à des troubles physiologiques au niveau du membre supérieur ; la localisation et la nature de ces effets dépendant de la fréquence des vibrations émises (troubles ostéo- articulaires pour des machines percutantes à quelques dizaines de hertz, et troubles neurologiques et vasculaires pour les machines tournantes à plusieurs centaines de hertz). Dans tous les cas, une exposition excessive peut conduire à une maladie professionnelle [8].

### **3.4.19. Risques de heurt, de cognement**

Ce sont des risques d'accident liés au heurt, au cognement d'un salarié contre un élément fixe de son environnement de travail. Ces heurts se produisent généralement contre un objet, du matériel, une structure... Ils génèrent souvent des contusions mais peuvent avoir des conséquences plus importantes (plaie, entorse...). Ils peuvent provoquer une chute. Ces risques sont présents dans tous les secteurs d'activité et concernent tous les métiers[7].

### **3.4.20. Risques liés aux pratiques addictives**

Ce sont des risques d'atteintes à la santé et à la sécurité des travailleurs, liées à des consommations occasionnelles ou répétées de substances psycho actives (alcool, tabac, canna- bis...). Les pratiques addictives peuvent entraîner des dépressions, des troubles de la vigilance, des problèmes cardiovasculaires, des cancers ou une dépendance à un produit. Elles peuvent être à l'origine d'accidents du travail et d'accidents routiers. Les causes des consommations de substances psycho actives peuvent relever de la vie privée, mais aussi de certains facteurs liés au travail dont l'organisation du travail (travail en horaires décalés, isolement...), les risques psychosociaux, les activités physiques contraignantes et les pots avec alcool [7].

## **1.4 Les différents types de risque à complexe métallique**

### **4.1. Risques liés au poste de travail fonderie**

#### **4.1.1 Les risques chimiques causés par les procédés de fonderie**

- **Les fumées émises par les alliages métalliques liquides**

Toutes les fumées de métaux peuvent entraîner des pathologies respiratoires (toux, expectoration, essoufflement), particulièrement pour certains alliages avec des oxydes de métaux dangereux pour la santé (plomb, nickel, chrome...) qui peuvent également être présents dans les fumées. L'intoxication chronique au plomb, par inhalation de fumées et de poussières, expose les travailleurs à des maladies professionnelles à long terme (saturnisme), par effets cumulatifs : troubles du système

nerveux, anémie, insuffisance rénale, altération de la fertilité. Des cancers (ethmoïde, sinus, bronches) peuvent être causés par le dioxyde de nickel. La fièvre des fondeurs, avec des symptômes de type grippal, provient d'une forte inhalation d'oxyde de zinc, mais également de fumées à base de cuivre, magnésium ou cadmium. Les fumées d'oxydes métalliques sont par ailleurs allergisantes et peuvent être à l'origine de véritables asthmes professionnels, urticaire, œdème de Quincke[7].

- **Les poussières de silice cristalline**

Le sable de fonderie utilisé pour la fabrication des moules, sous forme de poussières riches en silice cristalline peut provoquer une silicose et est classée comme cancérigène avérée par le CIRC : l'exposition a lieu à la sablerie lors du mélange et du transport, lors du noyautage et du moulage, lors du décochage (séparation du sable des pièces), et un peu lors du parachèvement des pièces (ébarbage, meulage des pièces). Les particules de poussières de silice cristalline peuvent être très fines (d'un diamètre inférieur à 5 microns) et sont donc invisibles à l'œil nu, et restent longtemps en suspension dans l'air ambiant. En étant inhalées et en séjournant longtemps dans le tissu pulmonaire, les très fines poussières de silice provoquent une inflammation chronique des muqueuses pulmonaires, la formation d'un tissu pulmonaire fibreux, la constitution de nodules, entraînant une maladie respiratoire, une pneumoconiose fibreuse nommée silicose, se traduisant par un essoufflement à l'effort (dyspnée) et de la toux au début, jusqu'à une déficience respiratoire très grave et une insuffisance cardiaque (tableau n°25 des maladies professionnelles du Régime Général). La silicose affecte la fonction pulmonaire au point de favoriser le développement de cancers broncho-pulmonaires : la silice est classée comme cancérigène avéré par le CIRC mais n'est classée par l'Union européenne que comme Agent Chimique Dangereux (ACD). Par ailleurs, les poussières de silice cristalline peuvent induire une irritation des yeux et provoquer l'apparition de bronchites chroniques[8].

- **Les résines et les produits de dégradation thermique pendant la coulée**

Le secteur du moulage et la réalisation des noyaux à prise chimique avec des résines thermodurcissables génèrent des émissions de formaldéhyde, de phénol, et les catalyseurs de polymérisation, du diméthyle éthylamine (DMEA), du formiate de méthyle selon le type de procédé. L'alcool furfurylique et le di iso cyanate de di phényle méthane (MDI) peuvent être aussi émis lors de la mise en œuvre des résines. Ces produits sont irritants pour la peau et les muqueuses, les yeux, les voies

respiratoires. Le formaldéhyde est classé comme cancérigène. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont formés lors de la pyrolyse de produits organiques (liants des moules en sable, graisses utilisées lors du moulage sous pression et en coquille,) et certains d'entre eux sont également classés comme cancérigènes. Enfin, du monoxyde de carbone (CO), qui se forme lors de la combustion des liants organiques des moules, peut provoquer une grave asphyxie. [8].

- **Les fibres céramiques réfractaires (FCR)**

Les FCR sont utilisées en fonderie comme isolant thermique pour le garnissage des fours, l'isolation des conduites, des couvercles et plaques de protection, des outils... Les poussières de fibres céramiques réfractaires FCR, ont un risque cancérigène moindre que l'amiante, mais sont néanmoins classées en catégorie 2 (phrase de risque R 49, c'est-à-dire possibilité pour ces produits d'être cancérigène pour l'homme). De plus, sous l'action de la chaleur, les FCR peuvent se transformer partiellement en produits pulvérulents contenant de la silice cristalline, ce qui entraîne un risque potentiel de silicose. Par ailleurs, l'inhalation constante dans les poumons de FCR peut causer des rhinites allergiques ou des inflammations de la muqueuse nasale, des pneumopathies chroniques et de l'asthme. Le risque est le plus important lors du renouvellement des FCR, soit de manière préventive lors de maintenance régulière sur les fours, soit de manière curative lors d'un constat d'usure [9].

#### 4.1.2. Risques physiques

- **Risques liés aux machines et outillages**

Les machines à mouler, à noyauter, à injecter les cires et leurs périphériques (systèmes de déboitage, ébavurage...) sont susceptibles d'avoir des organes en mouvement qui provoquent des risques de coupure aux mains, de lacérations des avant-bras, en particulier lors des mises en marche intempestives, des arrêts anormaux suite à une rupture d'énergie ou lors des nettoyages par exemple [9].

- **Risques liés aux manutentions**

Le port de lourdes charges (transport du métal fondu...), les contraintes posturales exigeantes du rachis lors des moulages et démoulages, sont à l'origine d'accidents de travail concernant la colonne vertébrale (dorsalgies, lombosciatiques) [8].

- **Autres risques physiques**

Chutes de plain-pied sur sol glissant, inégal ou encombré, projections de ferraille dans les yeux, troubles muscle squelettiques causés par les activités en station debout prolongée, s'effectuant dans des postures complexes et avec des gestes répétitifs ou dans des espaces confinés notamment pour la réfection des fours, électrocution par contact direct, niveaux sonores élevés exposant les opérateurs de fonderie à des risques de troubles auditifs, pouvant entraîner à la longue une surdité professionnelle ... [8].

#### **4.1.3 Risques d'incendie et d'explosion en fonderie**

La vaporisation d'eau lors des opérations de transfert du métal en fusion expose à un risque d'explosion : en effet, le contact d'objets humides et a fortiori d'eau avec un bain de métal en fusion peut provoquer des projections explosives de métal liquide, avec risque de propagation d'un incendie (d'où l'impératif de séchage des charges introduites, des poches et de l'outillage, et d'une zone de coulée exempte de trace d'eau) [9].

### **4.2. Risques liées au poste de travail rectifieur**

#### **4.2.1 Les risques physiques**

- **Liés aux manutentions**

Chargement, positionnement et calage des pièces à usiner, serrage et desserrage des mors, fermeture et ouverture du capot de la machine ... peuvent entraîner des ports de charges, des gestes répétitifs avec des contraintes posturales et une station debout prolongée propices à l'apparition de troubles muscle squelettiques. [9].

- **Liés à la machine**

Le réglage des outillages et les processus opératoires de fabrication de pièces peuvent conduire à la survenue d'accidents tels que coupures, écrasements, corps étranger dans l'œil... si les consignes de sécurité ne sont pas respectées ou si la machine est mal entretenue ou que l'opérateur en maîtrise mal le fonctionnement.

- **Liés à l'environnement de travail**

Chutes sur un sol d'atelier rendu glissant par les fluides de coupe répandus, chaleur, bruits, odeurs des brouillards de décomposition thermique de l'huile [9].

#### 4.2.2 Les risques chimiques

- **Les fluides d'usinage (ou huiles de coupe)**

Sont utilisées sur les machines outil pour la lubrification et le refroidissement des opérations d'usinage : les fluides de coupe ont pour rôle aussi de limiter l'usure de l'outil, réduire les risques de grippage et empêcher la corrosion des métaux. On distingue deux types d'huiles de coupe :

- ◆ Les huiles de pleine coupe (ou entières) peuvent contenir des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) cancérigènes par contact cutané (tableau 36 bis des maladies professionnelles), et sont susceptibles de provoquer des dermites et dermatoses [9].
- ◆ Les fluides aqueux (huile + eau) peuvent provoquer des dermites et des pathologies respiratoires (asthme et pneumopathies) dues aux réactions allergiques et aux bactéries présentes dans les brouillards et fumées de dégradation des huiles générés par les outils tournant à grande vitesse au contact du fluide [8].

- **Des solvants halogénés**

Comme le trichloréthylène sont utilisés pour le dégraissage des pièces métalliques. Le trichloréthylène a une toxicité sur le système nerveux central et le cœur. En outre, il est cancérigène (Classification R 45 : Peut causer le cancer) (Tableau n°12 RG des affections professionnelles provoquées par les dérivés halogénés des hydrocarbures aliphatiques) [9].

### 1.5 Risques professionnels liés au transport par convoyeur à chaud

- **Risque à forte probabilité (élevée)**

- Brûlures par contact avec des pièces chaudes du convoyeur
- Incendie dû à la température élevée et à la présence de matériaux inflammables
- Coincement ou écrasement dans les parties mobiles (rouleaux, courroies)
- Inhalation de fumées ou gaz toxiques générés par la chaleur
- Glissade sur des surfaces rendues glissantes par la chaleur ou des projections[10].

- **Risque à probabilité moyenne**

- Coupures ou blessures lors des opérations de maintenance
- Défaillance mécanique sous l'effet de la chaleur (rupture de pièce)
- Fatigue thermique ou déshydratation des opérateurs

- Exposition prolongée au bruit des convoyeurs motorisés
- Projections de particules chaudes (étincelles, métalliques) [10].
- **Risque à faible probabilité**
  - Électrocution par défaut d'isolation (si bonne maintenance assurée)
  - Effondrement structurel du convoyeur (si inspections régulières faites)
  - Chute de hauteur en zone sécurisée (présence de garde-corps)
  - Dérive de température hors seuil critique (si capteurs fonctionnels) [10].

## 1.6 Conclusion

Les complexes métallurgiques, en raison de la diversité et de la complexité des opérations qu'ils impliquent, sont des environnements de travail particulièrement exposés à des risques professionnels. Ces risques peuvent être d'ordre physique (accidents liés aux machines, brûlures, chutes), chimique (exposition aux fumées métalliques, poussières, produits corrosifs) ou psychosocial (stress, charges mentales élevées). La prévention de ces risques nécessite une approche globale, incluant une formation continue des travailleurs, des équipements de protection adaptés et une surveillance régulière des conditions de travail. Il est crucial que les entreprises mettent en place des mesures proactives pour réduire l'exposition aux dangers, garantir la sécurité des travailleurs et favoriser une culture de sécurité. En outre, le respect des normes de sécurité et la mise à jour régulière des équipements sont indispensables pour éviter les accidents graves. La gestion efficace des risques dans ces complexes est essentielle non seulement pour la santé des travailleurs, mais aussi pour la rentabilité et la pérennité de l'entreprise.

## **Chapitre 2 : les méthodes d'analyse des risques**

## 2.1 Introduction

L'analyse des risques est une composante essentielle de la gestion des risques de sécurité industrielle. Cette approche vise à comprendre les causes et les conséquences des accidents, tels que les explosions, les déversements toxiques ou les accidents critiques qui surviennent dans les installations industrielles.

L'objectif principal de cette analyse est d'identifier les facteurs contributifs ayant conduit à la survenance de l'accident, qu'ils soient techniques, organisationnels, humains ou environnementaux. L'analyse vise également à identifier les lacunes dans les procédures de sécurité, les défauts de conception, les défaillances dans les systèmes de contrôle ou les erreurs humaines qui peuvent avoir causé ou exacerbé l'accident.

## 2.2 La gestion de risque

### 2.1. Définition de gestion du risque

La gestion des risques est le processus qui permet d'identifier et d'évaluer les risques en vue d'élaborer un plan visant à minimiser et à maîtriser ces risques et leurs conséquences potentielles pour une entreprise. Les risques représentent une probabilité de perte ou de dommage. Leurs causes sont multiples : responsabilité légale, catastrophes naturelles, accidents, erreurs de gestion ou menaces relatives à la sécurité informatique [11].

### 2.2. Gestion des risques dans l'entreprise

Gestion des risques dans l'entreprise Les stratégies de gestion des risques sont les tactiques mises en œuvre pour appréhender ces risques et comprendre leurs conséquences potentielles. Elles doivent faire partie de votre plan de gestion des risques, qui est un processus documenté décrivant les méthodes qu'utilise votre entreprise ou votre équipe pour identifier les risques émergents et y remédier. La gestion des risques dans l'entreprise est un volet important de votre stratégie métier et de vos relations avec les parties prenantes. Elle vous aide en effet à éviter les situations qui peuvent entraver la réalisation des objectifs de votre entreprise. Dans de nombreux secteurs, les activités de l'entreprise sont soumises à des exigences de conformité. Plusieurs organismes ont donc défini des normes de gestion des risques, notamment le NIST (National Institute of Standards and Technology) et l'ISO (Organisation internationale de normalisation). Le secteur des services financiers est, par exemple, l'un des plus réglementés, avec de très nombreuses exigences de conformité. Le niveau de risque est également très élevé, entre le stockage sécurisé des données client, la prise de décisions d'investissement ou encore la gestion des risques de crédit. Les entreprises de tous les secteurs peuvent s'appuyer sur les principes de la norme ISO 31000 pour gérer les

Risques. Les normes de gestion des risques aident les entreprises à mettre en place un plan de gestion des risques de manière systématique [11].

### 2.3. Processus de gestion de risques

Les entreprises font face à un grand nombre de risques, c'est pourquoi la gestion des risques doit être une partie centrale de la gestion stratégique de toute entreprise. La gestion des risques vous aide à identifier et à aborder les risques auxquels fait face votre entreprise et, ce faisant, augmente la probabilité d'atteindre avec succès les objectifs de votre entreprise.

Un processus de gestion des risques implique

- L'identification méthodique des risques entourant les activités de votre entreprise.
- L'évaluation de la probabilité qu'un événement survienne.
- La compréhension de la façon de répondre à ces événements.
- La mise en place de systèmes afin de faire face aux conséquences.
- La surveillance de l'efficacité de vos approches et contrôles en matière de gestion des risques.

En conséquence, le processus de gestion des risques

- Améliore la prise de décision, la planification et la priorisation.
- Vous aide à allouer le capital et les ressources de façon plus efficace.
- Vous permettez d'anticiper ce qui pourrait mal tourner, de minimiser le nombre de feux que vous aurez à éteindre ou, dans le pire des cas, d'empêcher un désastre ou une grave perte financière.
- Améliore de façon importante la probabilité que vous livriez votre plan d'affaires en temps voulu et conformément au budget.

La gestion des risques devient même plus importante si votre entreprise décide d'essayer quelque chose de nouveau, par exemple le lancement d'un nouveau produit ou la pénétration de nouveaux marchés [11].

### 2.4. Étapes de la gestion des risques

Les étapes de la gestion des risques sont :

- **Identification des risques**

Identifiez et décrivez les risques potentiels. Il peut s'agir de risques financiers, de risques pour l'exploitation (par exemple pour la chaîne logistique), de risques liés aux projets, à l'activité et au marché, entre autres. Les risques identifiés doivent être consignés dans un registre des risques ou documentés dans un autre format.

- **Analyse des risques**

La détermination de la probabilité d'occurrence d'un risque se fait par le biais de l'analyse des facteurs et la documentation de ses conséquences potentielles. L'évaluation des risques consiste à déterminer l'importance d'un risque à l'aide d'audits internes et d'analyses de risques. Il est également nécessaire de définir le niveau de risque acceptable ainsi que les éléments à traiter en priorité.

- **Limitation des risques**

Une fois le niveau de priorité et l'importance des risques déterminés, vous pouvez établir une stratégie de réponse qui vise à minimiser ou à maîtriser ces risques.

- **Surveillance des risques**

Les risques et les indicateurs de mesure doivent être suivis en permanence afin de garantir l'efficacité des plans de limitation et d'être alerté lorsqu'un risque devient une menace plus importante.

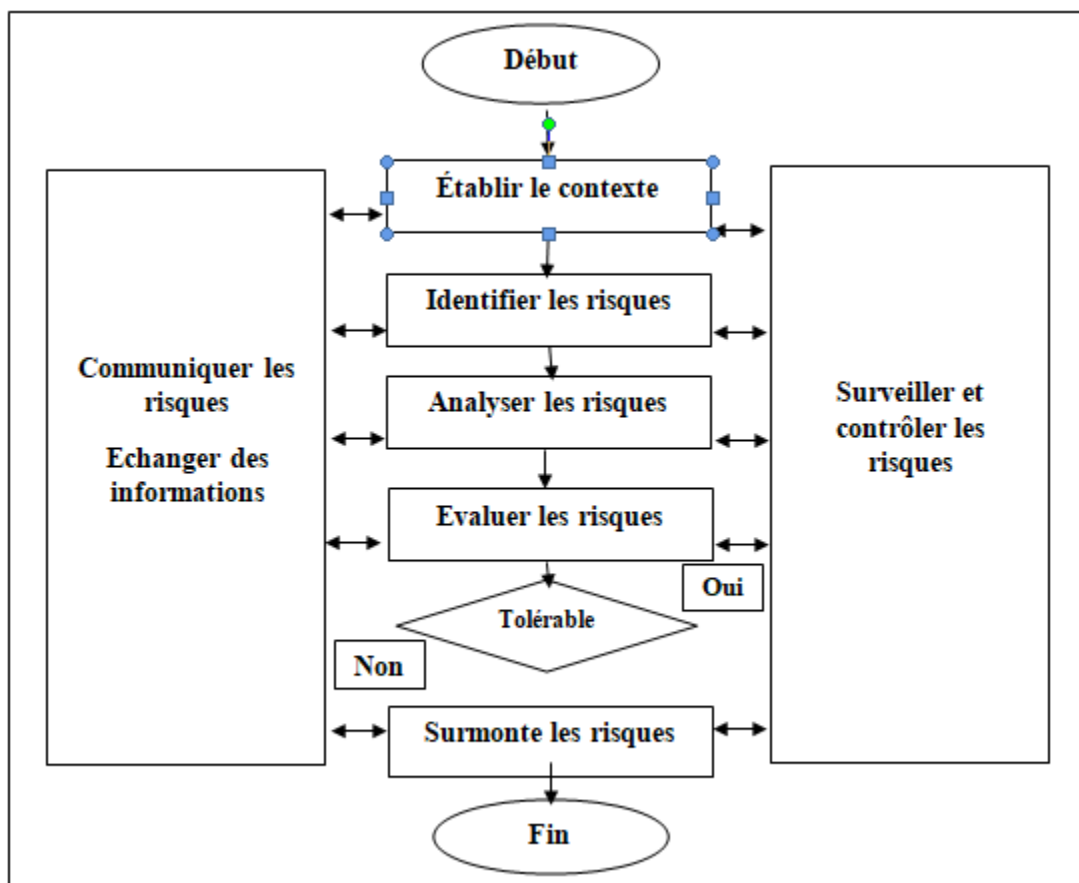


Figure 2.1. Plan de gestion des risques [12].

## 2.3 Méthodes d'analyse du risque :

Afin de prévenir les risques associés à un procédé, un certain nombre de méthodologie sont été développées pour procéder à une analyse systématique des risques et de leurs conséquences [13].

### 3.1. Classification des méthodes d'analyse de risque :

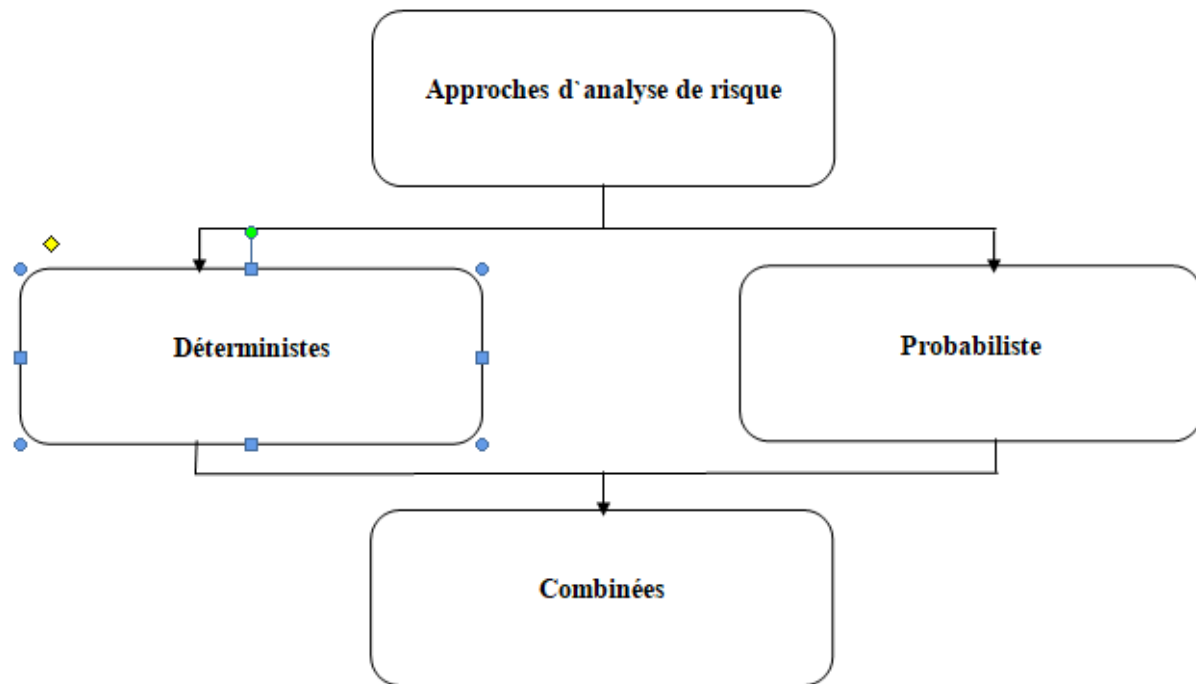


Figure 2.2. Approches d'analyse de risque [14].

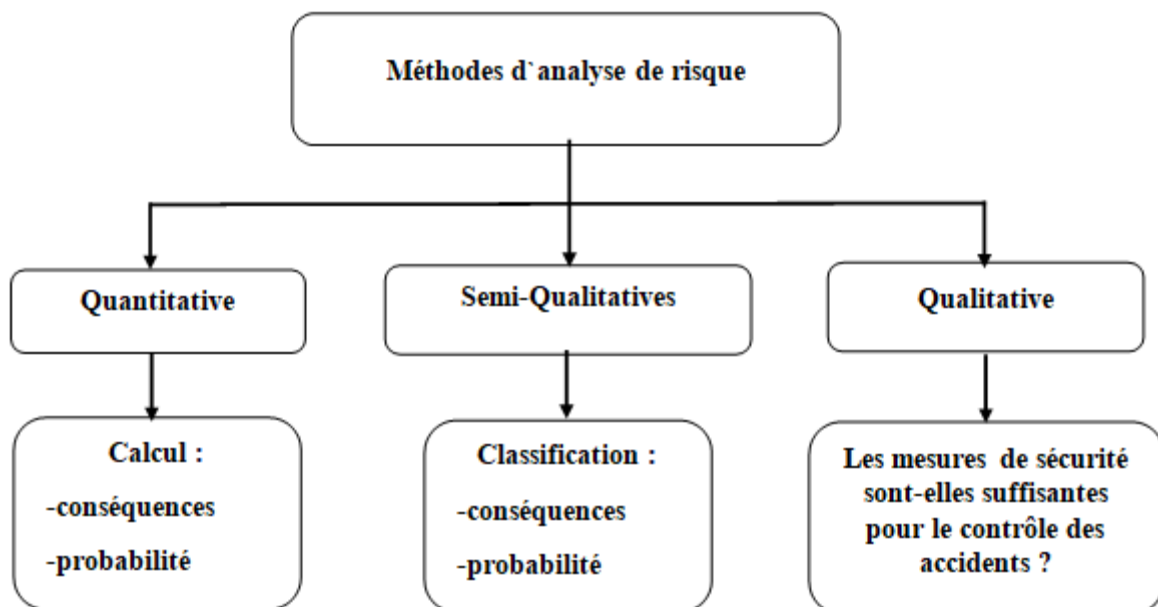
#### 3.1.1. Approche déterministe

Dans le domaine de la gestion des risques, les approches déterministes se concentrent sur l'évaluation des conséquences d'un accident. La maîtrise des risques consiste alors à s'assurer de la maîtrise des conséquences à l'aide de techniques de modélisation (modèle physique, modèle de contrainte) et de calcul déterministe (à partir de scénarios d'accidents). Concernant la prise en compte de scénarios d'accidents, la complexité des situations, les difficultés de modélisation ou la non nécessaire compréhension globale de l'ensemble des phénomènes régissant le système peuvent justifier le fait de ne retenir qu'un ensemble de cas type. Du fait de l'absence d'éléments d'incertitude, la qualité de cette approche est conditionnée par l'état des connaissances et ne peut donc satisfaire l'analyse des risques émergents et liés à des situations nouvelles, complexes et non entièrement maîtrisées [15].

### 3.1.2. Approche probabiliste

Les approches probabilistes reposent sur l'estimation de la probabilité de survenue d'un événement non souhaité. Dans ce sens, la maîtrise des risques consiste alors à démontrer que la probabilité de survenue est maintenue à des valeurs acceptables, si besoin est par la mise en place de mesures destinées à les réduire. L'évaluation des risques repose alors sur une analyse probabiliste des indices de probabilité et de conséquence (à partir de scénarios). Bien que rendue inconfortable du fait de la prise en compte d'éléments d'incertitude, cette approche a été largement développée sur l'appellation Evaluation Probabiliste de Risques ou (EPR) (de l'anglais Probabilistic Risk Assessment ou PRA) dans les domaines du nucléaire, du pétrole et de la chimie [15].

### 3.2. Les types des Méthodes d'analyse de risque



**Figure 2.3.** Typologies et Approches des méthodes d'analyse de risque [16].

#### 3.2.1. L'analyse Qualitative

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toutes autres analyses. En effet elle permet la bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants. Pour une bonne évaluation qualitative du risque cette approche ne s'appuie pas explicitement sur des données chiffrées, mais elle se réfère à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le retour d'expérience et les jugements d'experts.

### 3.2.2. L'analyse Semi- Quantitative

Lors d'une évaluation semi-quantitative, la probabilité est calculée subjectivement, mais l'impact est calculé objectivement. Ce mode de calcul s'applique lorsque l'impact du risque peut être déterminé avec exactitude alors que sa probabilité reste incertaine. Ce genre de risque concerne en général les changements dans la loi, car l'impact peut être calculé numériquement, mais la probabilité est souvent difficile à établir [17].

### 3.2.3. L'analyse Quantitative

L'évaluation quantitative est basée sur le calcul de la probabilité et l'impact du risque d'une manière objective. Ce mode de calcul est utilisé quand l'information est suffisamment disponible pour pouvoir calculer, numériquement, la valeur de la probabilité et la gravité du risque [17].

## 3.3. Les méthodes d'analyse les risques

Les principales méthodes d'analyse les risques :

- L'analyse préliminaire des risques (APR).
- L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC).
- L'analyse des risques sur schémas type (HAZOP).
- L'analyse par arbres des défaillances (Add).
- Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR).
- Méthode STPA.
- Arbre des Cause.
- Arbre d'évènements.

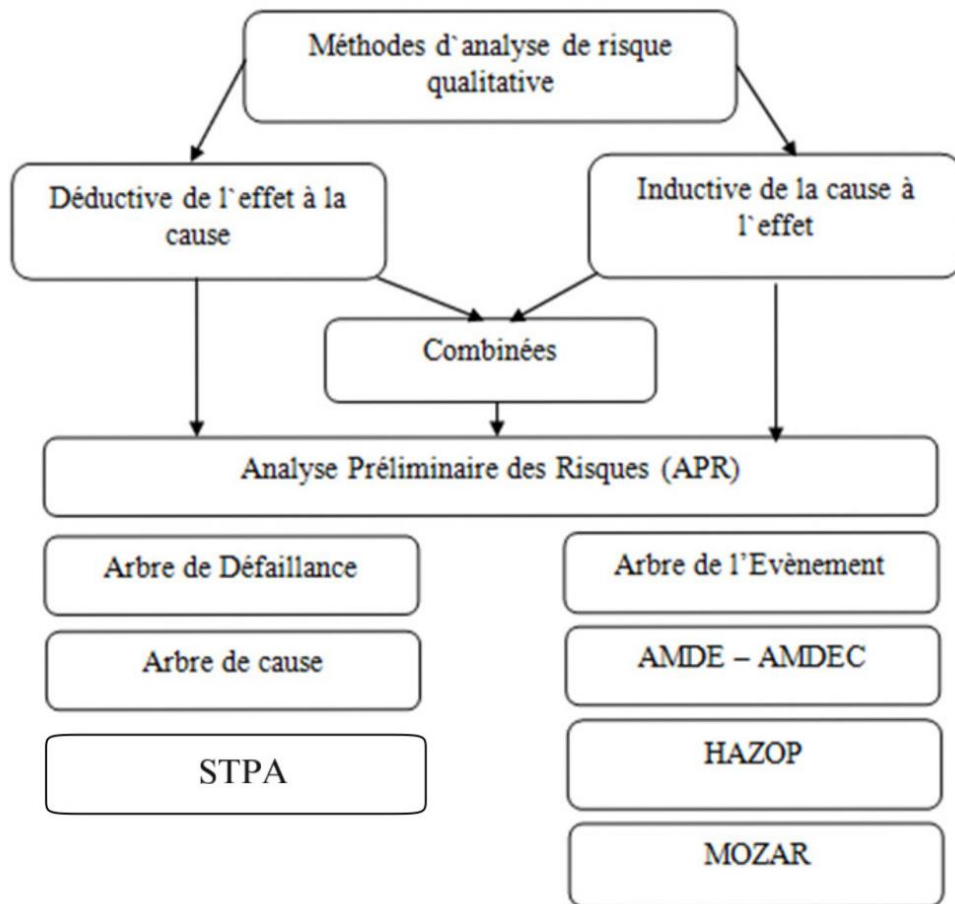


Figure 2.4. Classification des risques [18].

3.3.1. Analyse Préliminaire de Risque - APR

Selon la norme CEI : L'APR est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité[19].

Tableau 2.1. Représentation de la méthode de L' APR [19].

1	2	3	4	5	6
Sous-système ou fonction	Phase	Elément dangereux	Elément transformant un élément dangereux en situation dangereuse	Situation dangereuse	Elément transformant une situation dangereuse en accident potentiel
7	8	9	10	11	
Accident	Conséquences	Classification par gravité	Mesures préventives	Application des mesures	

### 3.3.2. Arbre de Défaillance

Est une analyse déductive qui fournit une évaluation Qualitative et quantitative du système [33]. Cette technique permet l'identification et l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un événement de tête. Elle est appuyée par une représentation graphique organisée des conditions ou des facteurs qui contribuent à l'avènement de l'événement indésirable [20].

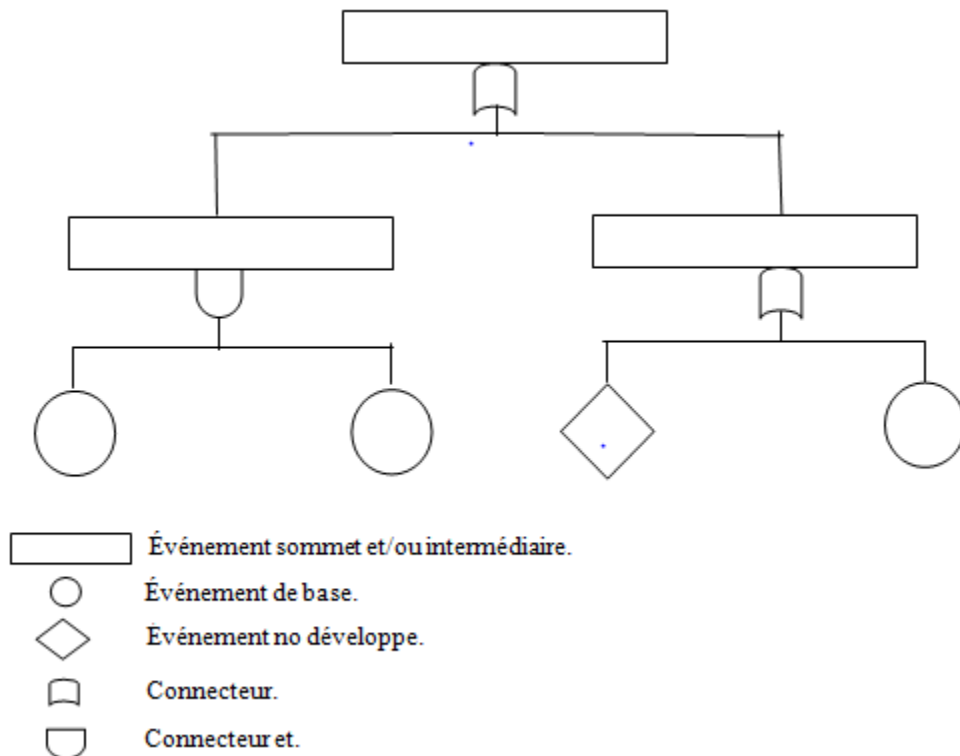


Figure 2.5. Représentation de l'arbre de défaillance [21].

### 3.3.3. Arbre des Cause

Est une méthode d'analyse des incidents. Il s'agit de représenter les faits inhabituels ou les incidents sur un arbre des causes. Leur objectif est d'identifier, parmi les actes constituant l'histoire globale qui s'est achevée par un incident, ceux qui correspondent à des défaillances afin de proposer des améliorations, et basée sur le principe d'organisation et décrire, à partir des faits, l'ensemble des actions ayant abouti à l'incident. Il permet ainsi de mettre en évidence l'enchaînement des actes à des fins d'analyse et d'amélioration (correction et/ou prévention) [22].

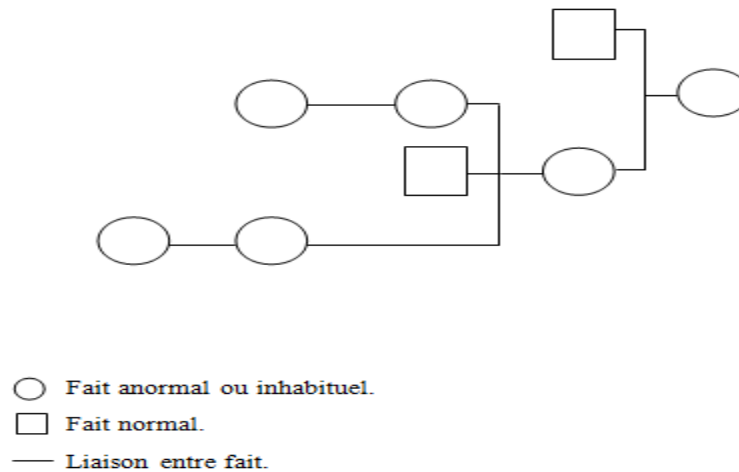


Figure 2.6. Représentation de l'arbre des causes [23].

### 3.3.4. Arbre d'évènements

Est une méthode déductive qui consiste à partir de l'événement initiateur conduisant à un événement indésirable à envisager l'échec ou le succès des fonctions de sécurité puis définir les événements susceptibles de se produire en aval de l'événement initiateur, les barrières de sécurité et leurs fonctions doivent être identifiées en leurs affectant des probabilités de défaillance. L'ADE construit permet temporellement d'identifier les différentes séquences d'événements susceptibles de conduire ou non à des conséquences aux limites et les chemins les plus dangereux conduisant à des conséquences catastrophiques sont ensuite analyses en détail [24].

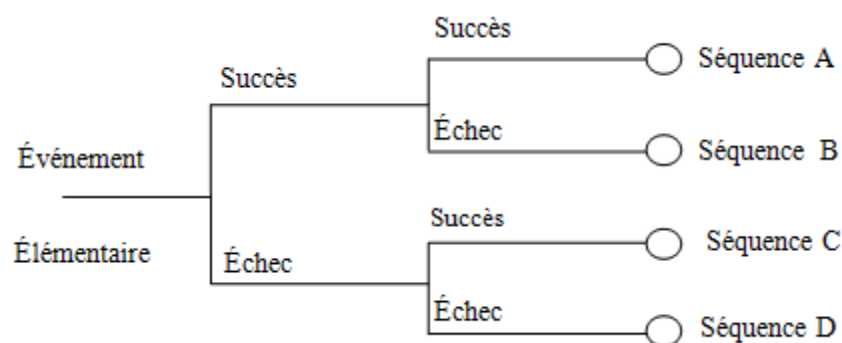


Figure 2.7. Représentation de l'arbre d'événement [26].

### 3.3.5. Analyse des Modes Défaillance, de leurs Effets (AMDE)

L'AMDE est une démarche d'analyse préventive et inductive qui recense et met en évidence les risques potentiels et permet l'étude systématique des causes et des effets des défaillances qui affectent les composants d'un système [25].

Elle comprend quatre étapes principales :

- Définition du système et ses composants,
- Etablissement des modes de défaillances et de leurs causes,
- Etude des effets des modes de défaillances,
- Conclusions et recommandations.

**3.3.6. Analyse des Modes Défaillance de Leurs Effets et de Leur Criticité (AMDEC)**

Est une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative de la fiabilité des systèmes. Elle a pour but d'évaluer l'impact ou la criticité de chacun des modes de défaillance sur la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'un système. Elle consiste à recenser les modes de défaillance, d'en évaluer les effets sur l'ensemble des fonctions du système et d'en analyser les causes. Elle est particulièrement efficace pour l'étude des défaillances simples [20].

L'A.M.D.E.C, est une extension de L'AMDE et elle a pour objectifs [25]:

- a) D'identifier les modes de défaillance du système,
- b) De recenser toutes les causes, pour chaque mode.
- c) De recenser les effets sur la mission du système.

**Tableau 2.2.** Représentation de la méthode AMDE ou de la méthode AMDEC [24].

1	2	3	4	5 et 6	
Identification Du Composant	Mode De Défaillance	Causes Possibles	Phases	Conséquence	
				Locales	Sur l'ensemble du système
7	8	9	10		
Probabilité de la défaillance	Criticité	Actions correctives	Recommandation applications		

  
 Pour l'AMDEC

**3.3.7. Hazard and Operability Study (HAZOP)**

L'étude HAZOP est une technique qui a pour but d'identifier les dangers. Elle Évalue toutes les parties d'un système afin de déterminer comment les déviations par rapport à la conception originale sont susceptibles de survenir et les problèmes qu'elles peuvent entraîner il s'agit d'un processus créatif qui est basé sur l'utilisation de mots-guides (principales et secondaires) pour réaliser une recherche systématique des déviations [28].Généralement une étude HAZOP représente une extension de l'analyse des modes de défaillance et leurs effets (AMDE).

**Tableau 2.3.**Exemple de tableau pour l'HAZOP [28]

Date :								
Ligne ou équipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot Clé	Paramètre	Causes	Consequences	Detection	Sécurités Existantes	Propositions D'améliorations	Observations

- **Définition du mot-clé (colonne 2)**

Les mots-clés accolés aux paramètres importants pour le procédé permettent de générer de manière systématique les dérives à considérer .la norme CEI : 61882 propose des exemples de mot-clé dont l'usage est particulièrement courant. Ces mot-clé sont repris dans le tableau ci-dessous, inspiré du tableau 1 de la norme précitée.

**Tableau 2.4.** Mot-clé pour HAZOP [29].

Type de deviation	Mot-Guide	Exemples d'interprétation
Negative	Ne pas faire	Aucune partie de l'intention n'est pas remplie
Modification quantitative	Plus	Augmentation quantitative
	Moins	Diminution quantitative
Modification qualitative	En plus de	Présence d'impuretés- Exécution simultanée d'une autre opération/étape
	Partir de	Une partie seulement de l'intention est réalisée
Substitution	Inverse	S'applique à l'inversion de l'écoulement dans les canalisations ou à l'inversion des réactions chimiques
	Autre que	Un résultat différent de l'intention originale est obtenu
Temps	Plus tôt	Un évènement se produit avant l'heure prévue
	Plus tard	Un évènement se produit après l'heure prévue
Ordre séquence	Avant	Un évènement se produit trop tôt dans une séquence
	Après	Un évènement se produit trop tard dans une séquence

### 3.3.8. Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR)

MOSAR est utilisée dans divers domaines, en particulier dans l'étude des risques d'installations à hauts risques (nucléaire, chimique, etc.). En effet, la méthode a été effectivement appliquée dans le domaine nucléaire et notamment à EDF (Centres de recherches et d'essais) et au CEA (Installations d'essais).

MOSAR contient deux modules hiérarchiques, un module macro « module `A' » et un Module micro « module `B' » [25].

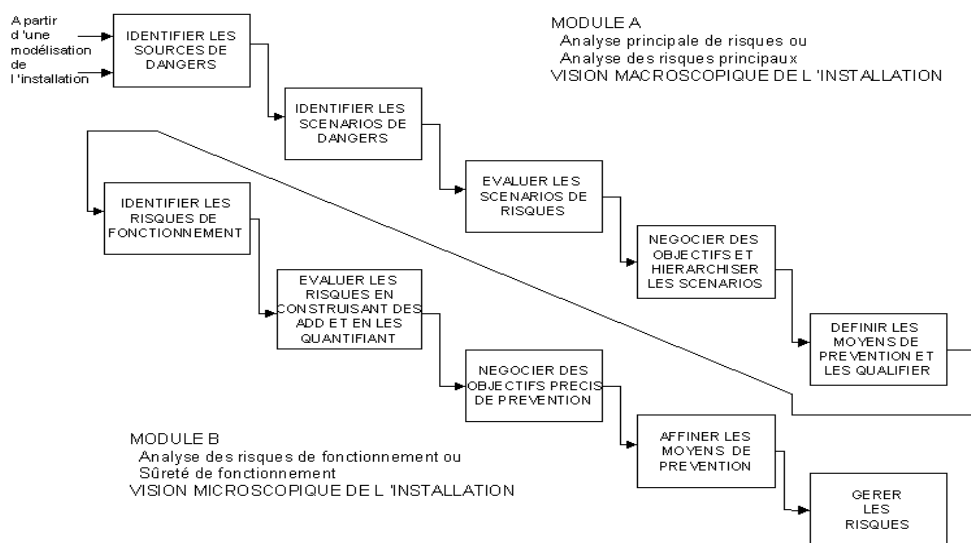


Figure 2.8. Module de Méthode d'analyse de risques MOSAR [25].

### 3.3.9. System Theoretic Process Analysis (STPA)

- Définition** : La méthode STPA est une approche d'analyse de la sécurité développée par la professeure Nancy Leveson du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Elle repose sur le modèle STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes), un cadre conceptuel qui considère les accidents non pas comme la simple conséquence de pannes matérielles, mais comme des défaillances dans la structure de contrôle d'un système complexe [30].
- Historique** : La méthode STPA a été développée au début des années 2000 par la professeure Nancy Leveson, spécialiste de la sécurité des systèmes complexes au Massachusetts Institute of Technology (MIT).

Cette méthode est née du constat que les approches traditionnelles de gestion des risques, comme FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), HAZOP (Hazard and

Operability Study) ou les arbres de défaillance, sont insuffisantes pour gérer la sécurité des systèmes modernes, de plus en plus automatisés, connectés et dépendants des logiciels.

En 2003, Leveson introduit un nouveau modèle appelé STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processus), qui considère la sécurité non seulement comme l'absence de défaillances, mais comme le résultat d'un contrôle efficace du système. Ce modèle théorique considère les accidents comme des conséquences de défauts dans la structure de contrôle, dans les interactions humaines ou dans la logique des logiciels [31].

- **Les objectifs**

- Détecter les actions de contrôle risquées [32]:
  - Identifier toute commande qui peut devenir dangereuse dans certaines conditions :mal envoyée, non envoyée, envoyée trop tôt ou trop tard.
- Analyser les scénarios causaux :
  - Déterminer comment et pourquoi une action incorrecte peut être émise.
  - Identifier les chaînes de causes dans le système (problème logiciel, erreur humaine, manque de feedback...).
- Générer des exigences de sécurité
  - Traduire les résultats en mesures préventives concrètes (règles, contrôles, alertes, redondance).
  - Aider à la conception sécurisée des systèmes dès la phase initiale (safety by design).
- Prendre en compte l'ensemble du système Intégrer :
  - les logiciels, les opérateurs humains, les boucles de rétroaction, les processus organisationnels, vision systémique et dynamique du fonctionnement réel du système.
- Éviter les pertes inacceptables Prévenir :
  - les dommages matériels ou environnementaux,
  - les atteintes aux personnes,
  - les interruptions de service critiques [32].

- **Les étapes**

Les 5 étapes de la méthode STPA (système théorique processus analyse) adaptée à un clair et structure [32]:

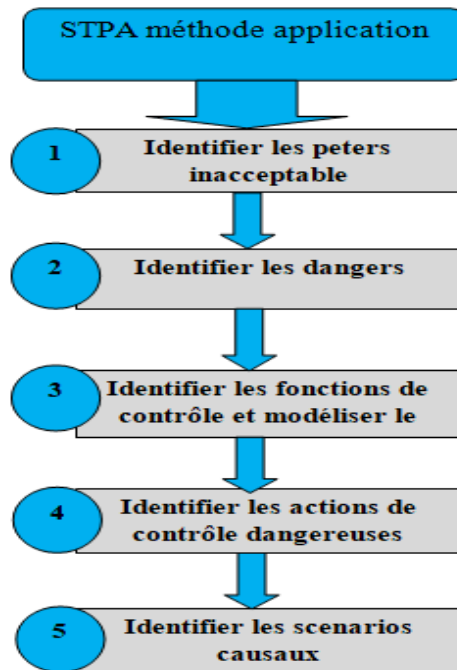


Figure 2.9. Les étapes de la méthode STPA[1].

- **Étape 1 : Identifier les pertes inacceptables (Losses)**
  - Objectif : Déterminer les conséquences graves que le système doit absolument éviter.
  - Exemple:
    - Blessure ou perte de vie humaine
    - Dommages matériels importants
    - Interruption de service critique
    - Pollution environnementale
  
- **Étape 2 : Identifier les dangers (Hazards)**
  - Objectif : Définir les états ou conditions du système qui, associés à un contexte particulier, peuvent conduire à une perte inacceptable.
  - Exemples :
    - Un convoyeur qui fonctionne alors qu'une vanne est ouverte
    - Une surpression dans un réservoir
    - Une température hors tolérance

Chaque danger est lié à une ou plusieurs pertes de l'étape 1.

• **Étape 3 : Identifier les fonctions de contrôle et modéliser le système**

- Objectif : Représenter le système sous forme de boucle de contrôle.
- Composants :
  - o Contrôleur (PLC, logiciel, opérateur humain)
  - o Actionneurs (vannes, compresseurs)
  - o Capteurs (pression, température, état de vanne)
  - o Feedback (retours de mesure vers le contrôleur)

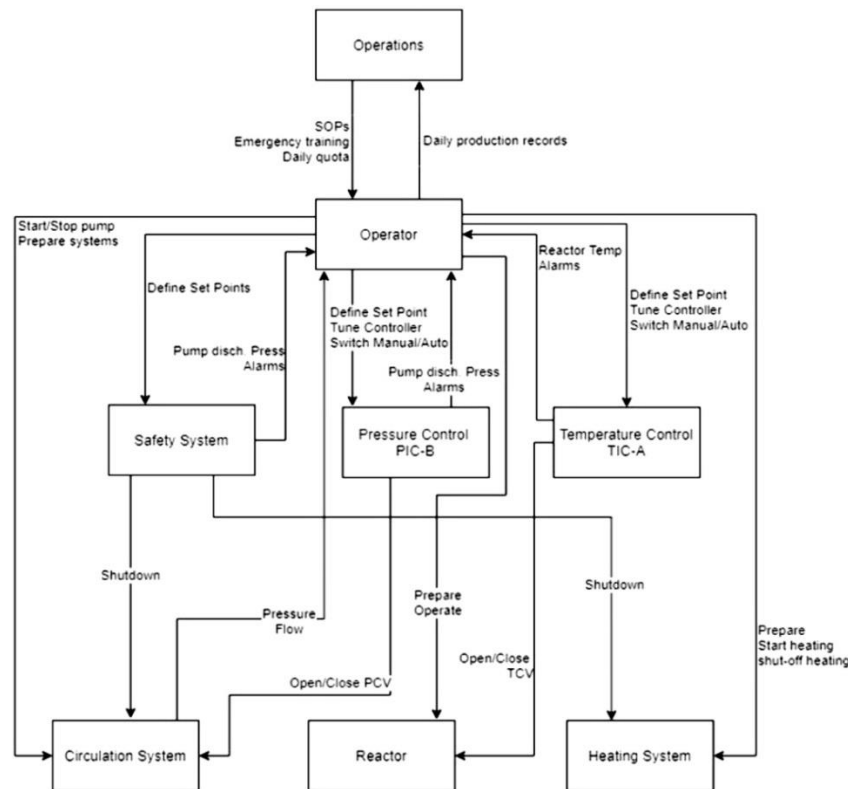


Figure 2.10. Exemple de Control Structure Diagramme[31].

• **Étape 4 : Identifier les actions de contrôle dangereuses (UCA)**

- Objectif : Déterminer les commandes dangereuses qui peuvent générer un danger identifié.
- Il existe 4 types de UCAs :
  - o Une commande est émise alors qu'elle ne devrait pas.
  - o Une commande n'est pas émise alors qu'elle devrait.
  - o La commande est mal synchronisée dans le temps (trop tôt, trop tard).
  - o La commande est trop longue, trop courte, ou interrompue.

- Chaque UCA est analysée en lien avec : Le composant impliqué, Le contexte, Le danger concerné.
- **Étape 5 (optionnelle) : Identifier les scénarios causaux**
  - Objectif : Décrire comment une UCA peut se produire.
  - Exemples :
    - Capteur défectueux
    - Logiciel mal configuré
    - Opérateur mal formé
    - Mauvais feedback ou délai de transmission

Ces scénarios servent à formuler des exigences de sécurité ou recommandations [32]

## 2.4 Evaluation du risque

L'évaluation du risque désigne une procédure fondée sur l'analyse du risque pour décider si le risque tolérable est atteint[33].

### 4.1. Méthodes d'évaluation des risques

Généralement, les niveaux de gravité et de probabilité d'occurrence sont croisés dans une matrice de criticité afin de positionner les zones de risque. La matrice Gravité/Occurrence ci-dessous :

**Tableau 2.5.**Matrice de criticité [34].

	Insignifiant	Marginal	Critique	Catastrophique
Invraisemblable	Négligeable	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Improbable	Négligeable	Négligeable	Acceptable	Acceptable
Rare	Négligeable	Acceptable	Indésirable	Indésirable
Occasionnel	Acceptable	Indésirable	Indésirable	Inacceptable
Probable	Acceptable	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable
Fréquent	Indésirable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable

Nous proposons de garder les qualificatifs de la norme NF EN 50126, tout en les répartissant sur 3 classes distinctes : « risque maîtrisé » regroupant le risque négligeable et le risque acceptable, « risque maîtrisable » regroupant le risque indésirable non résiduel et enfin « risque non maîtrisable » regroupant le risque résiduel et le risque inacceptable. Toutefois nous définissons le risque indésirable comme une sous-catégorie du risque tolérable et nous procédons de la même façon en ce qui concerne le risque inacceptable par rapport au risque résiduel [34].

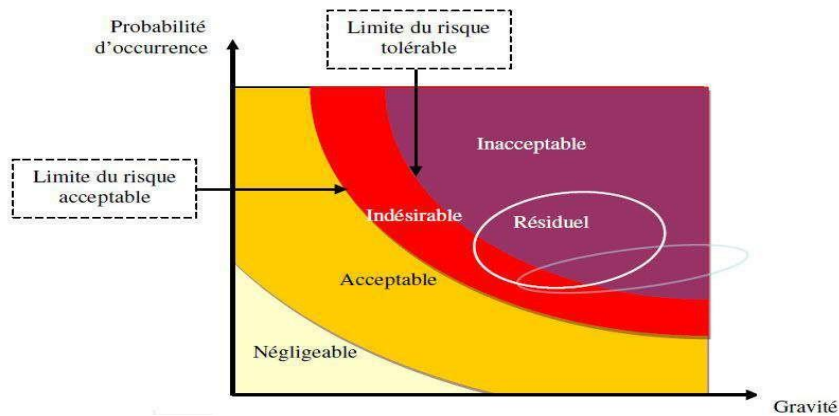


Figure 2.11. Classification des risques [35].

#### 4.2. Acceptation du risque

Le risque acceptable est un risque accepté dans un certain contexte et fondé sur les valeurs admises par la société [34].

#### 4.3. Réduction du risque

Actions entreprises en vue de diminuer la probabilité, les conséquences négatives (ou dommages), associées à un risque, ou les deux [34].

#### 4.4. Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque

Les importants critères de choix d'une méthode d'analyse de risque sont [34] :

- Domaine de l'étude.
- Stade de l'étude (spécification, conception, démantèlement).
- Perception du risque dans ce domaine.
- Culture de la Sûreté de Fonctionnement de l'organisation.
- Caractéristiques du problème à analyser.
- Niveau envisagé de la démonstration de la sécurité.
- Savoir-faire des intervenants.
- Nature des informations disponibles (spécifications du système et de ses interfaces, contraintes, etc.).
- Retour d'expérience et base de données disponibles.
- Moyens humains, logistiques et autres

## 2.5 Conclusion

Les méthodes d'analyse de risque jouent un rôle fondamental dans la maîtrise des dangers et la prévention des événements indésirables, notamment dans les secteurs sensibles comme la santé, l'industrie ou l'environnement. Qu'elles soient qualitatives, quantitatives ou mixtes, ces méthodes permettent d'identifier, d'évaluer, et de hiérarchiser les risques afin de mettre en place des actions correctives ou préventives adaptées. Parmi les plus utilisées, on trouve l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), l'arbre des causes, la méthode HACCP, ou encore la méthode de Monte Carlo pour les approches probabilistes. Chaque méthode possède ses avantages et ses limites selon le contexte d'application. Leur efficacité dépend en grande partie de la qualité des données, de l'implication des parties prenantes et de la rigueur dans leur mise en œuvre. Une analyse de risque bien menée améliore non seulement la sécurité, mais aussi la performance globale de l'organisation. Elle favorise une culture de prévention et de vigilance face à l'incertitude. À l'ère de la complexité croissante des systèmes, combiner plusieurs approches peut offrir une vision plus complète et plus robuste des risques encourus.

## **Chapitre 3 : généralité sur l'entreprise**

### 3.1 Introduction

L'industrie sidérurgique est un pilier fondamental du développement économique dans de nombreux pays, car elle fournit les matériaux de base nécessaires aux secteurs de la construction, de l'infrastructure, de l'automobile, et d'autres industries lourdes. En Algérie, la relance du secteur sidérurgique a été marquée par la création de l'entreprise Algerian Qatari Steel (AQS), fruit d'un partenariat stratégique entre l'Algérie et le Qatar [37].

### 3.2 Définition de l'Entreprise

Algérien Qatari Steel (AQS) est une société industrielle spécialisée dans la production de produits sidérurgiques longs, principalement des billettes, des barres en acier pour béton armé, et des fils machines. Elle a été fondée en 2013 dans le cadre d'un partenariat entre le groupe algérien Sidère (groupe public sous la tutelle du ministère de l'Industrie), le Fonds National d'Investissement (FNI), et le partenaire qatari Qatar Steel International, une filiale de Qatar Manning.

L'objectif principal d'AQS est de contribuer à l'autosuffisance de l'Algérie en acier et de réduire les importations coûteuses de produits sidérurgiques, tout en visant à exporter le surplus de production vers d'autres marchés [37].



**Figure 3.1.** Vue du complexe[37].

### 3.3 Position géographique

- **Wilaya** : Jijel
- **Commune** : El Milia
- **Zone industrielle** : Bellara
- **Coordonnées approximatives** : Latitude 36.745° N, Longitude 6.259° E
- **Au nord** :
  - La mer Méditerranée (à environ 10 km du site industriel).
  - Le port de Denjean, utilisé pour l'import-export de produits sidérurgiques.
- **À l'est** :
  - La ville de Skikda (à environ 80 km).
  - Autres zones industrielles côtières.
- **À l'ouest** :
  - Le chef-lieu de wilaya : Jijel (à environ 50 km à l'ouest de Bellara).
- **Au sud** :
  - La ville d'El Milia, située juste au sud de la zone industrielle.
  - Des zones montagneuses et rurales de l'intérieur du pays.



**Figure 3.2.** Localisation par points cardinaux de (AQS)[38].

### 3.4 Historique

La Société Algerian Qatari Steel (AQS) a été créée en décembre 2013 et résulte d'un partenariat d'investissement entre la République Algérienne et l'État du Qatar. Dotée d'un

capital social de 60, 592, 400, 000 Dinars Algériens. Elle est détenue à 49% par Qatar Steel International (QSI), à 46% par le Groupe Industriel SIDER et à 05% par le Fonds National d'Investissement(FNI).

Grâce à son volume1 de production, à sa fiabilité opérationnelle et à ses progrès techniques, l'Algerian Qatari Steel occupe une place importante dans la carte de l'industrie sidérurgique nationale et régionale.

L'AQS accorde également une grande attention au capital humain, en tant que moteur de croissance économique et de progrès social, notamment à travers la création d'un environnement de travail, qui encourage la créativité et l'innovation au profit de ses 1500 employés de différentes disciplines et qualifications [37].

### **3.5 Les Objectifs d'entreprise**

Nous nous engageons dans des pratiques durables et anticipons les besoins de nos clients. Nous maximiserons le retour aux actionnaires tout en maintenant la qualité de nos produits, à coûts compétitifs, et assurer des valeurs durables capables d'obtenir des résultats supérieurs grâce à :

- Gestion fiable et sécuritaire de nos actifs.
- Développement durable.
- Qualité supérieure [37].

### **3.6 Les produits**

#### **6.1 Fil Machine**

Fil Machine de section ronde de diamètre variant entre de 5,5 mm à 14 mm de haute qualité.

Le fil machine rond et lisse est obtenu par laminage à chaud conformément à la norme Algérienne NA 8634 et selon les normes internationale [35].



**Figure 3.3.** Le produit Fil Machine[37].

## 6.2. Rond à Béton

Produit laminé à chaud en acier d'usage multiple pour la construction haute adhérence, soudable de nuance RB500, Le rond à béton soudable produit par l'AQS est conforme aux exigences de l'arrête interministériel du 08 mars 1997, à la norme NA8634(2015) et à l'ISO6935-2 (2015)[35].



**Figure 3.4.** Le produit Rond à Béton[38].

## 6.3 Billette

Une billette est une section de métal utilisée pour rouler en barres et en profilés. Elle peut être produite avec des lingots ou directement par coulée continue. Les billettes sont utilisées comme matières premières ou pour l'extrusion, le forgeage, le laminage et d'autres opérations de traitement ...[37].



**Figure 3.5.** Le produit billette[37].

#### 6.4 Le CDRI

Le CDRI est le produit de l'unité de réduction directe ; premièrement, il sera stocké dans des silos de passivation de produits, son transport est par convoyeurs. Après cela, il sera stocké dans l'entrepôt pour une autre utilisation. Taux de production de 312 t/h. En supposant 8.000 heures d'exemple...[38].



**Figure 3.6.** Le produit le CDRI[38].

#### 6.5. Chaux

Produit de la chaux calcinée et des dolos lime de haute qualité pour la consommation captive avec une capacité de production annuelle combinée de 280 000 tonnes métriques, La chaux de haute qualité et le dolo lime sont largement utilisées comme fondant dans le raffinage de l'acier[38].



**Figure 3.7.** Le produit le Chaux[37].

### **3.7 Les matières premières utilisées**

Le four à arc n'était pas capable de fondre directement du minerai de fer ( $Fe_2O_3$ ), les ferrailles, le fer pré réduit ou la fonte. Ces trois matières premières ont des compositions de la charge de four et donc des propriétés d'usage différentes. Suivant les proportions utilisées, le sidérurgiste peut atteindre la qualité d'acier voulue, essentiellement déterminée par la teneur en produits résiduels présents dans les matières premières [39].

#### **7.1. Les ferrailles (scrap)**

Les ferrailles, issues de la récupération ou de la collecte interne, constituent la principale matière première employée par les usines à four à arc électrique. Si les chutes internes (ressources propres) représentent des matières premières d'excellente qualité, les ferrailles, provenant de la récupération, sont la principale source d'éléments résiduels des aciers fabriqués par le four à arc. Les éléments résiduels, présents dans les ferrailles, peuvent avoir des effets négatifs sur les propriétés des aciers et doivent être plus au moins limités en fonction de l'utilisation finale de l'acier [39].

Des ferrailles sur le parc, leur chargement dans le four, la fusion avec les amorçages d'arc génère des niveaux sonores très importants. La fusion des ferrailles dans les fours actuels nécessite entre 400 et 450 kWh par tonne d'acier [39].



**Figure 3.8.** Ferrailles[40].

### 7.2. Le pré réduit (DRI)

Les prés réduits, issus de la réduction partielle du minerai de fer par des gaz riches en CO ou H<sub>2</sub>, ne contiennent aucun résiduel et constituent pour le four à arc une source importante d'approvisionnement en fer non pollué. Caractérisés par leur degré de métallisation, leur teneur en carbone et en gangue, les pré réduits se présentent généralement sous forme de billes de diamètre inférieur à 20 mm. Pour permettre leur transport et stockage les prés réduits peuvent être compactés à chaud sous forme de briquettes (HBI : Hot Briqueted Iron). L'utilisation du pré réduit ne nécessite pas une adaptation particulière des fours à arc.



**Figure 3.9.** Billes de fer pré réduit[41].

### 7.3. La fonte

La fonte, métal fortement carburé, produite par les hauts fourneaux, peut être utilisée sous forme solide (pigiron) ou liquide (hot métal, la fonte solide, exemple de polluants, permet de diluer les résiduels introduits par les ferrailles. Toutefois, la forte teneur en carbone

impose une longue phase de décarburation, au cours de laquelle de l'oxygène est insufflé afin de brûler le carbone. Cette opération génère un volume important de gaz et peut augmenter la durée du cycle de fusion diminuant ainsi la productivité du four. La fonte liquide, est utilisée principalement pour élaborer des aciers de hautes qualités [39].



**Figure 3.10.** La fonte[42].

#### **7.4. Autre additifs**

- Matériaux de fabrication de laitier (lime, dolo lime ou chaux dolomitique)
- Carburateurs (coke métallurgique, débris d'électrodes, etc.)
- Poudre de carbone (principalement pour la mousse de laitier)
- Matériaux d'alliage comme ferro-alliages pour les besoins d'analyse de la nuance d'acier [39].

### **3.8 Le processus l'entreprise**

Par la suite nous décrivons que les unités de production, à savoir :

- **Les unités principales**
  - Unité de production de l'acier (Direct Réduction Iron. (CDRI)),
  - Usine de production d'acier avec deux acières électriques (en anglais, Steel Melt Shop (SMS)),
  - Laminar (Rolling Mill Steel (RMS))[43].
- **Les installations complémentaires**
  - Unité de séparation d'air (Air séparation unit (ASU)),
  - Unité de traitement de chaux (Lime treatment plant(LMP)),

- Station de récupération et de transport des matières premières,
- Station générale de traitement des eaux (Water treatment plant (WTP)),
- Sous station électrique (MRSS) [43].

## 8.1. Les unités principales

### 8.1.1. Unité de Réduction Directe (CDRI)

La DRI est l'unité de production de l'acier, où le minerai de fer (sous forme de grumeaux, de granulés ou de fines) est réduit en fer par un gaz réducteur ou un carbone élémentaire issu du gaz naturel ou du charbon. Le fer réduit dérive du changement chimique que subit le minerai de fer lorsqu'il est chauffé dans un four à haute température (Fig.9) en présence de gaz riches en hydrocarbures, de monoxyde de carbone ou de carbone élément. La capacité de production de l'unité est de 2,5 millions de tonnes par ans[43].



**Figure 3.11.**Le four d'unité de production CDR I[43].

### 8.1.2. Usine de production d'acier avec deux aciéries électriques (SMS)

Steel Melt Shop (SMS) est l'atelier de fonte d'acier. 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 électrique (EAF)(1650°C) (Fig.10), qui utilise de la ferraille et du fer à réduction directe (DRI) comme matière principale [43].

L'usine de production d'acier contenant également les unités auxiliaires suivantes :

- Station de traitement des fumées.
- Déchet de ferraille (Scarpe yard).
- Station de traitement des eaux
- Ferroalloy.



**Figure 3.12.** L'unité de production d'acier avec deux aciéries électriques (SMP)[37].

### 8.1.3. Laminoir (RMS)

Le processus de laminage comprend le réchauffage de chaleur de billette (1050°C), les opérations de laminage et de formage. Dans cette plante, la taille, la forme et les propriétés métallurgiques des billettes métalliques sont modifiées par compression répétée de métal chaud entre des rouleaux entraînés électriquement(Fig.11). au niveau de cette unités que les produits finaux sont produits[41].



**Figure 3.13.** Laminoir (Rolling Mill) [37]

## 8.2. Les installations complémentaires

### 8.2.1. Unité de séparation d'air (ASU)

Air séparation unit (ASU) est une installation de séparation d'air sépare l'air atmosphérique en ses composants primaires, typiquement l'azote et l'oxygène, et parfois aussi l'argon et d'autres gaz inertes rares [37].



**Figure 3.14.** L'unité de séparation d'Air (ASU)[43].

### 8.2.2. Unité traitement de chaux (Lime plant) (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 billets dans l'usine de DRI[41].



**Figure 3.15.**L'unité de traitement de chaux [43].

### 8.2.3. Station de récupération et de transport des matières premières

Le rôle de cette station est la manipulation des matériaux et le chargement, le déplacement et le déchargement des matériaux. Pour le faire de manière sûre et économique, différents types d'attaques, de gadgets et d'équipement sont utilisés. L'importance première de la manipulation des matériaux est qu'elle aide la productivité et augmente ainsi la rentabilité d'une industrie (3,43 million t/an) [41].



**Figure 3.16.** Station de récupération et de transport des matières premières [43].

#### 8.2.4. Station générale de traitement des eaux (WTP)

Eau Trématent Plant (WTP) est la station de traitement des eaux. Le traitement de l'eau est un procédé qui rend l'eau plus acceptable pour une utilisation final spécifique. L'utilisation final peut être la consommation d'eau potable, l'approvisionnement en eau industrielle, l'irrigation, l'entretien des cours d'eau, les loisirs nautiques ou bien d'autres utilisations,. Le traitement de l'eau supprime les contaminants et les composants indésirables, ou réduit leur concentration afin que l'eau soit adaptée à son utilisation finale souhaitée [43].



**Figure 3.17.** Station générale de traitement des eaux (WTP) [37].

#### 8.2.5. Sous-station électrique (MRSS)

Une sous-station fait partie d'un système de génération, de transmission et de distribution électrique. Les sous-stations transforment la tension du haut vers le bas, ou vers l'inverse, ou effectuent l'une des nombreuses autres fonctions importantes. La sous-station de complexe d'acier de Bellara (poste 400 KV) composée de : bâtiment de contrôle ; construction de relais ; transformateurs et salle diesel. Ce sera le chargeur de l'énergie

électrique du complexe d'une capacité de 450 MW. Les équipements principaux de cette sous-station sont : transformateur 400/33 KV et 33/6,6 KV [43].



**Figure 3.18.**Sous-station électrique (MRSS)[37].

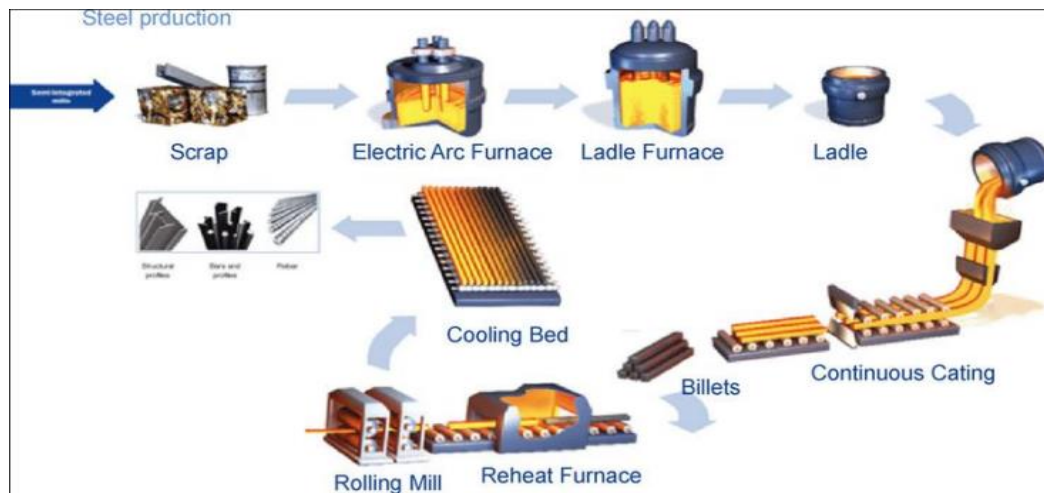
### 3.9 La fabrication de l'acier

Fusion directe de matériaux ferreux tels que la ferraille, généralement effectuée dans des fours à arc électrique, joue un rôle important. L'utilisation de fours à arc électrique dans la sidérurgie implique des coûts d'investissement réduits pour les aciéries, des besoins énergétiques considérablement réduits pour les aciéries intégrées par rapport aux procédés de four à coke/fours à haute teneur en oxygène/convertisseurs, et l'élimination du besoin de fours à coke. [44]

La production d'acier dans les fours à arc électrique comprend le chargement de la ferraille, la fusion, l'affinage, le décarburage et la coulée. En plus de la ferraille, le lot contient également des éléments nécessaires pour la fonte brute et les alliages. De la ferraille supplémentaire peut être introduite dans le four pendant que la ferraille est fondue. Les fours à arc génèrent de la chaleur en faisant passer un courant électrique à travers une charge de four entre des électrodes en graphite. Cette énergie est complétée par du gaz naturel, de l'oxygène et d'autres combustibles.

Dans cette partie on va étudier le principe de fonctionnement de l'aciérie électrique et concernant le fonctionnement de l'aciérie on peut distinguer trois niveaux dont les opérations principales sont :

- La fusion de la charge dans le four à arc électrique.
- Le transport poche de l'acier liquide vers l'affinage.
- La coulée continue dans la machine de coulée continue.



**Figure 3.19.**Processus de production d'une opération de fabrication d'acier à four à arc électrique (EAF). [44]

### 9.1. Présentation générale du four à arc

Un four à arc électrique est une cuve cylindrique à sole réfractaire en forme de creuset et d'électrode tombant d'un dôme amovible. L'intérieur du four est revêtu de briques réfractaires. Les murs sont généralement constitués de panneaux refroidis à l'eau et recouverts pour minimiser les pertes de chaleur.

Les électrodes peuvent également être équipées d'un refroidissement par eau, et l'énergie nécessaire est fournie sous forme d'énergie électrique au moyen d'arcs électriques souples entre les électrodes de graphite et la charge métallique.

La charge fond sous l'influence d'un arc électrique, il s'agit d'une fonderie conçue pour fondre le métal primaire, qui est de la ferraille mais peut être des minerais pré-réduits. Un four à arc est un système électrothermique qui utilise l'énergie produite par un arc électrique pour chauffer la charge. Les fours à arc sont utilisés presque exclusivement pour produire de l'acier à charge métallique, où des arcs sont formés entre chacune des trois électrodes en graphite et le métal, qui fait fondre le métal en conséquence directe des arcs creusant dans la charge métallique solide. Les fours à arc sont alimentés en courant alternatif ou en courant continu. Compte tenu de la puissance mise en jeu, ils sont généralement alimentés à partir d'un réseau haute tension au moyenne tension.

A l'origine, le four à arc était utilisé essentiellement pour la production de tous types des aciers car il permet non seulement d'atteindre des températures élevées (supérieur à

1650°C), mais aussi de réaliser un affinage sur mesure en assurant au choix une atmosphère oxydante et/ou réductrice [42]. Les principaux éléments constitutifs du four électrique sont :

- L'alimentation électrique.
- L'enceinte du four proprement dite capable de contenir d'abord des ferrailles fondre, de densité relativement faible (donc nécessité d'un grand volume disponible), puis l'acier liquide porté à des températures de 1600 à 1700°C (donc nécessité d'un revêtement intérieur de la cuve à l'aide de réfractaires), notamment au fond de cuve (sol réfractaire).
- Les installations annexes, telle que le système d'aspiration et traitement des fumés (Dépoussiérage, Désoxydation) et les systèmes d'additions.

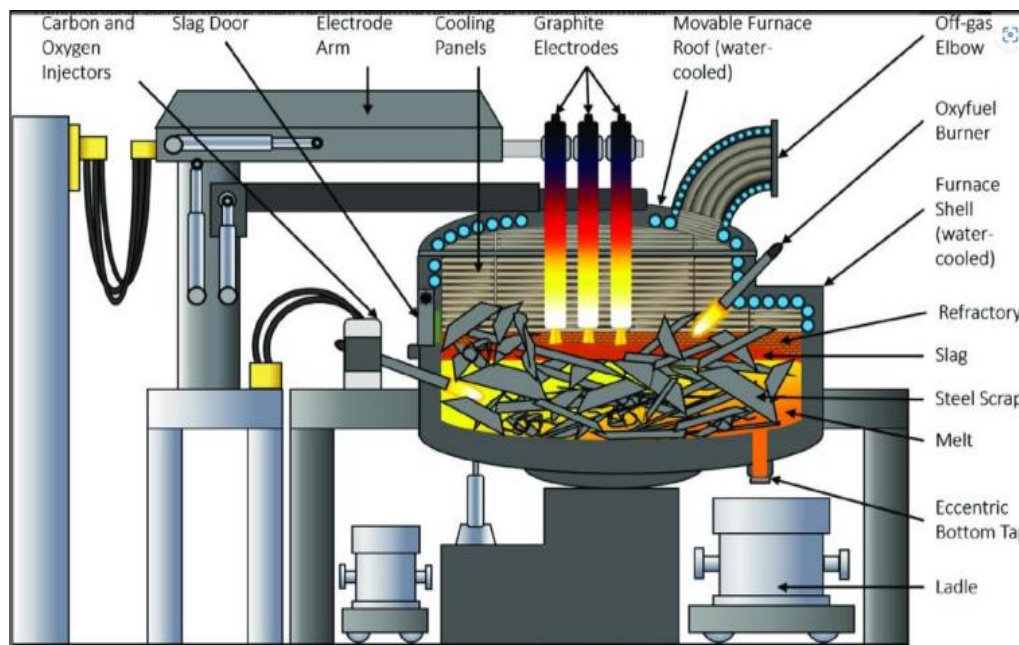


Figure 3.20. Schéma du four à arc électrique [44].

## 9.2 Marche d'une opération dans le four électrique

La fonction de four à arc a des étapes de procédure clairement définies qui sont les suivants :

### 9.2.1. Chargement du four (charging)

Le chargement du four est toujours une partie importante et sensible du processus, à la fois en termes de mesures pour éviter d'endommager le revêtement et les plaques du four et pour faciliter le processus de fusion. Le four électrique est alimenté en ferraille par des paniers en acier spéciaux. Ce panier permet d'évacuer les ferrailles vers le foyer par une

ouverture. Avant de charger la ferraille, l'électrode est soulevé hors du four et le toit est soulevé et pivoté. Placez ensuite le panier à ferraille (seau) sur le dessus du four ouvert. Le godet est hissé au-dessus du réservoir par une grue et l'ouverture de la vanne du godet est actionnée par le contrôle de la charge. Le seau est ouvert lorsqu'il est au-dessus du poêle avec l'axe vertical central aligné avec l'axe du poêle [44]. Pour éviter d'endommager à la fois la vanne du godet et le panneau du four réfrigéré, le fond du godet est surélevé jusqu'à environ 0,5 m au-dessus du haut du four La séquence d'ouverture du godet est la suivante :

- Le chariot de levage auxiliaire serre les câbles d'ouverture du godet et en même temps le chariot principal abaisse le godet ;
- Le chariot auxiliaire ouvre rapidement le godet faisant tomber la ferraille dans le four. Si possible, le chariot principal abaisse le godet et accélère l'ouverture de la vanne ; une fois le four chargé, le chariot principal soulève le godet et le chariot secondaire abaisse et ferme le godet qui est ensuite enlevé. Enfin, le toit est tourné et abaissé afin de fermer le four [44].

Ensuite, le disjoncteur du four est fermé, les électrodes abaissées automatiquement et le four est prêt à commencer ou à poursuivre le processus.



**Figure 3.21.**Chargement de la ferraille dans le four. [44]

Le chargement du four se fait par étapes et le nombre de seaux est généralement de 2 à 4 selon la densité du fer. La tendance actuelle est de fonctionner sur seulement deux charges. Dans certains cas, le chargement peut être effectué dans un seul godet (en fonction

du volume de l'EAF, des propriétés et de la densité des ferrailles) ou avec un approvisionnement continu en billes de fer pré réduites (DRI). Utilise un système de bandes transporteuses et de trémies montées sur le toit du four [44].



**Figure 3.22.** Alimentation de pré réduit DRI[44].

### 9.2.2. Fusion (melting)

Lorsque le four est chargé, le transformateur est mis en marche et les trois électrodes sont descendues sur la ferraille. Un arc est amorcé entre la pointe de l'électrode en graphite et la charge. Le métal fond rapidement sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc. L'électrode descend lentement jusqu'à ce qu'un bassin de métal en fusion se forme sous l'arc. A partir de ce moment, l'arc travaille dans un puits creusé dans la charge, et son rayonnement fait couler le métal et la charge s'affaisser progressivement vers le fond. La quantité de chaleur augmente et finit par noyer la dissolution presque complètement à ce titre, il peut être divisé en trois périodes bien caractérisées nécessitant des conditions de fonctionnement très différentes :

- **Phase de forage (drilling) :** les électrodes creusent un puits au milieu de la cuve du four a arc qui est remplie de ferrailles. Cette séquence de fonctionnement a lieu sous puissance réduite. Le puits ainsi créé permet de limiter le rayonnement de l'arc sur les parois du four et donc de minimiser l'usure du matériau réfractaire. Cette phase dure environ 2 min [44].

- **Phase de fusion (melting) :** dans cette phase, la puissance du four à arc électrique dans le premier panier reste au maximum. L'arc conserve une bonne efficacité thermique tant qu'il est inondé. Quelques minutes après l'allumage, dans certains cas, les buses à oxygène servent de chalumeau pour découper les plus gros morceaux de ferraille. A la fin de la première fusion du panier, l'injection de charbon fond les beignets sans base. Cette étape prend 15-25 minutes [43].

La charge DRI du four est ajustée pour maintenir une température du bain d'acier d'environ 1560-1580°C. Si l'alimentation DRI suit la charge de la lame, la lame fondra jusqu'à environ 300 kWh/tonne pour garantir suffisamment de liquide au début de l'alimentation DRI pour faciliter la fusion du DRI [43].

### 9.2.3. Affinage (réfining)

A ce stade, la ferraille est complètement fondue, mais l'acier n'est pas assez chaud pour être coulé. En raison du fort rayonnement de l'arc, le flux de chaleur vers les murs augmente fortement, la foi est observée. Des lances à oxygène et à charbon sont activées et la combustion du charbon introduit directement dans le bain produit des gaz dont les constituants moussent les scories entraînées dans la ferraille. Le bouchon de mousse limite le rayonnement de l'arc vers le mur. L'injection de gaz apporte de l'énergie supplémentaire dans le bain pour l'agiter et ainsi l'homogénéiser. Pour minimiser l'usure des matériaux réfractaires, cette phase se déroule à basse tension, donc la puissance est réduite et dure environ 10 minutes [37].

L'affinage permet l'extraction du phosphore de l'aluminium, du silicium, du manganèse et du carbone par un processus d'oxydation de l'acier fondu au laitier. Ceci est réalisé grâce à l'alimentation en oxygène du système d'injection pour obtenir la teneur en carbone souhaitée.

- **Déphosphoration :** Est un procédé métallurgique classique qui réduit la teneur en phosphore pour éviter la formation de fissures internes dans l'acier [43].
- **Décarburation :** Ou affinage, comme son nom l'indique, est une opération métallurgique qui élimine une partie du carbone contenu dans l'acier en fusion. Uniquement possible dans les fours à arc électrique. Le processus de raffinage élimine non seulement une partie du carbone, mais améliore également considérablement les propriétés de l'acier en stimulant le traitement par bain. La réaction de base est

l'oxydation du carbone dissous par l'oxygène, qui peut être fourni sous forme gazeuse ou sous forme d'oxydes métalliques (comme FeO) [44].

Le phosphore, avec le soufre, est l'un des éléments les plus problématiques car sa capacité à rester dans le laitier dépend fortement de la température du laitier, de sa basicité et de sa teneur en FeO. L'élimination du soufre à ce stade est très difficile car les conditions sont trop oxydantes et si la teneur en soufre du bain est trop élevée il faut affiner l'acier (affinage en poche).

#### 9.2.4. L'extraction des scories (déslaging)

Dans cette étape, du carbone est injectée dans le laitier pour réduire le FeO restant et permettre la formation de mousse. Les scories et sont retirés en inclinant le four vers l'arrière.



**Figure 3.23.** L'extraction des scories [44].

#### 9.2.5. Coulée (tapping)

Lorsque la température du bain est suffisante (environ 1620°C), le métal en fusion est coulé et acheminé vers le four poche, le trou de coulée est ouvert et le four est basculé pour permettre l'évacuation de l'acier en fusion. Le fond de l'acier en fusion, appelé Bain (Hot Heel) est maintenu dans la cuve et représente 48 tonnes. Les aciéries électriques de l'AQS contiennent deux fours à arc électrique d'une capacité d'environ 120 T chaque fusion et pour une consommation électrique d'environ de 80 MW [44].

### 9.3. Affinage en poche

Dans le domaine de la métallurgie secondaire, divers procédés d'affinage ont été développés et mis en œuvre pour répondre aux exigences de qualité et atteindre une productivité et des économies plus élevées. La mission de Senka métallurgie est d'apporter la qualité et la température de l'acier liquide du convertisseur. Un procédé de four à liquide appelé LF (Ladle furnace) est utilisé pour affiner l'acier liquide dans un environnement réducteur.

#### 9.3.1. Four a poche

Le four à poche est un processus de production pour tous les types d'acier, y compris l'acier de haute qualité, en mettant l'accent sur l'affinage du métal de laitier, ce qui signifie que le nettoyage du laitier, tel que l'oxydation et la désulfuration, est facile sous le laitier alcalin dans la poche et réduction, atmosphère l'acier liquide est mélangé dans une cuillère par barbotage pour initier des réactions, tout en réalisant une homogénéisation de la température et un contrôle de la composition chimique. De plus, le chauffage à l'arc submergé, où les électrodes en graphite sont entrelacées en couches, le laitier liquide empêche l'érosion tenace causée par le rayonnement de l'arc [44].

Les poches de traitement sont au nombre de 8 poches maçonnées et sont équipées des accessoires nécessaires pour effectuer les traitements nécessaires au niveau LF et au-dessus, garantissant fusion au niveau de la fonte continue et des sources. Généralement, les poches sont revêtues d'un matériau résistant au feu, dont la qualité varie en fonction des zones d'usure [43].

#### 9.3.2. Désoxydation

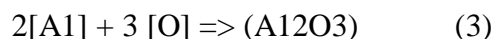
L'oxydation de l'acier commence lorsque l'alliage métallique est ajouté lors de la coulée. Le but de l'anti oxydation est d'obtenir de l'acier trempé (acier à faible teneur en O<sub>2</sub>) pour éviter formation de défauts (bulles) lors de la solidification de l'acier. Le carbone a une affinité chimiquement plus élevée que le manganèse en oxygène, donc le manganèse ne peut pas faire cela pour désoxyder l'acier liquide dans un four à arc électrique, par réduction uniquement par conséquent, la capacité d'oxydation du manganèse augmente à la température de l'acier lors de la solidification de l'acier, le manganèse peut éliminer l'oxydation de l'acier [43]. Réaction La désoxydation du manganèse est :



Le silicium est utilisé pour la désoxydation de tout l'acier suite à sa grande affinité chimique à l'oxygène. La réaction de désoxydation par Si est :



L'aluminium est un fort désoxydant, permet de calmer l'acier complètement et d'éviter l'oxydation du carbone pendant la solidification de l'acier. La réaction de désoxydation par aluminium est :

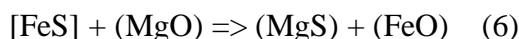
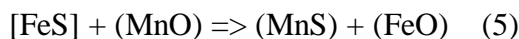
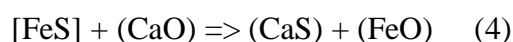


### 9.3.3. Désoxydation complexe

L'acier est généralement oxydé non pas par un oxydant, mais par trois ou plus antioxydants (Mn, Si, Al, ...) qui permettent une oxydation et une formation complètes les impuretés non métalliques (oxydes) sont plus susceptibles d'être éliminées du métal [37].

### 9.3.4 Désulfuration

La désulfuration est effectuée selon les réactions chimiques suivantes :



La réaction de base est la première, c'est-à-dire que la chaux est le désulfurant le plus efficace.

Les conditions optimales de désulfuration sont les suivantes :

1. Une température élevée.
2. Un laitier basique (riche en CaO).
3. Un milieu réducteur (teneur en FeO dans le laitier basse).

Les meilleures conditions sont données pour la désulfuration de l'acier dans le four poche. On trouve, outre le laitier basique avec faible teneur en FeO en MnO le contact des phases intimes acier/laitier déjà décrit également des températures de processus relativement élevées.

L'efficacité de la désulfuration est encore augmentée par l'utilisation de mélanges de désulfurant spéciaux (pexeSulfex, Desulfat) [44].

**8.3.5. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers**

**Tableau 3.1.** L'influence des éléments d'additions sur les caractéristiques mécaniques des aciers. [45]

	Résistance à la traction	Re	Résistance à l'usure	Résistance à la fatigue	Résilience	Dureté à froid	Dureté à chaud	A%
Aluminium					↗			
Carbone	↗		↗		↘	↗		
Cobalt		↗					↗	
Chrome	↗	↗	↗		↘	↗		↘
Manganèse	↗	↗	↗			↗		↘
Molybdène	↗	↗					↗	
Nickel	↗	↗	↗		↗			↘
Silicium	↗	↗	↗			↗		
Titane	↗	↗	↗		↘	↗	↗	
Tungstène	↗	↗	↗			↗	↗	
Vanadium	↗	↗		↗	↗	↗		

**9.4. Présentation du procédé de la coulée continue**

La production d'acier passe par une série d'étapes allant du minerai ou de la ferraille de fonte à l'acier pouvant être utilisé dans diverses industries (bâtiment, automobile, etc.). Le processus le plus courant qui permet la transition de l'acier liquide aux blocs d'acier solides est appelé coulée continue.

La coulée continue est une étape de solidification de l'acier liquide dont le principe est de couler de l'acier liquide dans une lingotière rectangulaire en cuivre. Le métal commence à former une croûte solide sur le côté des parois du moule, qui est fortement refroidie par l'eau. Le métal sortant du moule est tiré vers le bas par des rouleaux, il se termine par la solidification. Une barre carrée solide est tirée du bas de l'installation, qui est coupée en parties de la longueur souhaitée. [46]

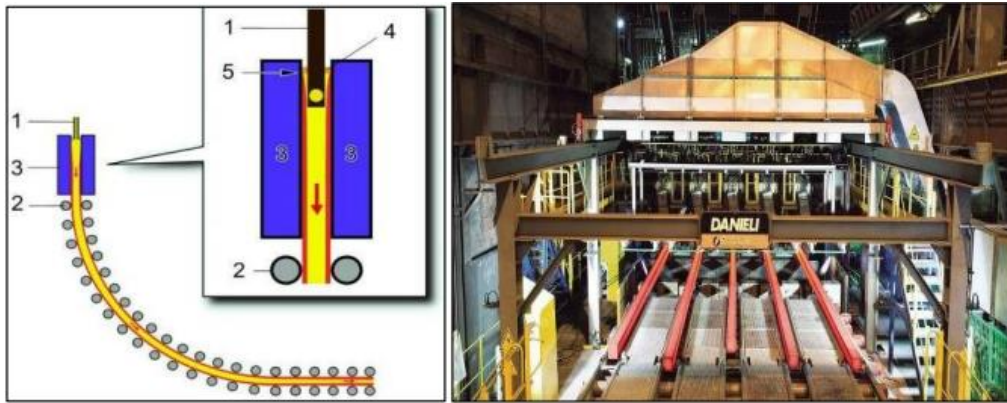
**9.4.1. Principe du fonctionnement de la machine de coulée continue**

La fonction principale de la machine de coulée est de transformer le métal de l'état liquide à l'état solide sous une forme déterminée par les capacités de formage des laminoirs

en aval. Le produit résultant pose trop de problèmes lors du processus de moulage ultérieur et de la réalisation finale du matériau[46].

Une machine de coulée continue est constituée d'un moule en cuivre sans fond appelé lingotière (point numéro 3 , Il durcit l'acier au contact. Pour ce faire, un réseau de canaux le parcourt, où l'eau circule pour le refroidir en permanence. L'acier liquide est injecté par le haut du lingot buse (caractère numéro 1). Lorsqu'il touche la paroi du moule, la température de l'acier liquide chute, provoquant sa solidification. Cette consolidation progresse donc, de la paroi du moule au cœur du produit et l'épaisseur du solide est proportionnelle au temps passé dans le moule. Ainsi, à mesure que l'acier se solidifie en lingot et se refroidit, l'épaisseur de la zone solidifiée est plus importante en dessous qu'en dessus du lingot. La partie centrale de l'acier reste liquide [47].

Une série de rouleaux (position numéro 2), appelés « rouleaux d'extraction », guident, et extraient en continu le produit partiellement solidifié du fond du moule. La solidification est terminée lorsque la surface de l'acier est refroidie pulvérisation d'eau. À la sortie de la machine, le produit est coupé à la taille souhaitée. Comme le produit est continuellement avancé entre les rouleaux, le moule subit un mouvement oscillatoire vertical. Ce mouvement favorise la lubrification et aide à lier les fissures cutanées pendant le collage 5), pour faciliter l'extraction du produit et Limiter l'adhérence et isoler le ménisque (la surface libre de l'acier en fusion, repérée par le chiffre 5), Un lubrifiant en poudre adhère à la surface d'acier exposée sur le dessus du moule (marquage numéro 4). Il peut donc créer une barrière de confinement entre l'air et l'acier liquide limitant Oxydation des métaux et formation d'inclusions non métalliques, le lubrifiant se liquéfie et s'introduit entre le moule et la peau solide. Le produit est généralement coupé à longueur au chalumeau (chalumeau à poudre pour l'inox). Cela peut être fait avec des ciseaux sur des produits de petite section. Selon la nature, le type et les exigences de qualité de surface du produit coulé, l'aval de la machine peut être conçu différemment[47].



**Figure 3.24.**Schéma de principe de la coulée continue. [47]

### 9.4.2. Défauts de coulée

L'un des plus gros problèmes pouvant arriver au cours de la coulée continue la peau solide n'est pas suffisamment épaisse pour contenir l'acier liquide et se déchire laissant ainsi l'acier s'écouler dans la machine. Ce phénomène entraîne une grosse perte financière due aux dégâts causés et au temps perdu pour la remise en marche de l'installation. L'une des causes principales d'une percée est la propagation d'un collage. Ce phénomène de collage débute généralement au début de la solidification, en haut de la lingotière. En effet, c'est à cet endroit que la peau est la plus fine et donc qu'il y a plus de chance qu'un morceau de peau solidifiée se déchire et reste collé à l'intérieur de la lingotière. En général, lorsque la peau se déchire légèrement, elle se "ressoude", notamment grâce aux oscillations de la lingotière et la peau ne forme à nouveau qu'une seule pièce qui glisse à l'intérieur de la lingotière [48].

## 9.5. Mise en forme de l'acier

L'acier est formé par laminage, qui est un processus composé d'une série d'opérations visant à transformer la billette obtenue par coulée en un produit long de forme et de dimensions spécifiques. Avant le laminage, la billette doit être réchauffée dans un four pour atteindre l'état austénitique, qui est particulièrement malléable et facile à mettre en forme. L'ébauche du laminage est réalisée à des températures allant de 1100°C à 1200°C, tandis que la finition peut être réalisée à des températures allant jusqu'à 800°C. [49]

### 9.5.1. Présentation du procédé

Le laminage est une opération de formage par déformation plastique visant à réduire la section de produits très longs en les faisant passer entre deux ou plusieurs outils qui

tournent autour d'un axe. C'est la rotation de l'outil qui force le produit dans le manche par friction. C'est la définition d'un généraliste. [50]

### 9.5.2. Laminage à froid et laminage à chaud

Il y a deux raisons principales pour lesquelles le laminage à chaud est nécessaire. La première est que la résistance à la chaleur du métal diminue rapidement avec l'augmentation de la température. Le second est la métallurgie. Lors du laminage à froid, le métal est écroui. Le défilement ne peut pas continuer au-delà de la limite En plus de la rupture, l'écrouissage peut dépasser les capacités du laminoir à froid. En pratique, la première série de réductions démarre à haute température afin d'atteindre facilement les grandes déformations du matériau et d'ajuster les propriétés métallurgiques du matériau produit. Un travail à froid est alors nécessaire pour obtenir les bonnes propriétés géométriques et mécaniques et un bon état de surface.

Le laminage à froid est généralement effectué dans un laminoir inversé à plusieurs cylindres avec plusieurs cages se succédant. Décrivons le train roulant. Deux enrouleurs sont montés de chaque côté de la cage pour assurer la tension de la bande et la tension inverse. Le laminage a lieu sous un film d'huile minérale, qui favorise l'écoulement du métal, dissipe la chaleur générée par le laminage et lubrifie l'intérieur de la cage du laminoir. À basse température, un traitement thermique peut être effectué pour restaurer la structure et éviter les dommages. D'autre part, dans le laminage à chaud, la recristallisation se produit lors de la déformation lorsque la température du matériau le permet. Le laminage à froid n'est généralement nécessaire que pour obtenir des tolérances serrées et une bonne finition de surface. D'un point de vue pratique La différence entre le procédé à haute température et le procédé à basse température est principalement due à la différence de forme des produits transformés. Dans ce cas il sera plus épais pour un laminage à chaud et plus fin pour un laminage à froid [49]

### 9.6. Contrôle de qualité

Tout au long du processus de production, des contrôles de qualité stricts sont réalisés pour garantir que les produits finaux respectent les normes de qualité.

Ces tests incluent des analyses chimiques et des tests mécaniques pour vérifier la conformité aux normes internationales (iso 9001) [51].

## 9.7. Emballage et expédition

Une fois que la qualité du produit final est vérifiée, il est emballé et étiqueté pour faciliter le transport. Les produits en acier sont ensuite expédiés vers les clients locaux et internationaux après leur emballage.

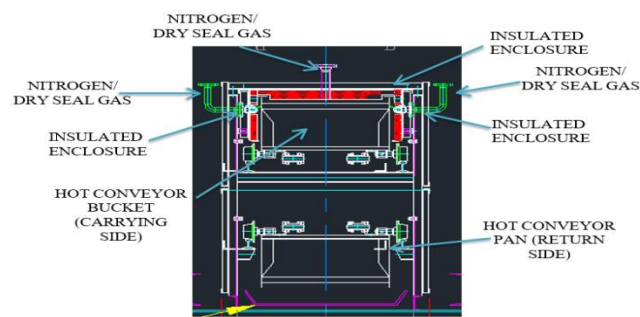
Des étiquettes et des codes de suivi sont utilisés pour suivre chaque lot pendant toute la chaîne logistique [52].

## 3.10 Convoyeur de transport à chaud

Depuis l'alimentateur rotatif, le produit est déchargé sur le convoyeur de transport à chaud et acheminé vers les trémies d'alimentation HDRI. Ce convoyeur est équipé de godets métalliques pour recueillir le matériau chaud. Il est totalement fermé, et du gaz d'étanchéité sec et/ou de l'azote est injecté à différents points afin d'empêcher l'infiltration d'air dans l'enceinte du convoyeur. Si de l'air venait à s'infiltrer, il oxyderait le produit [53].

### 10.1. Fonction du convoyeur

Le convoyeur de transport à chaud est utilisé pour déplacer des matériaux à des températures très élevées, notamment après des traitements thermiques tels que ceux effectués dans des fours ou des unités de réduction directe. Ce type de convoyeur protège les équipements standards qui ne peuvent pas supporter ces températures élevées. Il utilise des godets métalliques capables de supporter des températures extrêmes et est complètement fermé pour empêcher toute interaction avec l'oxygène, ce qui évite l'oxydation des matériaux[54].



**Figure 3.25.** Coupe transversale d'un convoyeur de transport à chaud montrant les enceintes et les godets du convoyeur[53]

## 10.2. Applications industrielles

### 10.2.1. Exemples concrets

- **Métallurgie**
  - Transport de l'aluminium ou de l'acier fondu.
  - Prévention de l'oxydation à haute température [55].
- **Industrie chimique / pharmaceutique**
  - Transport de poudres inflammables (soufre, charbon actif...).
  - Atmosphères protégées pour les produits réactifs[55].
- **Agroalimentaire**
  - Transport de grains de café torréfiés.
  - Protection des arômes et huiles essentielles contre l'oxydation [55].

### 10.2.2 Avantages

- Réduction des pertes liées à la dégradation.
- Prolongation de la durée de vie des équipements.
- Sécurité améliorée pour les opérateurs et l'environnement [56].

### 10.2.3. Importance du convoyeur dans l'industrie

Ce type de convoyeur est indispensable pour garantir le transport sécurisé des matériaux sans risque d'oxydation ou d'autres réactions chimiques indésirables. Si cela se produisait, il pourrait y avoir des pertes techniques et financières importantes pour l'entreprise[56].

## 10.3. Composition du système :

Le convoyeur est composé de plusieurs éléments clés qui assurent un transport sûr et efficace des matériaux chauds. Les composants principaux sont les godets métalliques et le système de fermeture complet :

### 10.3.1. Utilisation de l'azote comme atmosphère inerte

- **Principe de base**

Lors du transport de matériaux chauds (métaux, produits chimiques inflammables...), la présence d'oxygène dans l'air constitue un danger :

- Oxydation : détériore la qualité du produit (ex. : formation d'oxydes sur les métaux).
- Inflammation spontanée : certaines substances s'enflamment au contact de l'air chaud.
- Réactions chimiques non souhaitées : l'O<sub>2</sub> et la vapeur d'eau réagissent avec des matériaux sensibles [57].

- **Solution**

- L'azote (N<sub>2</sub>) est un gaz inerte qui ne réagit pas facilement.
- Il est injecté dans l'environnement du convoyeur (enceinte fermée) pour évacuer l'oxygène.
- Cela permet de protéger les matériaux, éviter les incidents et assurer la sécurité industrielle [58].

### 10.3.2. Convoyeur résistant à la chaleur

- **Détails techniques**

- Le convoyeur doit résister à des températures élevées (200 à 300 °C voire plus).
- Matériaux courants :
  - Fibre de verre recouverte de silicone : pour produits collants ou résineux.
  - Acier inoxydable : pour produits lourds ou très chauds.
  - Caoutchouc technique (EPDM, SBR, Kevlar) : pour chaleur modérée [59].

- **Structure typique**

- Couche supérieure : résistance thermique.
- Couche centrale : renfort (textile ou acier).
- Couche inférieure : résistance à l'abrasion ou à la dilatation [59].

- **Le système inclut**
  - Rouleaux protégés thermiquement.
  - Moteurs renforcés.
  - Système de refroidissement (optionnel)[60].
  
- **Objectif**

Créer une barrière étanche contre l'oxygène autour du convoyeur :

- Installation d'une enceinte hermétique autour de la bande.
  - Injection continue d'azote sous légère surpression (0,1 à 0,5 bar)[61].
- 
- **Caractéristiques de conception**
    - Matériaux résistants à la chaleur (inox, tôle isolée...).
    - Vannes automatiques pour réguler le débit d'azote.
    - Orifices d'échappement pour le dégazage sécurisé[62].

### 10.3.3. Godets métalliques

- Ce sont des contenants métalliques fixés en chaîne tout au long du convoyeur. Ces godets sont fabriqués à partir de matériaux résistants à la chaleur (comme l'acier inoxydable) et sont capables de supporter des températures très élevées. Ils sont utilisés pour collecter et transporter les matériaux chauds sans risque de détérioration[63].

### 10.3.4. Système Surveillance de l'oxygène et la pression

- **Système de mesure**
  - L'analyse continue de l'O<sub>2</sub> est cruciale :
    - Analyseurs zirconium (haute précision).
    - Capteurs électrochimiques (coût réduit).
  - Objectif : maintenir l'O<sub>2</sub> < 1 % dans l'enceinte[64].

- **Autres paramètres**
  - Pression de l'azote dans le système.
  - Débit de gaz pour éviter toute fuite ou insuffisance[64].
- **Automatisation**
  - Intégration avec automate programmable (PLC) pour :
    - o Alarmes.
    - o Arrêts d'urgence.
    - o Régulation du système [65].

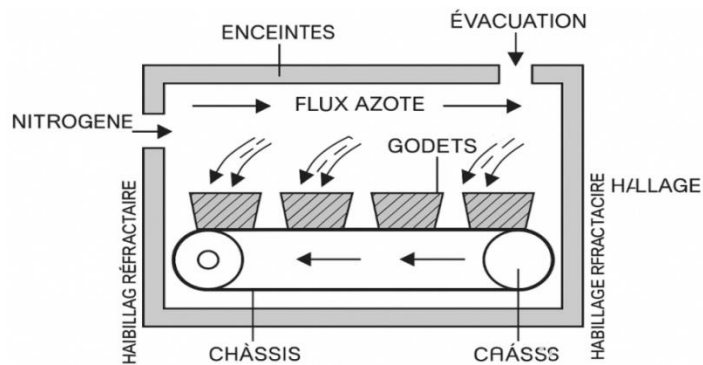


Figure 3.26. Composition du système convoyeur[66].)

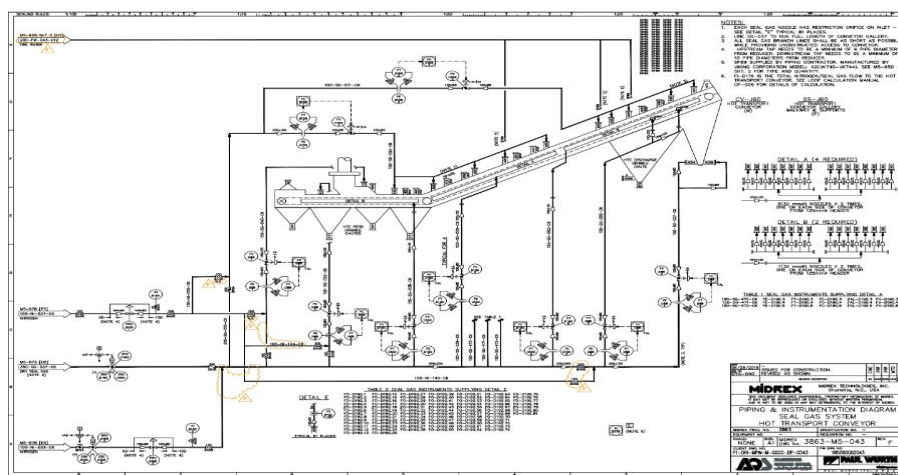


Figure 3.27.P&ID de convoyeur Piping and instrumentation diagramme [67].

#### 10.4. Système de protection (gaz inertes)

- **Rôle du gaz inerte**

Lors du transport de matériaux à haute température, il est crucial d'éviter que ces matériaux n'entrent en contact avec l'oxygène, car cela entraînerait leur oxydation. L'oxydation peut dégrader la qualité du matériau ou même provoquer une combustion. Pour cela, un gaz inerte (comme l'azote ou un gaz sec) est injecté dans le convoyeur[68].

- **Comment fonctionne le gaz inerte ?**

Le gaz inerte enveloppe les matériaux chauds et empêche leur interaction avec l'air. Ces gaz ne réagissent pas chimiquement avec les matériaux et préservent leur intégrité en les protégeant de l'oxydation. De plus, ils éliminent l'humidité et l'oxygène, qui sont des facteurs de dégradation[68].

- **Importance du gaz inerte**

Le gaz inerte joue un rôle crucial en préservant la qualité du produit et en évitant toute réaction chimique indésirable. Il est donc essentiel pour maintenir les propriétés des matériaux pendant leur transport [69].

##### 10.4.1. Les processus précédant l'utilisation du convoyeur

Avant d'être introduits dans le convoyeur, les matériaux subissent souvent plusieurs traitements thermiques, tels que la réduction directe (DRI). Ces processus nécessitent des températures élevées pour transformer les matières premières en produits finis comme le fer métallique :

- **Réduction directe (DRI)**

La réduction directe est un procédé industriel dans lequel le minerai de fer est réduit à l'aide de gaz réducteurs (comme le gaz naturel), éliminant l'oxygène du minerai. Ce processus produit du fer métallique, également appelé fer spongieux, utilisé dans la fabrication de l'acier[70].

- **Importance du processus**

La réduction directe est un procédé clé dans la production d'acier et de fer, car elle réduit la consommation d'énergie par rapport aux méthodes traditionnelles (comme le haut-fourneau), ce qui la rend plus économique et plus respectueuse de l'environnement[71].

### **3.11 Conclusion**

Algérien Qatari Steel (AQS) est une entreprise sidérurgique créée en 2013 à Bellara (Jijel), fruit d'un partenariat entre le Qatar et l'Algérie. Ce complexe moderne joue un rôle clé dans le développement de l'industrie lourde nationale. Il repose sur une chaîne de production intégrée, débutant par la réduction directe du minerai de fer via la technologie MIDREX, utilisant le gaz naturel comme agent réducteur.

Le fer réduit est ensuite acheminé vers des fours électriques à arc pour être fondu, puis transformé dans des laminoirs en produits finis. AQS produit principalement des barres d'armature et du fil machine, conformes aux normes internationales. Une des innovations du complexe est le convoyeur de transport à chaud, qui transfère le fer à 650 °C vers les fours, réduisant les pertes d'énergie.

AQS contribue à améliorer la balance commerciale de l'Algérie cette projet illustre parfaitement la volonté de

## **Chapitre 4 : application de la méthode AdD et STPA**

### 4.1 Introduction

L'analyse des risques industriels est un pilier fondamental dans l'assurance de la fiabilité, de la sécurité et de la continuité des opérations dans les complexes industriels à haut niveau technologique, tels que celui du complexe sidérurgique algéro-qatari de Bellara. Dans le cadre de ce mémoire, l'attention est portée sur un système critique : le convoyeur à transport à chaud, utilisé pour transférer des produits métallurgiques à haute température tout en assurant la protection de l'environnement et du personnel par un système de collecte de poussière et de gaz d'étanchéité.

#### Objectif de cette pratique

L'objectif principal de ce chapitre est de mener une analyse pratique approfondie de ce système à l'aide de deux méthodologies complémentaires et rigoureuses :

- La méthode de l'arbre de défaillance (FTA), qui permet de décomposer de manière hiérarchique les causes possibles d'une défaillance fonctionnelle, en identifiant les événements de base et leur probabilité ;
- La méthode STPA (System Theoretic Process Analysis), issue des approches systémiques modernes de la sûreté, qui prend en compte non seulement les défaillances physiques, mais aussi les erreurs de commande, de supervision et les défaillances organisationnelles.

Cette étude repose sur l'interprétation d'un schéma P&ID réel du système de convoyeur à chaud, accompagné de données techniques et probabilistes vérifiées. Elle vise à :

- Identifier les événements critiques pouvant mener à une panne totale ou partielle du système,
- Modéliser graphiquement ces événements à l'aide de l'outil GRIF pour le FTA,
- Évaluer les probabilités de défaillance en fonction du temps de mission (8760 h) et des valeurs de  $\lambda$  (taux de défaillance) issues de bases de données industrielles,
- Proposer des mesures préventives concrètes pour améliorer la sécurité opérationnelle.

L'approche combinée FTA/STPA permettra non seulement une lecture classique de la sûreté de fonctionnement, mais aussi une vision systémique et proactive des risques dans un environnement industriel complexe.

## 4.2 P&ID utilisé dans l'application

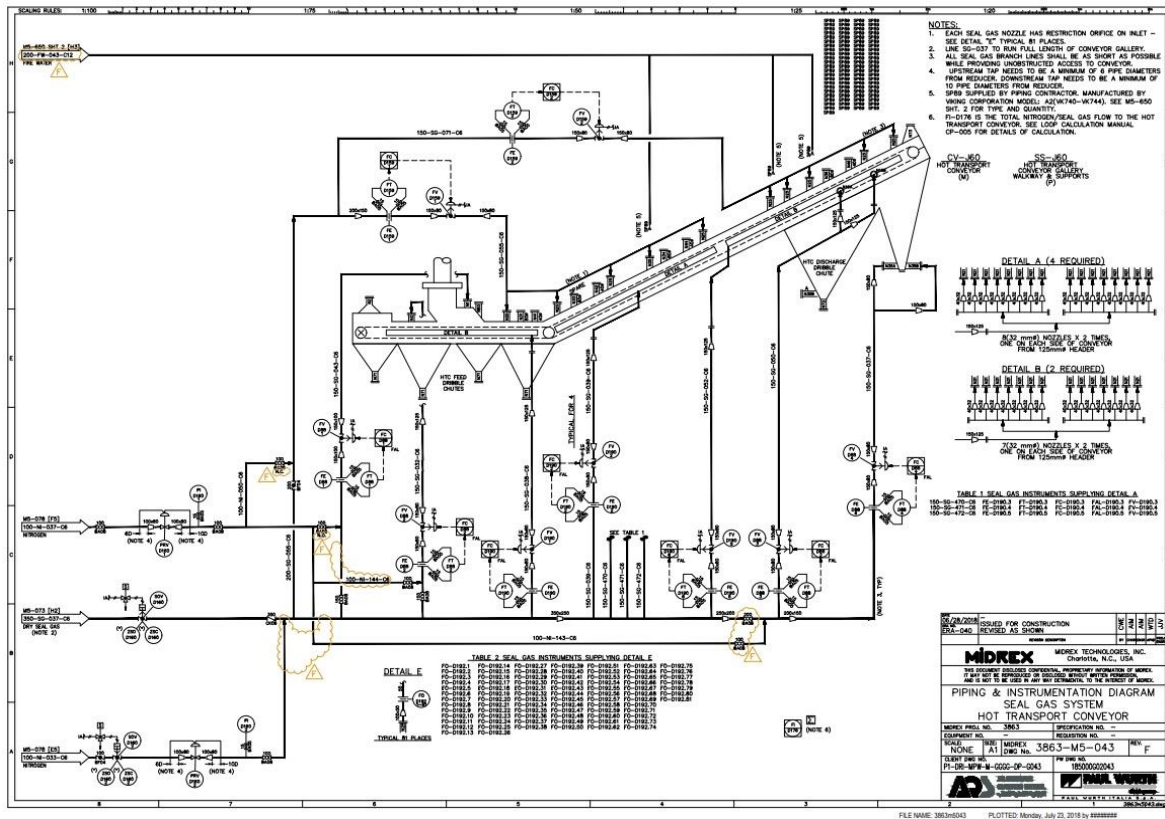


Figure 4.1. convoyeur de transport à chaud à cause du système de gaz d'étanchéité.

### 2.1 Analyse des sous-systèmes à partir du P&ID

- Soufflantes de gaz (M-621 et M-625).
- Ligne d'admission de gaz (vannes de sectionnement (XV-401, HV-401)
- Filtration (FILTER-401 /402...)
- Régulation de pression et de débit (vanne de régulation de pression (PT-401 / PI-401)
- Boucle de régulation automatique (FIC-401 contrôleur de débit)
- Distribution vers le convoyeur(les buses, orifices, collecteurs).
- Supervision et alarmes.
- Intégrité mécanique (brides, joints d'étanchéité, soudures, calorifugeage).

### 4.3 Application de la méthode STPA sur le système de transport convoyeur à chaud

Méthode STPA (System-Theoretic Process Analysis) appliquée au système de transport à chaud par convoyeur, en se basant sur le P&ID fourni (injection de gaz neutres comme l'azote et l'oxygène dans le convoyeur à scellage gaz).

#### 3.1. Les étapes de la méthode STPA

La méthode STPA se compose de 4 étapes majeures :

- **Identifier les pertes inacceptables**

Déterminer les pertes humaines, matérielles, environnementales ou économiques graves.

- **Identifier les dangers (hasards)**

Identifier les états du système qui peuvent mener aux pertes.

- **Modéliser le système avec un diagramme de contrôle**

Définir les contrôleurs, les processus, les capteurs, les actionneurs, les canaux de communication.

- **Identification des Unsafe Control Actions (UCA) : (Unsafe Control Actions - UCA)**

Analyser les actions de contrôle dangereuses.

- **Identifier les scénarios de défaillance**

Analyser les scénarios menant à un accident.

#### 3.2. Application de la méthode STPA au système de transport à chaud (basée sur le P&ID fourni)

##### 3.2.1. Contexte du système

- Le convoyeur à chaud est protégé par un système de gaz de scellage (azote et oxygène), injecté à plusieurs points.
- Système critique pour empêcher l'entrée d'air, éviter l'oxydation ou explosion.
- Contrôlé par des régulateurs de débit (FC, FIC), de pression (PCV), avec des actionneurs (XV, HV), et des capteurs (PT, FT, PI...).

### 3.2.2. Pertes inacceptables (Losses)

- L1 : Explosion due à une surpression ou fuite de gaz
- L2 : Incendie sur le convoyeur à chaud
- L3 : Inhalation de gaz toxique par le personnel
- L4 : Détérioration du compresseur par manque de débit ou mauvaise purge)
- L5 : Blocage ou mauvaise activation des vannes (purge, azote...).
- L6 : Commande inadéquate du PLC causant une séquence incorrecte
- L7 : Absence de détection de température ou pression anormale
- L8 : Interface opérateur mal utilisée provoquant une commande dangereuse
- L9 : Mauvaise ventilation ou circulation du gaz

### 3.2.3. Hasards (états dangereux du système)

- H1 : Surpression dans le système de gaz
- H2 : Présence de gaz inflammable sans inertage à l'azote
- H3 : Température excessive dans le convoyeur à chaud
- H4 : Vanne de purge ou d'azote ouverte au mauvais moment
- H5 : Signal erroné d'un capteur (pression, température, débit)
- H6 : Blocage du compresseur dû à une commande mal synchronisée
- H7 : Interface opérateur mal utilisée (commande manuelle incorrecte)
- H8 : Perte de communication entre capteurs et automate
- H9 : Gaz mal évacué ou mal distribué dans les conduites.

### 3.2.4. Définir la liaison entre le danger et les pertes

- H1 : Surpression dans le système de gaz
  - L1 : Explosion due à une surpression ou fuite de gaz
  - L4 : Détérioration du compresseur par manque de débit ou mauvaise purge
  - L5 : Blocage ou mauvaise activation des vannes (ex. surpression non relâchée).
- H2 : Présence de gaz inflammable sans inertage à l'azote
  - L1 : Explosion (mélange inflammable sans inertage)
  - L2 : Incendie sur le convoyeur à chaud (si gaz inflammable atteint cette zone)
  - L3 : Inhalation de gaz toxique par le personnel

- L9 : Mauvaise ventilation ou circulation du gaz
- H3 : Température excessive dans le convoyeur à chaud
  - L2 : Incendie sur le convoyeur à chaud
  - L3 : Inhalation de gaz toxique si libération par combustion
  - L4 : Détérioration du compresseur en aval (chaleur transmise)
  - L7 : Détection absente ou défaillante aggrave la situation
- H4 : Vanne de purge ou d'azote ouverte au mauvais moment
  - L4 : Détérioration du compresseur (par manque de gaz ou purge accidentelle)
  - L5 : Blocage ou mauvaise activation des vannes
  - L6 : Commande inadéquate du PLC (si commande ouverte au mauvais moment)
- H5 : Signal erroné d'un capteur (pression, température, débit)
  - L6 : Commande inadéquate du PLC (basée sur un signal incorrect)
  - L7 : Absence de détection de température ou pression anormale
  - L8 : Interface opérateur mal utilisée à cause d'information erronée
- H6 : Blocage du compresseur dû à une commande mal synchronisée
  - L4 : Détérioration du compresseur
  - L6 : Commande inadéquate du PLC
  - L5 : Blocage des vannes ou séquences mal gérées
- H7 : Interface opérateur mal utilisée (commande manuelle incorrecte)
  - L8 : Commande dangereuse de l'interface
  - L6 : Séquence incorrecte via commande manuelle
  - L1/L2 : Risque d'explosion ou incendie si mauvaise manipulation du gaz
- H8 : Perte de communication entre capteurs et automate
  - L6 : Commande inadéquate (automate ne reçoit pas les bonnes valeurs)
  - L7 : Absence de détection (automate aveugle)
  - L8 : Risque d'erreur humaine via l'interface en absence de données fiables
- H9 : Gaz mal évacué ou mal distribué dans les conduites
  - L1 : Explosion ou surpression
  - L3 : Inhalation de gaz toxique
  - L9 : Mauvaise ventilation ou distribution de gaz
  - L2 : Incendie possible par accumulation en zone chaude

### 3.2.5. Diagramme de contrôle (Control Structure Diagramme)

- **Contrôleur**

- PCL (Automate Programmable): C'est le cerveau du système qui reçoit les signaux des capteurs, traite les informations selon les consignes et la logique programmée, et commande les actionneurs.

- **Processus contrôlé**

Transport convoyeur à chaud avec gestion du gaz, ce processus implique :

- La circulation de gaz (mesurée et contrôlée).
- Le fonctionnement du convoyeur.
- La sécurité (détection de fuite, arrêt d'urgence, etc.).
- Le contrôle de la pression, température et débit du gaz.
- Le démarrage/arrêt du compresseur de gaz.

- **Capteurs**

- Capture de température: mesure la température du processus.
- Capture de pression: mesure la pression (en Bar/Pa).
- Capteur de débit: mesure le débit de gaz.
- Détecteur de gaz : Détecte les fuites de gaz et envoie une alarme.
- Feedback des vannes : donne l'état (ouvert/fermé) des vannes au PCL.

- **Actionneurs**

- Vannes (TCV, PVS, etc.): commandées en ouverture/fermeture pour contrôler le passage du gaz.
- Compresseur de gaz : mis en marche ou arrêté selon la logique conditionnelle et les consignes du PCL.
- Système de circulation: commandé pour faire circuler le fluide ou gaz.
- Transport convoyeur à chaud: commandé en marche/arrêt selon le besoin du système.

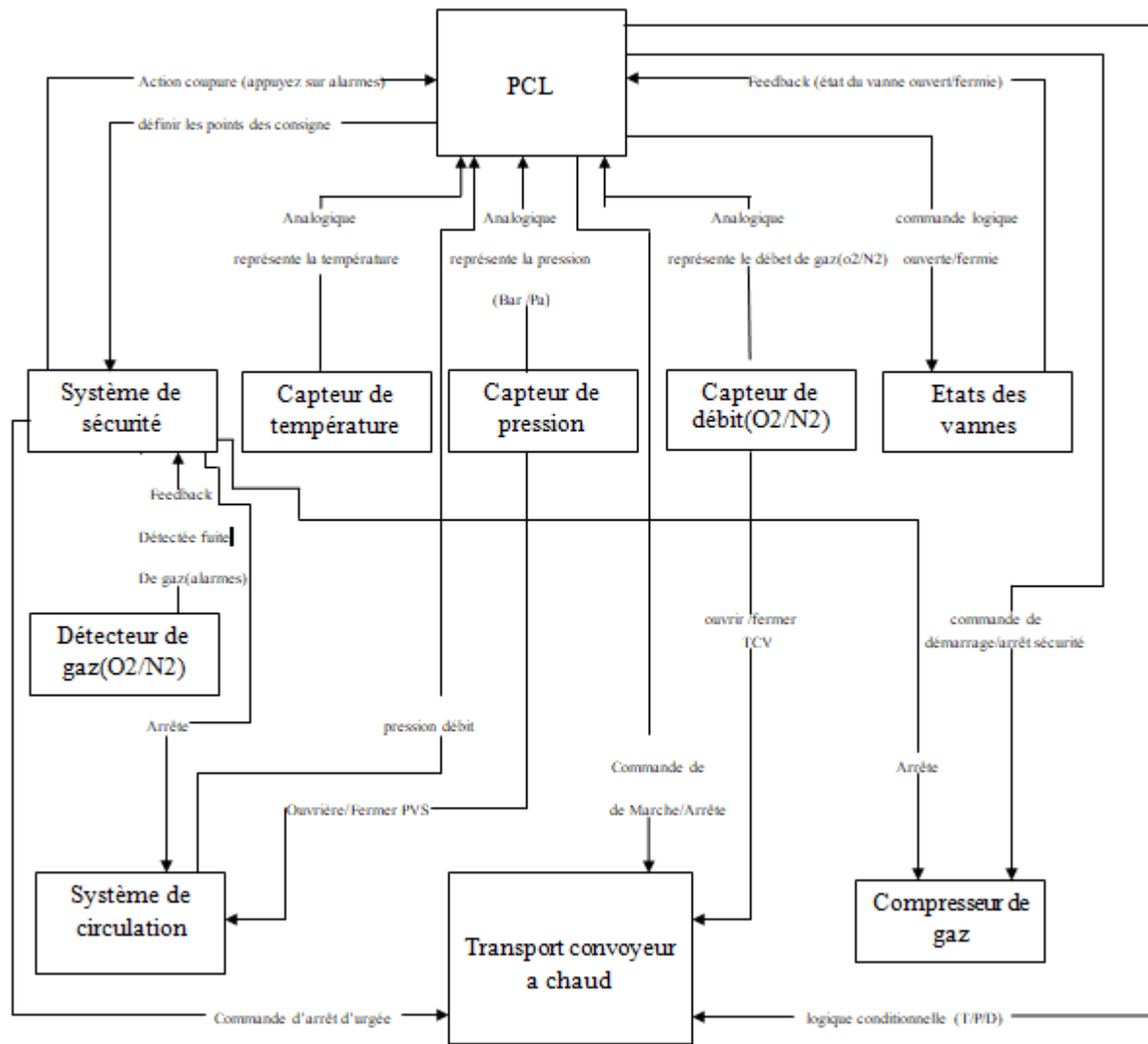


Figure 4.2. Diagramme de contrôle de transport convoyeur (par Word).

### 3.2.6. Identification des Unsafe Control Actions (UCA) :

- **UCA 1** : Commande envoyée alors qu'elle ne devrait pas l'être : Le système envoie un ordre dans une situation où cela peut créer un danger.
- **UCA 2** : Commande non envoyée alors qu'elle est nécessaire : Le système reste silencieux et ne réagit pas alors qu'il devrait le faire
- **UCA 3** : Commande envoyée au mauvais moment (trop tôt ou trop tard) : L'ordre est correct, mais le timing est mauvais, ce qui peut causer un dysfonctionnement.
- **UCA 4** : Commande incomplète, trop longue ou trop courte : Le système envoie l'ordre, mais pas correctement (durée ou intensité mauvaise).

Tableau 4.1. Les actions de contrôle dangereux.

Action de contrôle	Ne pas fournir	fournir	Trop tôt / trop tard / désordre	Trop Longtemps
Ouverture de la vanne de purge	UCA1 : Si la vanne de purge n'est pas ouverte alors que le système doit être purgé → accumulation de pression → H1 → L1	UCA2 : Si la vanne de purge s'ouvre alors que le système est en fonctionnement normal → perte de pression, entrée d'air → H4 → L4	UCA3 : Si la purge est ouverte trop tôt, avant l'inertage ou le démarrage correct → déséquilibre du processus → H4 → L6	UCA4 : Si la purge reste ouverte trop longtemps → perte de gaz utile ou entrée d'air → H1, H4 → L1, L4
Ouverture de la vanne d'azote	UC0A1 : Si la vanne ne s'ouvre pas pour inertage en présence de gaz inflammable → risque d'explosion → H2 → L1	UCA2 : Si la vanne s'ouvre sans besoin, le système peut être surpressurisé → H1 → L1	UCA3 : Si l'ouverture est trop tardive, le gaz inflammable est déjà présent sans inertage → H2 → L1, L2	UCA4 : Si l'injection d'azote dure trop longtemps, le système devient instable ou gaspille du gaz → H1, L4, L9
Démarrage du compresseur	UCA1 : Si le compresseur ne démarre pas quand requis → pas de mise en pression → H6 → L4	CA2 : Si le compresseur démarre alors que le système est mal préparé (non purgé) → risque de surcharge → H6 → L4	UCA3 : Si le compresseur est démarré dans le mauvais ordre (avant ouverture de purge par ex.) → blocage possible → H6 → L5	UCA4 : Si le compresseur fonctionne trop longtemps, risque de surchauffe ou d'usure prématurée → H3 → L4

<p>Commande de démarrage du convoyeur</p>	<p>UCA1 : Si le convoyeur ne démarre pas alors que nécessaire → accumulation de gaz → H9 → L3</p>	<p>UCA2 : Si le convoyeur démarre avec gaz inflammable présent → risque d'incendie → H2 → L2</p>	<p>UCA3 : Si le convoyeur démarre trop tôt, avant que le système ne soit purgé → H2 → L2</p>	<p>UCA4 : Si le convoyeur fonctionne trop longtemps sans arrêt malgré un danger → H3 → L2, L4</p>
<p>Arrêt d'urgence non activé</p>	<p>UCA1 : Si l'arrêt d'urgence n'est pas déclenché en présence de danger → le système continue → H1, H3 → L1, L2</p>	<p>UCA2 : Si l'arrêt est activé sans justification → interruption non critique mais possible confusion</p>	<p>UCA3 : Si l'arrêt est activé trop tard, les dommages sont déjà survenus → L1, L2</p>	<p>UCA4 : Si l'arrêt est levé trop tôt, avant élimination du danger → reprise prématurée → H3 → L2</p>
<p>Activation tardive de la vanne de sécurité</p>	<p>UCA1 : Si la vanne de sécurité ne s'active pas en cas de surpression → H1 → L1</p>	<p>UCA2 : Si elle s'active alors qu'il n'y a pas de danger, pression tombe inutilement → H4 → L4</p>	<p>UCA3 : Si elle s'active trop tard, la surpression cause déjà des dégâts → L1</p>	<p>UCA4 : Si elle reste ouverte trop longtemps, le système perd de la pression → L4</p>
<p>Alarme de température désactivée trop rapidement</p>	<p>UCA1 : Si l'alarme ne s'active pas en cas de surchauffe → le personnel ne réagit pas → H3 → L2</p>	<p>UCA2 : (Peu probable – désactivation d'une alarme inutile n'est pas critique)</p>	<p>UCA3 : Si l'alarme est désactivée trop tôt, le danger persiste sans signal → H3 → L2</p>	<p>UCA4 : Si l'alarme reste active inutilement, moins critique mais risque d'habituation</p>

<p>Le PLC n'émet pas d'ordre d'arrêt au convoyeur</p>	<p>UCA1 : Si le PLC n'envoie pas d'ordre d'arrêt alors qu'un danger est détecté → surchauffe, fuite de gaz → H3 → L2, L4 H6 → L2, L4</p>	<p>UCA2 : Si le PLC arrête le convoyeur sans raison → perte d'efficacité mais pas de danger</p>	<p>UCA3 : Si l'ordre d'arrêt est émis trop tard, le danger se réalise → H3 → L2</p>	<p>UCA4 : Si le convoyeur reste arrêté trop longtemps, pas de danger immédiat mais perturbation du processus</p>
---	--	---	---	--

3.2.7. Définir les contraintes du contrôleur

Tableaux 4.2. Les contraintes du contrôleur.

Actions de contrôle dangereux	contraintes du contrôleur
UCA : Le contrôleur n'ouvre pas la vanne quand elle doit l'être → risque de surpression (H1) → explosion (L1).	Le contrôleur doit ouvrir la vanne de purge avant toute introduction de gaz ou mise en pression.
UCA : Le contrôleur ouvre la vanne alors que ce n'est pas requis → perturbation de la pression (H4) → dommages au compresseur (L4).	Le contrôleur ne doit ouvrir la vanne que dans la séquence autorisée, après validation des conditions.
UCA : Le contrôleur n'ouvre pas la vanne d'azote en présence de gaz inflammable → absence d'inertie (H2) → incendie ou explosion (L2, L1).	Le contrôleur doit obligatoirement activer l'injection d'azote avant d'autoriser le gaz inflammable.
UCA : Ouverture injustifiée ou trop longue → surpression ou perte d'équilibre (H1) → détérioration du système (L4).	La durée d'ouverture de la vanne d'azote doit être strictement contrôlée et limitée.
UCA : Le compresseur est démarré sans	Le contrôleur ne doit démarrer le

purge ou inertie préalable → risque mécanique ou explosion (H6) → (L1, L4).	compresseur que si les conditions de sécurité (purge, inertage, détection) sont remplies.
UCA : Le compresseur fonctionne trop longtemps → surchauffe (H3) → dommages (L4).	Le contrôleur doit surveiller les paramètres du compresseur et l'arrêter automatiquement en cas d'anomalie.
UCA : Le convoyeur est démarré alors que l'inertie est incomplet → incendie (H2) → (L2).	Le contrôleur doit vérifier la fin du cycle d'inertage avant d'autoriser le transport.
UCA : Le contrôleur n'active pas l'arrêt d'urgence lors d'un danger détecté → continuation d'un état instable (H1, H3) → explosion ou incendie (L1, L2)	Le contrôleur doit activer immédiatement l'arrêt d'urgence dès qu'un seuil critique est dépassé.
UCA : La vanne n'est pas activée à temps → surpression (H1) → explosion (L1).	Le contrôleur doit déclencher automatiquement la vanne de sécurité dès franchissement du seuil.
UCA : L'alarme est coupée alors que le danger persiste → absence de réaction → incendie ou erreur humaine (L2, L8).	L'alarme doit rester active tant que la condition dangereuse persiste.

### 3.2.8. Les Scénarios causant

- **UCA-1 : Le contrôleur n'ouvre pas la vanne de purge alors que la pression augmente dans le système (H1 – Surpression) :**
  - Scénario 1 pour UCA-1 :

Après la fin du cycle de gaz, une surpression commence à s'accumuler dans le système. Le PLC détecte bien la pression anormale, mais l'automate ne transmet pas l'ordre d'ouverture de la vanne de purge. En conséquence, le gaz reste piégé dans la conduite, provoquant une surpression progressive [UCA-1], ce qui conduit à une explosion possible [H1, L1].

- **UCA-2 : Le contrôleur ouvre la vanne d'azote alors qu'aucun gaz inflammable n'est présent (H1 – Surpression)**

– Scénario 1 pour UCA-2 :

Le système est en phase de mise en veille, mais le PLC active par erreur la vanne d'azote en raison d'un signal de capteur défectueux. L'injection d'azote sans besoin opérationnel entraîne une élévation de pression inutile [UCA-2], pouvant causer une surcharge sur les conduites [H1] et une détérioration d'équipements sensibles [L4].

- **UCA-3 : Le compresseur est démarré avant que la purge ou l'inertage ne soit terminé (H2 – Présence de gaz inflammable sans inertage)**

– Scénario 1 pour UCA-3 :

Une commande automatique démarre le compresseur sans attendre la confirmation de la fin d'inertage à l'azote. Le gaz inflammable est encore présent dans le système [UCA-3], et le fonctionnement du compresseur génère un échauffement et des turbulences internes, ce qui entraîne une inflammation du gaz résiduel [H2, L2].

- **UCA-4 : Le PLC n'envoie pas l'ordre d'arrêt du convoyeur malgré une température excessive détectée (H3 – Température excessive)**

– Scénario 1 pour UCA-4 :

Le capteur de température détecte une montée rapide de la température du convoyeur. Toutefois, en raison d'un bug logiciel, le PLC ne transmet pas le signal d'arrêt du moteur du convoyeur [UCA-4]. Le convoyeur continue de chauffer, causant une dégradation thermique des matériaux environnants [H3], avec un risque de déclenchement d'incendie [L2].

- **UCA-5 : La vanne de sécurité est activée trop tard après détection de surpression (H1 – Surpression)**

– Scénario 1 pour UCA-5 :

Une fuite de gaz combinée à un dysfonctionnement de la purge génère une surpression rapide. La commande d'activation de la vanne de sécurité ne s'active qu'avec 5 secondes de retard à cause d'un temps de traitement prolongé dans le programme automate [UCA-5]. Ce délai est suffisant pour dépasser le seuil de sécurité, entraînant une explosion du réservoir [H1, L1].

- **UCA-6 : L'alarme de température est désactivée trop tôt, alors que le risque est toujours présent (H3 – Température excessive)**

– Scénario 1 pour UCA-6 :

Une alarme de température se déclenche à 80°C. Un opérateur ou un script désactive l'alarme prématurément, croyant que le problème est résolu [UCA-6]. Cependant, la température continue d'augmenter, atteignant un point critique sans alerte active. Cela conduit à une surchauffe du système [H3] et à un risque d'incendie localisé [L2].

- **UCA-7 : Le convoyeur est démarré alors que le gaz inflammable n'a pas été totalement purgé (H2 – Gaz sans inertie)**

– Scénario 1 pour UCA-7 :

En phase de redémarrage, l'opérateur lance manuellement le convoyeur avant la fin du cycle de purge au gaz inerte. Du gaz inflammable reste présent dans les conduites du convoyeur [UCA-7]. Le mouvement mécanique provoque un point chaud, déclenchant une inflammation du gaz résiduel [H2], menant à un incendie [L2]

### 3.2.9 Recommandation proposées pour résoudre les problèmes potentiels à partir

#### STPA

- Ordres incorrects envoyés par le PLC :
  - Ajouter une double validation logique avant l'envoi (conditions + capteurs).
  - Intégrer des alarmes visuelles avant action critique.
  - Mise en place d'un historique de commande pour retracer l'événement.
  - Interface HMI avec message explicatif avant chaque action manuelle
- Ordres mal synchronisés (trop tôt / trop tard) :
  - Chronogramme interne avec fenêtres de validation temporelle.
  - Ajout de capteurs de fin de cycle ou de position avant passage à l'étape suivante.
- Signal trop court / incomplet :
  - Application d'un filtre logiciel anti-bruit (détection impulsion parasite).
  - Implémentation d'un système de confirmation à double capteur.
  - Journaux d'événements pour détecter anomalies de durée
- Capteurs défectueux ou non fiables :
  - Capteurs redondants avec comparaison automatique (vérification croisée).

- Maintenance prédictive avec mesure de dérive des capteurs.
- Auto-étalonnage à intervalles réguliers.
- Alarmes différenciées (capteur muet, capteur incohérent, capteur en erreur).
- Ouverture dangereuse des vannes :
  - Blocage logiciel si conditions de sécurité non remplies.
  - Verrou mécanique (électrovanne verrouillée sans signal de validation).
  - Capteur d'état réel des vannes pour confirmer mouvement.
- Risque de surchauffe du convoyeur :
  - Capteurs température multi-points avec alarme moyenne / pic.
  - Activation automatique du refroidissement.
  - Arrêt d'urgence du système si dépassement seuil critique.
- Fuite de gaz ou mauvaise circulation :
  - Capteur de gaz fixe connecté directement au PLC.
  - Analyse pression différentielle entrée/sortie.
  - Arrêt automatique en cas d'anomalie de débit.
  - Maintenance préventive basée sur historique des fuites.
- Solutions aux pannes de communication (Capteurs ↔ PLC) :
  - Programmer le PLC pour détecter automatiquement les pertes de signal (timeout).
  - Planifier une maintenance préventive mensuelle (nettoyage, test de connexion).
  - Tester régulièrement les connexions avec un multimètre ou simulateur de capteur.
  - Utiliser des câbles blindés pour éviter les interférences électriques.

#### 4.4. Application de la méthode AdD à partir les scénarios de STPA

Nous appliquerons la méthode AdD en utilisant P&ID pour analyser tous les événements et calculer les probabilités. Pour appliquer cette méthode, nous suivons les étapes suivantes :

- **Définition de l'événement redouté (Top Event)**

On commence par identifier la défaillance principale que l'on souhaite analyser, par exemple : « Défaillance du système de convoyeur à chaud et de collecte de poussière ».

- **Identification des causes directes**

On identifie les causes qui peuvent mener directement à l'événement principal, comme : panne du moteur, obstruction du flux de poussière, panne du système de contrôle, panne électrique, ou blocage mécanique par accumulation de produit.

- **Construction de l'arbre logique**

On utilise des portes logiques (AND, OR) pour relier les événements intermédiaires et de base aux événements supérieurs, selon leur relation logique.

- **Définition des événements de base**

Pour chaque branche, on décompose les sous-systèmes en composants concrets (moteur, vanne, capteur, automate, filtre...) et on identifie les modes de défaillance possibles.

- **Estimation ou collecte des probabilités de défaillance**

On obtient les taux de défaillance ( $\lambda$ ) à partir de bases de données fiables comme MIL-HDBK-217, OREDA ou à partir du retour d'expérience terrain (REX).

On calcule ensuite la probabilité de défaillance avec la formule :

- Si  $\lambda$  est faible :  $P \approx \lambda \times t$  Sinon :  $P = 1 - e^{(-\lambda t)}$

### **Modélisation dans un logiciel FTA comme GRIF**

On saisit la structure de l'arbre et les probabilités dans le logiciel, qui génère automatiquement l'analyse.

- **Analyse des résultats**

Le logiciel fournit la probabilité de l'événement principal et identifie les combinaisons critiques (cut sets) qui conduisent au scénario redouté.

- **Les recommandations proposées pour résoudre les problèmes à partir Add**

#### 4.1 Bloc diagramme fonctionnel

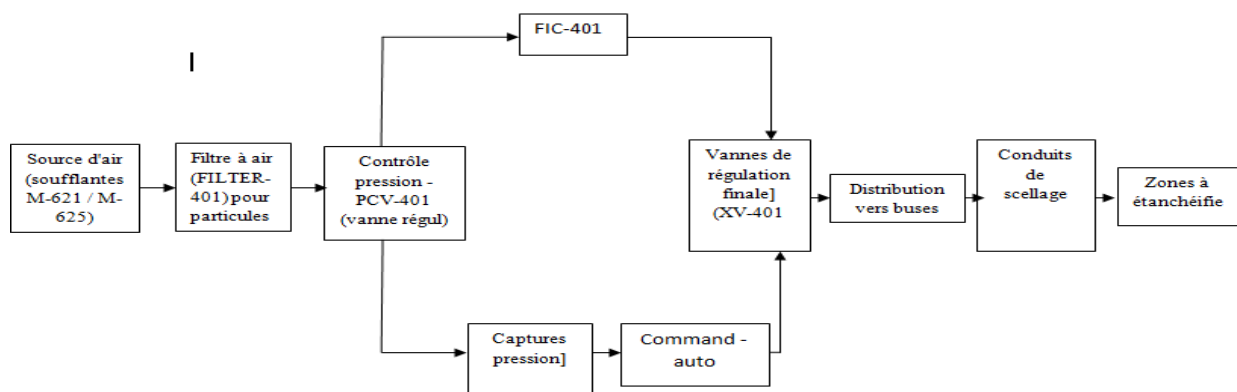


Figure 4.3. Bloc diagramme fonctionnel

#### 4.2 Explosion du système de gaz de scellage du convoyeur à chaud

Evènement principale : Explosion du système de gaz de scellage du convoyeur à chaud .

- Porte ET
  - A1.1 Fuite de gaz
  - A1.2 Défaillance du système de détection
  - A1.3 Source d'inflammation
  - A1.4 Erreur de régulation du débit ou pression
  - A1.5 Absence de maintenance préventive

##### A1.1 Fuite de gaz

- Porte OR
  - B1.1 Tuyau fissuré.
  - B1.2 Joint de bride.
  - B1.3 Vanne mal fermée / fuite.

##### A1.2 Défaillance du système de détection

- Porte OU
  - B2.1 défectueuse Capteur HS (PT ou FT)
  - B2.2 Alerte désactivée ou ignorée
  - B2.3 Maintenance non réalisée

**A1.3 Source d'inflammation**

- Porte OU
  - B3.1 Court-circuit (moteur / armoire)
  - B3.2 Surchauffe d'un tuyau (par friction ou chaleur ambiante)-Étincelle électrostatique ou mécanique.

**A1.4 Erreur de régulation du débit ou pression**

- Porte OU
  - B4.1 PCV-401 bloquée (suralimentation)
  - B4.2 Défaillance de FIC-401 ou mauvaise consigne
  - B4.3 Surpression due à vanne restée fermée

**A1.5 Absence de maintenance préventive**

- OU
  - B5.1 Filtre obstrué non remplacé.
  - B5.2 Alarmes de sécurité désactivées ou ignorées.
  - B5.6 Fuite ancienne jamais réparée.

**4.2.1 Probabilités associées aux événements de base****Tableau 4.3.** Probabilités associées aux événements de base.

Sous-événement	$\lambda$ (h/(chacune))	t(temps exécution)	Probabilité
Tuyau fissuré	$1 \times 10^{-7}$	8760 h	0,0009
Joint de bride défectueux	$1 \times 10^{-6}$	8760 h	0,0087
Vanne mal fermée / fuite interne	$2 \times 10^{-6}$	8760 h	0.0171
Défectueuse Capteur HS (PT/FT).	$3.91 \times 10^{-5}$	8760 h	0.27
Alerte désactivée ou ignorée	$1 \times 10^{-5}$	8760 h	0.084

Maintenance non réalisée	$5 \times 10^{-6}$	8760 h	0.042
Court-circuit (moteur / armoire)	$4 \times 10^{-6}$	8760 h	0.034
Surface trop chaude (tuyau non isolé)	$2 \times 10^{-5}$	8760 h	0.16
Étincelle mécanique / électrostatique	$1.5 \times 10^{-5}$	8760 h	0.115
PCV-401 bloquée (suralimentation)	$1 \times 10^{-6}$	8760 h	0,0087
Surpression par vanne fermée	$2 \times 10^{-6}$	8760	0.0171
Filtre obstrué non remplacé	$8 \times 10^{-6}$	8760	0.068
Alarmes désactivées ou ignorées	$5 \times 10^{-6}$	8760	0.042
Fuite ancienne non réparé	$9 \times 10^{-6}$	8760	0.077
FIC-401 défaillant/ mauvaise consigne	$1 \times 10^{-6}$	8760	0,0087

4.2.2 Modélisation dans un logiciel AdD comme GRIF

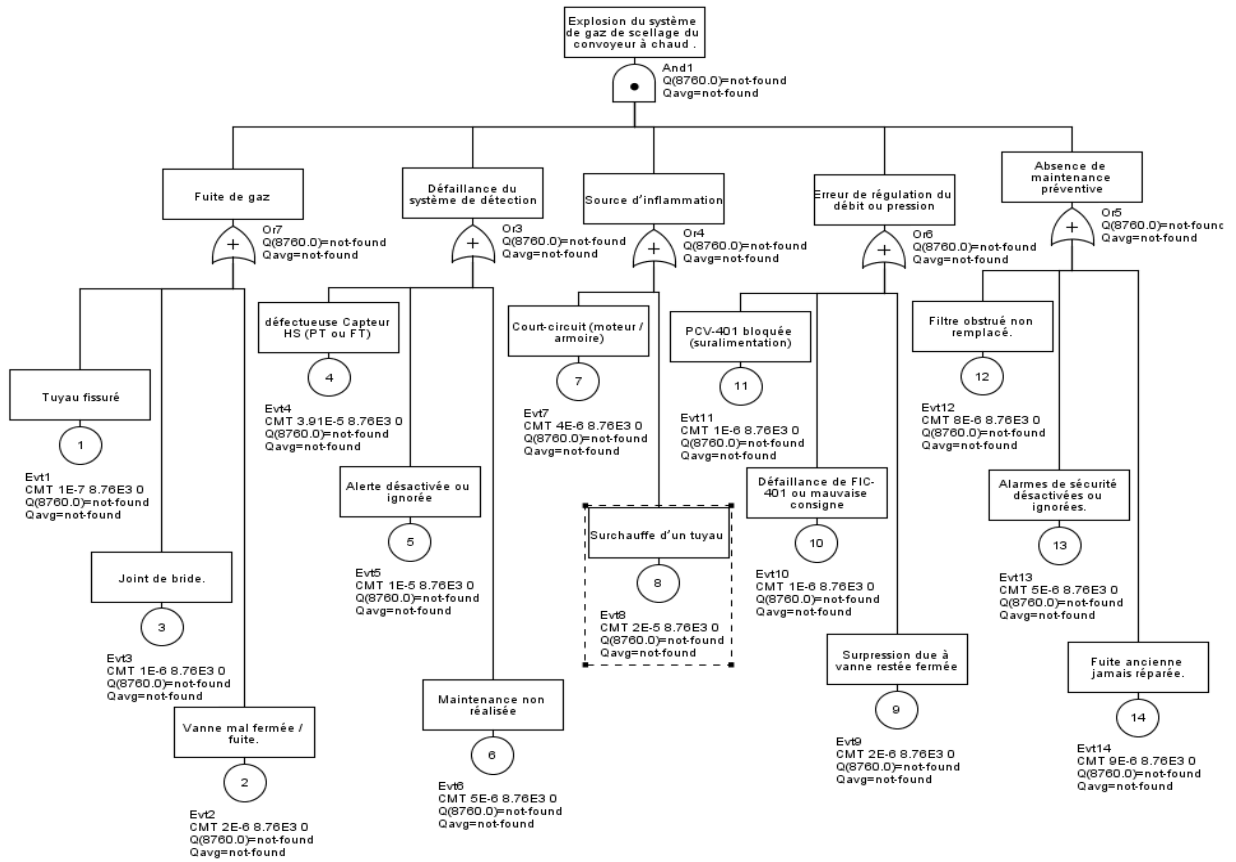


Figure 4.4. Modélisation dans un logiciel AdD comme GRIF

System	Min	Max	Average	Integral
Explosion du système de g...	1.16E-5	1.16E-5	1.16E-5	0
Tuyau fissuré	8.76E-4	8.76E-4	8.76E-4	0
Défaillance de FIC-401 ou ...	8.72E-3	8.72E-3	8.72E-3	0
PCV-401 bloquée (suralim...	8.72E-3	8.72E-3	8.72E-3	0
Filtre obstrué non remplacé.	6.77E-2	6.77E-2	6.77E-2	0
Alarmes de sécurité désact...	4.29E-2	4.29E-2	4.29E-2	0
Fuite ancienne jamais répa...	7.58E-2	7.58E-2	7.58E-2	0
Vanne mal fermée / fuite.	1.74E-2	1.74E-2	1.74E-2	0
Joint de bride	8.72E-3	8.72E-3	8.72E-3	0
Joint de bride.	8.72E-3	8.72E-3	8.72E-3	0
défectueuse Capteur HS (P...	2.9E-1	2.9E-1	2.9E-1	0
Alerte désactivée ou ignorée	8.39E-2	8.39E-2	8.39E-2	0
Maintenance non réalisée	4.29E-2	4.29E-2	4.29E-2	0
Court-circuit (moteur / armo...	3.44E-2	3.44E-2	3.44E-2	0
Surchauffe d'un tuyau	1.61E-1	1.61E-1	1.61E-1	0
Suppression due à vanne re...	1.74E-2	1.74E-2	1.74E-2	0
Défaillance du système de ...	3.77E-1	3.77E-1	3.77E-1	0
ource d'inflammation	1.9E-1	1.9E-1	1.9E-1	0
bsence de maintenance p...	1.75E-1	1.75E-1	1.75E-1	0
rrreur de régulation du déb...	3.44E-2	3.44E-2	3.44E-2	0
uite de gaz	2.68E-2	2.68E-2	2.68E-2	0

Figure 4.5. Unavailability Average Uavg.

### 4.2.3 Commentaire sur les résultats présentés dans le tableau à partir AdD

L'analyse probabiliste présentée dans ce tableau résume les contributions individuelles de chaque événement de base menant à l'explosion du système de gaz de scellage du convoyeur à chaud. L'événement redouté, identifié comme "Explosion du système de gaz de scellage", affiche une probabilité moyenne très faible ( $1,16E-5$ ), ce qui démontre une bonne résilience globale du système en conditions normales, mais n'élimine pas les risques d'accidents majeurs si plusieurs défaillances surviennent simultanément.

Parmi les événements les plus critiques, on retrouve : l'absence de maintenance préventive ( $1,75E-1$ ), la surchauffe d'un tuyau ( $1,61E-1$ ), et la fuite ancienne jamais réparée ( $7,58E-2$ ). Ces événements sont fortement liés aux défaillances humaines et organisationnelles, ce qui met en lumière l'importance de la culture de sûreté industrielle et du respect rigoureux des plans de maintenance.

D'autres causes importantes incluent le filtre obstrué non remplacé, les défauts de régulation de pression ou de débit, ou encore les instruments de sécurité désactivés. Ces failles représentent des points de vulnérabilité opérationnels, souvent sous-estimés, mais aux conséquences graves.

En conclusion, cette analyse met en évidence la nécessité de renforcer les dispositifs de surveillance proactive, de gestion du vieillissement des équipements, et d'engagement du personnel de maintenance. Une stratégie de gestion intégrée des risques industriels est essentielle pour garantir la continuité de service et la protection des biens et des personnes.

#### Les Coupes minimales de l'arbre Explosion :

- $(B1.1 \wedge B2.1 \wedge B3.1 \wedge B4.1 \wedge B5.1)$
- $(B1.1 \wedge B2.2 \wedge B3.2 \wedge B4.1 \wedge B5.2)$
- $(B1.3 \wedge B2.3 \wedge B3.2 \wedge B4.3 \wedge B5.6) \dots$

Nombre de coupes minimales  $\approx$

$\rightarrow 3 (A1.1) \times 3 (A1.2) \times 2 (A1.3) \times 3 (A1.4) \times 3 (A1.5) = 162$  combinaisons possibles

#### 4.2.4 Recommandation proposées pour résoudre les problèmes potentiels à partir Add et résultat tableau

- Non-évacuation du gaz d'étanchéité :
  - Installation de capteurs de pression redondants avec alarme (configuration 1oo2)
  - Automatisation de l'arrêt du système en cas de surpression (>1,2 bar)
  - Nettoyage et inspection des conduites et filtres toutes les 200 heures
  - Intégration d'un automate (PLC) avec supervision en temps réel
- Mauvais mélange Azote/Oxygène :
  - Utilisation de débitmètres massiques numériques avec alarme de dérive de rapport
  - Calibration périodique des vannes de dosage (chaque 500h)
  - Remplacement des vannes mécaniques par des vannes électropneumatiques intelligentes
  - Mise en place d'un ratio automatique contrôlé via automate (PID)
- Colmatage du filtre à gaz :
  - Substitution des filtres standards par des filtres auto-nettoyants (reverse-pulse)
  - Mise en place de capteurs différentiels de pression avant/après filtre
  - Planning de remplacement préventif basé sur l'analyse des heures de fonctionnement
- Fuite de gaz
  - Inspection trimestrielle avec détecteur de fuite portable (type Sniffer IR)
  - Installation de capteurs fixes pour détection continue (zones critiques)
  - Remplacement systématique des joints chaque 12 mois
  - Application de revêtements anticorrosion sur les réseaux de tuyauterie
- Capteur de pression ou d'O<sub>2</sub> défaillant
  - Couplage de capteurs redondants avec validation croisée automatique

#### 4.3 Incendie dans le système de gaz du convoyeur à chaud

- Porte ET
  - A1.1 Fuite de gaz inflammable
  - A1.2 Présence d'une source d'inflammation
  - A1.3 Accumulation de gaz non évacué

- A1.4 Défaillance du système de détection
- A1.5 Erreur humaine ou manœuvre non conforme
- **A1.1 Fuite de gaz inflammable**
- Porte OU
  - B1.1 Corrosion ou fissure des tuyauteries
  - B1.2 Joints de brides usés ou défectueux
  - B1.3 Vanne mal fermée ou endommagée
  - B1.4 Surcharge de pression sur le réseau
  - B1.5 Choc mécanique ou vibration excessive
- **A1.2 Présence d'une source d'inflammation**
- Porte OU
  - B2.1 Arc électrique (moteur ou coffret électrique)
  - B2.2 Étincelle électrostatique (défaut de mise à la terre)
  - B2.3 Surface chaude (moteur, roulement surchauffé)
  - B2.4 Travaux à chaud sans permis (soudage, meulage)
- **A1.3 Accumulation de gaz non évacué**
  - Porte OU
  - B3.1 Défaut ou arrêt du système de ventilation
  - B3.2 Obstruction des conduits ou des filtres
  - B3.3 Vanne de purge bloquée
  - B3.4 Arrêt inapproprié du circuit par opérateur
- **A1.4 Défaillance du système de détection**
- Porte OU
  - B4.1 Capteur de gaz HS (O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.)
  - B4.2 Alarme désactivée ou non perçue
  - B4.3 Absence de redondance dans la détection
  - B4.4 Maintenance préventive non effectuée
- **A1.5 Erreur humaine ou manœuvre non conforme**
- Porte OU
  - B5.1 Purge de gaz effectuée hors consigne
  - B5.2 Démarrage du système sans vérification préalable
  - B5.3 Non-respect des procédures opérationnelles

– B5.4 Absence de formation ou de recyclage du personne

4.3.1 Modélisation dans un logiciel Add comme GRIF

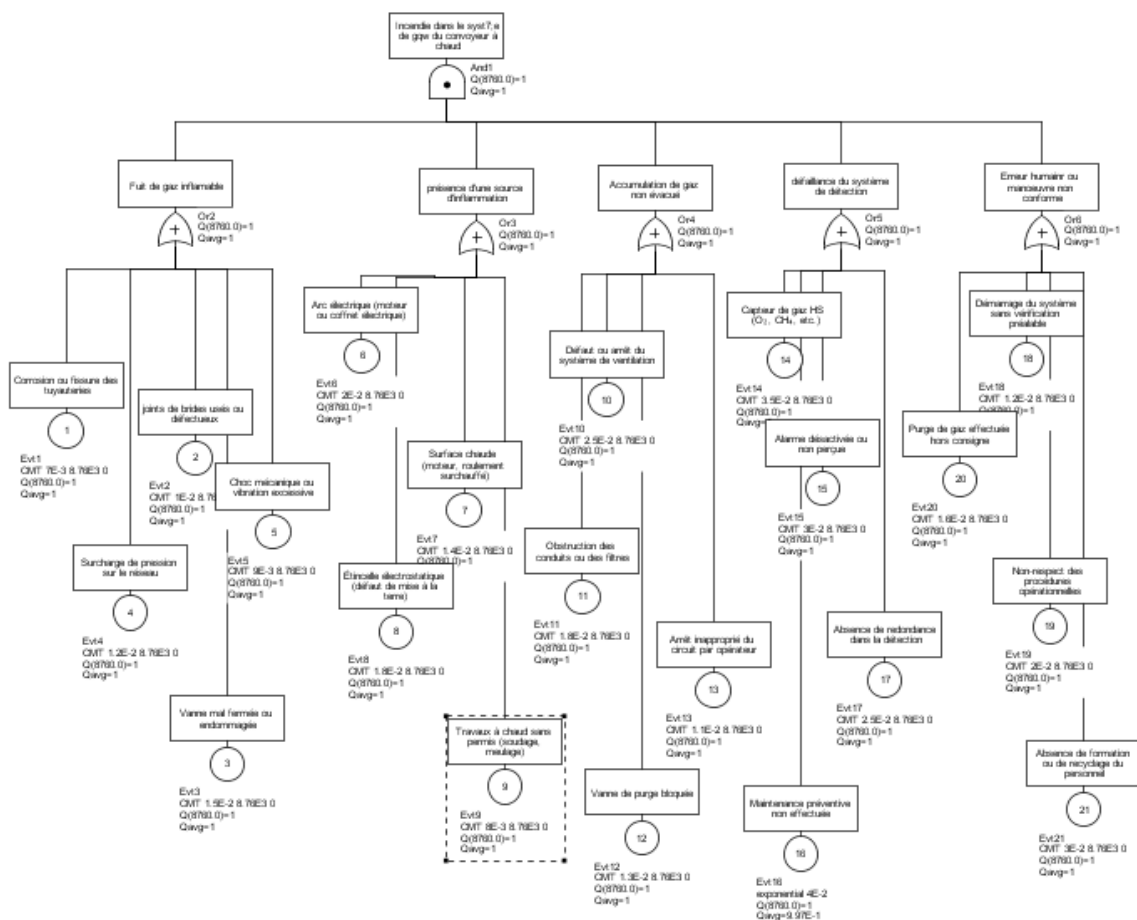


Figure 4.6. Modélisation dans un logiciel Add comme GRIF

Synthesis PR					
System	Min	Max	Average	Integral	
Incendie dans le syst7:e de...	1	1	1	8.76E3	
Corrosion ou fissure des tu...	1	1	1	8.76E3	
Défaut ou arrêt du système ...	1	1	1	8.76E3	
Obstruction des conduits o...	1	1	1	8.76E3	
Vanne de purge bloquée	1	1	1	8.76E3	
Arrêt inapproprié du circuit ...	1	1	1	8.76E3	
Capteur de gaz HS (O <sub>2</sub> , CH...	1	1	1	8.76E3	
Alarme désactivée ou non p...	1	1	1	8.76E3	
Maintenance préventive non...	0	1	9.97E-1	8.73E3	

Figure 4.7. Unavailability Average Uagv.

4.3.2 Commentaire sur les résultats présentés dans le tableau à partir Add

Le tableau présente les principales causes pouvant entraîner un incendie dans le système de gaz du convoyeur à chaud, selon l'arbre de défaillance.

Toutes les causes identifiées (comme la corrosion des tuyaux, défaut de ventilation, capteurs de gaz défectueux, ou encore absence de maintenance) ont une même valeur moyenne de risque ( $8.76E-3$ ). Cela signifie qu'elles sont considérées comme également importantes dans l'analyse.

Cela montre que chaque défaillance a le même poids dans la survenue de l'incendie, qu'elle soit technique (vanne bloquée, capteur HS), humaine (erreur de manœuvre), ou liée à la maintenance.

Il est donc important de :

- surveiller tous les éléments du système,
- maintenir les équipements en bon état,
- et assurer la formation du personnel

#### 4.3.3 Les Coupes minimales de l'arbre Incendie :

Ce sont toutes les combinaisons contenant un événement de base de chaque sous-branche A1.x :

- $(B1.1 \wedge B2.1 \wedge B3.1 \wedge B4.1 \wedge B5.1)$
- $(B1.1 \wedge B2.1 \wedge B3.1 \wedge B4.1 \wedge B5.2)$
- $(B1.5 \wedge B2.4 \wedge B3.4 \wedge B4.4 \wedge B5.4)$ .....

Nombre de coupes minimales = produit du nombre d'événements dans chaque sous-branche :

$$\rightarrow 5 (A1.1) \times 4 (A1.2) \times 4 (A1.3) \times 4 (A1.4) \times 4 (A1.5) = 1\ 280 \text{ coupes minimales}$$

#### 4.3.4 Recommandation proposées pour résoudre les problèmes potentiels à partir Add et résultat tableau

- Contrôler régulièrement les tuyauteries pour détecter la corrosion ou les fissures.
- Remplacer les joints de brides usés ou défectueux pour éviter les fuites de gaz.
- S'assurer que les vannes sont bien fermées et fonctionnent correctement.
- Limiter les chocs mécaniques et vibrations en renforçant les supports et fixations.
- Éviter les surpressions par un bon réglage des systèmes de régulation.
- Mettre à la terre toutes les installations pour éviter les étincelles électrostatiques
- Éviter les surfaces surchauffées en assurant le refroidissement des moteurs et roulements.

- Superviser strictement les travaux à chaud (soudure, meulage)
- Assurer le bon fonctionnement du système de ventilation pour évacuer les gaz accumulés.
- Déboucher régulièrement les filtres et conduits pour éviter les obstructions.
- Tester et calibrer les capteurs de gaz (CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, etc.) périodiquement.
- Ne jamais désactiver les alarmes et vérifier leur bon fonctionnement.
- Prévoir une redondance dans les capteurs pour assurer la détection même en cas de panne.

#### 4.5 Les recommandations intégrées STPA/Add

- Surveillance technique du système (ADD + STPA)
  - Installer des capteurs redondants (gaz, pression) avec retour d'information fiable.
  - Mettre en place un système d'arrêt automatique en cas de détection de fuite ou surpression.
  - Contrôler régulièrement les tuyauteries, vannes et joints pour prévenir les fuites (corrosion, fissures).
  - Assurer la disponibilité et l'efficacité du système de ventilation, pour éviter l'accumulation de gaz.
- Renforcement du retour d'information (feedback)
  - Activer des alarmes sonores et visuelles indépendantes du contrôle principal.
  - Archiver les événements critiques dans un journal d'audit numérique pour analyse future.
  - Utiliser des outils de suivi de tendance (pression/température) pour détection précoce.
- Réduction des erreurs humaines (ADD + STPA)
  - Fournir des check-lists numériques obligatoires avant toute manœuvre (purge, démarrage).
  - Organiser des formations régulières sur les procédures, incidents passés et gestes réflexes.
  - Superviser les travaux à chaud par un personnel qualifié, avec permis et autorisation formelle.
- Amélioration des procédures et règles de décision
  - Imposer une autorisation écrite et sécurisée pour toute purge ou opération critique.

- Restreindre l'accès aux paramètres sensibles (pression, vannes) à des opérateurs formés.
- Créer des barrières organisationnelles, comme des double-vérifications pour les démarrages.
- Renforcement organisationnel (STPA)
  - Mettre en place une politique stricte de maintenance préventive et prédictive.
  - Créer une équipe d'analyse des risques multidisciplinaire (production, maintenance, HSE).
  - Tenir des réunions de sécurité régulières pour analyser incidents, quasi-accidents et retours d'expérience.

## 4.6 Conclusion

Dans le cadre de cette démarche d'analyse des risques, l'approche combinée AdD (Analyse des Défaillances) et STPA (System Théorique Processus Analyse) a permis d'adopter une vision à la fois fonctionnelle et systémique du système étudié. L'utilisation d'AdD a fourni une première base solide pour identifier les modes de défaillance potentiels au niveau des composants techniques, tandis que STPA a élargi l'analyse en intégrant les interactions complexes entre les sous-systèmes, les facteurs humains et organisationnels.

Cette complémentarité méthodologique a enrichi la compréhension globale des risques, permis de formuler des recommandations de sécurité robustes et d'anticiper des scénarios critiques qui n'auraient pas été identifiés par une méthode classique. Elle a également renforcé une culture de la sûreté en favorisant la collaboration interdisciplinaire et en impliquant les parties prenantes dans l'analyse.

En résumé, cette expérience m'a permis de développer des compétences pratiques en ingénierie de la sécurité, tout en m'initiant à une approche systémique de l'analyse des risques, essentielle pour la maîtrise des systèmes complexes modernes.

## Conclusion Générale et perspective

La sécurité industrielle constitue aujourd'hui un levier stratégique incontournable dans tout système de production moderne, notamment dans des secteurs à haut risque comme la sidérurgie. À travers ce travail, nous avons mis en lumière l'importance de dépasser les approches classiques d'analyse des risques, en intégrant des méthodes capables de prendre en compte la complexité croissante des systèmes industriels. Le choix du complexe sidérurgique algérien-qatarien de Bellara comme terrain d'application s'est imposé naturellement, en raison de son envergure, de la diversité de ses processus, et des enjeux liés à sa fiabilité opérationnelle.

Face à cette complexité, nous avons adopté une démarche analytique combinant deux outils complémentaires : la méthode STPA, qui permet une analyse systémique tenant compte des interactions humaines, techniques et organisationnelles, et la méthode AdD, axée sur la détection des défaillances techniques. Cette approche intégrée nous a permis de mieux comprendre les vulnérabilités du système, d'identifier les zones critiques, et de proposer des solutions adaptées.

Ainsi, en réponse à la problématique posée — à savoir comment exploiter de manière complémentaire les méthodes STPA et AdD pour améliorer l'analyse des risques industriels au sein du complexe de Bellara — nous avons formulé trois hypothèses : la capacité de STPA à révéler des insuffisances systémiques, l'efficacité d'AdD dans l'analyse ciblée des défauts, et l'apport d'une approche combinée pour renforcer la sécurité industrielle. Les résultats obtenus confirment la pertinence de cette démarche et ouvrent des perspectives concrètes pour l'amélioration continue des pratiques de prévention au sein des environnements industriels complexes.

## Les références bibliographie

- [1] Article 'STPA and BOWTIE risk analysis study for centralized and hierachical control an architectures comparison 20/10/2020 .Youcef Zennir.Chaima Bencacci,22p
- [2] Article Complex Safety study of intelliggent multi-robot navigation in risk environnement El-Arkam Mechhoud.Youcef zennir.chaima Bencacci,6p
- [3] DRI Manual AQS 683p.
- [4] Référentiel Évaluation des risques de SONATRACH/2019,35p ,(p12)
- [5] Standardization, International Organization for. ISO 45001:2018 - Occupational health and safety manag,30p(7-15)
- [6] Santé et Sécurité au Travail. Les différents concepts de prévention des risques professionnels .<https://www.officiel-prevention.fr> consulté le : 28/03/2025.
- [7] INRS. Les risques professionnels et leur prévention. [Online] 03 26, 2024. <https://www.inrs.fr/>. Consulté le :28/03/2025.
- [8] Officiel Prévention. Concepts de risque professionnel. Officiel Prévention. [Online] AVRIL 21, 2025. <http://www.officiel prevention.com/formation/fiches->.
- [9] AFNOR Certification. Chargé de Prévention des Risques professionnels. AFNOR Certification.[Online]21/04/2025<https://certification.afnor.org/certificationsdepersonnes/gestion-des-risques-sst/charge-prevention-risques-professionnels> consulté le 30/03/2025.
- [10] **ISO 13732-1** – Température de contact pour les surfaces chaudes.22p,(8p)
- [11] Red Hat. Enterprise open source and hybrid cloud technology. Red Hat. [En ligne] 12/05/2023. <https://www.redhat.com/> . consulté le 30/03/2025.
- [12] International Organization for Standardization. iso. 1999,18p,(6p)
- [13] BROWN. Risk analysis: An investment in engineering. Process Safety Progress. 1999, pp. 43-47.
- [14] BERRAR.A. Gestion des risques par l'analyse préliminaire au sein de complexe GL1/K-Sonatrach- Wilaya de Skikda. Université Badji Mokhtar - Annaba : Mémoire de master, 2017,120p ,(p78)

- [15] FUMEY.M. Méthode d'évaluation des risques agrégés : Application au choix des investissements de renouvellement d'installations. s.l. : Centre de Recherche Génie, 2001,150p,(33p)
- [16] Achouri, Nouhed. Apport de la logique floue à l'analyse de criticité des risques industriels. batna : Université El-Hadj Lakhdar, 2009,180p,(45p)
- [17] Public-Private Partnerships: Managing Risks and OpportunitiesOxfordBlackwell Science Ltd2003,250p(p102)
- [18] Mazouni, : Mohamed-Habib. Pour une meilleure approche du management des risques : de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision. s.l. : Institut National Polytechnique de Lorraine, 13 novembre 2008,200p,(88p)
- [19] Hassini, Brahim. Étude qualitative et quantitative des scénarios de défaillances de la pompe 2000D de l'entreprise CERTAF. s.l. : Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen, 2014 90p,(50p)
- [20] Therrien, S. Développement d'une méthodologie pour déterminer les objectifs de fiabilité des systèmes importants pour la sûreté d'une centrale nucléaire de type CANDU. Trois-Rivières : Université du Québec à Trois-Rivières, 2006,200p,(110p)
- [21] Ledoux, Chloé. Analyse de risques appliquée à la validation du nettoyage des équipements de fabrication de médicaments aérosols. s.l. Université de Rouen – UFR de Médecine et de Pharmacie, 2014,140p,(66p)
- [22] Collomp, R. Pilotage de la performance du circuit du médicament au travers du management des risques iatrogènes. paris : École des Mines de Paris, 2008,130p, (55p)
- [23] Abdelkarim, Serradj Benhadji Walid. Risque projet et méthodes de management des risques projet : quelle approche pour une contribution à une meilleure planification d'un projet de construction . batna : Université El-Hadj Lakhdar , 2014,100p,(72p)
- [24] Bourareche, M. Apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse semi-quantitative des risques industriels. batna : Université El Hadj Lakhdar, 2009,160p, (80p)
- [25] Kheloufi, D. et Medjdoub, J. Analyse de la sûreté de fonctionnement pour la maîtrise des risques de la chaudière de Tchîn-Lait. Bejaïa : Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2013,110p,(53p)

- [26] Gardes, L. Méthodologie d'analyse des dysfonctionnements des systèmes pour une meilleure maîtrise des risques industriels dans les PME : application au secteur du traitement de surface. 2001,140p,(61p)
- [27] Internationale, Commission Électrotechnique. Études de danger et d'exploitabilité (étude HAZOP) : Guide d'application. s.l. : CEI, 2001,80p,(20p)
- [28] ENERIS. outils d analyse des risques générés par une installation industrielle direction des risques accidentels. Mai 2003,60p,(15p)
- [29] NORME CEI 61882. etudes de danger et d expoloitabilite (etude HAZOP)-guide d application. 2001,90p,(25p)
- [30] Understanding Society (<https://undsoc.org/>) Daniel Little consulté le:11/04/2025
- [31] [https://www.gate.energy/the-brainery/stpa?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gate.energy/the-brainery/stpa?utm_source=chatgpt.com) consulté le:11/04/2025.
- [32] Nancy G. Leveson – Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety, MIT Press, 2012.Chapitre 6 : « STPA: The System-Theoretic Process Analysis »,500p,(200p)
- [33] ISO. Aspects liés à la sécurité : Principe directeur pour les inclure dans les normes, ISO/CEI/96/82. s.l. : ISO, 1999,55p,(21p)
- [34] Mazouni, M. Pour une meilleure approche du management des risques : De la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision. s.l. : L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2008,200p-(101p)
- [35] Berrar, A. Gestion des risques par l'analyse préliminaire au sein de complexe GL1/K-Sonatrach- Wilaya de Skikda. annaba : Université Badji Mokhtar- Annaba, 2017,120p,(90p)
- [36][https://www.researchgate.net/figure/Organizational-chart-of-the-STPA-analysis\\_fig1\\_357852571](https://www.researchgate.net/figure/Organizational-chart-of-the-STPA-analysis_fig1_357852571) consulté le :19/04/2025.
- [37] Site officiel : <https://aqs.dz/> consulté le 27/04/2025
- [38]Localisation de entreprise :<https://earth.google.com/web/> ,consulté le 30/04/2025.
- [39]Postiglione, G. (année 2006). Nouvelle alimentation pour les fours à arc à courant alternatif (Thèse). Institut National Polytechnique de Toulouse,170p,(p77)

[40] <https://www.mtb-recycling.fr/equipements-de-recyclage/ferraille/consulté> consulté le 03/05/2025.

[41]<https://www.beshaysteel.com/categories/direct-reduced-iron/> consulté le 03/05/2025

[42]<https://fr.kxgalloy.com/ferro-silicon/ferro-silicon-alloy-65-72-75-for-high-qu.html> consulté le 03/05/2025.

[43]AQS, 2017. Document Interne de l'entreprise AQS,40p,(p19)

[44]Documentation interne de l'entreprise,49p,(p14)

[45][http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/trait\\_thermic.-consulté](http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/metallurgie/trait_thermic.-consulté) le 05/05/2025.

[46][Les aciers dans la construction, Publication des grands ateliers, Mme MariamOlivier. Page 41, 44, 61 et 62. Octobre 2006,80p,(41,44,61,62p)

[47]Farhi, J. (10 Oct 1994). "Coulée Continue de Brame Minces." Dossier Techniques de l'Ingénieur, p. 6.8.

[48]Jean Saleil, Jean Le Coz, La coulée continue des aciers. Un exemple de développement technique où l'étroite coopération entre métallurgistes, constructeurs et exploitants ont été d'une grande fécondité Jean Saleil, Jean Le Coz ,35p

[49]GREDT M., LESSEL G., SIMON P. Laminage de ronds à béton Tempcore en bobines sur un train à fil moderne à grande vitesse // Revue de Métallurgie-CIT, 1987, N° 1, P. 25-31.

[50]Anouar Halloumi. Modélisation mécanique et thermique du procédé de laminage asymétrique. Autre Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011.Français. NNT : 2011EMSE0595 tel-00609219,220p,(p133)

[51]Rapport de contrôle de qualité de l'usine,10p.

[52]Manuel logistique de l'usine,60p,(p26)

[53] DRI Manual AQS,686p

[54]Handbook of IndustrialDrying", Arun S. Mujumdar,1232p,(614p)

[55]AIChE – Chemical Engineering Progress,98p,(42p)

- [56] ASM International – Metals Handbook Desk Edition, 1600p, (1175p)
- [57] Linde Gas – Applications industrielles de l’azote, 40p, (p17).
- [58] Air Liquide – Inertage des atmosphères industrielles, 35p (12p)
- [59] Habasit & Dunlop – Manuels techniques sur les bandes résistantes à la chaleur, 60p, (p28)
- [60] Dorner Conveyors – Fiches techniques pour le transport de produits chauds, 33p, (p11)
- [61] Praxair / Linde – Systèmes de couverture à l’azote, 25p, (p7)
- [62] Norme **IEC 61511** – Sécurité fonctionnelle des procédés industriels, 155p, (p98)
- [63] Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA), 124p, (p55).
- [64] Yokogawa – Analyseurs d’oxygène industriels, 42p, (p18).
- [65] MSA Safety – Systèmes de détection de gaz pour inertage, 48p, (p41).
- [66] <https://www.researchgate.net/>. consulté le : 16/05/2025.
- [67] Piping and instrumentation diagramme of the ALGERIEN QATAR STEEL., 12p, (p5)
- [68] "Introduction to Chemical Engineering Processes" by Howard L. Lieberman, 850p, (p303)
- [69] "Industrial Gas Handbook" by Carl L. Yaw, 650p, (p270).
- [70] ("Direct Reduction of Iron" by George E. Totten, 715p, (p249).
- [71] Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice" by A.K. Lahiri, 624p, (p198).

## **Tableau des matières:**

**Dédicace**

**Remerciements**

**Liste des tableaux.....I**

**Liste des figures.....II**

**Liste des abréviations.....III**

**Résumé.....IV**

**Introduction Générale..... 1**

**Chapitre 01:Généralités sur les risques professionnels**

**1.1 Introduction..... 4**

**1.2 Termes & définitions..... 4**

**1.3 Concepts de risque professionnel..... 5**

3.1. Le risque professionnel ..... 6

3.2. Classification des risques ..... 6

3.3. Les facteurs de risque professionnel..... 7

3.4. Les fiches de risques ..... 7

3.4.1. Risques de chute de plain-pied ..... 7

3.4.2. Risques de chute de hauteur ..... 7

3.4.3. Risques liés aux circulations internes de véhicules et d'engins ..... 8

3.4.4. Risques routiers en mission..... 8

3.4.5. Risques liés à la charge physique de travail..... 8

3.4.6. Risques liés à la manutention mécanique : ..... 8

3.4.7. Risques liés aux produits chimiques, aux émissions et aux déchets ..... 8

3.4.8. Risques liés aux agents biologiques ..... 8

3.4.9. Risques liés aux équipements de travail ..... 9

3.4.10. Risques liés aux effondrements et aux chutes d'objets..... 9

3.4.11. Risques et nuisances liés au bruit ..... 9

3.4.12. Risques liés aux ambiances thermiques ..... 9

3.4.13. Risques d'incendie et d'explosion ..... 9

3.4.14. Risques liés à l'électricité..... 10

3.4.15. Risques liés aux ambiances lumineuses ..... 10

3.4.16. Risques liés aux rayonnements.....	10
3.4.17. Risques psychosociaux .....	10
3.4.18. Risques liés aux vibrations.....	10
3.4.19. Risques de heurt, de cognement .....	11
3.4.20. Risques liés aux pratiques adductives.....	11
<b>1.4 Les différents types de risque à complexe métallique .....</b>	<b>11</b>
4.1. Risques liés au poste de travail fonderie .....	11
4.1.1 Les risques chimiques causés par les procédés de fonderie .....	11
4.1.2. Risques physiques.....	13
4.1.3 Risques d'incendie et d'explosion en fonderie .....	14
4.2. Risques liées au poste de travail rectifieur :.....	14
4.2.1 Les risques physiques .....	14
4.2.2 Les risques chimiques.....	15
<b>1.5 des risques professionnels liés au transport par convoyeur à chaud.....</b>	<b>15</b>
<b>1.6 Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre 2:Les méthodes d'analyse des risques</b>	
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 La gestion de risque.....</b>	<b>18</b>
2.1. Définition de gestion du risque.....	18
2.2. Gestion des risques dans l'entreprise .....	18
2.3. Processus de gestion de risques .....	19
2.4. Étapes de la gestion des risques.....	19
<b>2.3 Méthodes d`analyse du risque.....</b>	<b>21</b>
3.1. Classification des méthodes d`analyse de risque.....	21
3.1.1. Approche déterministe .....	21
3.1.2. Approche probabiliste .....	22
3.2. Les types des Méthodes d`analyse de risque.....	22
3.2.1. L`analyse Qualitative .....	22
3.2.2. L'analyse Semi- Quantitative : .....	23
3.2.3. L`analyse Quantitative :.....	23
3.3. Les méthodes d`analyse les risques :.....	23
3.3.1. Analyse Préliminaire de Risque - APR.....	24
3.3.2. Arbre de Défaillance .....	25

3.3.3. Arbre des Cause.....	25
3.3.4. Arbre d'évènements.....	26
3.3.5. Analyse des Modes Défaillance, de leurs Effets (AMDE) .....	26
3.3.6. Analyse des Modes Défaillance de Leurs Effets et de Leur Criticité (AMDEC)...	27
3.3.7. Hazard and Operability Study (HAZOP).....	28
3.3.8. Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR).....	29
<b>2.4 Evaluation du risque .....</b>	<b>33</b>
4.1. Méthodes d'évaluation des risques .....	33
4.2. Acceptation du risque .....	34
4.3. Réduction du risque .....	34
4.4. Critères de choix d'une méthode d'analyse de risque .....	34
<b>Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>Chapitre 03 : étude de cas</b>	
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Définition de l'Entreprise.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3 Position géographique .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Historique .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Les Objectifs d'entreprise .....</b>	<b>39</b>
<b>3.6 Les produits.....</b>	<b>39</b>
6.1. Fil Machine.....	39
6.2. Rond à Béton .....	40
6.3. Billette.....	40
6.4. Le CDRI.....	41
6.5. Chaux .....	41
<b>3.7 Les matières premières utilisées .....</b>	<b>42</b>
7.1. Les ferrailles (scrap) .....	42
7.2. Le pré réduit (DRI) .....	43
7.3. La fonte .....	43
7.4. Autre additifs .....	44
<b>3.8 Le processus l'entreprise.....</b>	<b>44</b>
8.1. Les unités principales.....	45
8.1.1. Unité de Réduction Directe (CDRI) .....	45
8.1.2. Usine de production d'acier avec deux aciéries électriques (SMS) .....	45

8.1.3. Laminoir (RMS) .....	46
8.2. Les installations complémentaires .....	46
8.2.1. Unité de séparation d'air (ASU).....	46
8.2.2. Unité traitement de chaux (Lime plant).....	47
8.2.3. Station de récupération et de transport des matières premières .....	47
8.2.4. Station générale de traitement des eaux (WTP) [1].....	48
8.2.5. Sous-station électrique (MRSS) .....	48
<b>3.9 La fabrication de l'acier .....</b>	<b>49</b>
9.1. Présentation générale du four à arc.....	50
9.2 Marche d'une opération dans le four électrique.....	51
9.2.1. Chargement du four (charging) .....	51
9.2.2. Fusion (melting) .....	53
9.2.3. Affinage (réfining).....	54
9.2.4. L'extraction des scories (déslaging).....	55
9.2.5. Coulée (tapping) .....	55
9.3. Affinage en poche .....	56
9.3.1. Four a poche .....	56
9.3.2. Désoxydation.....	56
9.3.3. Désoxydation complexe .....	57
9.3.4 Désulfuration .....	57
9.3.5. Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des acier .	58
9.4. Présentation du procédé de la coulée continue .....	58
9.4.1. Principe du fonctionnement de la machine de coulée continue .....	58
9.4.2. Défauts de coulée.....	60
9.5. Mise en forme de l'acier .....	60
9.5.1. Présentation du procédé .....	60
9.5.2. Laminage à froid et laminage à chaud .....	61
9.6. Contrôle de qualité.....	61
9.7. Emballage et expédition.....	62
<b>3.10 Convoyeur de transport à chaud .....</b>	<b>62</b>
10.1. Fonction du convoyeur.....	62
10.2. Applications industrielles .....	63
10.2.1. Exemples concrets .....	63

10.2.2 Avantages .....	63
10.2.3. Importance du convoyeur dans l'industrie.....	63
10.3. Composition du système .....	63
10.3.1. Utilisation de l'azote comme atmosphère inerte .....	64
10.3.2. Convoyeur résistant à la chaleur .....	64
10.3.3. Godets métalliques.....	65
10.3.4. Système Surveillance de l'oxygène et la pression .....	65
10.4. Système de protection (gaz inertes).....	67
10.4.1. Les processus précédant l'utilisation du convoyeur .....	67
<b>3.11 Conclusion .....</b>	<b>68</b>
<b>Chapitre 04: application de la méthode AdD et STPA</b>	
<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>70</b>
<b>Objectif de cette pratique .....</b>	<b>70</b>
<b>4.2 P&amp;ID utilisé dans l'application .....</b>	<b>71</b>
2.1 Analyse des sous-systèmes à partir du P&ID.....	71
<b>4.3 Application de la méthode STPA sur le système de transport convoyeur à chaud :</b>	
3.1. Les étapes de la méthode STPA .....	72
3.2. Application de la méthode STPA au système de transport à chaud (basée sur le P&ID fourni) .....	72
3.2.1. Contexte du système .....	72
3.2.2. Pertes inacceptables (Losses) .....	73
3.2.3. Hasards (états dangereux du système) .....	73
3.2.4. Définir la liaison entre le danger et les pertes .....	74
3.2.5. Diagramme de contrôle (Control Structure Diagramme) .....	76
3.2.6. Identification des Unsafe Control Actions (UCA) .....	76
3.2.7. Définir les contraintes du contrôleur .....	79
3.2.8. Les Scénarios causant .....	80
<b>4.4 Les étapes application de la méthode AdD sur le système de transport convoyeur ..</b>	<b>83</b>
<b>4.4 Application AdD sur P&amp;ID.....</b>	<b>83</b>
4.1 Bloc diagramme fonctionnel .....	84
4.3 Explosion du système de gaz de scellage du convoyeur à chaud .....	84
4.4 Incendie dans le système de gaz du convoyeur à chaud .....	90
4.5 Les recommandations intégrées STPA/AdD.....	94

**4.6 Conclusion ..... 92**

**Conclusion Générale ..... 96**

**Les bibliographies**

**Résumé**

## الملخص :

تهدف هذه المذكرة إلى المساهمة في تحسين منظومة الأمن الصناعي داخل المركب الجزائري-القطري للحديد والصلب ببلارة (ولاية جيجل). في ظل تعقيد الأنظمة الصناعية الحديثة، أظهرت أساليب تحليل المخاطر التقليدية محدوديتها. لذلك، تم اعتماد منهجية مزدوجة تعتمد على (STPA) (التحليل النظمي للعملية) AdD (شجرة تحليل الأعطال). تسمح STPA بالكشف عن المخاطر الناتجة عن التفاعلات البشرية والتنظيمية داخل النظام، بينما تركز AdD على تحديد الأعطال الفنية المحتملة. وقد مكّن تطبيق هذا النهج على وحدة حساسة من المركب (مثل وحدة الاختزال المباشر أو الدرفلة) من فهم أفضل لسيناريوهات المخاطر، واقتراح توصيات عملية لتعزيز السلامة والموثوقية داخل النظام المدروس.

**الكلمات المفتاحية:** الأمن الصناعي، STPA، AdD، شجرة تحليل الأعطال، تحليل المخاطر، صناعة الحديد والصلب، بلارة.

## Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la sécurité industrielle au sein du complexe sidérurgique algéro-qatarien de Bellara, situé dans la wilaya de Jijel. Face à la complexité croissante des systèmes industriels modernes, les méthodes classiques d'analyse des risques montrent leurs limites. Pour y remédier, nous avons adopté une approche combinée fondée sur la STPA (System-Theoretic Process Analysis) et l'AdD (Analyse des Défauts). La STPA permet d'identifier les défaillances issues des interactions système et humaines, tandis que l'AdD cible les défauts techniques potentiels. L'application de cette démarche sur une unité critique du complexe (ex. : réduction directe ou laminoir) a permis une meilleure compréhension des scénarios de risques et la formulation de recommandations concrètes pour renforcer la sécurité et la fiabilité du système étudié.

**Mots-clés :** sécurité industrielle, STPA, AdD, analyse des risques, sidérurgie, Bellara.

## Abstract:

This thesis focuses on improving industrial safety at the Algerian-Qatari steel complex of Bellara, located in the Jijel province. In the face of increasing system complexity, traditional risk analysis methods have shown significant limitations. To address this, we adopted a hybrid approach combining STPA (System-Theoretic Process Analysis) and AdD (Defect Analysis). STPA helps identify system and human-interaction-based failures, while AdD targets potential technical defects. Applying this integrated approach to a critical production unit (e.g., direct reduction or rolling mill) provided deeper insight into risk scenarios and led to concrete recommendations for enhancing system safety and reliability.

**Keywords:** industrial safety, STPA, AdD, risk analysis, steel industry, Bellara.