

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Spécialité : QHSE-GRI

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

**Proposition de mesures techniques pour la maîtrise des risques
majeurs au niveau de la station de réchauffement et
d'épuration du gaz combustible**

Cas : Centrale de production d'électricité de Hajret-Ennous

AMRI Mahdi Mohamed

Sous la direction de **A. BENMOKHTAR**

Présenté et soutenu publiquement le 18/06/2017

Composition du Jury :

Président	C. BOUTEKEDJIRET	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	A. BENMOKHTAR	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	M.T. ATTOUCHI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	M. HADDAG	EHS Manager	General Electric
Examineurs	F. LEGUEBEDJ	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	A. DJILI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département : Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux

Spécialité : QHSE-GRI

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

**Proposition de mesures techniques pour la maîtrise des risques
majeurs au niveau de la station de réchauffement et
d'épuration du gaz combustible**

Cas : Centrale de production d'électricité de Hajret-Ennous

AMRI Mahdi Mohamed

Sous la direction de **A. BENMOKHTAR**

Présenté et soutenu publiquement le 18/06/2017

Composition du Jury :

Président	C. BOUTEKEDJIRET	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique
Promoteurs	A. BENMOKHTAR	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	M.T. ATTOUCHI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	M. HADDAG	EHS Manager	General Electric
Examineurs	F. LEGUEBEDJ	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique
	A. DJILI	M.A.A	Ecole Nationale Polytechnique

ENP 2017

Dédicaces

En cette occasion, je profite pour dédier ce modeste travail :

*À mes parents qui m'ont toujours été une source de soutien et
d'encouragement ;*

À mes sœurs ;

À ma grand-mère « Yema » ;

À ma très chère tante « Houria » ;

À mes cousins et cousines ;

À tous mes amis et camarades que j'aime.

Mahdi

Remerciements

Pour commencer, Je veux adresser mes premiers remerciements au seigneur « ALLAH » tout puissant qui m'a fourni le courage et les capacités pour accomplir ce travail.

Mes sincères remerciements à mes encadreurs, Monsieur Amine Benmokhtar et Monsieur Tarek Attouchi pour leurs disponibilités, leurs suivis et leurs conseils prodigués tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de la filière QHSE-GRI qui nous a accompagné durant les trois années de notre formation à l'école nationale polytechnique.

Tous mes remerciements s'adressent à Monsieur Mounir Haddag, manager EHS à General Electric, pour son accompagnement et son soutien durant la réalisation de ce travail.

Je remercie également tous les employés de l'entreprise General Electric pour m'avoir fourni tous les outils nécessaires pour une bonne conduite de ce travail.

Un remerciement particulier à Madame K.WAFAA, Senior Project Management Staff Manager, pour m'avoir donné l'opportunité de faire un stage de fin d'étude au sein du grand groupe américain General Electric.

Enfin, j'adresse mes chaleureux remerciements et gratitude à tous mes amis, mes proches et tous ce qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

A toutes ces personnes, je présente mes sincère remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو اقتراح تدابير تقنية للسيطرة على المخاطر الرئيسية، خاصة الانفجار، المتعلقة بالغاز الطبيعي القابل للاحتراق على مستوى محطة تسخينه وتنقيته في محطة توليد الكهرباء لحجرة النوس.

تتألف هذه المذكرة من ثلاثة أجزاء رئيسية. الجزء الاول مكرس لسياق المشروع ، لبيان الاشكالية متنوعا بمنهجية حلها وللتعريف بشركة جنرال الكتريك. كما يخصص هذا الجزء لتفسير المنهجية العامة لإدارة المخاطر وظاهرة الانفجار، لعرض طرق تحليل المخاطر التي طبقتها و لدراسة النظام الذي عملنا عليه.

يخصص الجزء الثاني من هذا العمل لتطبيق الطرق النوعية لتحليل المخاطر بهدف استخراج الأحداث المروعة وتصور سيناريوهات الحوادث و لتطبيق الطرق الكمية من أجل تقدير ترددات حدوثها؛ و هذا الجزء مخصص ايضا لتقدير آثار الظواهر الخطرة من خلال المحاكاة العددية والتحليلية

ويتم تخصيص الجزء الأخير من المذكرة للحلول الهندسية التي نقترحها ، التي تقلل من أهمية المخاطر المرتبطة بالغاز الطبيعي و التي تسمح لنا بالوصول إلى هدفنا، الا وهو السيطرة على هذه المخاطر.

الكلمات المفتاحية: تحديد المخاطر، تحليل المخاطر، تقييم المخاطر، غاز الوقود، الانفجار، تقدير الآثار ، الحد من مخاطر

ABSTRACT

The main objective of this work is to propose technical measures to control the major risks, the explosion, related to the combustible natural gas manipulated in the heating and purification station in Hajret-Ennos power plant.

This report consists of three main parts. The first is devoted to the contextualization of our project, to the statement of the problem followed by the approach of its resolution and to the presentation of the company General Electric. This section is also devoted to the explanation of the generic approach of risk management and the phenomenon of explosion, to the presentation of the methods of risk analysis we have applied and to the study of the system we worked on.

The second part of the project is devoted to the application of qualitative risk analysis methods to extract the dreaded events and to visualize scenarios of accidents and quantitative methods to estimate the frequencies of occurrence; It is also devoted to the estimation of the effects of hazardous phenomena through numerical and analytical simulation.

The last part will be devoted to the proposal of engineering solutions which reduce the criticality of risks linked to natural gas and allow to reach our objective, mastery.

Keywords: Risk Identification, Risk Analysis, Risk Assessment, Combustible Gas, Explosion, Estimation of Effects, Risk Reduction.

RESUMÉ

L'objectif principale de ce travail est de proposer des mesures d'ordre technique dans le but de maîtriser les risques majeurs, notamment l'explosion, qui sont liés au gaz naturel combustible manipulé dans la station de réchauffement et d'épuration au sein de la centrale de production d'électricité de Hajret-Ennous.

Le présent mémoire est constitué de trois grandes parties. La première est consacrée à la mise en contexte de notre projet, à l'énoncé de la problématique suivi de la démarche de sa résolution et à la présentation de l'entreprise General Electric. Cette partie est dédiée également à l'explication de la démarche générique du management des risques et du phénomène d'explosion, à la présentation des méthodes d'analyse des risques appliquées ainsi qu'à l'étude de l'existant.

La deuxième partie du projet porte sur l'application des méthodes d'analyse des risques qualitatives pour extraire les événements redoutés et visualiser les scénarios d'accidents et quantitatives afin d'estimer les fréquences d'apparition ; elle porte également sur l'estimation des effets des phénomènes dangereux à travers une simulation numérique et analytique.

Quant à la dernière partie, elle sera consacrée à la proposition des solutions d'ingénierie afin de réduire la criticité des risques liés au gaz naturel et atteindre notre objectif, la maîtrise.

Mots clé : Identification des risques, Analyse des risques, Evaluation des risques, Gaz combustible, Explosion, Estimation des effets, Réduction des risques.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

Introduction	16
Chapitre 1 : Contexte, problématique et méthodologie	18
1.1 Contexte général	18
1.2 Présentation de GENERAL ELECTRIC	19
1.2.1 Business GE Power	20
1.2.2 GE Power Services	20
1.2.3 General Electric en Algérie	21
1.2.4 GE Power Services Algérie	22
1.3 Problématique	23
1.4 Méthodologie	25
Chapitre 2 : Concepts du risque et outils d'analyse	27
2.1 Généralités sur les risques	28
2.1.1 Définition et classification	28
2.1.2 Processus de management des risques	29
2.1.3 Concepts de sécurité	31
2.2 Phénomène d'explosion	32
2.2.1 Termes et définitions	32
2.2.2 Hexagone d'Explosion	33
2.2.3 Caractérisation d'une explosion de nuages Gazeux	33
2.2.4 Simulation des effets d'explosion	35
2.3 Outils d'analyse des risques	36
2.4 Classification	36
2.4.1 Méthodes quantitatives vs qualitatives	36
2.4.2 Méthodes déductives vs inductives	36
2.5 Analyse des modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC)	38
2.5.1 Présentation et domaine d'application	38
2.5.2 Principe	38
2.5.3 Déroulement	38
2.6 Hazard operability analysis (HAZOP)	39
2.6.1 Principe	39

2.6.2	Déroulement	40
2.7	Arbre de défaillances (AdD).....	41
2.7.1	Principe.....	41
2.7.2	Construction de l'AdD	41
2.8	Arbre d'évènement (AdE)	42
2.8.1	Présentation et Domaine d'Application	42
2.8.2	Déroulement	43
2.9	Méthode nœud papillon	44
Chapitre 3 : Etude de l'existant	47
3.1	Présentation de la centrale	47
3.1.1	Description générale.....	47
3.1.2	Caractéristiques et composition de la centrale	49
3.2	Description du système étudié.....	53
3.2.1	Filtres séparateurs à deux étages	54
3.2.2	L'échangeur à chaleur	54
3.2.3	Réchauffeur électrique	55
3.2.4	Epurateur de gaz.....	55
3.3	Positionnement du système	57
3.4	Analyse fonctionnelle	58
3.5	Étude de conformité.....	61
Chapitre 4 : Application des méthodes d'analyse des risques	64
4.1	Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC).....	64
4.2	Hazard operability analysis (HAZOP)	70
4.3	Arbre de défaillances	73
4.4	Arbre d'évènements.....	82
4.5	Méthode nœud papillon	88
4.6	Simulation des effets d'explosion.....	93
4.6.1	Description du modèle Baker-Strehlow	94
4.6.2	Application du Modèle Baker-Strehlow.....	96
4.6.3	Estimation des effets de l'onde de choc	99
4.7	Simulation des effets de feu de torche	103
Chapitre 5 : Moyens de réduction des risques	107
5.1	Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)	107
5.1.1	Méthodes pour déterminer le SIL.....	108

5.1.2	Détermination des SIL requis pour les SIS dans la station de réchauffement et d'épuration du gaz.....	110
5.1.3	Conception des SIS pour la station de réchauffement et d'épuration du gaz...	113
5.1.4	Vérification de la conformité des architectures par rapport au SIL requis	115
5.1.5	Analyse temporelle du premier SIS	118
5.1.6	Positionnement des SIS	122
5.1.7	Impact de la mise en place des SIS	123
5.2	Mur anti-souffle	126
5.2.1	Méthodes de calcul de la résistance des structures aux Actions accidentelles.	126
5.2.1.1	Méthode analytique	127
5.2.2	Détermination de l'épaisseur minimale requise pour le mur anti-souffle	128
5.2.3	Emplacement du Mur	130
	Conclusion	133
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	133
	ANNEXES	138
	Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle.....	140
	Annexe2 : Diagramme SADT.....	147
	Annexe 3 : Tableau AMDEC.....	151
	Annexe 4 : Grille AMDEC et Echelles de cotation.....	164
	Annexe 5 : Identification des nœuds choisis pour la HAZOP.....	166
	Annexe 6 : Tableau HAZOP.....	169
	Annexe 7: Synthèse de vérification de conformité par rapport aux prescriptions....	180

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Les différents business de General Electric.....	19
Figure 1-2 : Power services dans le monde (2016).....	21
Figure 1-3 : Activités exercées et les business présents en Algérie.....	21
Figure 1-4 : Démarche de résolution.....	26
Figure 2-1 : Modèle Standard du risque.....	28
Figure 2-2 : Processus de management des risques selon l'ISO 31000.....	29
Figure 2-3 : Exemple d'une grille de criticité.....	31
Figure 2-4 : Feuille d'analyse AMDEC.....	29
Figure 2-5 : Méthode de construction de l'arbre.....	44
Figure 2-6 : Exemple d'arbre d'évènements pour le scénario évitement d'obstacles sur l'autoroute	44
Figure 2-7 : Représentation de scénario d'accident selon le modèle du nœud papillon.....	45
Figure 3-1 : Plan de situation de centrale Electrique Hajret-Ennous.....	48
Figure 3-2 : Principe du Cycle Combiné.....	49
Figure 3-3 : Station de comptage et de détente principale du gaz.....	50
Figure 3-4 : Configuration de type à arbre unique.....	51
Figure 3-5 : Composants de la turbine à gaz.....	52
Figure 3-6 : Poste de transformation et de départ.....	52
Figure 3-7 : Poste d'épuration et de réchauffement du gaz.....	53
Figure 3-8 : Filtres séparateurs.....	54
Figure 3-9 : Echangeur à chaleur.....	55
Figure 3-10 : Réchauffeur électrique.....	55
Figure 3-11 : Epurateur de gaz combustible.....	56
Figure 3-12 : Représentation du système étudié.....	56
Figure 3-13 : Aménagement de la centrale électrique.....	58
Figure 3-14 : Modèle du diagramme (boite mère).....	59

Liste des figures

Figure 3-15 : Diagramme SADT plus détaillé.....	60
Figure 3-16 : Taux de conformité.....	61
Figure 3-17 : Vanne manuelle de réglage de pression (sortie échangeur).....	62
Figure 3-18 : Vanne manuelle à l'entrée à la station.....	62
Figure 4-1 : Répartition des conséquences provoquées par l'ensemble des modes de défaillances.....	69
Figure 4-2 : Proportions des différents niveaux de dérives.....	72
Figure 4-3 : Proportions des différents niveaux de dérives dans chaque nœud étudié.....	72
Figure 4-4 : AdD 1.....	74
Figure 4-5 : AdD 2.....	75
Figure 4-6 : AdD 3.....	76
Figure 4-7 : AdD 4.....	77
Figure 4-8 : AdE de la surpression dans le sous-système 1.....	83
Figure 4-9 : AdE de la surpression dans le sous-système 2.....	83
Figure 4-10 : AdE de la surpression dans le système 3.....	84
Figure 4-11 : AdE de la surpression dans le sous-système 4.....	84
Figure 4-12 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de filtration à deux étages.....	89
Figure 4-13 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de réchauffement à vapeur.....	90
Figure 4-14 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de réchauffement électrique.....	91
Figure 4-15 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système d'épuration de gaz.....	92
Figure 4-16 : Diagramme P_s en fonction de r	96
Figure 4-17 : Position de la bride de jonction en amont.....	97
Figure 4-18 : longueur de la conduite gaz depuis la station principale jusqu'au point de déviation.....	98
Figure 4-19 : Courbe de variation de la surpression P_s en fonction de la distance x	99
Figure 4-20 : Seuils des effets létaux et irréversibles pour les personnes (140 et 50 mbar)..	101

Liste des figures

Figure 4-21 : Seuils des dégâts très graves et des effets domino sur les structures (300 et 200 mbar).....	101
Figure 4-22 : Le coude dans la conduite gaz à l'entrée de la station de réchauffement et d'épuration.....	103
Figure 4-23 : Périmètres des différents niveaux d'intensité du flux thermique.....	105
Figure 4-24 : Position du coude par rapport aux chaudières auxiliaires.....	106
Figure 5-1 : Exemple de graphe des risques [22].....	110
Figure 5-2 : Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) pour le premier SIS.....	112
Figure 5-3 : Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) pour le deuxième SIS.....	112
Figure 5-4 : Structure générique d'un système instrumenté de sécurité	113
Figure 5-5 : Premier SIS.....	114
Figure 5-6 : Deuxième SIS.....	115
Figure 5-7 : Architecture du premier SIS.....	116
Figure 5-8 : Rapport de calculs pour le premier SIS.....	116
Figure 5-9 : Architecture du deuxième SIS.....	117
Figure 5-10 : Rapport de calculs pour le deuxième SIS.....	117
Figure 5-11 : Schéma fonctionnel du SIS 1.....	118
Figure 5-12 : Schéma fonctionnel introduit dans MATLAB.....	119
Figure 5-13 : Evolution de la réponse $x_s(t)$ en fonction du temps.....	120
Figure 5-14 : Positionnement des SIS (brides de jonction à l'entrée de la station et en amont de l'échangeur à chaleur).....	122
Figure 5-16 : Positionnement des SIS (brides de jonction en aval de l'échangeur à chaleur et de l'épurateur de gaz).....	123
Figure 5-17 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système 1.....	124
Figure 5-18 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système 2.....	124
Figure 5-19 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système 3.....	125
Figure 5-20 : Evolution de la contrainte appliquée sur la structure en fonction de la déformation.....	127
Figure 5-21 : Facteur DLF en fonction du rapport (t_L/T) pour un profil de surpression de forme triangulaire rectangle et triangulaire isocèle.....	128

Liste des figures

Figure 5-22 : Conception du mur anti-souffle proposé.....	130
Figure 5-23 : Positionnement du mur anti-souffle.....	131
Figure 5-24 : Configuration du mur anti-souffle proposé.....	131
Figure 5-25 : Position du mur anti souffle par rapport à la station de réchauffement et d'épuration (Vue d'en haut).....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Etendue des dommages pour la vie humaine en fonction des valeurs de surpression.....	34
Tableau 2-2 : Etendue des dommages pour les structures en fonction des valeurs de surpression.....	35
Tableau 2-3 : Finalité et Typologie de quelques méthodes d'analyse des risques.....	37
Tableau 2-4 : Exemple de tableau HAZOP.....	40
Tableau 2-5 : Syntaxe de l'arbre de défaillance.....	42
Tableau 2-6 : Exemple de tableau définissant les fonctions de sécurité.....	43
Tableau 2-7 : Définition des abréviations.....	45
Tableau 3-1 : Modèle de tableau utilisé.....	59
Tableau 4-1 : Hiérarchisation des modes de défaillances.....	66
Tableau 4-2 : Modes de défaillances provoquant la surpression.....	68
Tableau 4-3 : Modes de défaillances qui provoquent la formation du nuage gazeux.....	69
Tableau 4-4 : Découpage de la station de réchauffement et d'épuration du gaz.....	70
Tableau 4-5 : Paramètres choisis pour chaque composant.....	71
Tableau 4-6 : Classification des niveaux des dérives.....	71
Tableau 4-7 : Fréquences des événements de base dans le Sous-système 1.....	78
Tableau 4-8 : Fréquences des événements de base dans le Sous-système 2.....	79
Tableau 4-9 : Fréquences des événements de base dans le Sous-système 3.....	80
Tableau 4-10 : Fréquences des événements de base dans le Sous-système 4.....	80
Tableau 4-11 : Probabilités d'occurrence de la surpression dans chaque sous-système.....	81
Tableau 4-12 : Fonctions de sécurité.....	82
Tableau 4-13 : Fréquences de défaillance des équipements de sécurité.....	85
Tableau 4-14 : Probabilités d'occurrences des événements redoutés secondaires.....	87
Tableau 4-15 : Classes des taux d'occurrences.....	87
Tableau 4-16 : Identification des barrières de défenses.....	88

Liste des tableaux

Tableau 4-17 : Vitesse de la flamme exprimée en nombre de Mach M_j	95
Tableau 4-18 : Valeurs de surpression en fonction des distances.....	99
Tableau 4-19 : Seuils des différents niveaux de surpression.....	100
Tableau 4-20 : Effets de l'onde de choc sur les équipements avoisinants.....	102
Tableau 5-1 : SIL pour mode de fonctionnement à faible demande.....	108
Tableau 5-2 : Niveaux des facteurs.....	109
Tableau 5-3 : Endroits d'emplacement des SIS.....	122
Tableau 5-4 : Fréquences de défaillance des équipements de sécurité.....	124
Tableau 5-5 : Probabilités d'occurrences des évènements redoutés secondaires avant et après la mise en place du SIS 1.....	125

LISTE DES ABRÉVIATIONS

-	ARIA	Analyse, Recherche et Information sur les Accidents
-	GE	General Electric
-	EDD	Etude de dangers
-	SADT	Structures Analysis Design Technique
-	AMDEC	Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités
-	HAZOP	Hazard Operability
-	AdD	Arbres de défaillances
-	PHAST	Process Hazard Analysis Software Tool
-	ISO	International Organization for Standardization
-	REX	Retour d'expérience
-	APR	Analyse préliminaire des risques
-	SIS	Système instrumenté de sécurité
-	SIL	Safety integrity level
-	LII/E	Limite inférieure d'inflammabilité/d'explosivité
-	LSI/E	Limite supérieure d'inflammabilité/d'explosivité
-	TNT	Tri Nitro Toluène
-	AdE	Arbre d'évènements
-	VCE	Vapor Cloud Explosion
-	P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
-	Ein	Évènement Indésirable
-	EC	Évènement Courant
-	EI	Évènement Initiateur
-	ERC	Évènement Redouté Centrale
-	ERS	Évènement Redouté Secondaire
-	Ph D	Phénomène Dangereux
-	EM	Effet Majeur
-	SKH	Shariket Kahraba Hajret-Ennous
-	SPA	Société par actions
-	AEC	Algerian Energy Company
-	GN	Gaz Naturel
-	ATEX	Atmosphere Explosive
-	OREDA	Offshore and Onshore Reliability Data
-	SIF	Safety Instrumented Function
-	PFD _{avg}	Probability of Failure on Demand average
-	CEI	Commission Electrotechnique Internationale
-	PLC	Programmable Logic controller
-	INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
-	EHS	Environment Health and Safety
-	ER	Evènement Redouté

Introduction

Dans le monde d'aujourd'hui la population ne cesse de grandir, cela implique une augmentation de la demande en énergie, notamment l'énergie électrique. Notre pays l'Algérie fait partie des pays qui n'échappent pas à cette règle. En effet, à l'horizon 2018 selon les prévisions, la production d'électricité devra atteindre une puissance de 27000 MW, cela pour faire face aux besoins d'une population de 44 millions d'habitants.

C'est un challenge que les pouvoirs publics se sont donné et pour se faire, plusieurs partenariats ont été contractés avec des grands groupes internationaux tel que General Electric. Le secteur de production d'électricité occupe alors un volet assez important dans notre pays, le nombre de centrales électriques implantées ainsi que ceux qui sont en phase de projet en constituent la preuve tangible. Ce secteur est considéré comme faisant partie de l'industrie lourde dans laquelle plusieurs procédés et matières dangereuses sont mises en œuvre et qui présentent un risque potentiel pour les employés, pour l'installation ainsi que pour l'environnement avoisinant.

Donc sécuriser ce type d'installation est un enjeu majeur ; d'où l'indispensabilité d'une maîtrise et d'une bonne gestion des risques.

Pour mener une meilleure gestion des risques, plusieurs outils et méthodes systématiques peuvent être appliquées et qui permettent d'identifier, d'analyser et d'évaluer ces derniers présents sur les différents systèmes de l'installation en question. Cela en vue de mettre en place des barrières de défense performantes tant que techniques qu'organisationnelles dans le but de réduire la criticité de ces risques.

General Electric, une compagnie de dimension internationale et de renommé mondiale, est reconnue par un engagement volontariste en sécurité qui se concrétise par une politique dont les lignes directrices constituent le guide et une norme en la matière.

Ainsi, pour maintenir cette excellente réputation, GE se porte toujours garante d'offrir et d'installer à ses clients des machines et des systèmes d'une performance irréprochable et qui présentent un niveau de sécurité considérable quant à leurs exploitations sur le terrain.

La finalité de ce projet est d'analyser la performance sur le plan sécurité d'un système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible au niveau de la centrale électrique de Hajret-Ennous détenue par le client (SNC-LAVALIN). Ceci, par l'application des méthodes qui nous ont été enseignées. Nous pourrons alors proposer des solutions techniques afin de maîtriser le risque majeur d'explosion du gaz et donc contribuer étroitement à la mise à jour de la lettre de recommandations techniques (*Technical Information Letter*) spécifique à ce système.

Pour une bonne conduite du projet, notre travail est structuré de la manière suivante :

-Nous présentons dans un premier chapitre le contexte de notre projet, l'entreprise General Electric, la problématique ainsi que la méthode de sa résolution.

-Dans un deuxième chapitre intitulé « concepts du risque et outils d'analyses », nous traitons la notion du risque, du danger et de la sécurité ainsi que leurs concepts de base. Nous traitons également la démarche générique de gestion des risques ainsi qu'un aperçu sur le phénomène de l'explosion. Dans le même chapitre, nous abordons en détail les méthodes et outils d'analyse des risques. En effet, nous citons leurs critères de classification, leurs principes, leurs domaines d'application ainsi que les démarches de leurs mises en œuvre.

-Nous entamons ensuite dans un troisième chapitre une description de la centrale électrique de Hajret-Ennous ainsi qu'une étude complète du système qui fait l'objet de notre travail.

-Le chapitre quatre sera consacré à la présentation des résultats du processus d'application des méthodes d'analyse des risques. Il sera dédié également à la simulation des effets des phénomènes dangereux.

-Dans le dernier chapitre (chapitre 5), nous allons proposer des mesures d'ordre technique pour la réduction des risques dans le but d'éviter la concrétisation des phénomènes dangereux, notamment l'explosion, et leurs effets au niveau de la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible.

CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre est consacré à la présentation du contexte général de notre étude, dans le but de fixer la problématique et présenter la démarche de sa résolution.

1.1 Contexte général

Il s'avère que toute installation industrielle comprend plusieurs risques. Le secteur de production d'électricité est l'exemple parfait qui n'échappe pas à cette problématique. Cela en raison de la manipulation quotidienne de plusieurs matières dangereuses qui sont principalement le gaz naturel, le gasoil, l'huile de lubrification et l'hydrogène dont la dangerosité est liée surtout à leur inflammabilité. Selon l'historique des accidents majeurs connus, les deux phénomènes les plus dangereux liés à cette activité sont l'explosion et l'incendie.

A partir de la base de données ARIA [15], nous avons pu recenser sur une période de 12 ans (1990-2002) 19 accidents survenues de par le monde dans des centrales thermiques dont 37% sont des explosions liées au gaz naturel, 26% liées à la fuite d'hydrogène, 21 % d'explosions suivies d'incendies suite aux fuites d'huile de lubrification et 16 % d'explosions liées à d'autres substances manipulées dans cette industrie à l'instar du charbon et d'acide chlorhydrique. Sans oublier le risque d'incendie lié au gasoil qui est d'une probabilité relativement faible en raison du pouvoir calorifique élevé de cette substance.

De même, il a été répertorié pendant la décennie en cours des accidents notables tels que :

- L'explosion de gaz dans une centrale électrique en cours de mise au point (France-Morcenx - 30/10/2012) ;
- Fuite enflammée sur un gazoduc dans une centrale électrique (France- Blenod les Pont à Mousson- 18/12/2009) ;

Nous pouvons déduire alors que l'explosion du gaz naturel dans le secteur de production de l'énergie électrique est un accident d'une fréquence importante. C'est considéré comme un risque majeur dont les conséquences sont graves et dramatiques ; l'ampleur des pertes est extrêmement importante, qu'ils s'agissent de dégâts matériels ou des pertes humaines, sans oublier les fortes répercussions sur l'économie de l'entreprise. Il est crucial alors de mener des actions de maîtrise de ce risque. C'est ce qui fera l'objet de notre travail au sein de la centrale de production d'électricité à cycle combiné de Hajret-Ennous (SNC LAVALIN), client de GENERAL ELECTRIC (filiale Power Services), au niveau du système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible (*The Gas Fuel Consolidated Heating and Cleaning System*).

1.2 Présentation de GENERAL ELECTRIC

General Electric est un conglomérat Américain, il a été fondé en 1892 par la fusion de deux entreprises rivales qui sont Thomson-Houston Electric Company et d'Edison General Electric Company. Ce groupe est actuellement dirigée par le directeur générale Jeffrey Immelt. Son siège est basé à Fairfield aux Etats-Unis [13].

General Electric est un grand groupe diversifié organisé autour de 5 pôles d'activités :

- Prestations de services financiers destinées aux entreprises et aux particuliers (affacturation, crédit-bail, crédit à la consommation),
- Fabrication d'équipements d'infrastructures (moteurs d'avions, locomotives, turbines à gaz et à vapeurs, centrales électriques clé en main etc.),
- Fabrication de biens d'équipements domestiques et industriels (Appareils électroménagers, produits d'éclairage, équipements de contrôle de basse tension),
- Fabrication d'équipements médicaux (systèmes d'imagerie et navigation chirurgicale),
- Prestation de service de maintenances et de réparations avec la fourniture des pièces de rechange.

Avant de devenir leader mondiale, GE a réparti ses activités à travers 9 business (filiales) qui mènent leurs activités dans différents domaines et qui ont souvent été stratégiquement modifiées afin de pérenniser l'entreprise.

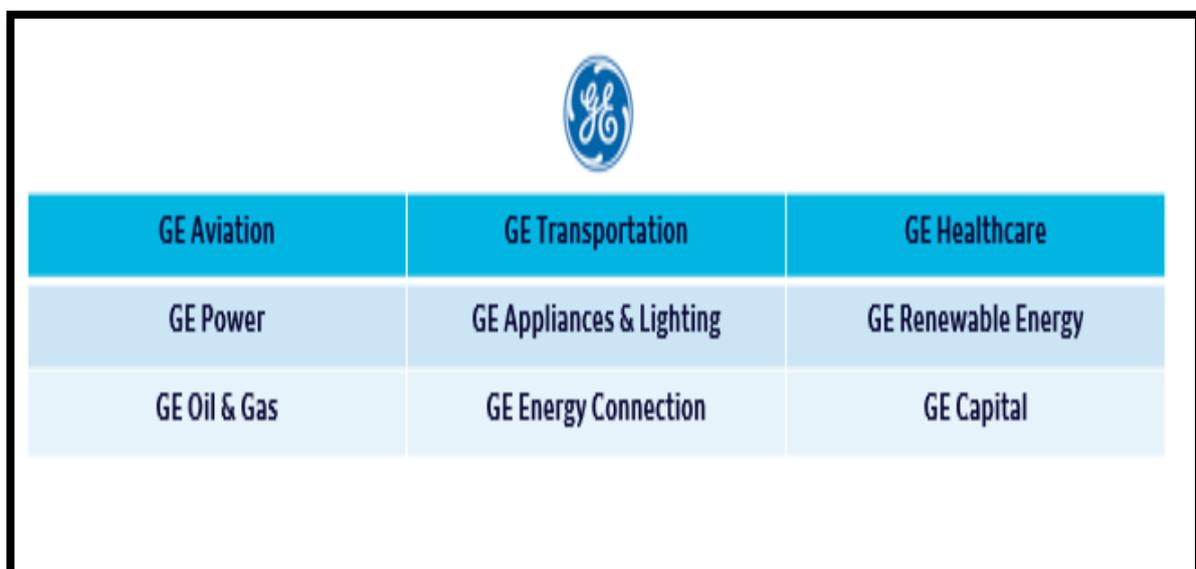


Figure 1-1 : Les différents business de General Electric.

1.2.1 Business GE Power

GE Power est un leader mondial dans les technologies de production d'électricité et d'exploitation d'eau pour les producteurs indépendants, les services publics ainsi que les applications industrielles. Elle possède plus 120 000 d'employés dans 120 pays à travers le monde. Son siège est situé à Baden en Suisse. GE Power se divise en six sous-businesses : Gas Power Systems, Steam Power Systems, Distributed Power, GE Hitachi Nuclear Energy, Water & Process Technology et Power Services.

- **Gas Power Systems** : Spécialisée dans la fourniture des centrales électriques à cycle simple et à cycle combiné avec des turbines à gaz de 20 à 520 MW, des turbines à vapeur de 80 à 700 MW et des générateurs.
- **Steam Power Systems** : Steam Power Systems offre des chaudières pour tous les combustibles, une large gamme de générateurs et des turbines à vapeur. Elle offre également des systèmes de contrôle de la qualité de l'air ainsi que des solutions pour les centrales nucléaires.
- **Distributed Power** : Distributed Power est un fournisseur de moteurs, d'équipement et de service de génération d'électricité. Ce business se focalise sur la production d'électricité à proximité du point d'utilisation.
- **GE Hitachi Nuclear Energy** : C'est une joint-venture entre les deux entreprises GE et Hitachi, elle est détenue majoritairement par General Electric. GEH est un leader mondial dans la fourniture des réacteurs avancés, des combustibles nucléaires et les services connexes.
- **Water & Process Technology** : C'est un business qui fournit des équipements qui assurent l'amélioration des processus d'exploitation des eaux (dessalement, purification, procédés membranaires, etc..) en utilisant des technologies avancées.

1.2.2 GE Power Services

Power Services est la plus grande entreprise de services industriels GE. Ce business mène ses activités dans 7 régions à travers le monde : (China, Europe, Middle East & Africa, Asia, North America, Latin America and India). Avec environ 26 000 employés dans plus de 150 pays et plus de 130 ans de connaissances et d'expertise dans la réparation, dans l'entretien ainsi que dans l'inspection des équipements de production d'électricité. Ainsi une expertise globale de la flotte et de vastes données opérationnelles pour personnaliser des solutions autour de : planification et installations, maintenance (préventive et curative), performance à long terme et optimisation. Ces solutions technologiques de services avancés apportent une valeur qui est un cycle de vie de pointe pour les turbines à gaz, les turbines à vapeur, les alternateurs et pour toutes opérations plus larges de la centrale. La plus grande entreprise de services industriels GE fait tourner la connaissance en puissance, optimise la performance, gère le coût total du cycle de vie des composants de la centrale électrique et réduit les risques.



Figure 1-2 : Power Services dans le Monde (2016).

1.2.3 General Electric en Algérie

Le groupe GE est présent depuis 40 ans en Algérie, en effet il mène ses activités en partenariat ou sous contrats avec les sociétés algériennes dans les différentes branches d'activités. Nous montrons ci-dessous les différentes filiales de GE ainsi leurs partenaires et clients et les types de services et produits offerts.



Figure 1-3 : Activités exercées et les business présents en Algérie.

1.2.4 GE Power Services Algérie

Power Services Middle East & Africa regroupe les pays du moyen orient, ainsi que les pays africains tels que l'Algérie, le Maroc, la Tunisie, l'Égypte, le Nigéria, La côte d'ivoire et l'Afrique du sud. Son siège principal est situé à Dubaï.

En Algérie, Power Services offre à ses clients quatre types de services :

- Fourniture des pièces de rechanges destinées à l'entretien des équipements des centrales électriques ;
- La maintenance des turbines à gaz et à vapeurs ;
- Du savoir-faire sous forme d'ingénieurs (Field-services) ainsi que des recommandations techniques pour améliorer le processus et les performances.

Ses clients potentiels sont Sonelgaz et SNC-LAVALIN. Les offres de services sont présentées sous forme de trois types de contrats :

-Multi -Year Maintenance Program (MMP) :

Ce type de contrat est un engagement à long-terme. Il permet au client de gérer sereinement la maintenance de sa centrale en maîtrisant les coûts et la planification. Pour résumer, un MMP est structuré de la manière suivante :

- General Electric fournit Les pièces de rechange, les services de réparations ainsi que les prestations de service sur le terrain.
- Le client bénéficie d'une garantie des prix, les délais de livraison des pièces et la disponibilité du personnel GE.

-Contractual Services Agreements (CSA) :

Ce type de contrat couvre les maintenances planifiées et les pièces recommandées par GE et ouvre l'accès à une multitude de ressources de General Electric pendant une durée de 20 ans, y compris les technologies les plus avancées dans l'ensemble.

-Contrat Transactionnel (Transacitonal contract, TX) :

Les contrats transactionnels sont des marchés de pièces de rechange et de prestations de maintenance ponctuels qui se déroulent généralement en une seule opération et en un temps court et défini. Ces marchés sont décrochés suite à l'émission d'un besoin par le client à travers un appel d'offre public.

1.3 Problématique

Avant de construire la centrale électrique de Hajret-Ennous, une étude de dangers (EDD) a été préalablement réalisée par l'exploitant SNC LAVALIN (Entreprise Canadienne) en Avril 2006.

Selon l'EDD, le phénomène d'explosion est susceptible de se produire dans différentes parties de l'installation :

- ✓ Le gaz naturel (station de détente principale, conduites, turbines à gaz (skid-gaz), chaudières de récupération, chaudières auxiliaires) avec une consommation annuelle de 2.000.000 m³ (pas d'entreposage) ;
- ✓ L'hydrogène (générateur, lieu d'entreposage (162 Kg)) ;
- ✓ Gasoil (bacs 2x16000 m³, bac de récupération 18 m³) ;
- ✓ Huile hydraulique pour l'actionnement des vannes, huile de scellement dans les générateurs, huile de lubrification des rotors des turbines et huile de refroidissement des transformateurs.

Nous avons exploité cette EDD et nous pouvons déduire que le premier événement redouté pris en considération lors de l'élaboration des scénarios d'accidents majeurs est **la perte de confinement** d'une substance inflammable, ce qui peut conduire à des événements tels des feux de torches ou des explosions dans des milieux confinés ou congestionnés. Le second événement redouté est **l'ignition accidentelle** de vapeur ou de gaz dans un équipement.

Une évaluation semi-quantitative faite dans l'étude a permis d'hierarchiser les risques liés à divers scénarios d'accidents et de les comparer à des niveaux d'acceptabilité à l'aide d'une grille de criticité.

En tenant compte uniquement de la gravité, l'analyse a indiqué que les scénarios d'accidents liés au gaz naturel combustible **les plus graves** sont :

- Explosion de gaz ou de vapeurs inflammables dans une chaudière de récupération, dans l'enceinte d'une turbine et dans la chaudière auxiliaire ;
- Boilover (explosion par vaporisation) d'un réservoir de gasoil suite à un incendie ;
- Fuite de gaz naturel suivie d'un feu de torche, d'un feu éclair ou d'une explosion dans un milieu partiellement confiné ou congestionné ;
- Fuite d'hydrogène suivie d'une explosion.

Il ressort également de l'analyse que les scénarios ayant les probabilités d'occurrence les plus élevées sont :

- Accumulation de gaz dans une chaudière de récupération, suivie d'une explosion ;
- Accumulation de gaz dans l'enveloppe d'une turbine suivie d'une explosion ;
- Accumulation de gaz ou de vapeur dans la chaudière auxiliaire suivie d'une explosion ;
- Déversement des huiles à partir des réservoirs, pompes ou conduites suivi d'une explosion ou d'un incendie ;
- Déversement des huiles de transformateur suivi d'une explosion ou un incendie.

À partir de cela, nous déduisons que le risque d'explosion le plus critique est lié au gaz naturel à travers sa présence répartie sur l'ensemble de l'installation. C'est la raison pour laquelle notre choix pour le projet s'est porté sur cette matière dangereuse.

Le système qui fera l'objet de notre travail est le poste de réchauffement et d'épuration du gaz combustible (*The Gas Fuel Consolidated Heating and cleaning System*). Il est à rappeler que la centrale électrique est composée de trois tranches de production identiques dans leurs conceptions, chacune comporte le même système cité ci-dessus.

Nous avons choisi de travailler sur le système de la tranche 2, cela en raison de sa proximité de plusieurs éléments importants et vulnérables, à savoir :

- La salle de contrôle qui régit l'ensemble des trois tranches ;
- Les chaudières auxiliaires de production de vapeur au nombre de trois ;
- Le bac à fuel de recirculation d'une capacité de 18 m³ ;
- Le système de pompage doté de pipes qui desservent les turbines en fuel en cas de nécessité.

De plus, ce système n'a pas été pris en considération lors de l'élaboration de l'EDD.

Il est à préciser que pour la sécurité, le contrôle de pression et de température du gaz combustible est d'une importance capitale. En effet, pendant le cheminement du gaz à travers tous les éléments du système, la pression de ce dernier doit être maintenue constante (34 bar) avant de l'envoyer à la turbine à gaz. Faute de quoi il y a risque de variation de ce paramètre dont la surpression peut engendrer une fuite pouvant aller jusqu'à la rupture des pipes, cela peut être suivie d'une explosion avec effet domino sur les autres éléments vu leurs proximités les uns et les autres, et les conséquences peuvent être désastreuses.

Les questions qui découlent alors de cette problématique sont :

- ✓ Par quels moyens la pression du gaz combustible est-elle maintenue constante ?
- ✓ Est-ce que les équipements qui constituent le système sur lequel nous allons travailler sont conformes aux exigences prescrites par GE ?
- ✓ Quels sont les défaillances qui peuvent entraîner la variation de la pression ?

- ✓ Est-ce que la surpression peut être considéré comme un évènement redouté central et quels sont les scénarios possibles pour en aboutir ?
- ✓ Quels sont les dispositifs de sécurité mis en place ? Sont-ils suffisants ?
- ✓ Quels sont les différents phénomènes dangereux et l'étendue de leurs effets que nous pouvons avoir en cas de perte de confinement ?
- ✓ Quels sont alors les différentes méthodes d'analyse des risques qui seront capable de répondre à toutes nos questions ?

1.4 Méthodologie

Dans le but de répondre à la problématique posée, nous avons choisi d'adopter la démarche de résolution suivante :

-Étape 1 : Description de la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible.

Nous allons tout d'abord faire une étude complète du système afin de bien comprendre sa composition et son fonctionnement ; cette étape comprend :

- ✓ Une description détaillée des composants de la station de réchauffement et d'épuration du gaz ;
- ✓ Positionnement de ce système par rapport aux autres équipements qui composent la centrale électrique ;
- ✓ Une analyse fonctionnelle qui consiste en une décomposition de la station en différents systèmes et sous-systèmes avec tous leurs équipements, ainsi que les éléments d'entrée et de sortie. Ensuite, pour une compréhension complète, nous continuerons notre analyse par l'application d'une démarche hiérarchique appelée méthode SADT « *Structured analysis Design Technique* » ;
- ✓ Une étude de conformité de la station par rapport aux exigences prescrites par General Electric.

-Étape 2 : Appréciation des risques.

Cette étape constitue le cœur de notre travail. Elle comprend l'application des différentes méthodes d'analyse des risques dans le but d'extraire tous les scénarios possibles qui conduisent aux accidents majeurs ainsi de calculer les probabilités d'occurrences. Pour atteindre cet objectif nous allons appliquer les méthodes suivantes :

- ✓ Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC) :
-Détermination et hiérarchisation des conséquences des modes de défaillances des composants de chaque sous-système qui compose la station de réchauffement et d'épuration de gaz ;
- ✓ Hazard Operability (HAZOP) : Extraction des événements (conséquences) engendrés par les dérives des paramètres liés à l'exploitation de l'installation étudiée ;

- ✓ Arbre de défaillances (AdD) : Détermination des combinaisons des causes qui provoquent la survenance d'un évènement redouté et calcul de la probabilité d'occurrence ;
- ✓ Arbre des évènements (AdE) : visualisation de la succession d'évènements redoutés secondaires provoqués par un évènement redouté central et calculer ensuite leurs probabilités d'occurrence ;
- ✓ Nœud Papillon : Schématisations des scénarios d'accidents depuis les évènements basiques jusqu'aux phénomènes dangereux et aux effets majeurs.

-Étape 3 : Simulation des effets des phénomènes dangereux.

Nous allons simuler les phénomènes dangereux dans le but d'estimer l'étendue de leurs effets tant sur les équipements que sur la population présente au sein de la centrale électrique de Hajret-Ennous, par l'application des modèles enseignés et à l'aide du logiciel PHAST.

-Étape 4 : Réduction des risques : Proposition des mesures techniques.

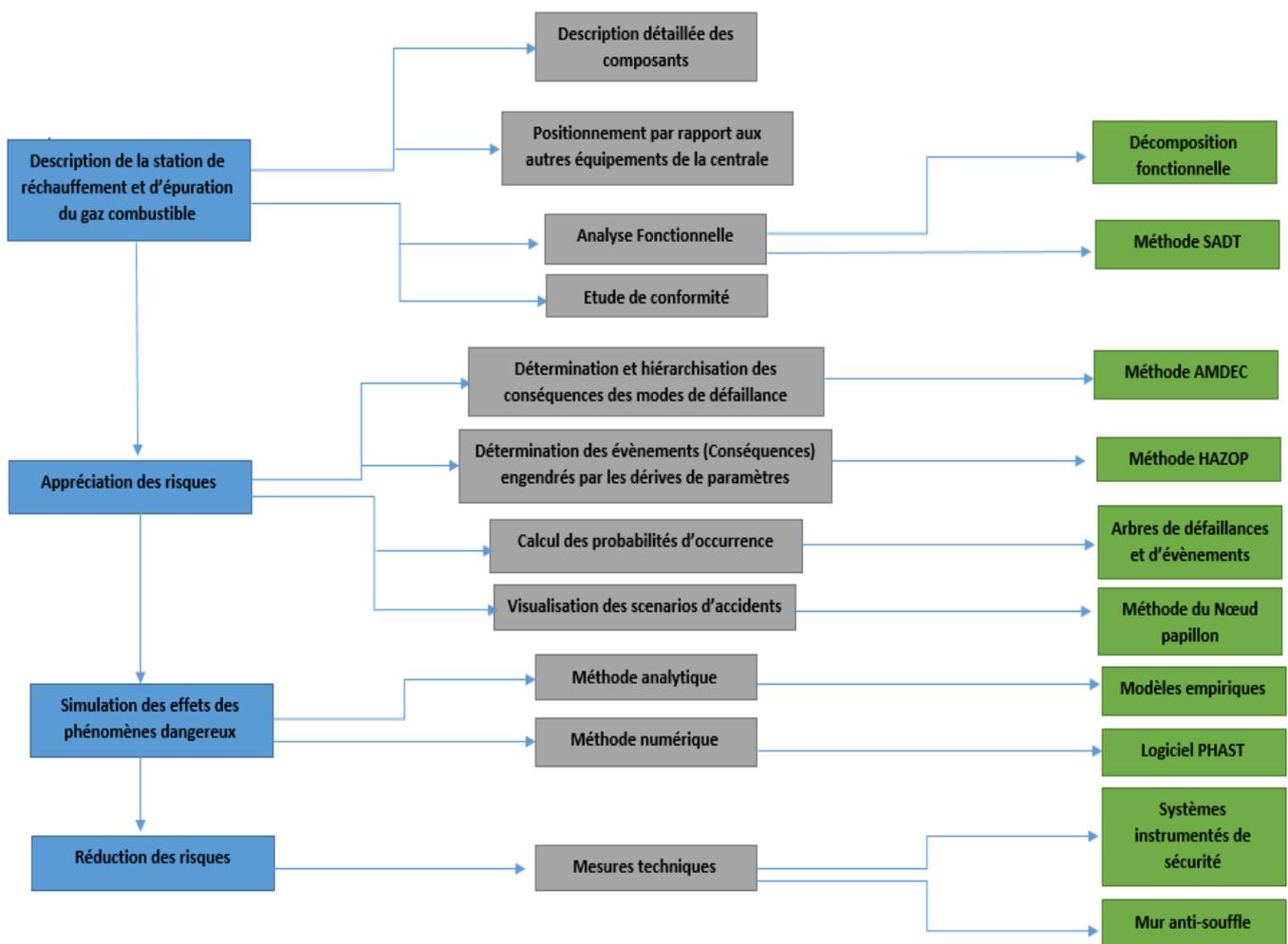


Figure 1-4 : Démarche de résolution.

CONCEPTS DU RISQUE ET OUTILS D'ANALYSE

Toute activité humaine comporte une part de risque et d'incertitude. La sécurité est parmi les problèmes épineux auxquels les pays industrialisés font face. Cela, en raison de la mise en œuvre des systèmes de production complexes, des modes opératoires et des substances toxiques, inflammables et explosives qui sont souvent une source de danger et un potentiel à risques qui peuvent se traduire en catastrophes si leur gestion ne fait pas partie des préoccupations des entreprises. Des catastrophes qui engendrent des pertes humaines, matériels et financières qui coûtent à l'entité sa réputation et sa confiance auprès de ses clients et de ses riverains.

Le management des risques a pour objectif principal d'avoir de bons résultats en matière de sécurité et de refléter la qualité de l'organisation de l'entreprise. Cela ne peut être que le fruit d'un engagement volontaire qui vise à maîtriser l'ensemble des risques.

Pour une meilleure vulgarisation du contexte de management des risques, nous allons présenter dans ce chapitre d'abord les concepts de base liés au risque et au danger, ensuite nous expliquerons la démarche générique de la gestion des risques tout en étant encadrés par la norme ISO 31000 : 2009 (Principes et lignes directrices du management des risques). Ensuite, nous aborderons la notion et les concepts de la sécurité, nous finirons notre chapitre par une description du phénomène d'explosion et une présentation des outils d'analyse des risques.

2.1 Généralités sur les risques

2.1.1 Définition et classification

Le risque peut prendre plusieurs définitions et sa notion peut être considérée différemment selon les cas.

Selon le dictionnaire Larousse : « Possibilité, probabilité d'un fait, d'un événement considéré comme un mal ou un dommage. Danger, inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé ». **Bernard BARTHÉLÉMY** et **Jacques QUIBEL** définissent le risque comme suit : « Un risque est un événement dont l'occurrence est incertaine et dont la réalisation affecte les objectifs de l'entreprise qui le subit. Certains risques peuvent avoir des effets positifs, ce sont ceux que l'entreprise recherche. D'autres risques ont certainement des effets négatifs, ce sont ceux que l'entreprise craint » [16].

Cependant, il existe une autre définition plus pertinente. Le risque est la possibilité de survenance d'un dommage résultant d'une **exposition** à un **danger**. C'est la composante de deux paramètres : la « **gravité** » et la « **probabilité** ». Plus la gravité et la probabilité d'un événement sont élevées, plus le risque est important. [17].

A partir de cela, Nous déduisons que le risque est la combinaison de deux paramètres, la probabilité et la gravité, et pour qu'il y ait un risque il est impératif d'avoir un danger (*une propriété intrinsèque d'une substance, d'un équipement, d'une situation ou d'un système à causer des dommages aux personnes, aux biens ou à l'environnement* [18]) et une cible ou un élément vulnérable exposé à ce danger. Une situation qui se caractérise par la présence simultanée d'un danger et d'une cible est considérée comme une situation dangereuse et dans laquelle un événement redouté menace de se produire et de causer des dommages conséquents.

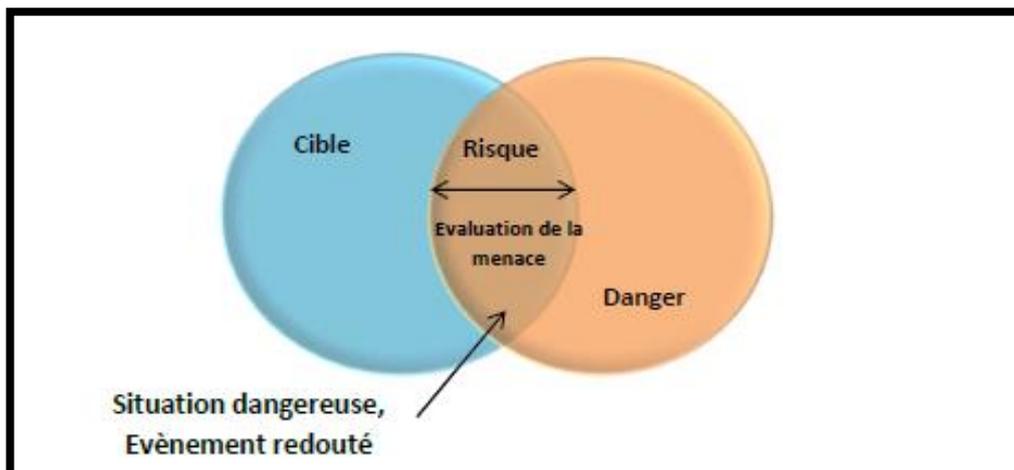


Figure 2-1 : Modèle Standard du Risque.

Les risques liés à l'activité humaine, plus précisément dans le domaine de l'industrie, peuvent se diviser en deux principales catégories :

❖ **Les Risques professionnels**

Ils se définissent comme étant l'ensemble des risques auxquels des employés sont exposés dans le cadre de l'exercice de leurs fonctions. Ces risques peuvent se transformer en accidents de travail ou en maladies professionnelles, c'est la raison pour laquelle cette catégorie de risque fait l'objet de préoccupations des différents acteurs de la santé et de la sécurité au travail [2].

❖ **Les risques majeurs**

Dans le monde de l'industrie, il existe trois types de risques majeurs :

- ✓ L'explosion ;
- ✓ L'incendie ;
- ✓ Emanation importante d'une substance dangereuse dans l'environnement externe.

Ils se caractérisent par une faible probabilité d'occurrence, mais leur gravité est extrêmement importante. En effet, les conséquences d'une explosion par exemple sont considérables en termes de nombre de victimes, de dégâts matériels et d'impacts sur l'environnement, sans oublier les pertes financières [2].

2.1.2 Processus de management des risques

Comme précisé ci-dessus, concernant la définition du processus de management des risques, nous nous référons à la norme ISO 31000 version 2009 qui fournit des principes, un cadre et des lignes directrices pour gérer toutes formes de risques.

Selon la norme ISO 31000, le processus de management des risques comprend cinq activités qui sont hiérarchisées dans la figure 2-2.

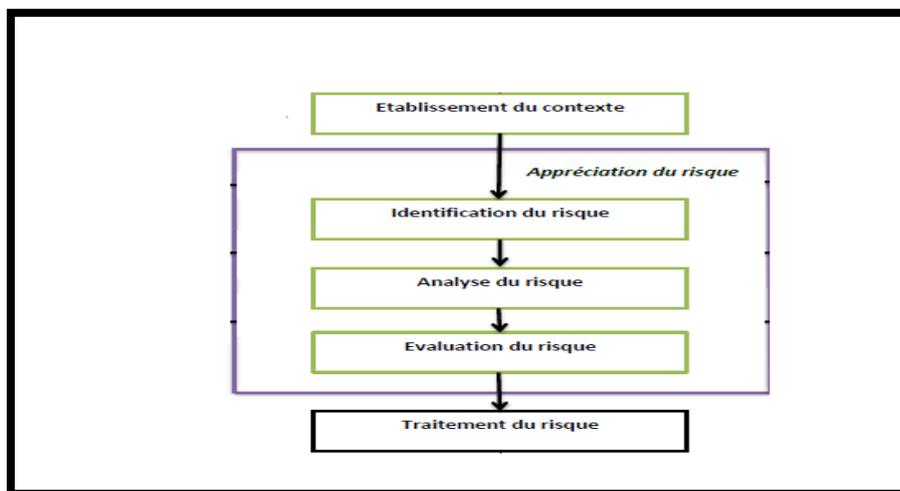


Figure 2-2 : Processus de management des risques selon l'ISO 31000 [1].

2.1.2.1 Etablissement du contexte

Cette étape consiste à déterminer l'environnement externe, afin de s'assurer que les objectifs et les préoccupations des parties externes sont pris en considération lors de l'élaboration des **critères des risques**. Elle consiste également à bien comprendre tout ce qui, au sein d'un organisme, peut influencer la manière dont il gère les risques (la gouvernance, l'organisation, la politique...).

✓ Définition des critères des risques

La définition des critères est obligatoire si l'organisme souhaite évaluer l'importance des risques. Pour cela, la norme recommande de tenir compte des facteurs suivants :

- La méthode de définition de la vraisemblance (probabilité) ;
- L'échelle de la vraisemblance et/ou de la (des) conséquence(s) ;
- La méthode de détermination du niveau des risques ;
- Le niveau à partir duquel le risque devient acceptable ;
- La prise en compte ou non des combinaisons de plusieurs risques.

2.1.2.2 Appréciation des risques

Comme indiqué sur le schéma de la figure 2-2, l'étape d'appréciation est un processus qui englobe l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques. Ces actions sont mises en application d'une manière hiérarchique.

✓ Identification des risques

Il s'agit d'identifier les sources des risques, les cibles ou domaines d'impact, les événements, ainsi que leurs causes et leurs conséquences potentielles.

Le recensement de ces risques peut se faire en utilisant des méthodes spécialisées (analyse préliminaire des risques (APR) par exemple).

✓ Analyse des risques

Analyser les risques consiste à déterminer leurs attributs dont la combinaison constitue ce qu'on appelle la criticité, il s'agit des conséquences et des vraisemblances (probabilité d'occurrence). Il convient aussi de prendre en compte les moyens de maîtrise des risques existants, leurs efficacités et leurs performances.

Pour une meilleure expression des deux attributs (conséquences et probabilités), il est préférable d'établir des échelles de gravité et de probabilité qui sont présentés dans ce qu'on appelle une grille de criticité.

Gravité \ Probabilité	Mineure	Significative	Grave	Très grave
Fréquent	acceptable sous conditions		inacceptable	
Peu fréquent			inacceptable	
Rare	acceptable			
Très rare				

Figure 2-3 : Exemple d'une grille de criticité.

✓ Evaluation des risques

Après avoir analysé les risques, on procède maintenant à leurs évaluations. Cette étape consiste à comparer leurs niveaux aux critères établis lors de l'établissement du contexte, ensuite décider s'ils nécessitent un traitement et établir un ordre de priorité dans la mise en œuvre des actions correctives.

2.1.2.3 Traitement des risques

Une fois l'évaluation est terminée, on procède au traitement des risques. Ce traitement implique le choix et la mise en œuvre d'une ou de plusieurs options dans le but de réduire les risques à un niveau acceptable. Ces options peuvent inclure l'élimination de la source du risque, l'élimination de l'élément vulnérable, la réduction de la probabilité en mettant en œuvre des actions de prévention ou la réduction de la gravité par des actions de protection.

2.1.3 Concepts de sécurité

La sécurité se définit comme étant la situation à laquelle tous les risques sont en dessous de la limite d'acceptabilité. Donc elle se caractérise par l'absence totale des risques non tolérés. A l'échelle de l'industrie, la sécurité est l'aptitude d'une entité à ne pas causer de dommages ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [9].

✓ Sécurité fonctionnelle

Selon la norme CEI 61508, c'est le sous-ensemble de la sécurité globale, relatif aux équipements et aux systèmes de contrôle-commande associés, qui dépend du fonctionnement correct de systèmes électriques, électroniques, électroniques programmables (E/E/EP) liés à la sécurité. Exemple : Système d'auto déclenchement ou bien un système de signalisation d'un réseau électrique interconnecté [4].

✓ **Fonction de sécurité**

Fonction devant être implémentée dans un système E/E/EP concerné par la sécurité dont le but est d'atteindre ou de maintenir un état sûr des équipements contrôlés, dans le cadre d'un événement dangereux particulier [4].

✓ **Système Instrumenté de sécurité (SIS)**

« C'est un système E/E/PE relatif aux applications de la sécurité, il comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité », [CEI 61508].

✓ **Intégrité de sécurité**

C'est la Probabilité qu'un système concerné par la sécurité exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et dans une période de temps donnée [4].

✓ **Niveau d'intégrité de sécurité (SIL : *Safety Integrity Level*)**

C'est un niveau discret parmi quatre niveaux possibles pour la spécification des exigences des fonctions de sécurité à assigner aux systèmes concernés par la sécurité [4] :

- 4 Le plus élevé.
- 1 Le plus bas.

Le concept **SIL** s'applique donc au système concerné par la sécurité dans son intégralité et pas uniquement à un sous-ensemble (par exemple un capteur).

2.2 Phénomène d'explosion

Les explosions dans les installations industrielles sont souvent spectaculaires et dramatiques. Ces phénomènes peuvent conduire à des pertes en vies humaines et à des dégâts matériels extrêmement importants. Dans cette partie du chapitre, nous présentons les notions fondamentales ainsi que les caractéristiques de l'explosion et les méthodes de simulation de ses effets.

2.2.1 Termes et définitions

- **Explosion** : Une explosion est définie comme un processus dans lequel la combustion d'un nuage de gaz ou de vapeur inflammable pré-mélangé (combustible-air ou combustible-comburant) provoque une augmentation rapide de la pression [10]. Les explosions sont classifiées selon l'environnement dans lequel elles ont lieu :
 - ✓ **Explosion en milieu confiné** : Réservoirs, pipes, canaux ou tunnels.

- ✓ **Explosion en milieu semi-confiné** : C'est une explosion dans les compartiments, les bâtiments ou les modules offshore.
- ✓ **Explosion en milieu non-confiné** : C'est le cas des explosions dans les installations à l'air libre.
- **Onde de choc** : Le terme onde de choc est utilisé pour décrire la surpression créée lors d'une explosion à partir d'une expansion rapide des gaz produits. Elle se propage à vitesse supersonique, elle est considérée comme la principale cause de dommages.
- **Feu de torche (*Jet Fire*)** : C'est un feu de dispersion turbulente provenant de la combustion d'un fluide ou d'un gaz inflammable libéré en continu avec une impulsion considérable vers une direction spécifique.
- **Limites d'inflammabilité/d'explosivité** : Un mélange de carburant et d'air ne peut s'allumer que lorsque la concentration du carburant se situe entre sa limite inférieure et supérieure d'inflammabilité ou d'explosivité.
- ✓ **Limite inférieure d'inflammabilité (LII)/d'explosivité (LIE)** : C'est la proportion minimale requise d'un combustible (vapeur ou gaz) dans l'air pour s'enflammer ou exploser.
- ✓ **Limite supérieure d'inflammabilité (LSI)/d'explosivité (LSE)** : C'est la proportion maximale d'un combustible (vapeur ou gaz) dans l'air en dessous de laquelle l'explosion ou l'inflammation n'aura pas lieu.

2.2.2 Hexagone d'Explosion

Pour qu'une explosion puisse avoir lieu, six conditions doivent être réunies simultanément :

- | | |
|--------------------------------------|--|
| -Le comburant (généralement l'air) ; | - Le combustible ; |
| - La source d'inflammation ; | -Le combustible sous forme gazeuse ; |
| - Domaine d'explosivité (LIE, LSE) ; | -Un confinement ou un milieu congestionné. |

2.2.3 Caractérisation d'une explosion de nuages Gazeux

Si un nuage de gaz inflammable est formé lors d'une fuite, son allumage direct peut parfois conduire à un feu flash (*Flash Fire*). Si, toutefois, l'ignition est retardée pour une raison quelconque (5-10 min), alors une explosion du nuage de vapeur (*Vapor cloud Explosion, VCE*) en est le résultat probable.

L'explosion d'un nuage gazeux, constitue un des événements les plus redoutés dans les installations industrielles qui manipulent les substances inflammables. Ce type de phénomènes comprend généralement la succession de plusieurs étapes [12] :

- ✓ Rejet dans l'atmosphère d'un produit combustible (Gaz ou vapeur issue d'un liquide inflammable volatil) ;
- ✓ Mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable ;

- ✓ Dispersion du nuage de gaz ;
- ✓ Inflammation d'une première partie du nuage ;
- ✓ Propagation du front de la flamme au travers des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme agit à la manière d'un piston sur les gaz environnants et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne si sa vitesse de propagation est suffisante ou si les gaz sont confinés ou le milieu est congestionné.
- ✓ Combustion des autres parties du nuage.

L'évolution et l'intensité d'une explosion peuvent être influencés par plusieurs paramètres, à savoir :

- ✓ Le type et la quantité de la substance ;
- ✓ L'intervalle de temps entre le début de la fuite et l'allumage ;
- ✓ La configuration de l'espace où l'explosion a eu lieu ainsi que la position et le nombre de sources d'inflammation par rapport au lieu de fuite.

Les effets néfastes d'une explosion de nuage gazeux sont principalement dus à la surpression (onde de choc) qui est créée à partir de l'expansion rapide des produits de combustion et au flux de chaleur. L'onde de choc est la cause la plus importante de dommages aux personnes, au matériel et aux installations.

Pour une illustration, nous présentons dans les tableaux 2-1 et 2-2 l'étendue des dommages en fonction de la surpression (onde de choc) sur l'homme, et sur quelques structures.

Tableau 2-1 : Etendue des dommages pour la vie humaine en fonction des valeurs de surpression [18].

Etendue	Onde de choc (mbar)
Seuil des effets indirects par bris de vitres	20
Seuil des effets irréversibles Zone des dangers significatifs pour la vie humaine	50
Seuil des effets létaux Zone de dangers graves pour la vie humaine	140
Seuil des effets létaux significatifs Zone des dangers très graves pour la vie humaine	200

Tableau 2-2 : Etendue des dommages pour les structures en fonction des valeurs de surpression [18].

Etendue	Onde de choc (mbar)
Seuil de destruction significatif des vitres	20
Seuil des dégâts légers	50
Seuil des dégâts graves	140
Seuil des effets domino	200
Seuil des dégâts très graves	300

2.2.4 Simulation des effets d'explosion

Pour simuler et prédire les effets des explosions de nuage de vapeur, on emploie souvent des modèles analytiques empiriques qui sont généralement basés sur une courbe de surpression en fonction de la distance, avec des paramètres tels que :

- ✓ L'énergie qui est libérée sous forme d'onde de choc (méthode TNT) ;
- ✓ La force de l'explosion (méthode Multi-Energy) ;
- ✓ La vitesse d'expansion de la flamme (méthode Baker-Strehlow).

Cependant, il existe des logiciels de simulation des explosions qui permettent d'obtenir des résultats plus fiables et qui sont programmés pour employer les modèles cités ci-dessus tel que le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool). C'est un logiciel qui offre un avantage particulier, en effet il permet de simuler les phénomènes dangereux sur l'installation réelle en apportant une cartographie et localiser le site.

2.3 Outils d'analyse des risques

Comme nous l'avons vu dans figure 2-2, le management des risques comprend plusieurs étapes qui sont structurées d'une manière hiérarchique, la phase d'appréciation constitue le cœur de ce processus. Cette phase est fondée sur trois étapes qui sont l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques. Pour se faire, il existe plusieurs méthodes qui constituent un ensemble d'outils qui fournissent un meilleur encadrement, ce qui rend la tâche plus facile à exécuter avec une identification exhaustive des éléments dangereux et les risques y afférant. Cela permettra d'atteindre en finalité une bonne maîtrise des risques.

Dans cette partie, nous allons présenter en premier lieu les critères de classification, ensuite nous décrirons les méthodes d'analyse des risques et leurs domaines d'application ainsi que le processus de leurs mises en œuvre, ce qui permettra de faire un choix optimum quant à la méthode qui semble être la plus appropriée.

2.4 Classification

La classification des méthodes d'analyse des risques est basée sur deux principaux critères :

2.4.1 Méthodes quantitatives vs qualitatives

Une analyse quantitative consiste à caractériser numériquement le système à étudier, cela en calculant par exemple le taux de défaillance ou bien la probabilité d'occurrence d'une défaillance, dans le but d'évaluer sa sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité.

Contrairement à une analyse quantitative, une analyse qualitative ne consiste pas à quantifier mais à donner une appréciation. On cherchera à déterminer quelles occurrences sont possibles ; par exemple : une défaillance pourrait avoir une probabilité d'occurrence très faible, faible, moyenne ou forte.

Le raisonnement qualitatif permet parfois de combler certaines insuffisances des méthodes quantitatives dans des domaines où les connaissances sont peu formalisées ou difficilement quantifiables [6].

2.4.2 Méthodes déductives vs inductives

Les méthodes inductives correspondent à une approche « cause à effet » où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui peuvent entraîner la réalisation d'un événement indésirable. Tandis que pour les méthodes déductives la démarche

est inversée, en effet on part de l'événement indésirable, une défaillance par exemple, et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles [6].

Tableau 2-3 : Finalité et Typologie de quelques méthodes d'analyse des risques.

Nom de la Méthode	Objectif Principal	Typologie
AMDEC (Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités)	Identifier les causes et les effets des modes de défaillances des composants sur le fonctionnement du système	Quantitative Inductive Statique
APR (analyse préliminaire des risques)	Identification des scénarios d'accidents en présence de sources de danger et estimer la criticité	Quantitative Inductive Statique
AdD (Arbre de défaillances)	Représenter de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'évènements qui peuvent engendrer un évènement redouté	Qualitative\Quantitative Déductive Statique
AdE (Arbre d'évènements)	Représenter sous forme de scénarios les conséquences d'un évènement initiateur ou d'une défaillance	Quantitative Inductive Statique
HAZOP (Hazard Opérabilité)	Identifier les risques créés par une dérive des paramètres d'un procédé	Qualitative Inductive Statique
Méthode nœud papillon	Visualiser concrètement les scénarios d'accidents en partant des causes initiales jusqu'aux conséquences finales	Quantitative Inductive et déductive Statique

➤ **Remarque :**

Toutes les méthodes ci-dessus classifiées, se valent, il n'y a pas de meilleure méthode, la méthode est retenue selon son domaine d'application, ses caractéristiques, la complexité du système à étudier et les objectifs des analystes. Nous tenons à rappeler d'ailleurs que certaines méthodes ont une relation de complémentarité.

2.5 Analyse des modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC)

2.5.1 Présentation et domaine d'application

L'AMDEC est une méthode d'analyse qui permet d'identifier d'abord et de recenser systématiquement les modes de défaillances potentielles dont les conséquences affectent le bon fonctionnement du moyen de production, de l'équipement ou du processus étudiée. Ensuite estimer la criticité des risques liés à l'apparition de ces défaillances, ce qui permettra de les hiérarchiser et d'engager des actions correctives à apporter lors de la conception, de la réalisation ou de l'exploitation du moyen de production ou du processus dans le but d'atteindre un niveau de risque plus réduit [5].

2.5.2 Principe

L'AMDEC est une méthode qui repose sur les concepts suivants :

- ✓ La défaillance, elle se définit comme étant la cessation de l'aptitude d'une entité ou d'un système à accomplir la fonction qui lui a été assignée ;
- ✓ Le mode de défaillance, représente l'effet par lequel une défaillance est observée sur un élément du système ;
- ✓ Cause de défaillance, c'est l'événement qui conduit aux modes de défaillances ;
- ✓ L'Effet, c'est l'impact direct du mode de défaillance sur l'élément étudié et par conséquent sur le système dont il fait partie.

2.5.3 Déroulement

Avant d'entamer l'analyse, il est primordial de décomposer le système en éléments (sous-systèmes) bien connus à un niveau auquel on peut associer des modes de défaillance et estimer leurs criticités. Ensuite décrire brièvement les fonctions réalisées par chaque composant.

L'application de la méthode AMDEC nécessite de suivre la démarche systématique suivante [7] :

- 1- Découpage en sous-systèmes ;
- 2- Choisir un élément du système qui fera l'objet de l'étude et définir sa fonction,
- 3- Retenir un mode de fonctionnement de l'élément ;
- 4- Affecter à l'élément un mode de défaillance ;
- 5- Déterminer les causes et les conséquences du mode de défaillance au niveau du composant ou de l'intégralité du système ;

- 6- Identifier et examiner les dispositifs de détection du mode de défaillance existants ;
- 7- Estimer la criticité du mode de défaillance en déterminant sa probabilité et sa gravité ;
- 8- Evaluer la criticité et proposer des mesures d'atténuation dans le cas où sa valeur dépasse le seuil de tolérance ;
- 9- Revenir au point 4 et retenir un nouveau mode de défaillance ;
- 10- Lorsque tous les modes de défaillance sont examinés, envisager un autre mode de fonctionnement de l'élément et revenir au point 3 ;
- 11- Lorsque tous les modes de fonctionnement sont pris en considération, on choisit un autre composant et on reprend l'analyse au point 3.

AMDEC	Analyse de Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités											
	Système de réchauffement et d'épuration de gaz naturel combustible											
Sous Système	Mode d'exploitation	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Moyen de détection	Criticité				Actions correctives
								F	G	D	C	

Figure 2-4 : Feuille d'analyse AMDEC.

- **Criticité** : Pour évaluer les risques liés aux modes de défaillance, on calcule la criticité, cela à partir de l'estimation des indices de fréquence F, de gravité G et de la non-détection D qui sont déterminés à partir des barèmes de cotations.

Après on calcule l'indice de criticité $C = F \times G \times D$ afin d'hierarchiser les défaillances et de recenser celles qui ont un niveau de criticité supérieur au seuil de tolérance imposé, il varie en fonction des objectifs de fiabilité ou des technologies traitées.

2.6 Hazard operability analysis (HAZOP)

2.6.1 Principe

La méthode HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes, particulièrement les systèmes thermo-hydrauliques, dont la maîtrise de certains paramètres est d'une importance extrême pour la sécurité de l'installation [7].

Cette méthode prend en considération les déviations potentielles des paramètres liés à l'exploitation de l'installation. De ce fait, l'analyste se focalise sur le fonctionnement du procédé, donc il est indispensable de disposer un plan de circulation des fluides ou des schémas P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*).

La dérive ou la déviation se définit comme étant la combinaison d'un mot clé (trop de, plus de, moins de...) et d'un paramètre associé au système qui fait l'objet de l'étude (Pression, température, Concentration...). Les mots clé associés aux paramètres sont importants, ils permettent en effet de générer d'une manière systématique les déviations à prendre en compte. La HAZOP permet de déterminer les causes et les conséquences potentielles de chacune des dérives et d'identifier les moyens existants pour les détecter, d'en prévenir l'occurrence ou d'en limiter les effets dans le but de prévoir des dispositifs pour renforcer la sécurité de l'installation. Les paramètres à prendre en considération dépendent du type du système étudié et les substances manipulées, généralement il s'agit des paramètres dont la dérive influe sur la sécurité de l'installation.

2.6.2 Déroulement

La méthode HAZOP est une démarche systématique, donc pour mener une analyse il convient de suivre les étapes suivantes [7] :

- 1- Choisir une portion du processus « nœud », généralement elle est identifiée à partir d'un schéma P&ID, elle comprend un équipement et ses connexions ;
- 2- Identifier un paramètre du processus, température par exemple.
- 3- Associer au paramètre un mot clé, ce qui forme une dérive ;
- 4- Procéder à l'identification des causes et les conséquences potentielles de cette dérive ;
- 5- Identifier et examiner les moyens existants pour détecter la dérive ;
- 6- Identifier et évaluer les dispositifs pour prévenir l'occurrence de la dérive ou pour minimiser les effets ;
- 7- Proposer des actions correctives et des recommandations pour renforcer la sécurité.
- 8- Retenir un nouveau mot- clé et reprendre la démarche au point 4 ;
- 9- Lorsque tous les mots clé sont traités, retenir un nouveau paramètre et revenir au point 3 ;
- 10- Une fois terminé avec tous les paramètres, choisir un autre nœud et appliquer la même démarche.

Pareil à l'AMDEC, l'analyse HAZOP doit être synthétisée dans un tableau qui constitue un support pratique pour mener la réflexion et résumer les résultats.

Tableau 2-4 : Exemple de tableau HAZOP [7].

Date :								
Ligne ou Equipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N ⁰	Mot clé	Paramètre	Cause	Conséquence	Détection	Sécurité existante	Propositions d'amélioration	Observations

2.7 Arbre de défaillances (AdD)

2.7.1 Principe

L'analyse par arbre de défaillance est une méthode de type déductif. En effet l'arbre de défaillance modélise l'ensemble des combinaisons d'événements et de conditions qui peuvent aboutir à un événement sommet (événement redouté). Il inclut tous les arbres de causes possibles. Les liens entre les différents événements identifiés sont des fonctions logiques (« ET », « OU »), la probabilité de l'événement " sommet " se déduit par algèbre booléenne des probabilités des événements de base qui sont susceptibles d'être à l'origine de l'événement redouté.

- ❖ **Événement Redouté :** Avant d'élaborer un arbre de défaillance, il est primordial et indispensable de définir un événement redouté. Il est considéré comme étant un événement indésirable pour lequel on fait l'étude de toutes les causes qui y conduisent. La construction de l'AdD est d'autant plus simple que l'événement redouté soit défini d'une manière précise. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'utiliser au préalable des méthodes inductives définies auparavant (APR, AMDEC, HAZOP) afin d'identifier d'une manière systématique les événements redoutés qui feront l'objet d'analyse plus approfondie par l'arbre de défaillance.

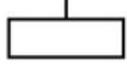
2.7.2 Construction de l'AdD

La construction d'un arbre de défaillance est une démarche systématique, elle commence par sélectionner un événement qualifié d'indésirable dont on veut représenter les scénarios de survenue.

Après, on se pose la question " quels événements ou combinaisons d'événements et de conditions pourraient produire cet événement redouté ? ". On représente donc, avec des connecteurs ou portes logiques (voir tableau 3-3), les réponses trouvées. Puis on réitère : on se demande comment peuvent se produire ces événements qui, combinés de certaines façons, peuvent produire l'événement qui nous intéresse et ainsi de suite. On arrête de décomposer chaque fois qu'on arrive à des événements dont on connaît bien le cas où la fréquence d'apparition ou il s'agit des événements de base dont le développement ne sera plus possible.

Cette représentation permet de déduire la probabilité de l'événement redouté "sommet" et les probabilités des événements de base sur lesquels la décomposition s'est arrêtée.

Tableau 2-5 : Syntaxe de l'arbre de défaillance [8].

Événement / report	Dénomination	Portes	Dénomination
	Événement de base		Porte « ET »
	Événement-sommet ou événement intermédiaire		Porte « OU »
	Report (sortie) Le sous-arbre situé sous ce « drapeau » est à dupliquer ...		Porte « OU exclusif »
	Report (entrée) ...à l'endroit indiqué par ce second drapeau		Porte « combinaison »

Cependant, il est à rappeler qu'en construisant un arbre de défaillance, certaines règles doivent être respectées [7] :

- ✓ Il faut que le système soit cohérent (la défaillance de tous les composants entraîne la défaillance du système ; un seul événement ne doit jamais aboutir à la défaillance totale du système) ;
- ✓ Il faut que les événements intermédiaires soient antérieurs à l'existence de l'événement considéré ;
- ✓ S'assurer que les portes logiques ne sont pas directement connectées.

2.8 Arbre d'évènements (AdE)

2.8.1 Présentation et Domaine d'Application

L'analyse par arbre d'évènements est une méthode inductive. En effet, contrairement à l'analyse par arbre de défaillances, l'ADE suppose une défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les événements qui en découlent. C'est une méthode qui s'applique pour étudier des systèmes qui comportent plusieurs dispositifs de sécurité. Elle permet d'estimer la probabilité d'occurrence de séquences accidentelles et d'envisager d'une manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des dispositifs de sécurité. Elle est utilisée aussi dans le domaine de l'analyse après accidents dans le but d'avoir une explication des conséquences observées qui résultent d'une défaillance du système [7].

2.8.2 Dérroulement

L'analyse par arbre d'évènements consiste à suivre la démarche systématique suivante :

➤ **Définir l'évènement initiateur**

C'est le point de départ de l'arbre, il s'agit d'un évènement qui peut effectivement conduire à une situation critique. Exemple : panne, défaillance ou erreur humaine.

➤ **Identifier les fonctions de sécurité**

Elles ont en général pour objectif d'empêcher que l'évènement initiateur soit à l'origine d'un accident majeur. Elles se déclinent le plus souvent en :

- Fonctions pour détecter l'évènement initiateur ;
- Fonctions d'alarme qui indique l'occurrence de l'évènement initiateur ;
- Fonctions de limitation visant à empêcher la progression de l'évènement initiateur ;
- Fonction d'atténuation pour réduire les effets de l'évènement initiateur.

Les fonctions de sécurité ainsi que les équipements destinés à les assurer doivent être rassemblés dans un tableau chronologique.

Tableau 2-6 : Exemple de tableau définissant les fonctions de sécurité [7].

Fonction	Mesure de la température dans le réacteur	Alarme	Rétablissement du système de réfrigération par un operateur	Arrêt de la réaction
Dispositif assurant la fonction	Sonde de température dans le réacteur	Signaux sonores et lumineux aux postes de travail	Operateur selon une procédure	Introduction automatique d'un inhibiteur de la réaction
Paramètre ou information déclenchant la fonction	Permanent	$T > T_2$	Alarme	$T > T_2$
Délai	Continue	1 min	Si possible, estimé à 5 min	Estimé à 10 min De T_1 à T_2

➤ **Construire l'arbre**

La construction de l'arbre consiste alors, à partir de l'évènement indésirable, à envisager soit le fonctionnement soit la défaillance de la première fonction de sécurité. L'évènement initiateur est représenté schématiquement par un trait horizontal.

Le moment où doit survenir la première fonction de sécurité est représenté par un nœud. La branche supérieure correspond généralement au succès de la fonction de sécurité, la branche inférieure à la défaillance de cette fonction.

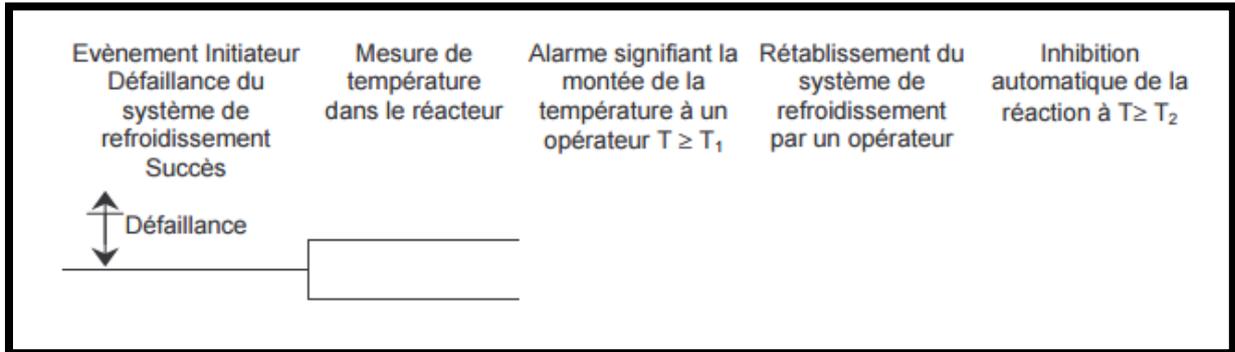


Figure 2-5 : Méthode de construction de l'arbre [7].

La suite de la méthode consiste à examiner le développement de chaque branche de manière itérative en considérant systématiquement le fonctionnement ou la défaillance de la fonction de sécurité suivante. Cette démarche permet d'identifier des séquences d'évènements susceptibles de conduire ou non à un accident potentiel.

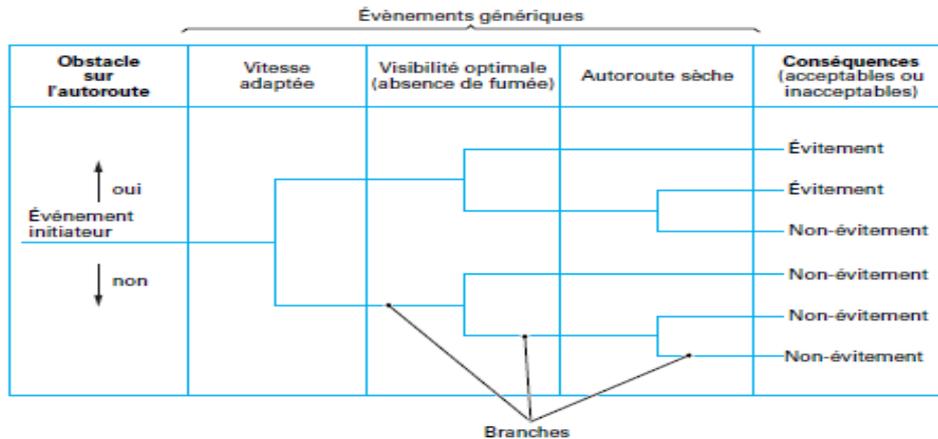


Figure 2-6 : Exemple d'arbre d'évènements pour le scénario évitement d'obstacles sur l'autoroute [9].

2.9 Méthode nœud papillon

L'analyse par la méthode nœud papillon (*Bow Tie Analysis Method*) est une approche de type arborescente. C'est une méthode qui est à la fois inductive et déductive. En effet, elle combine l'arbre de défaillance et d'évènements, ce qui permet de visualiser clairement les scénarios d'accidents en partant des évènements de bases jusqu'aux conséquences.

En plus de cela, le nœud papillon constitue un outil précieux pour s'assurer que les risques sont bien maîtrisés en vérifiant l'efficacité et la performance des barrières de prévention et de protection mis en place, notamment lorsqu'il s'agit de traiter un événement dont la criticité est extrêmement importante.

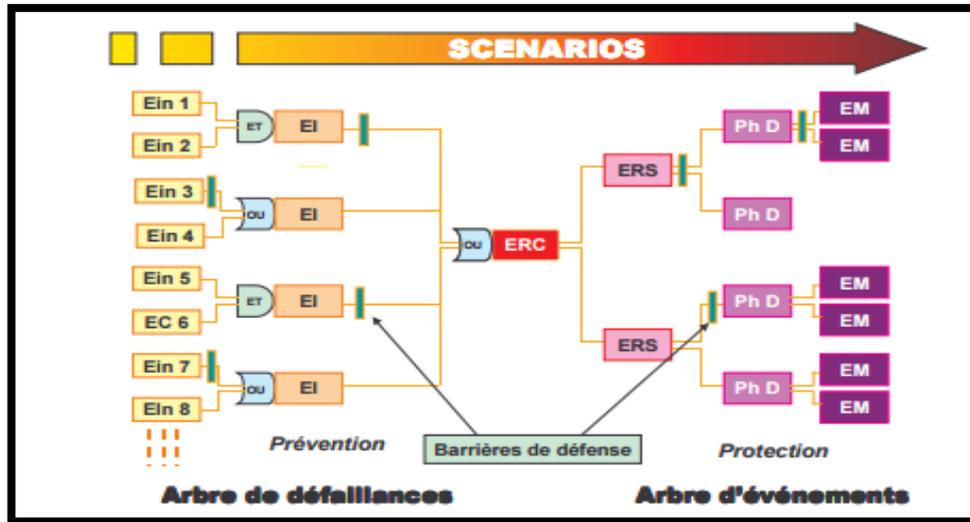


Figure 2-7 : Représentation de scénario d'accident selon le modèle du nœud papillon [7].

Tableau 2-7 : Définition des abréviations.

Désignation	Signification	Définition
Ein	Évènement Indésirable	Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitations usuelles définies
EC	Évènement Courant	Évènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation.
EI	Évènement Initiateur	Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique
ERC	Évènement Redouté Centrale	Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse
ERS	Évènement Redouté secondaire	Conséquence directe d'un ERC, il caractérise le terme source de l'accident
Ph D	Phénomène Dangereux	Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs
EM	Effet Majeur	Dommages occasionnés au niveau des éléments vulnérables

En conclusion, le chapitre que nous venons de présenter met en clair, à travers tous ces alinéas, la notion du danger et fait bien ressentir les risques qui en découlent, ainsi que leurs différents concepts que vit au quotidien tout organisme quel que soit son secteur d'activité, du fait qu'il y a manipulation de matières dangereuses, ainsi que la mise en service d'équipements complexes ; le tout nécessitant une très bonne connaissance et maîtrise parfaite des risques encourus.

A travers la description du phénomène d'explosion et l'existence de plusieurs modèles et logiciels de simulation, on peut déduire l'étendu l'importance portée par les industriels à définir et à gérer les risques liés aux produits inflammables au vu de l'ampleur des dégâts que peut engendrer un accident sur un site d'exploitation et l'impact sur l'environnement sans oublier la répercussion sur l'investissement.

L'étude de quelques méthodes d'analyse des risques nous a permis d'avoir une vue assez distincte des différentes méthodes dont nous pouvons disposer. Ces méthodes sont de véritables instruments d'action lorsqu'il faudra faire un choix rapide et décisif.

ÉTUDE DE L'EXISTANT

Le besoin en énergie électrique dans notre pays est caractérisé par une permanente augmentation, d'autant plus que l'Algérie a connue au cours des dernières années une croissance démographique assez considérable, en plus de cela s'ajoute les investissements dans le secteur de l'industrie qui se traduisent par un nombre important d'infrastructures qui contribuent d'une manière directe à l'accroissement du taux de consommation d'électricité. Cela met l'Algérie en défi de répondre continuellement à la requête d'augmentation de la capacité de production de l'énergie électrique. Pour se faire, plusieurs appels d'offres ont été lancés et qui ont mené à la construction de nombreuses centrales électriques de puissances nominales suffisantes et capables de répondre aux besoins de différentes régions tel que la centrale de Hajret-Ennous.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu la centrale électrique de Hajret-Ennous à travers sa localisation géographique et sa composition, ensuite nous décrirons le processus de production d'électricité, enfin nous aborderons une étude complète du système qui fait l'objet de notre travail.

3.1 Présentation de la centrale

3.1.1 Description générale

La centrale électrique de Hajret-Ennous est une centrale de production à cycle combiné. D'une superficie de 35 Hectares, elle se situe dans la wilaya de Tipaza, le site se trouve à environ 12 Km à l'Ouest de Cherchell. La centrale est limitée au nord par la mer méditerranée, au sud par la route nationale n°11, à l'Ouest par la commune de Hajret-Ennous et à l'est par l'Oued Arbal (Figure 3-1).

L'opérateur de la centrale est la société Shariket Kahraba Hajret-Ennous (SKH, SPA). Cette société est détenue à 51 % par la société Algerian Utilities International Limited, et à 49 % par trois filiales du gouvernement d'Algérie : Sonatrach (35 %), Sonelgaz (35 %) et Algerian Energy company (AEC) (30 %). La société Algerian Utilities International Limited est détenue à 51 % par SNC-LAVALIN et à 49 % par Mubadala Development Company (Société d'investissement et de développement, Abu Dhabi).

La construction de la centrale a été prise en charge par SNC-LAVALIN, quant aux équipements et machines (Turbines, Générateurs...), ils ont été fournis par le grand groupe américain General Electric. Les travaux ont débuté en juin 2006 jusqu'à Aout 2008 où la première tranche de production a été mise en opération.

La centrale est constituée de trois tranches principales de production, chacune dispose d'un bâtiment d'une superficie de 2150 m² qui abrite une turbine à gaz, une turbine à vapeur et un groupe turboalternateur. Puisqu'il s'agit d'un cycle combiné, au niveau de chaque tranche se trouve une chaudière de récupération de chaleur et un système de refroidissement qui se situent à l'extérieur. D'autres bâtiments se trouvent également dans la centrale ; en effet, ils abritent les unités pour la déminéralisation de l'eau, le poste de départ d'électricité, les bureaux d'administration, les équipements d'entretien et la salle de contrôle. Le poste d'évacuation (400 KV) est situé au sud des îlots de production et couvre une superficie de 900 m².

La centrale est munie d'une station de pompage d'eau de mer avec une structure brise lames pour stabiliser la mer. L'eau est utilisée pour refroidir la vapeur du condenseur ainsi que les auxiliaires de la centrale.



Figure 3-1 : Plan de situation de centrale Electrique Hajret-Ennous.

3.1.2 Caractéristiques et composition de la centrale

La centrale à cycle combiné de Hajret-Ennous produit une puissance nominale de 1200 MW en utilisant le gaz naturel comme combustible et 840 MW (combustible de secours, Gasoil). Elle est conçue pour générer l'électricité à une puissance qui augmente, sur une base annuelle, la capacité de production d'énergie du réseau nationale d'environ 10 TWh.

➤ Cycle thermique

La centrale électrique de Hajret-Ennous est une centrale à cycle combiné avec un rendement de production de 56 %. Ce rendement est obtenu en récupérant la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz au travers des chaudières de récupération afin de produire de la vapeur à haute pression, avec laquelle la turbine à vapeur est entraînée. Les gaz d'échappement ainsi refroidis sont finalement évacués dans l'atmosphère au moyen des cheminées. La vapeur à haute pression détendue dans la turbine à vapeur est par la suite condensée par l'eau froide qui circule dans un condenseur. Le condensat est retourné à la chaudière de récupération pour y être revaporisé, bouclant ainsi le cycle vapeur.

En général, ce type de centrale produit environ deux tiers de l'électricité à partir des turbines à gaz alors que l'autre tiers est produit par les turbines à vapeur.

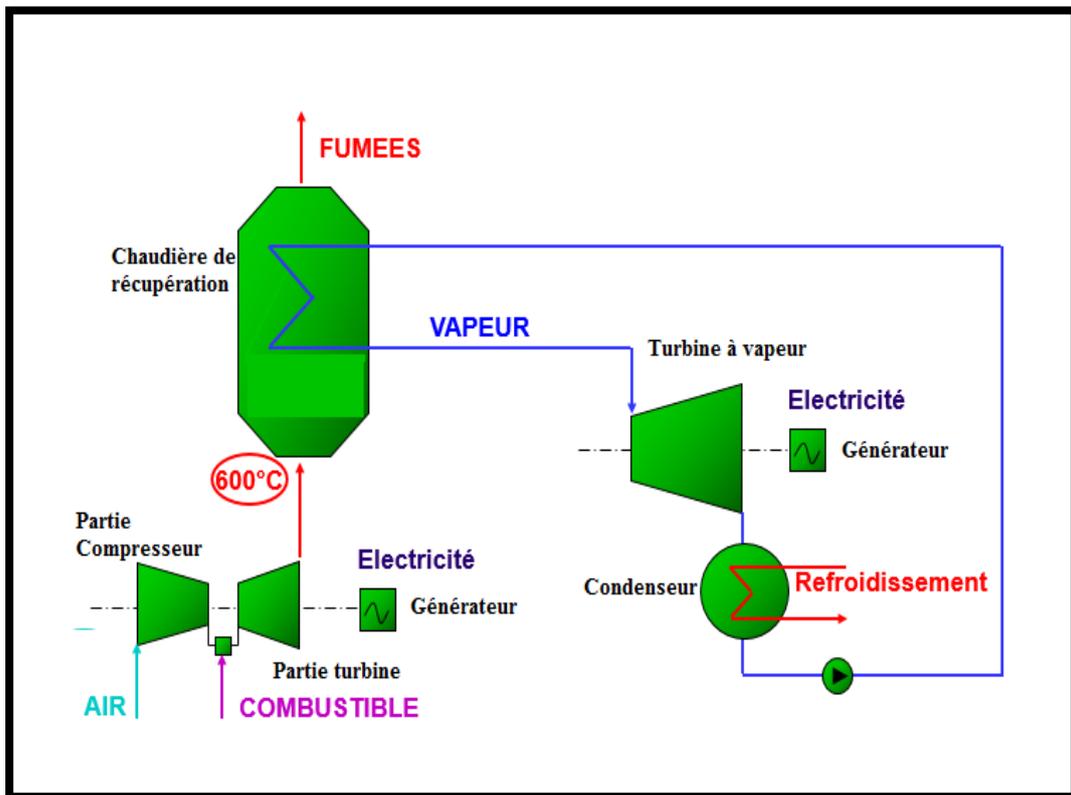


Figure 3-2 : Principe du Cycle Combiné.

➤ **Station de gaz principale**

La station de gaz principale est le premier poste par lequel le combustible transite. En effet, le gaz arrive depuis la conduite principale qui approvisionne la centrale avec une importante pression qui avoisine les 60 bar avec une température de 18°C, il passe ensuite dans deux échangeurs à chaleur pour être chauffé jusqu'à 38 °C afin d'éviter le risque de givrage. Par la suite, il sera collecté dans quatre rampes pour réduire la pression jusqu'à 37 bar au moyen des vannes régulatrices de pression. Enfin, le gaz sera envoyé aux trois tranches à travers des pipes de diamètre de 45.72 cm.



Figure 3-3 : Station de comptage et de détente principale du gaz.

➤ **Configuration de la centrale**

Chaque tranche de production de la centrale est composée des éléments suivants :

- Une turbine à gaz ;
- Une turbine à vapeur ;
- Un système de lubrification et un système hydraulique ;
- Un alternateur avec un système de refroidissement à l'hydrogène ;
- Une chaudière de récupération ;
- Un condenseur avec un système de refroidissement ;
- Un transformateur élévateur dans un poste de départ.

La turbine à gaz, turbine à vapeur et le générateur constituent les éléments essentiels, leur assemblage est fait d'une manière à avoir une configuration « *single-shaft* » ou autrement dit une configuration à arbre unique. En effet ils sont assemblés sur un arbre rotatif unique et par conséquent ils entraînent un seul alternateur.

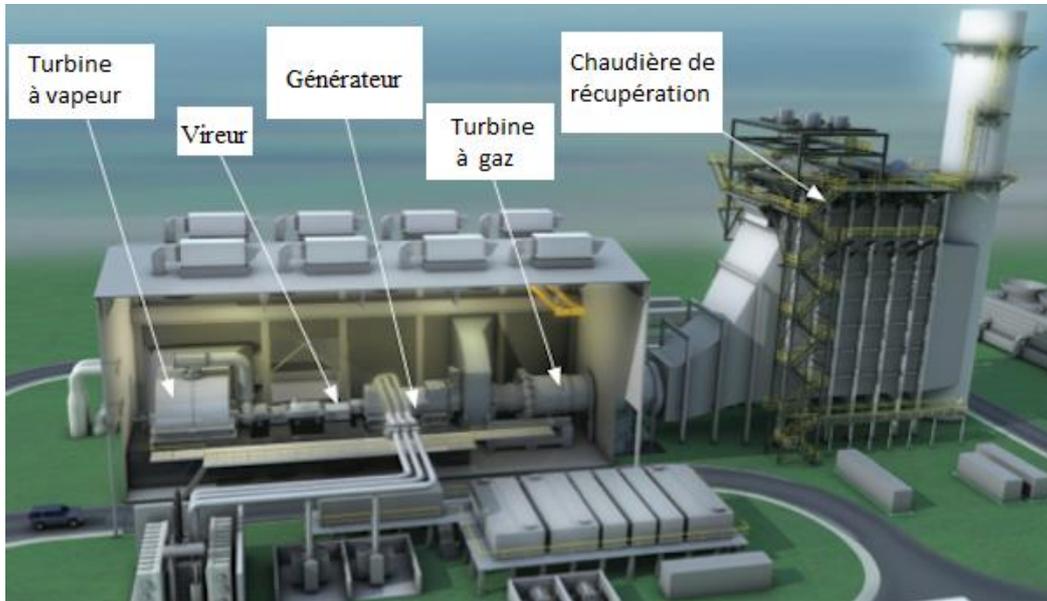


Figure 3-4 : Configuration de type à arbre unique.

➤ Processus de production d'électricité

La turbine à gaz installée est le modèle PG93719FB de General Electric avec un rendement de 37 %. D'une manière générale, une turbine à gaz fonctionne selon le cycle de Joule, elle se compose d'un compresseur axial, de 18 chambres de combustion et d'une partie turbine dans laquelle le flux de gaz chaud se détend. On résume son fonctionnement en trois étapes :

- **Etape 1 :** L'air est aspiré, filtré ensuite introduit dans le compresseur axial. Il y est comprimé jusqu'à une pression de 16 bar environ. Il est ensuite envoyé aux chambres de combustion pour être mélangé avec le gaz combustible.
- **Etape 2 :** Le mélange (air + gaz) s'enflamme dans les chambres et dégage une température de 1300 °C.
- **Etape 3 :** Les gaz chauds seront envoyés vers la partie turbine où ils se détendent en faisant tourner l'arbre rotatif qui lui-même entraîne l'alternateur pour produire de l'électricité.
- **Etape 4 :** Les gaz chauds (600 °C) seront ensuite acheminés vers la chaudière de récupération dans laquelle leur énergie thermique sera transmise à l'eau pour produire de la vapeur à trois niveaux de pression différentes (124 ; 34 et 4 bar) qui alimente par la suite la turbine à vapeur. La vapeur à haute pression produite par la chaudière (124 bar) est injectée dans la turbine à vapeur, modèle A15, où elle est détendue en faisant tourner l'arbre de cette dernière et donc entraînant l'alternateur.

La vapeur qui s'échappe de la turbine à vapeur est condensée par la suite dans un échangeur à faisceau tubulaire (condenseur) qui est refroidi par une circulation continue d'eau de mer dont l'alimentation est assurée par la station de pompage.

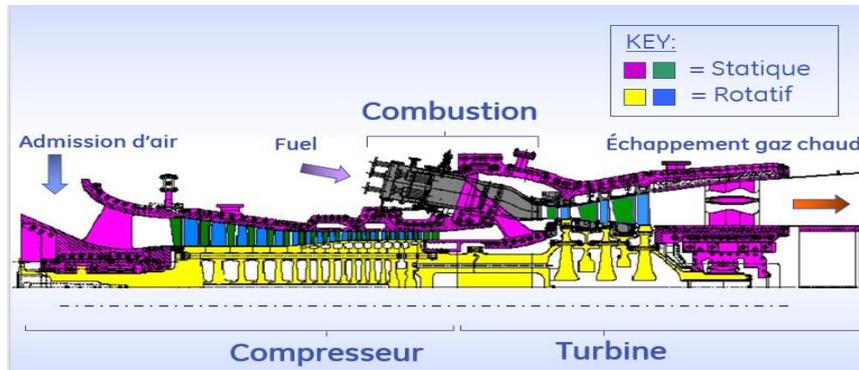


Figure 3-5 : Composants de la Turbine à gaz.

Chaque tranche dispose d'un alternateur de type 450H d'une puissance apparente d'environ 544 MVA débitant 19 KV sur trois phases, en fréquence de 50 HZ . L'ensemble des éléments de la tranche génère une puissance active d'environ 425 MW, ce qui équivaut à 1275 MW pour toute la centrale.

➤ Transformateurs

Avant d'envoyer l'électricité et l'injecter dans le réseau national, la tension est élevée jusqu' à 400 kV par trois transformateurs élévateur (1 par tranche) au niveau d'un poste de départ installé dans un bâtiment situé au sud des trois bâtiments abritant les turbines.

Chacun de ces transformateurs contient environ 60 000 litres d'huile de refroidissement et est installé au-dessus d'une cuvette de rétention munie d'un lit coupe-feu fait de pierre concassée, afin de contenir tout déversement accidentel.



Figure 3-6 : Poste de Transformation et de départ.

➤ **Système de refroidissement des équipements auxiliaires**

La centrale est équipée d'un système de refroidissement pour chaque groupe incluant entre autres les turbines, les alternateurs, le circuit d'huile de lubrification, les condenseurs, les pompes et les compresseurs. Le refroidissement de chaque groupe est assuré par un circuit fermé où circule de l'eau déminéralisée qui est refroidie en passant par un échangeur de chaleur à plaques, où circule de l'eau de mer. Cette eau de mer capte la chaleur résiduelle et est évacuée par 3 émissaires (1 par tranche).

3.2 Description du système étudié

Comme précisé et justifiée auparavant, le système qui fait l'objet de notre étude est le poste d'épuration et de réchauffement du gaz combustible de la deuxième tranche de production, (*The Gas Fuel Consolidated Heating and Cleaning System*). C'est un ensemble d'équipements fournis et installés par General Electric. Il est destiné à filtrer, chauffer ensuite purifier le gaz reçu depuis la station gaz principale afin de lui donner les caractéristiques requises en termes de pression et de température (34 bar ; 160 °C) pour une combustion optimale dans les chambres de combustion de la turbine à gaz.



Figure 3-7 : Poste d'épuration et de réchauffement du gaz.

Ce poste est situé à l'extérieur du bâtiment abritant les turbines, il est constitué des éléments suivants :

- Deux filtres séparateurs à deux étages ;
- Un épurateur de gaz ;
- Un échangeur à chaleur ;
- Un réchauffeur électrique.

3.2.1 Filtres séparateurs à deux étages

Les deux filtres séparateurs fonctionnent en alternance, lorsque le premier est colmaté le deuxième prend la relève, ils sont conçus pour protéger la turbine à gaz et empêcher la pénétration des condensats et des particules contaminants en suspension.

Chaque filtre est composé de deux étages. La section de séparation inférieure (premier étage) consiste en un faisceau de cyclones dans lequel un grand pourcentage des liquides entrants et des solides sont éliminés mécaniquement et sont recueillis dans un puisard inférieur. Ensuite le gaz s'écoule vers la section supérieure qui se compose d'éléments de coalescence de matière synthétique en microfibrilles qui regroupe les particules liquides, condensat, résiduels et les collectes dans un puisard supérieur. Ces deux puisards sont drainés par la suite au moyen d'un système de contrôle du niveau de liquide.

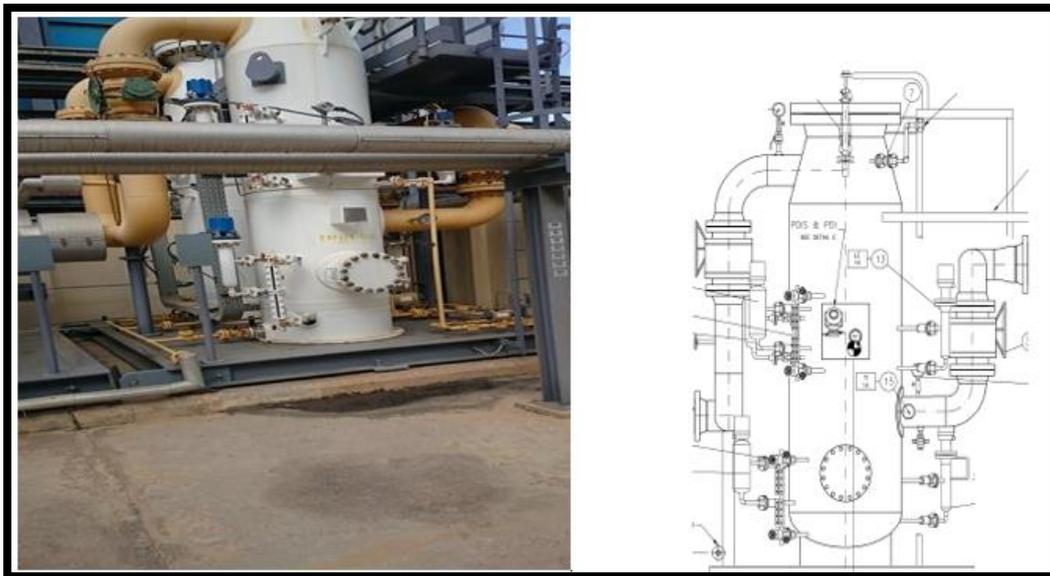


Figure 3-8 : Filtres séparateurs.

3.2.2 L'échangeur à chaleur

Après le passage dans le filtre séparateur, le gaz est introduit dans l'échangeur à chaleur de configuration à contre-courant ou il sera chauffé jusqu'à une température de 160 °C par la vapeur soutirée de la chaudière de récupération.

L'échangeur est composé de deux enveloppes montées en série avec des tubes et des chicanes à l'intérieur, le gaz s'écoule dans les enveloppes et la vapeur dans les tubes.

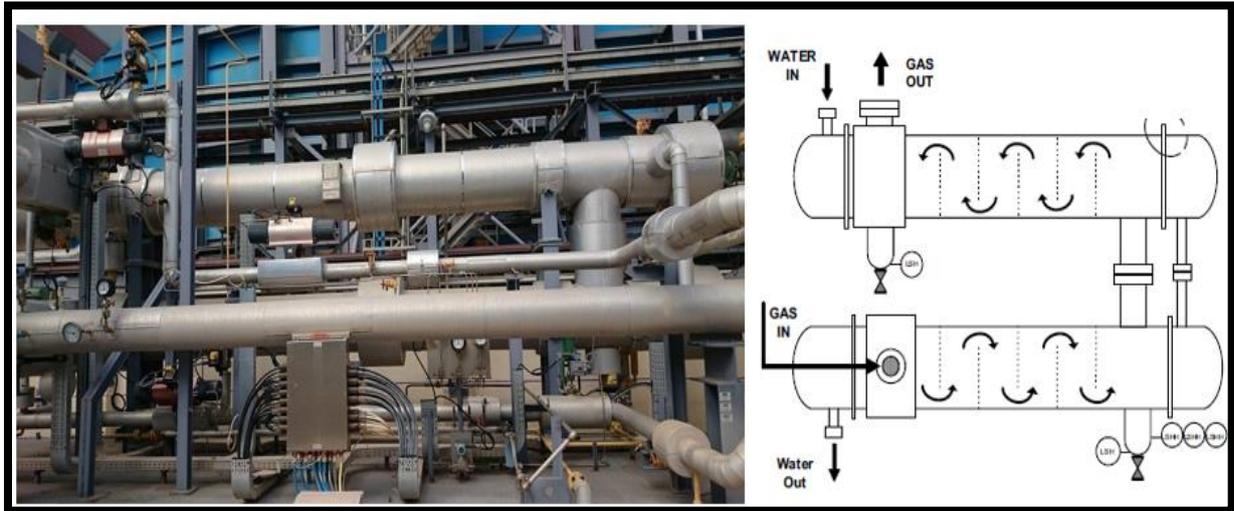


Figure 3-9 : Echangeur à chaleur.

3.2.3 Réchauffeur électrique

Le réchauffeur électrique est utilisé lors du démarrage de la turbine après un arrêt pour la maintenance. Il est conçu pour réchauffer le gaz combustible à une température de 60.5°C. La puissance nominale de ce dispositif est de 380 KW à 400 volts haute entre 3 phases et une fréquence de 50 Hz. Il est utilisé seulement lors de la phase de démarrage de la tranche de production, il sera désactivé lorsque la turbine dégage suffisamment de gaz chauds capables de produire de la vapeur au niveau de la chaudière de récupération qui sera introduite dans l'échangeur pour un réchauffement plus puissant.

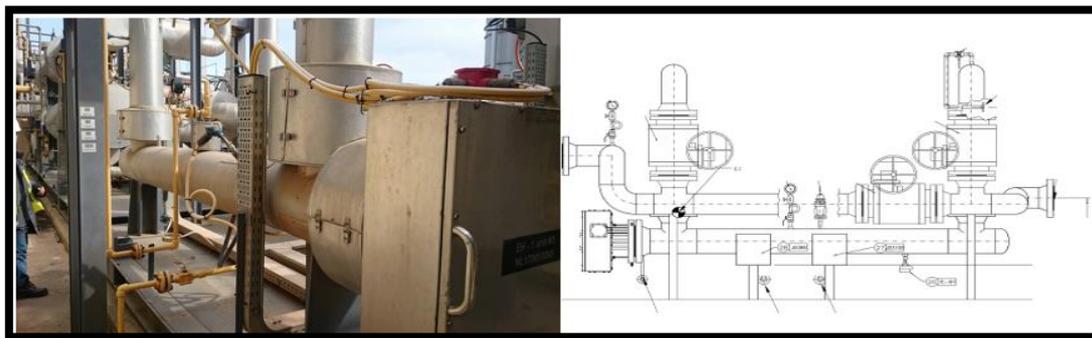


Figure 3-10 : Réchauffeur électrique.

3.2.4 Epurateur de gaz

Après le réchauffement, le gaz passe enfin dans un épurateur. C'est un filtre à multicyclones ayant pour but d'éliminer les particules solides et liquides probablement entraînées avec le flux gazeux. Donc le risque de contamination de la turbine sera éliminé. Les solides et les liquides entraînés se rassemblent au fond de l'épurateur et sont automatiquement éliminés

par une vanne de régulation de niveau. Le gaz combustible ainsi purifié sort finalement de l'épurateur et continue sa course vers la turbine à gaz.

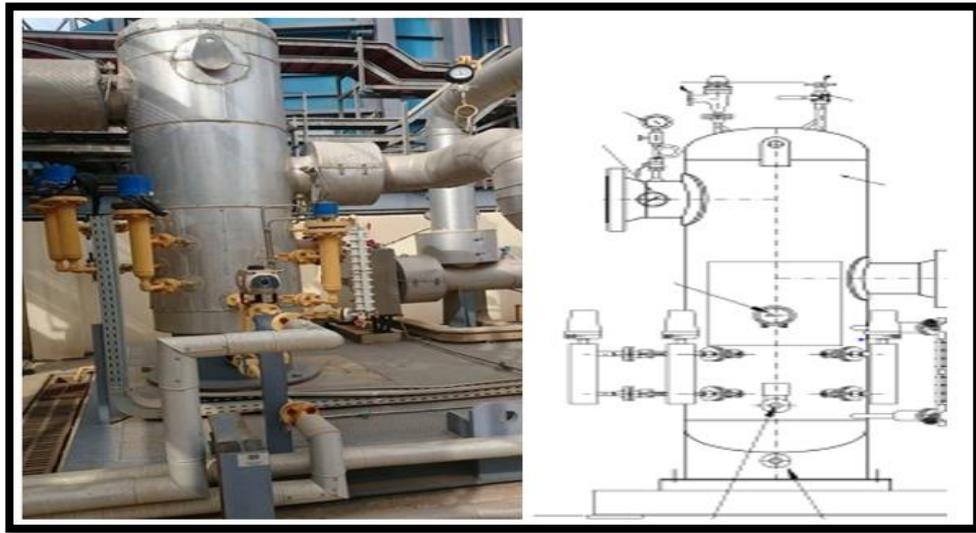


Figure 3-11 : Epurateur de gaz combustible

Pour une meilleure compréhension, nous présentons ci-dessous le schéma de l'arrangement générale des équipements qui constituent le poste gaz que nous venons de décrire ci-dessus.

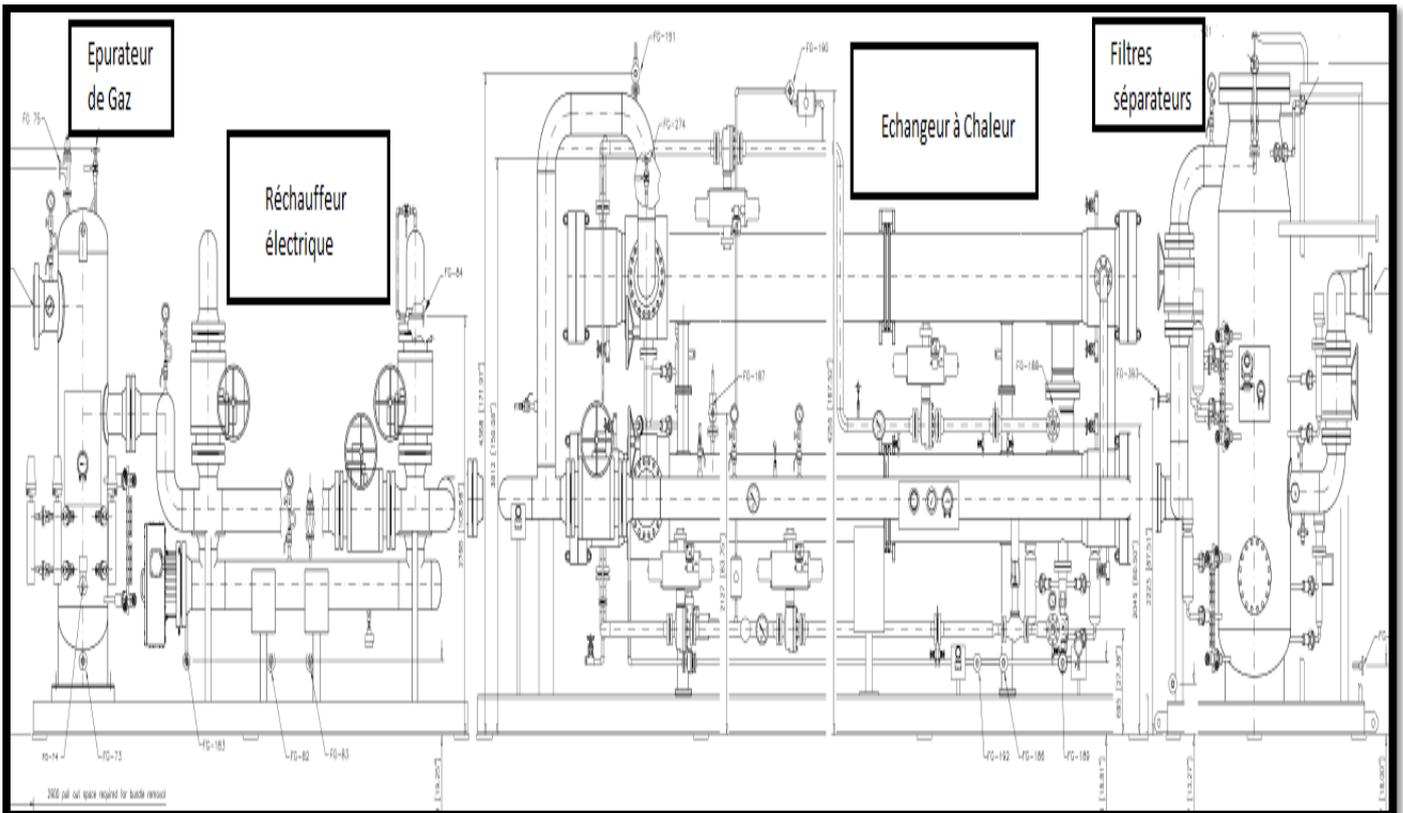


Figure 3-12 : Représentation du système étudié.

3.3 Positionnement du système

Comme mentionné au début, la station de réchauffement et d'épuration du gaz naturel combustible est installée au niveau de chaque tranche de production d'électricité (voir figure 3-13). C'est un système qui occupe une superficie de 165 m² environ avec une longueur de 22 mètres.

Les trois systèmes (un par tranche) sont identiques dans leurs conceptions et fonctionnent selon le même mode opératoire. En revanche, la station du milieu, qui délivre le gaz à la deuxième tranche, présente une certaine particularité qui se situe dans son voisinage. En effet, cette station se trouve encerclée par plusieurs éléments importants à savoir :

- ✓ Trois chaudières auxiliaires qui alimentent la station gaz principale en vapeur. Elles sont installées 2 m environ au nord de notre système ;
- ✓ Un système de récupération de fuel issue du compartiment turbine, car le gasoil est considéré comme le combustible de secours, il est mis en circulation permanente pour remplacer le gaz immédiatement en cas de coupure en alimentation. Ce système est situé à côté des trois chaudières auxiliaires et se compose de trois pompes et d'un bac de stockage d'une capacité de 18 m³ ;
- ✓ Un skid-fuel, c'est un système de pompage qui alimente le compartiment turbines en fuel d'une manière continue. Ce skid délivre le gasoil au moyen de deux pompes qui se trouvent à l'intérieur d'un bloc fermé à travers deux pipes de 15 cm de diamètre avec un débit de 14 kg s⁻¹. Une des deux conduites est installée d'une façon à passer par le système d'épuration et de réchauffement juste derrière le filtre épurateur, 2 mètres environ, avant de monter aux compartiment turbines ;
- ✓ La voie de circulation de véhicules et engins de la centrale électrique. Elle est très fréquentée aussi par les piétons (les opérateurs), elle se situe à 17 mètres environs à l'Est de notre station ;
- ✓ La chaudière de récupération. Elle est positionnée à l'Ouest, 55 m environ, de la station de réchauffement et d'épuration du gaz. Cette position est commune pour les trois systèmes.

Il est à signaler que la deuxième tranche de production d'électricité abrite le bloc le plus important de la centrale qui est la salle de contrôle. Ce compartiment regroupe tous les dispositifs qui permettent de surveiller l'activité de l'intégralité des équipements de la centrale et commander leurs fonctionnements. Elle se situe au milieu de plusieurs sources de danger, sa sécurité est alors d'une importance capitale.

Pour plus d'évidence, nous présentons dans la figure ci-après le plan d'aménagement de la centrale électrique de Hajret-Ennous.

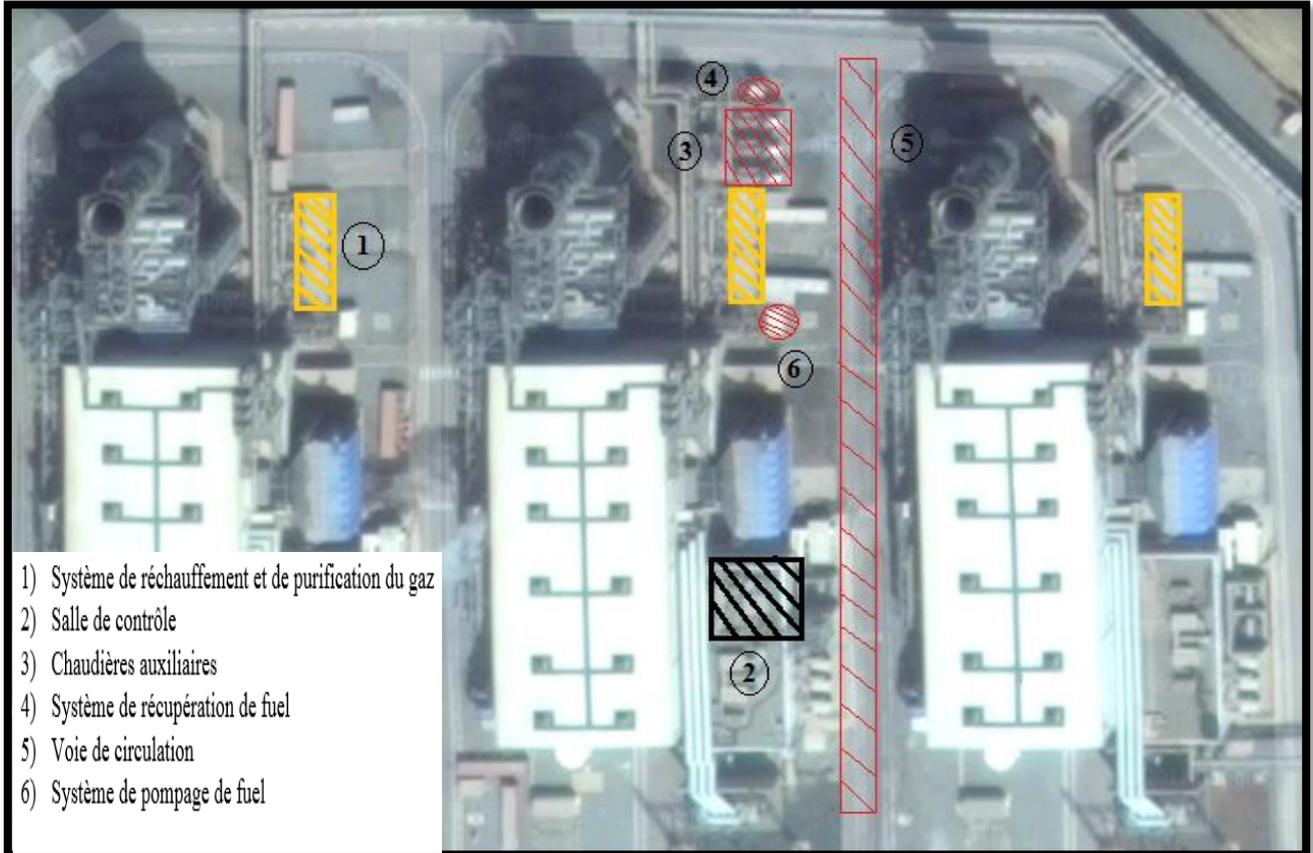


Figure 3-13 : Aménagement de la centrale électrique.

3.4 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle est une étude qui consiste à définir les caractéristiques d'un produit ou d'un système pour bien comprendre son fonctionnement. Dans le but d'offrir une vision globale et synthétique du système d'épuration et de réchauffement du gaz combustible (objet de notre étude), nous avons tout d'abord décomposé cet élément en différents systèmes avec tous leurs équipements ainsi que les éléments d'entrée et de sortie, nous les avons synthétisés dans des tableaux présentés en annexe 1.

La station de réchauffement et d'épuration a été décomposée en 4 systèmes :

- Système de filtration (filtre séparateur 1 ; filtre séparateur 2) ;
- Système de réchauffement à vapeur (circuit vapeur ; circuit gaz ; échangeur à chaleur) ;
- Système de réchauffement électrique (réchauffeur électrique) ;
- Système d'épuration (épurateur de gaz combustible).

Tableau 3-1 : Modèle de tableau utilisé.

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N ⁰	Nom	Entrée	Sortie	Ss-N ⁰	Nom	Entrée	Sortie	Equipements

Ensuite, pour une compréhension complète, nous avons approfondie notre analyse en adoptant une démarche hiérarchique (descendante). Pour cela, nous avons préféré utiliser la méthode **SADT**. SADT signifie : *Structured Analysis and Design Technique*. Il s'agit d'une méthode de modélisation par niveaux successifs d'une fonction assurée par un système donné avec un langage semi-formel [texte + graphique (flèches, boîtes)] en utilisant un diagramme dans lequel on présente l'activité principale dans un boîtier appelée boîte mère ou niveau A-0, les données d'entrée et les données de sortie, les données de contrôle ainsi que le système qui supporte la fonction principale.

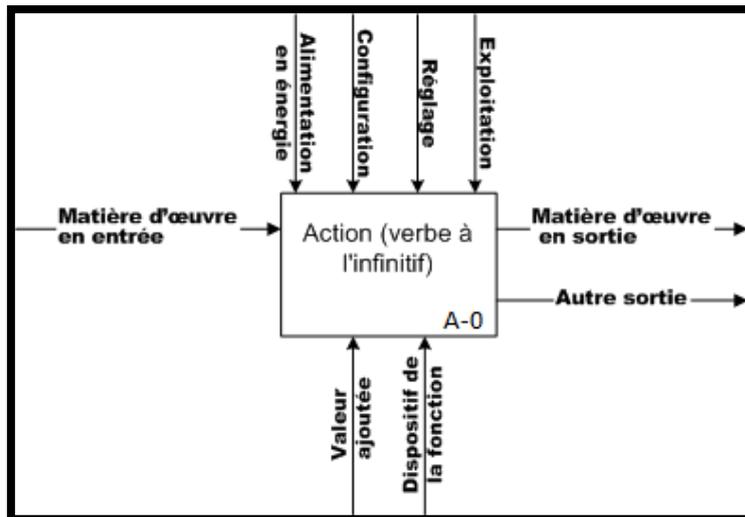


Figure 3-14 : Modèle du diagramme (boîte mère).

Une construction de diagramme plus détaillée sera nécessaire si la boîte mère (niveau A0) ne permet pas une totale compréhension. Cela se fait par la présentation des sous boîtes (diagrammes enfants) en allant à des niveaux dans lesquels la description sera plus détaillée.

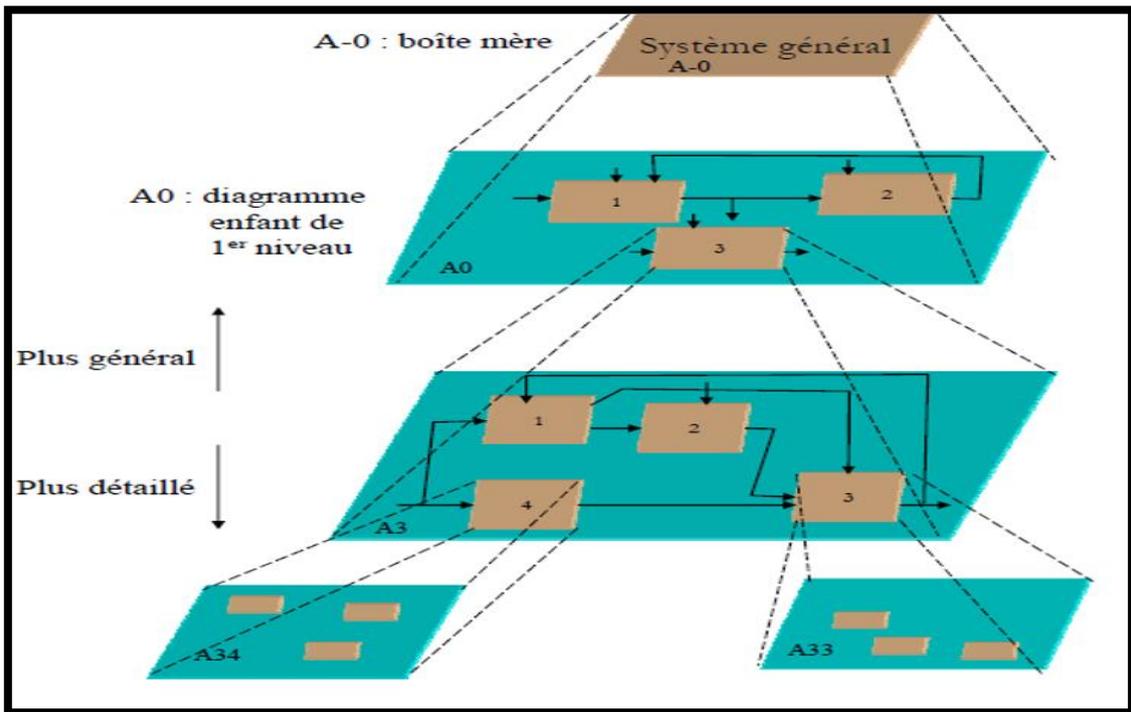


Figure 3-15 : Diagramme SADT plus détaillé.

L'application de cette méthode sur le système de réchauffement et d'épuration de gaz nous a amené à construire un diagramme de cinq niveaux (A-0 ; A0 ; A1 ; A2 et A3) qui sont présentés en annexe 2.

3.5 Étude de conformité

Il est à rappeler que la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible est un système dans lequel on manipule une substance extrêmement dangereuse. Donc il peut y avoir une formation d'un nuage explosif tout autour des équipements décrits auparavant. Ce système a été conçu, fabriqué et assemblé pour fonctionner dans une Zone 2 selon la réglementation ATEX. C'est un emplacement où le nuage explosif (air+ gaz naturel) n'est pas susceptible de se présenter en phase d'exploitation normale du système. Dans le but de maintenir la sécurité. Ainsi, pour éviter la formation accidentelle du nuage explosif lors du fonctionnement de ce système, le constructeur (General Electric) a fourni une lettre de recommandations techniques qui porte plusieurs exigences et obligations sous forme d'équipements dont leur mise en place est indispensable. Nous avons visité le système sur site, ensuite examiné la conformité par rapport aux obligations prescrites par le constructeur. Le tableau en annexe 7 résume les résultats du diagnostic obtenus. Pour le calcul du pourcentage de conformité, nous avons attribué 2 points si l'exigence est conforme, 1 point si elle est partiellement conforme et zéro point si l'exigence n'est pas respectée.

Selon le diagnostic que nous avons établi, il a été constaté que le taux de conformité par rapport aux exigences prescrites par General Electric est assez faible, 45.45 %. En effet, plusieurs équipements d'une importance capitale et qui contribuent étroitement à la sécurité n'ont pas été installés dans le système. Ce qui nous amène à déduire qu'il y a une certaine négligence qui est peut-être due à une surestimation de la fiabilité de la conception du système ou à la sous-estimation des risques car l'explosion est un événement qui n'a jamais eu lieu dans cette station jusqu'à ce jour (Mai 2017).

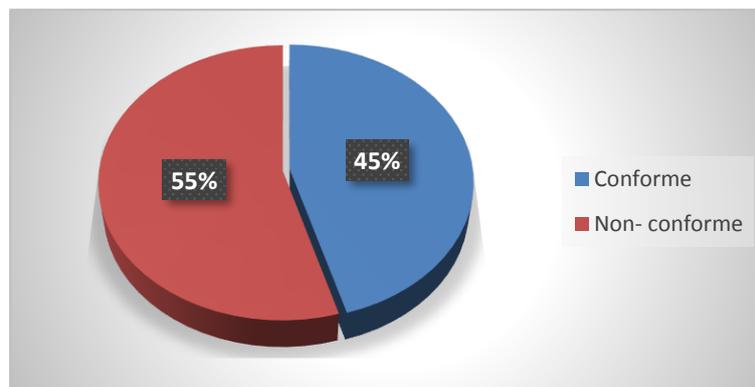


Figure 3-16 : Taux de conformité.

Finalement il est à signaler que le réglage des pressions dynamiques du gaz à partir des vannes manuelles est non toléré. En effet en cas d'évènement de variation de pression il n'y a aucun système d'alarme qui informe les opérateurs pour agir. Donc l'absence de vannes régulatrices de pression au sein du système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible est considérée comme un écart majeur qui rend le système très vulnérable aux événements qui découlent de la variation de la pression.



Figure 3-17 : Vanne manuelle de réglage de pression (sortie échangeur).

Le réglage de pression en aval de l'échangeur est important car cette dernière est censée augmenter lors du réchauffement du gaz combustible. On agit alors sur la vanne manuelle pour la réduire jusqu'à 34 bar.

Le système contient également plusieurs autres vannes manuelles, elles se trouvent en amont et en aval de chaque équipement. Nous montrons dans la figure 3-18 la vanne installée à l'entrée de la station. Cette vanne est aussi importante car elle permet de régler la pression d'entrée du gaz dans station (34 bar).



Figure 3-18 : Vanne manuelle à l'entrée à la station.

Pour conclure, nous avons vu dans ce chapitre que la centrale de production d'électricité de Hajret-Ennous est une unité industrielle moderne et complexe, et qui pour pouvoir produire de l'énergie électrique à une puissance de 1200 MW nécessite la mise en place d'une technologie de pointe.

L'analyse fonctionnelle du système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible a permis de bien comprendre sa composition et son fonctionnement. La position de ce système à proximité de différents éléments que nous avons décrits ci-dessus fait qu'en cas d'évènement majeur (explosion) il y a un fort risque d'avoir un effet domino avec des conséquences gravissimes.

Il est à noter que ce système présente des vulnérabilités du faite que nous avons constaté que le taux de conformité existant par rapport aux recommandations techniques prescrites par General Electric est assez faible.

APPLICATION DES MÉTHODES D'ANALYSE DES RISQUES

Après une étude complète du système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible à travers sa description, sa localisation, son analyse fonctionnelle et le diagnostic de conformité par rapport aux exigences techniques prescrites par GE ; nous entamons maintenant l'étape d'appréciation des risques afférents à ce système. Dans le but de résoudre notre problématique, ce chapitre est consacré à l'application des méthodes d'analyse des risques.

Dans un premier temps il s'agira de déterminer les conséquences provoquées par les modes de défaillances des composants de chaque sous-système et leurs ampleurs par l'application de la méthode **AMDEC**. Nous appliquerons par la suite la méthode **HAZOP** afin de déterminer les ER liés aux dérives des paramètres de cette installation. Après, nous allons estimer les probabilités d'occurrence des ER et des séquences accidentelles pour chaque élément de ce système en construisant des arbres de défaillances et d'évènements. Ensuite nous appliquerons la méthode **nœud papillon** dans le but de visualiser clairement les scénarios d'accidents depuis les évènements de base jusqu'aux phénomènes dangereux et leurs effets majeurs. Nous finirons par la suite ce chapitre par la simulation des effets des phénomènes dangereux.

4.1 Analyse de modes de défaillances, leurs effets et leurs criticités (AMDEC)

Nous avons appliqué la méthode AMDEC pour déterminer et estimer la criticité des modes de défaillances des composants qui affectent leurs bons fonctionnements et qui peuvent être à l'origine de plusieurs évènements redoutés. Nous avons décomposé d'abord le système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible en quatre sous-systèmes :

- 1- Sous-système de filtration à deux étages (Filtre séparateur) ;
- 2- Sous-système de réchauffement à vapeur (Echangeur à chaleur) ;
- 3- Sous-système de réchauffement électrique (Réchauffeur électrique) ;
- 4- Sous-système d'épuration (Filtre épurateur).

Ensuite, nous avons suivi la démarche systématique de l'application de cette méthode expliquée au chapitre 2.

Il est à signaler que les vannes régulatrices de pression de la rampe de détente qui se trouve au niveau de la station gaz principale ont fait aussi l'objet d'analyse AMDEC, car certains de leurs modes de défaillances peuvent avoir des effets sur notre station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible.

- **Résultats**

Le déploiement de la méthode AMDEC nous a amené à synthétiser l'analyse dans un tableau qui est présenté en annexe 3.

Concernant l'estimation de la criticité des modes de défaillances, nous avons utilisé une grille qui contient une échelle de la fréquence d'apparition et une échelle de gravité qui sont présentées dans les tableaux en annexe 4. Ces deux barèmes de cotation ont été élaborés avec l'équipe EHS et approuvés par le manager.

Une autre échelle a été aussi élaborée pour évaluer le niveau de détection des modes de défaillances. En effet, nous avons classifié la détection en quatre niveaux qui sont présentés dans le tableau en annexe 4.

L'application de la méthode AMDEC nous a permis d'identifier les modes de défaillances de chacun des composants étudiés et de les hiérarchiser selon le niveau de criticité estimée.

Le tableau 4-1 rassemble les modes de défaillances trouvés de chaque composant durant l'analyse ainsi que les jugements que nous y apportons.

Tableau 4-1 : Hiérarchisation des modes de défaillances.

Composant	Mode de défaillance	Sous-système	Criticité	Jugement
Purgeur manuel (Event)	Blocage	-Epuration -Réchauffement à vapeur -Filtration à deux étages	20	Inacceptable
Soupape de sécurité		-Epuration -Réchauffement à vapeur -Filtration à deux étages		
Vannes de purge		-Réchauffement électrique		
Vannes régulatrices de pression	Bloquées ouvertes	Rampes de détente (Station gaz principale)		
	Fuite externe			
Vanne Manuelle amont\aval	Fuite externe	-Filtration à deux étages -Réchauffement électrique	16	Inacceptable
Pipes d'interconnexion		-Filtration à deux étages -Réchauffement électrique		
Vanne manuelle de dérivation		-Réchauffement électrique		
Vanne manuelle de dérivation	Blocage	-Réchauffement électrique	15	Inacceptable
Vanne Manuelle amont\aval		-Filtration à deux étages -Réchauffement électrique		
Système pneumatique de contrôle de niveau	-Blocage du mécanisme interne du contrôleur -Vanne de drainage bloquée fermée	-Filtration à deux étages -Epuration		

Tableau 4-1 : Hiérarchisation des modes de défaillances [suite].

Composant	Mode de défaillance	Sous système	Criticité	Jugement
Pipes d'interconnexion	Rupture	-Filtration à deux étages -Epuración -Réchauffement électrique	12	Important
Système pneumatique de contrôle de niveau	Pression d'air très faible	-Filtration à deux étages -Epuración		
Soupape de sécurité	Ouverture intempestive	-Filtration à deux étages -Réchauffement électrique -Epuración -Réchauffement à vapeur		
Electrovanne 1\2	Fermeture intempestive	-Réchauffement à vapeur		
Vannes régulatrices de pression	-Ouverture excessive -Fermeture intempestive	Rampes de détente (Station gaz principale)		
Vanne de drainage	Blocage	-Réchauffement électrique -Epuración	10	Important
Système pneumatique de contrôle de niveau	Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation en air comprimé	-Filtration à deux étages -Epuración	9	Important
Vanne Manuelle amont\aval	Fuite interne	-Réchauffement électrique -Filtration à deux étages		
Vanne manuelle de dérivation		-Réchauffement électrique		
Éléments de coalescence en micro fibres	Colmatage	-Filtration à deux étages	8	Important
Vanne Manuelle amont\aval	Fermeture intempestive	-Filtration à deux étages -Réchauffement électrique		
Disjoncteur magnétique	Non déclenchement	-Réchauffement électrique	8	Important
Enveloppes (Carcasses)	Fuite	Réchauffement à vapeur		

Tableau 4-1 : Hiérarchisation des modes de défaillances [suite].

Composant	Mode de défaillance	Sous système	Criticité	Jugement
Pipes d'interconnexion	Baisse de débit	-Filtration à deux étages -Epurateur -Réchauffement électrique	6	Indésirable
Enveloppes (Carcasses)	Chute de pression de sortie	Réchauffement à vapeur		
Tubes internes	Fuite			
	Baisse de débit			
Vanne manuelle de dérivation	Ouverture intempestive	-Réchauffement électrique		
Disjoncteur magnétique	Déclenchement intempestif			
Purgeur manuel (Event)	Ouverture intempestive	-Filtration à deux étages	4	Négligeable
Vanne de drainage		-Réchauffement électrique -Epurateur		

Ainsi il est à noter que la méthode AMDEC nous a permis de récolter plusieurs modes de défaillances qui provoquent la **surpression** et la perte de confinement du gaz combustible (**formation de nuage gazeux**), ce sont des évènements extrêmement redoutés. Le tableau 4-2 représente l'ensemble des modes de défaillances qui engendrent chacun de ces deux effets.

Tableau 4-2 : Modes de défaillances provoquant la surpression.

Effets	Mode de défaillance	Composant
Surpression	Fermeture intempestive	Vannes manuelles (amont\aval)
	-Fermeture intempestive de vannes d'alimentation en air comprimé -Pression d'air très faible -Blocage du mécanisme interne du contrôleur -Vanne de drainage bloquée fermée	Systèmes pneumatiques de contrôle de niveau
	Non déclenchement en cas de surintensité	Disjoncteur magnétique
	Fermeture intempestive	Vannes régulatrices de pression (station gaz principale)
	Ouverture excessive	
	Bloquées ouvertes	

Tableau 4-3 : Modes de défaillances qui provoquent la perte de confinement.

Effet	Mode de défaillance	Composant
Perte de confinement (formation de nuage gazeux)	-Fuite externe	-Vannes manuelles (amont\aval) -Vanne manuelle de dérivation -Vannes régulatrices de pression (station gaz principale)
	-Fuite -Rupture	Pipes d'interconnexions
	-Ouverture intempestive	Events manuels Soupapes de sécurité Vannes de drainage
	-Fuite	Enveloppes (Carcasses)

Nous avons répertorié grâce à cette analyse 71 modes de défaillances. Nous avons calculé la proportion de chacun des effets provoqués et nous les avons présentés ci-dessous.

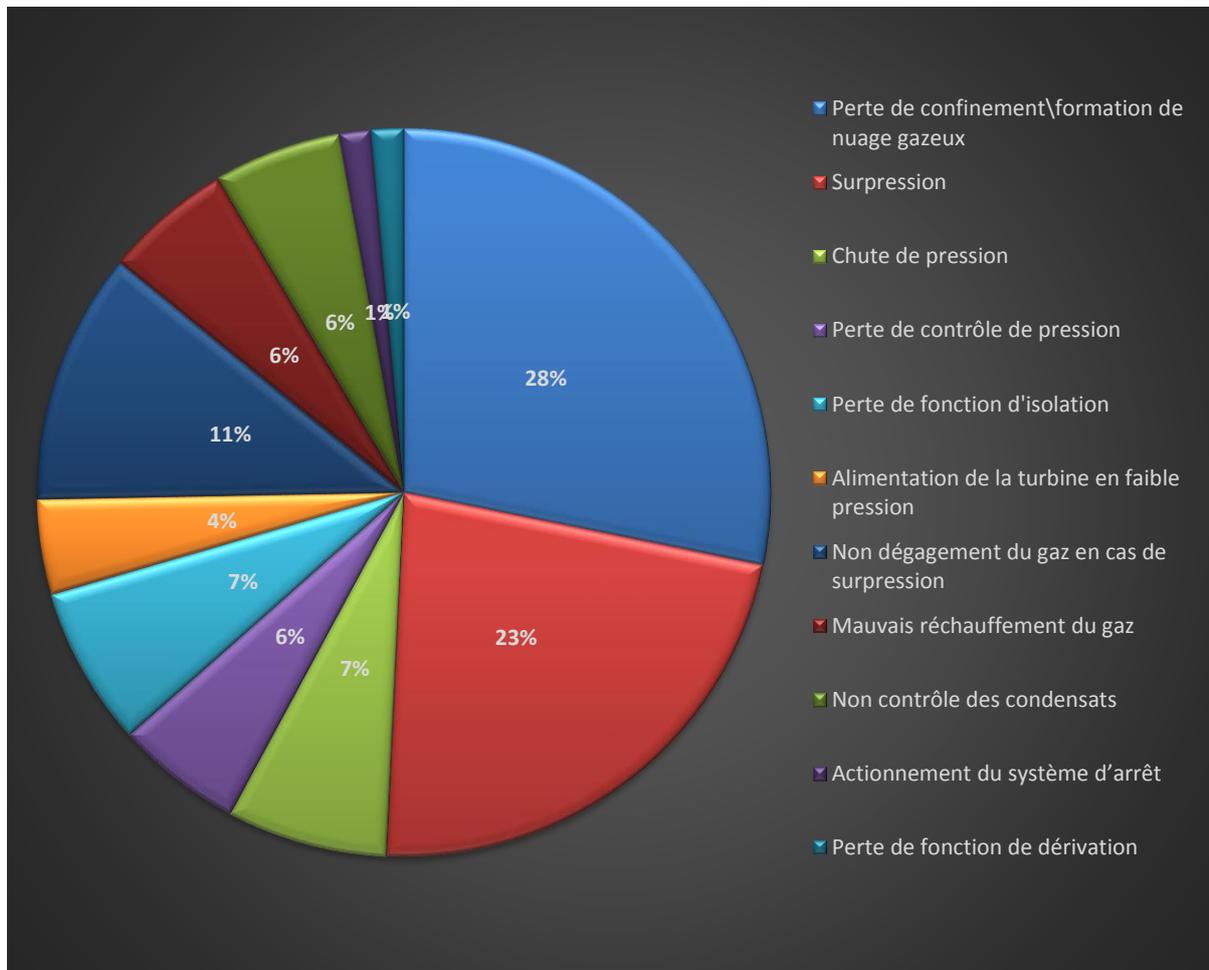


Figure 4-1 : Répartition des conséquences provoquées par l'ensemble des modes de défaillances.

La répartition dans la figure 4-1 nous renseigne que les grandes proportions sont occupées par les événements de **surpression** et de **perte de confinement**, on peut déduire que ce sont les événements qui sont les plus provoqués par les modes de défaillances analysés par l'application de la méthode AMDEC.

En finalité, il est à signaler que cette méthode nous a fournis des modes de défaillances très utiles. Cependant, pour la construction des arbres de défaillances, il nous faudra encore plus de causes qui engendrent les ER (surpression par exemple). Nous avons à appliquer alors la méthode HAZOP par la suite.

4.2 Hazard operability analysis (HAZOP)

La station de réchauffement et d'épuration est un système thermo-hydraulique dans lequel circule un fluide (gaz combustible) et la HAZOP est particulièrement adaptée à ce genre de système ; donc c'est la méthode la plus appropriée à appliquer. Elle nous permet d'extraire les événements (conséquences) engendrés par les dérives des paramètres liés à l'exploitation de l'installation étudiée, de déterminer les causes et de recenser les barrières de sécurités existantes. Cette méthode nous fournit également encore plus de causes potentielles possibles qui peuvent conduire à des événements redoutés notamment la suppression et la perte de confinement du gaz combustible.

- **Découpage**

Le découpage de l'installation qui fait l'objet d'une analyse HAZOP est une étape primordiale et indispensable pour que l'analyse soit complète et de qualité. Nous avons découpé la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible en quatre nœuds qui sont constitués de plusieurs composants dont chacun contient une substance (matière) comme précisé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-4 : Découpage de la station de réchauffement et d'épuration du gaz.

N°	Nœud	Composant	Matière
1	Sous-système de filtration à deux étages	Conduite d'air	Air comprimé (8bar)
		Conduite en amont	Gaz combustible
		Conduite en aval	
2	Sous-système de Réchauffement à vapeur	Conduite avant échangeur	Gaz combustible
		Conduite après échangeur	
		Conduite d'alimentation en vapeur en amont de l'échangeur	Vapeur
		Conduite d'eau condensée en aval de l'échangeur	
3	Sous-système de Réchauffement Electrique	Conduite en amont du réchauffeur	Gaz combustible
		Conduite en aval du réchauffeur	
4	Sous-système d'épuration du gaz combustible	Conduite d'air	Air comprimé (8bar)
		Conduite en aval	Gaz combustible

Pour plus de clarté, nous avons identifié les nœuds choisis dans les schémas P&ID de la station étudiée que nous présentons en annexe 5.

Ensuite, pour chaque composant, nous avons choisi des paramètres et étudié leurs dérives puis déduit les causes ainsi que les conséquences ou événements engendrés qui en découlent. Le tableau 4-5 montre l'ensemble des paramètres choisis pour chacun des composants étudiés.

Tableau 4-5 : Les paramètres choisis pour chaque composant.

Composant	Paramètre
Conduite d'air	Pression
Conduite en amont du filtre	
Conduite en aval du filtre	
Conduite avant échangeur	
Conduite après échangeur	Pression ; Température
Conduite d'alimentation en vapeur en amont de l'échangeur	Débit
Conduite d'eau condensée en aval de l'échangeur	Pression
Conduite en amont du réchauffeur électrique	
Conduite en aval du réchauffeur	
Conduite en aval de l'épurateur	

• **Résultats**

Nous avons suivi la démarche systématique HAZOP décrite dans le chapitre 2 puis synthétisé notre analyse dans 4 tableaux (un tableau pour chaque nœud) qui sont présentés en annexe 6. Chaque tableau contient l'identification du nœud et se compose de dix colonnes. La dernière colonne, intitulée observations, est dédiée aux jugements que nous portons aux dérives. C'est une échelle de trois niveaux (indésirable, critique et inacceptable) qui sont expliquées dans le tableau 4-6.

Tableau 4-6 Classification des niveaux des dérives.

Niveau	Signification
Indésirable	Dérive dont l'effet à une répercussion sur la production
Critique	Dérive qui conduit à la surpression, à l'augmentation du niveau des condensats ou de température
Inacceptable	Dérive qui conduit directement à la perte de confinement (fuite) du gaz ou la rupture de pipes

L'analyse par l'application de la méthode HAZOP nous a permis d'extraire plusieurs dérives qui conduisent aux ER, les plus importants sont la surpression et la de perte de confinement du gaz combustible. Elle nous a permis également d'identifier d'autre dérives qui affectent le bon fonctionnement de la turbine à gaz. Nous résumons ci-dessous la répartition de l'ensemble des niveaux de dérives trouvées.

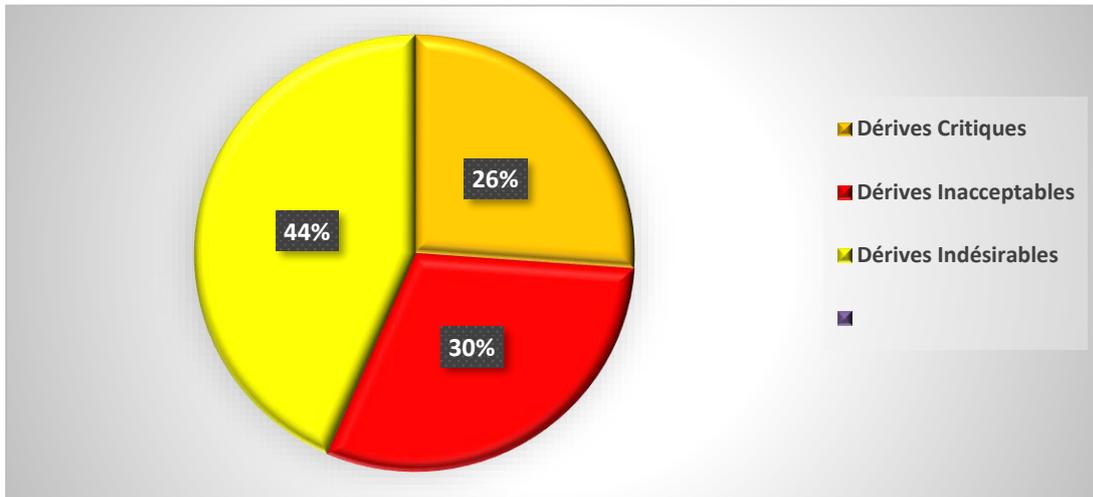


Figure 4-2 : Proportions des différents niveaux de dérives

Si nous considérons les proportions, nous observons que celle des dérives indésirables tient une place importante. Cependant, si on combine les pourcentages des dérives inacceptables et critiques, la proportion sera plus significative. Donc nous pouvons déduire que la majorité des dérives conduit aux événements tel que la surpression, la perte de confinement du gaz (fuite) ou la rupture des conduites.

Nous présentons ci-dessous la répartition des trois niveaux de dérives à travers les quatre nœuds étudiés.

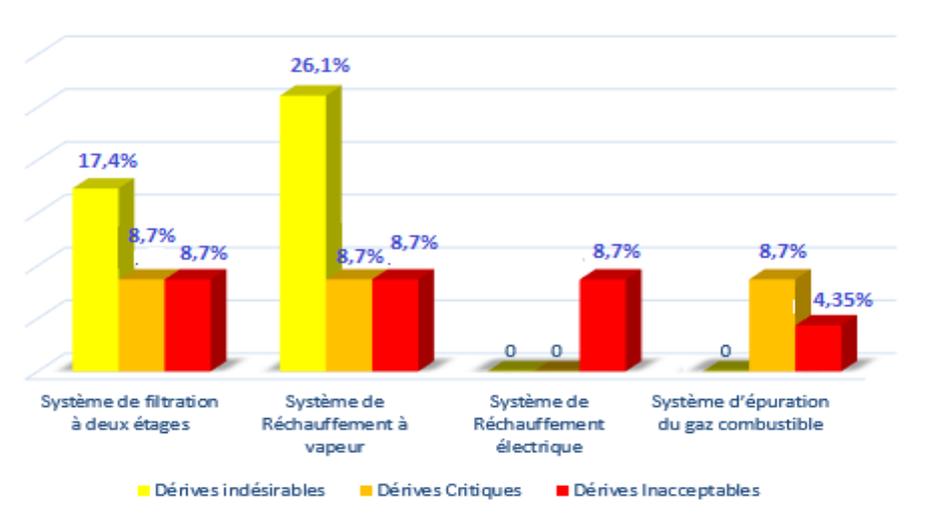


Figure 4-3 : Proportions des différents niveaux de dérives dans chaque nœud étudié.

La figure 4-3 renseigne que les événements générés par les dérives critiques et inacceptables (surpression, fuite ou rupture de conduites) peuvent survenir dans les quatre nœuds étudiés.

Ainsi nous remarquons qu'il n'y a pas de dérives qui engendrent la surpression dans le sous-système de réchauffement électrique, en revanche cet événement est provoqué par des défaillances déjà traitées dans l'analyse AMDEC. Cela nous amène à déduire qu'il y a une certaine complémentarité entre les deux méthodes appliquées.

4.3 Arbre de défaillances

Le déploiement des deux méthodes d'analyse AMDEC et HAZOP nous a permis d'obtenir suffisamment d'événements de base pour l'élaboration des arbres de défaillances. Ces deux méthodes nous ont démontré également que tous les sous-systèmes qui composent la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible ne sont pas à l'abri de la surpression et de perte de confinement ; donc nous élaborons dans ce qui va suivre un arbre de défaillances pour chaque sous-système (filtration à deux étages ; réchauffement à vapeur ; réchauffement électrique et épuration de gaz).

Quant à l'ER, notre choix s'est porté vers la surpression car il peut être considéré comme un événement central ; en effet, il est provoqué par la combinaison des défaillances et des dérives traitées auparavant et il peut aussi conduire aux événements de perte de confinement (fuite) ou de la rupture des pipes (voir les tableaux AMDEC et HAZOP).

Nous schématisons les quatre arbres de défaillances dans les figures 4-4 à 4-7.

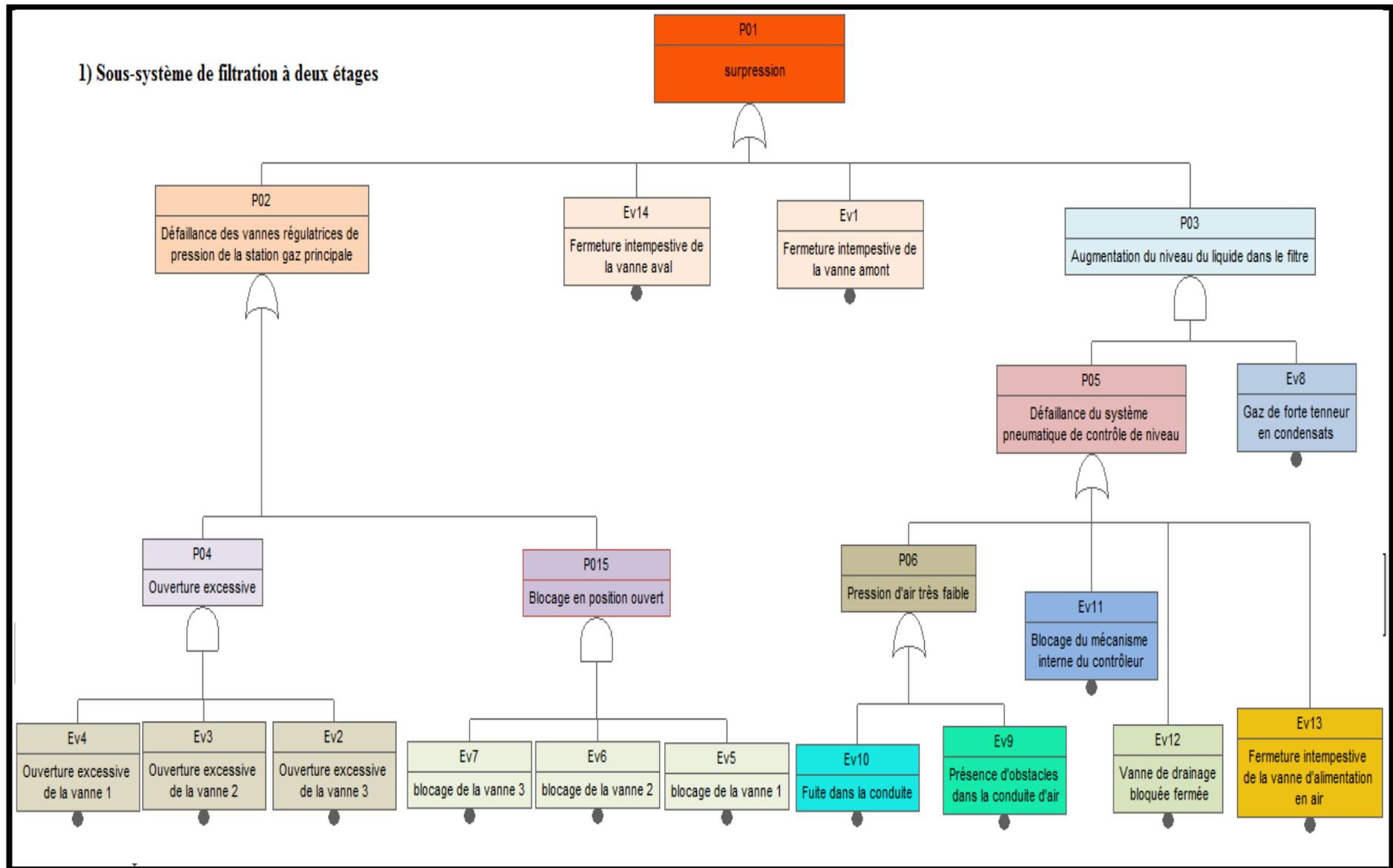


Figure : 4-4 AdD 1.

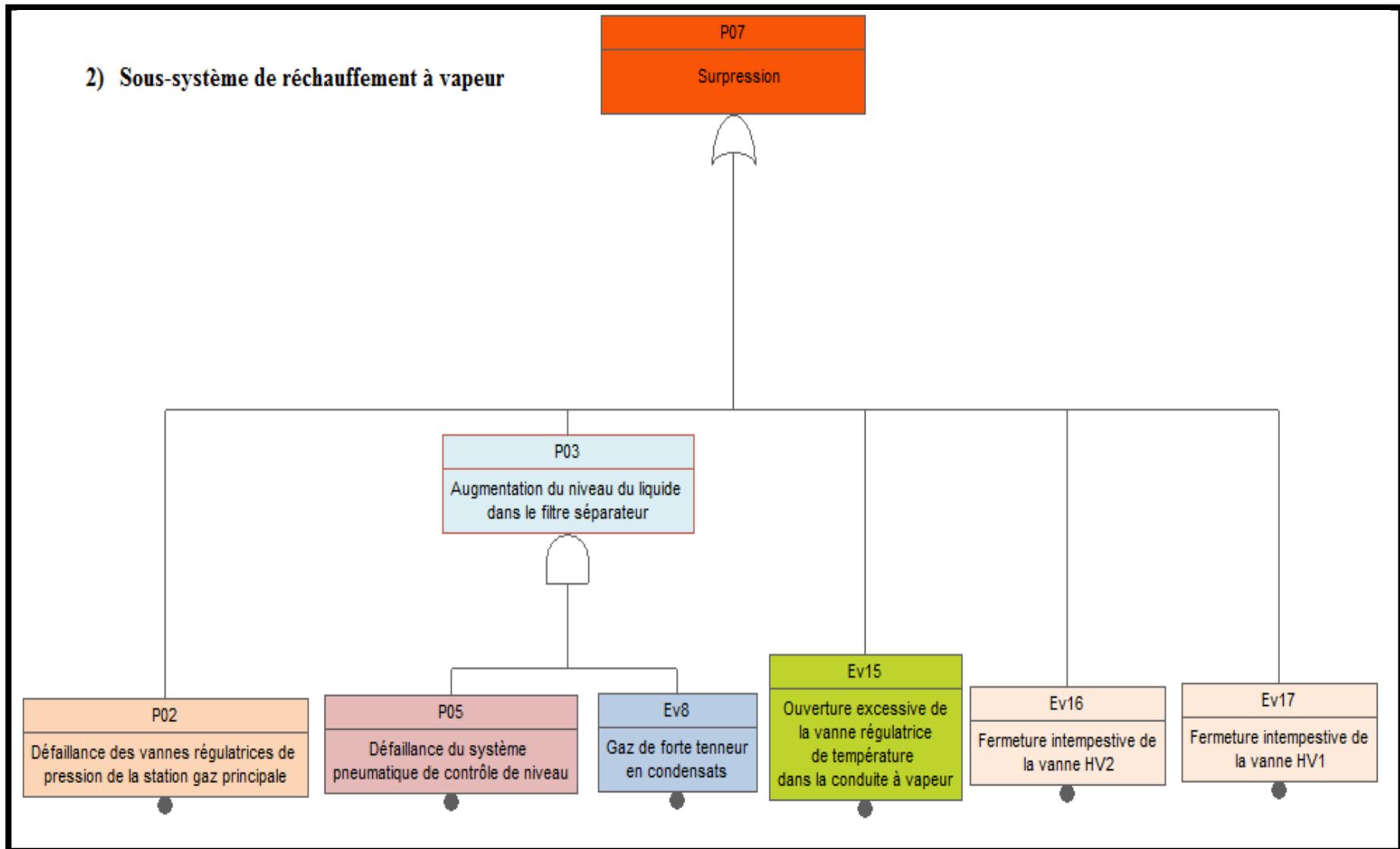


Figure 4-5 : AdD 2

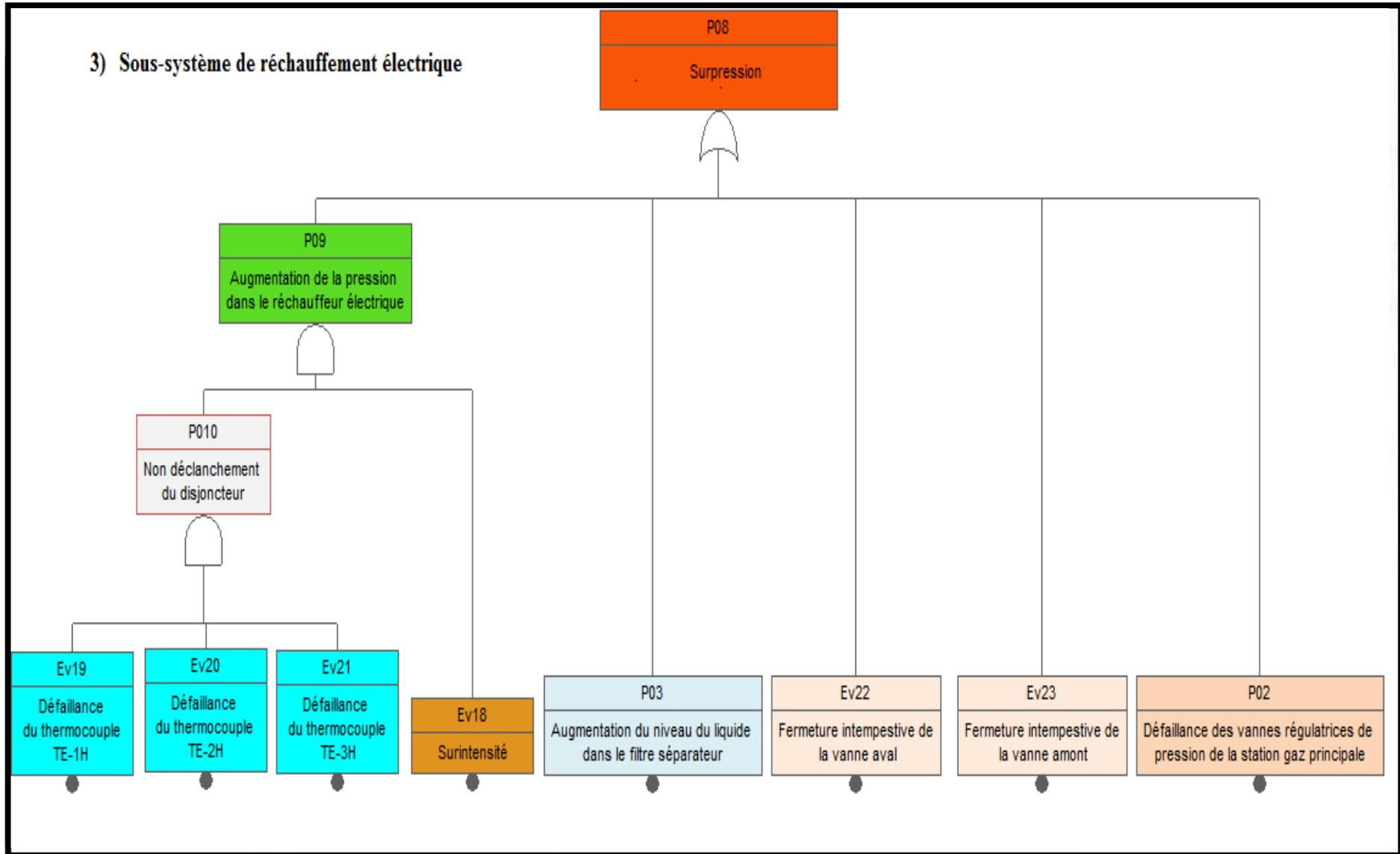


Figure 4-6 : AdD 3.

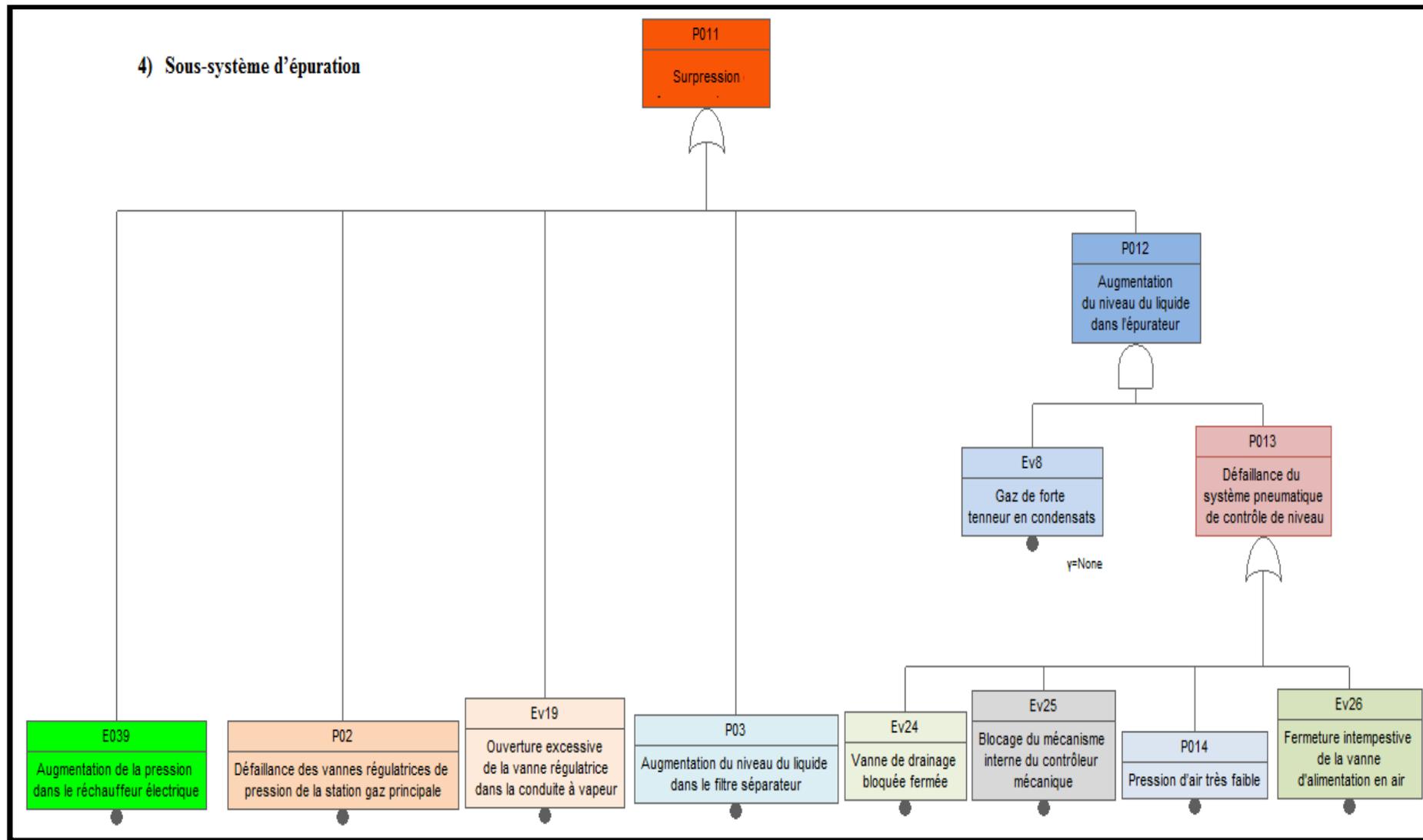


Figure 4-7 : AdD 4.

• **Calcul des probabilités**

Dans une approche quantitative et dans le but de mettre en évidence la partie dans laquelle la surpression est plus susceptible d'y survenir, nous allons dans ce qui va suivre calculer la probabilité d'occurrence de cet évènement redouté dans chaque sous-système. Pour cela, nous partageons la tâche en quatre parties. Dans chacune, nous présenterons un tableau contenant les évènements de base qui constituent chaque arbre de défaillance élaboré auparavant ainsi que leurs codifications et leurs fréquences d'apparition extraites de la base de données OREDA [14]. Cela nous permettra de calculer la probabilité d'occurrence de la surpression dans chaque partie. **Les fréquences sont exprimées en nombre de défaillances par heure.**

Les probabilités sont calculées de la manière suivante :

- Pour les portes logiques « Et » : $P(A \text{ et } B) = P(A) \times P(B)$;
- Pour les portes logiques « Ou » : $P(A \text{ ou } B) = P(A) + P(B)$.

1. Sous-système de filtration à deux étages

Tableau 4-7 : Fréquences des évènements de base dans le Sous-système 1 [14].

Codification	Evènement de base	Fréquence
Ev1	Fermeture intempestive de la vanne amont	0.78×10^{-6}
Ev2	Ouverture excessive de la vanne 3	6.1×10^{-10}
Ev3	Ouverture excessive de la vanne 2	
Ev4	Ouverture excessive de la vanne 1	
Ev5	Blocage de la vanne 1	1.95×10^{-6}
Ev6	Blocage de la vanne 2	
Ev7	Blocage de la vanne 3	
Ev8	Gaz de forte teneur en condensats	11.42×10^{-6}
Ev9	Présence d'obstacle dans la conduite d'air	114.16×10^{-6}
Ev10	Fuite dans la conduite d'air	6.1×10^{-10}
Ev11	Blocage du mécanisme interne du contrôleur mécanique	2.90×10^{-6}
Ev12	Vanne de drainage bloquée fermée	1.19×10^{-6}
Ev13	Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation en air	0.18×10^{-6}
Ev14	Fermeture intempestive de la vanne aval	0.78×10^{-6}

La probabilité de surpression dans le sous-système de filtration à deux étages est donnée par la relation suivante : **$P01 = P02 + Ev1 + Ev14 + P03$** .

Nous avons $P02=P04 + P015$; $P03= P05 \times Ev8$.

$P04=Ev2 \times Ev3 \times Ev4$; $P015=Ev5 \times Ev6 \times Ev7$; $P05= P06 + Ev11 + Ev11 + Ev12 + Ev13$.

$P06= Ev9 + Ev10$.

Alors $P01= (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7) + Ev1 + Ev14 + (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) \times Ev8$.

$P01= (6.1 \times 10^{-10})^3 + (1.95 \times 10^{-6})^3 + 2 \times 0.78 \times 10^{-6} + (114.16 \times 10^{-6} + 6.1 \times 10^{-10} + 2.90 \times 10^{-6} + 1.19 \times 10^{-6} + 0.18 \times 10^{-6}) \times 11.42 \times 10^{-6}$.

Donc $P01= 1.561 \times 10^{-6}$.

2. Sous-système de réchauffement à vapeur

Tableau 4-8 : Fréquences des évènements de base dans le Sous-système 2 [14].

Codification	Evènement de base	Fréquence
Ev15	Ouverture excessive de la vanne régulatrice de température dans la conduite vapeur	0.09×10^{-6}
Ev16	Fermeture intempestive de la vanne HV2	0.78×10^{-6}
Ev17	Fermeture intempestive de la vanne HV1	

La probabilité de surpression dans le sous-système de réchauffement à vapeur est donnée par la relation suivante : $P07= P02 + P03 + Ev15+ Ev16 + Ev17$

Nous avons $P03= (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) \times Ev8$

$P02= (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7)$

Alors $P07= (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7) + (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) \times Ev8 + Ev15+ Ev16 + Ev17$

$P07 = (6.1 \times 10^{-10})^3 + (1.95 \times 10^{-6})^3 + (114.16 \times 10^{-6} + 6.1 \times 10^{-10} + 2.90 \times 10^{-6} + 1.19 \times 10^{-6} + 0.18 \times 10^{-6}) \times 11.42 \times 10^{-6} + 0.09 \times 10^{-6} + 2 \times 0.78 \times 10^{-6}$.

Donc $P07 = 1.651 \times 10^{-6}$.

3. Sous-système de réchauffement électrique

Tableau 4-9 : Fréquences des évènements de base dans le Sous-système 3 [14].

Codification	Evènement de base	Fréquence
Ev18	Surintensité	114.16 x 10 ⁻⁶
Ev19	Défaillance du thermocouple TE-1H	4.06 x 10 ⁻⁶
Ev20	Défaillance du thermocouple TE-2H	
Ev21	Défaillance du thermocouple TE-3H	
Ev22	Fermeture intempestive de la vanne en aval	0.78 x 10 ⁻⁶
Ev23	Fermeture intempestive de la vanne en amont	

La probabilité de surpression dans le sous-système de réchauffement électrique est donnée par la relation suivante : **P08= P09 + P02+ P03 + Ev22+ Ev23**

Nous avons **P09=P010 x Ev18 ; P03= (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) x Ev8**

$$P02= (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7)$$

$$P010= Ev19 \times Ev20 \times Ev21$$

Alors **P08= Ev19 x Ev20 x Ev21 x Ev18 + (Ev2 x Ev3 x Ev4) + (Ev5 x Ev6 x Ev7) + (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) x Ev8 + Ev22+ Ev23**

$$P08= (4.06 \times 10^{-6})^3 \times 114.16 \times 10^{-6} + (6.1 \times 10^{-10})^3 + (1.95 \times 10^{-6})^3 + (114.16 \times 10^{-6} + 6.1 \times 10^{-10} + 2.90 \times 10^{-6} + 1.19 \times 10^{-6} + 0.18 \times 10^{-6}) \times 11.42 \times 10^{-6} + 2 \times 0.78 \times 10^{-6}$$

Donc **P08 = 1.561 x 10⁻⁶.**

4. Sous-système d'épuration de gaz

Tableau 4-10 : Fréquences des évènements de base dans le Sous-système 4 [14].

Codification	Evènement de base	Fréquence
Ev24	Vanne de drainage bloquée fermée	1.19 x 10 ⁻⁶
Ev25	Blocage du mécanisme interne du contrôleur mécanique	2.90 x 10 ⁻⁶
Ev26	Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation en air	0.18 x 10 ⁻⁶

La probabilité de surpression dans le sous-système de réchauffement électrique est donnée par la relation suivante : $P011 = P02 + P03 + P09 + P012 + Ev19$

$$P02 = (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7)$$

$$P03 = (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) \times Ev8 ; P014 = P06 = Ev9 + Ev10$$

$$P09 = P010 \times Ev18 ; P012 = P013 \times Ev8 ; P013 = P014 + Ev24 + Ev25 + Ev26$$

Alors $P011 = (Ev2 \times Ev3 \times Ev4) + (Ev5 \times Ev6 \times Ev7) + (Ev9 + Ev10 + Ev11 + Ev12 + Ev13) \times Ev8 + Ev19 \times Ev20 \times Ev21 \times Ev18 + (Ev9 + Ev10 + Ev24 + Ev25 + Ev26) \times Ev8$

$$P011 = (6.1 \times 10^{-10})^3 + (1.95 \times 10^{-6})^3 + 2 \times (114.16 \times 10^{-6} + 6.1 \times 10^{-10} + 2.90 \times 10^{-6} + 1.19 \times 10^{-6} + 0.18 \times 10^{-6}) \times 11.42 \times 10^{-6} + (4.06 \times 10^{-6})^3 \times 114.16 \times 10^{-6}$$

Donc $P011 = 2.71 \times 10^{-9}$.

• **Interprétation des résultats**

Nous présentons l'ensemble des résultats dans le tableau ci-dessous avec une classification d'apparition des évènements selon l'échelle qui a été établie dans l'EDD de la centrale électrique de Hajret-Ennous (voir tableau 4-11).

Tableau 4-11 : Probabilités d'occurrence de la surpression dans chaque sous-système.

N°	Sous-système	Evènement redouté	Codification	Probabilité d'occurrence par heure	Probabilité d'occurrence par an	Classification
1	Filtration à deux étages	Surpression	P01	1.561×10^{-6}	13.7×10^{-2}	5
2	Réchauffement à vapeur		P07	1.651×10^{-6}	14.5×10^{-2}	
3	Réchauffement électrique		P08	1.561×10^{-6}	13.7×10^{-2}	
4	Epuration		P011	2.71×10^{-9}	2.37×10^{-5}	2

L'ensemble des résultats obtenus ci-dessus nous renseigne que la probabilité de surpression est assez considérable (évènement fréquent) et varie plus au moins d'un sous-système à l'autre. En effet, selon le calcul, cet évènement est relativement plus susceptible d'avoir lieu dans le sous-système de réchauffement à vapeur avec une probabilité de 14.5×10^{-2} par an. Les probabilités d'occurrence au niveau des deux sous-systèmes de filtration à deux étages et de réchauffement électrique sont les mêmes et la valeur est très proche de celle du réchauffement à vapeur. Quant au sous-système d'épuration de gaz, l'occurrence de la surpression est relativement rare.

4.4 Arbre d'évènements

Après avoir élaboré les AdD de l'ER « surpression » dans les quatre sous-systèmes qui composent la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible, nous construisons maintenant les AdE pour visualiser la succession d'évènements redoutés secondaires (ERS) et calculer ensuite leurs probabilités d'occurrence. L'élaboration des arbres commence depuis la surpression, cela est considéré dans ce cas comme l'évènement initiateur qui conduira aux ERS (conséquences).

❖ Identification des fonctions de sécurité

Avant de construire les arbres des événements, nous identifions d'abord les fonctions de sécurité qui empêchent l'aboutissement aux ERS. Nous les présentons dans le tableau 4-12.

Tableau 4-12 : Fonctions de sécurité.

Fonction	Acquérir la valeur de pression et la transmettre aux afficheurs (salle de contrôle)	Réglage manuel de pression	Dégager automatiquement le gaz en cas de surpression	Dégager manuellement le gaz en cas de surpression
Dispositif assurant la fonction	Transmetteur de pression	Vannes manuelles (amont\ Aval) Vannes (HV1, HV2)	Soupapes de sécurité	Events manuels
Paramètre ou information déclenchant la fonction	Permanent	P > 38 bar	P=44.8 bar	Blocage des vannes manuelles

Le suivi de la démarche qui consiste à envisager d'une manière systématique le fonctionnement ou la défaillance des fonctions de sécurité nous a amené à construire quatre AdE qui sont présentés dans les figures ci-dessous.

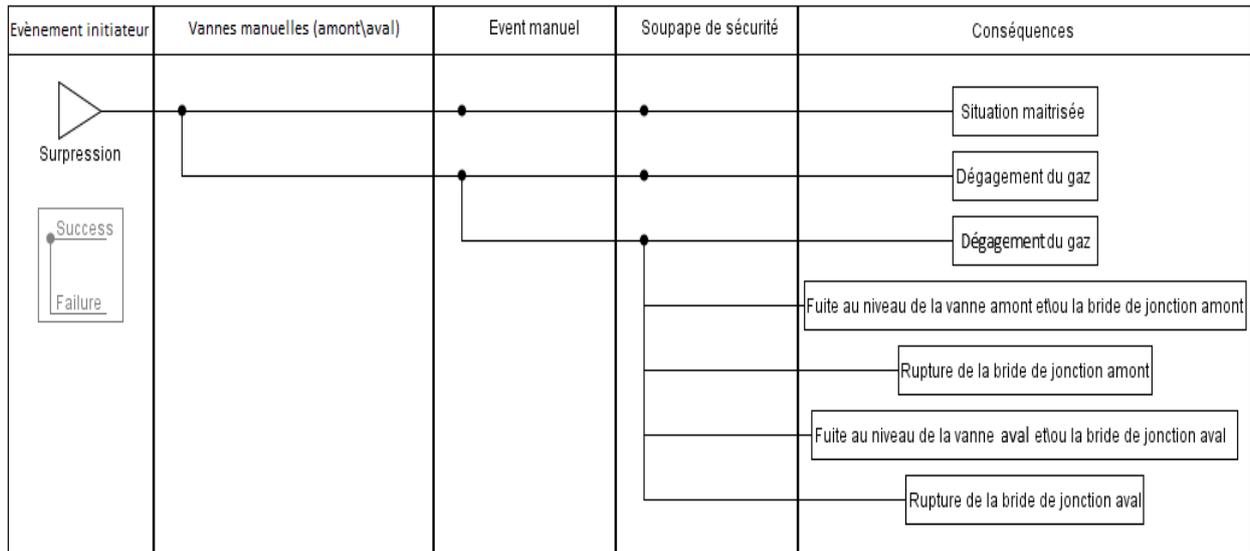


Figure 4-8 : AdE de la surpression dans le sous-système 1.

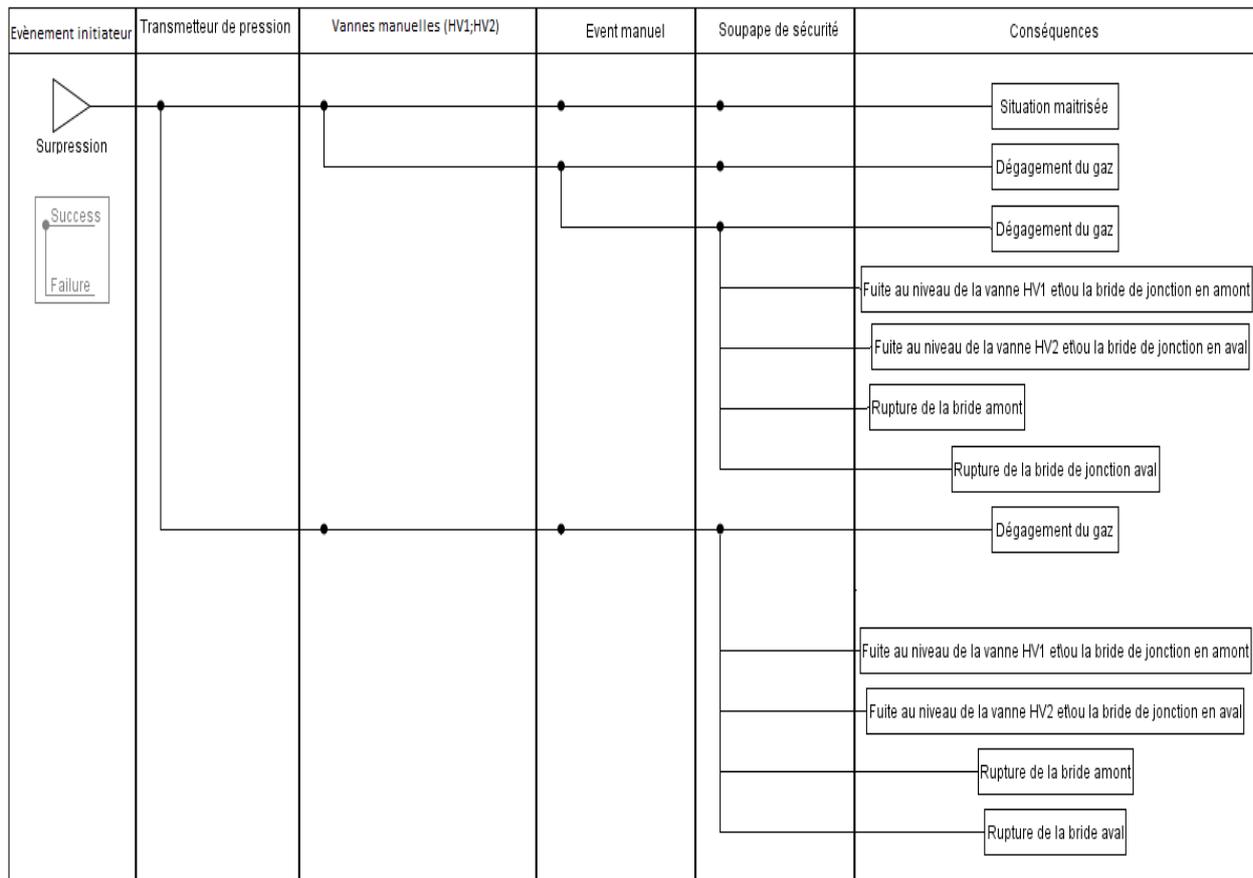


Figure 4-9 : AdE de la surpression dans le sous-système 2.

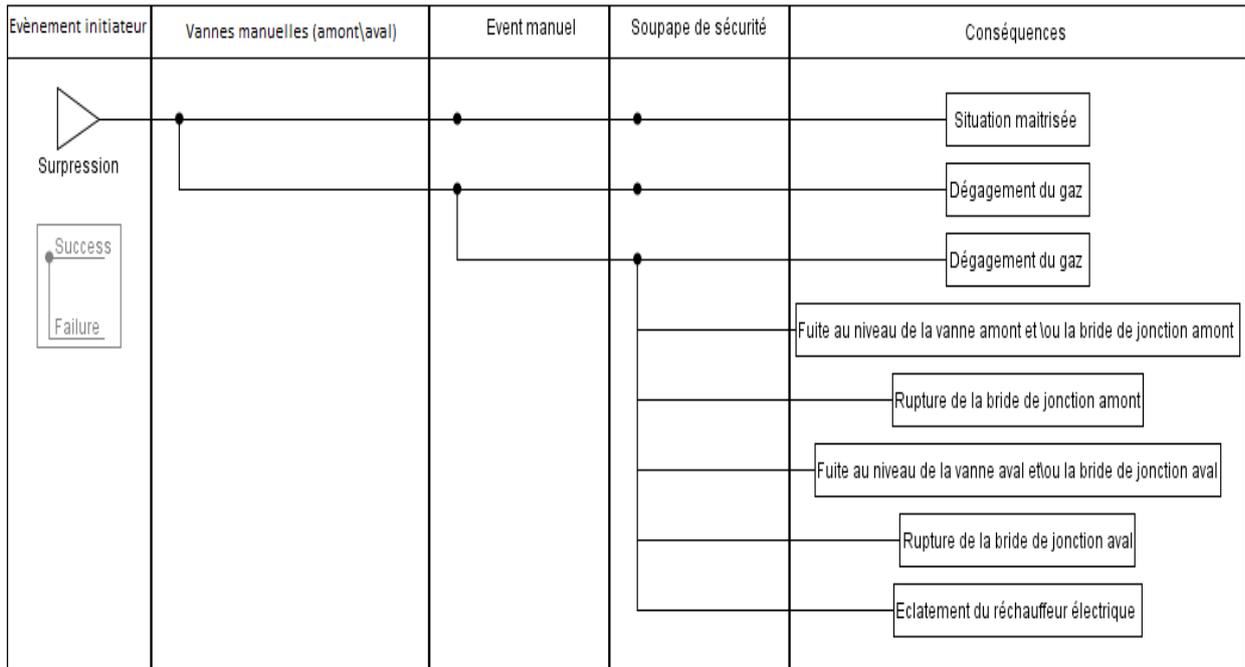


Figure 4-10 : AdE de la surpression dans le sous-système 3.

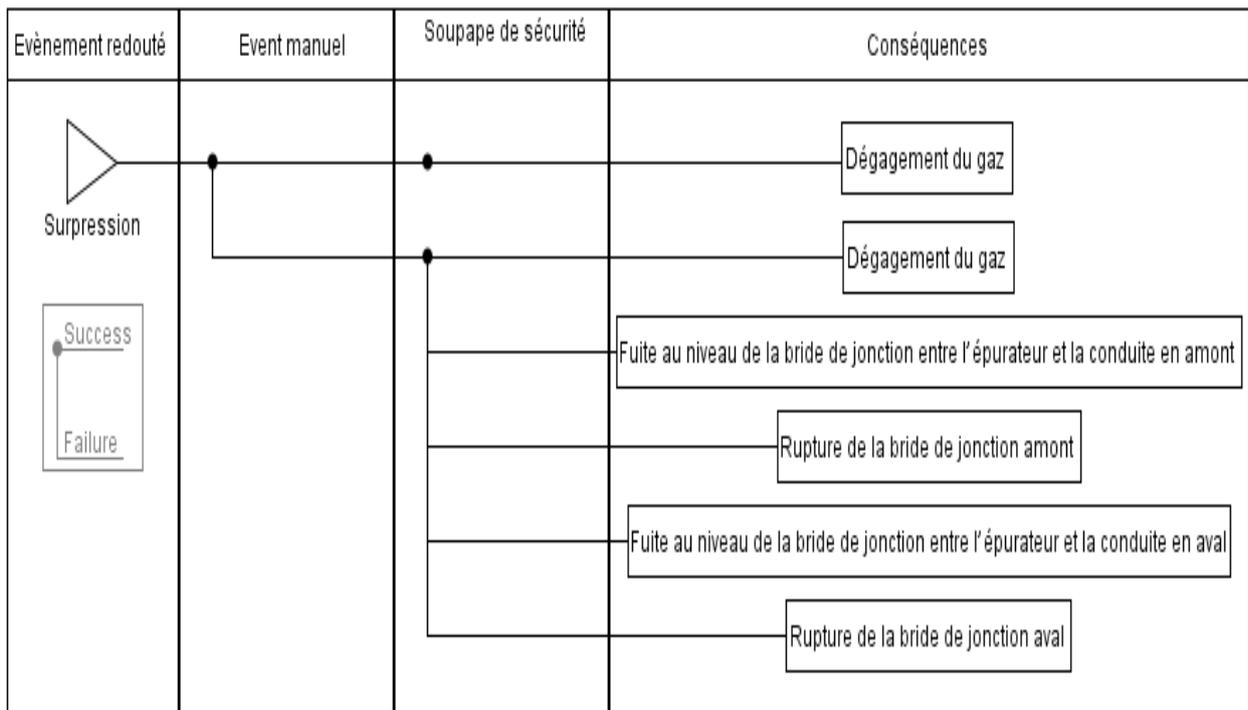


Figure 4-11 : AdE de la surpression dans le sous-système 4.

Selon les figures, nous observons clairement que la surpression peut engendrer les ERS suivants :

- Fuite de gaz au niveau des vannes ;
- Fuite de gaz au niveau des brides de jonction ;
- Rupture totale des brides de jonction entre les équipements et les conduites ;
- Eclatement du réchauffeur électrique.

- **Calcul de probabilités**

Pour calculer les probabilités d'occurrence des ERS, nous suivons la même démarche que celle adoptée pour le calcul des probabilités de l'ER (surpression). En effet, nous présentons d'abord un tableau qui contient les fréquences de défaillance des équipements de sécurité exprimées en nombre de défaillances par heure, ensuite nous calculerons pour chaque arbre d'évènement élaboré la probabilité d'occurrence des conséquences.

Tableau 4-13 : Fréquences de défaillance des équipements de sécurité [14].

Equipement	Fréquence de défaillance	Codification
Vannes manuelles (amont\aval)	5.86×10^{-6}	P1
Event manuel de l'échangeur	13.68×10^{-6}	P2
Soupape de sécurité	2.79×10^{-6}	P3
Transmetteur de pression	5.48×10^{-6}	P4
Events manuels des autres équipements	4.49×10^{-6}	P5

- **Remarque :** Nous observons que dans chaque AdE construit ci-dessus, la surpression donne lieu à plusieurs ERS en cas de défaillance des équipements de sécurité. Puisque la trajectoire est identique pour en arriver à ces évènements, leurs probabilités d'occurrence sont les mêmes dans chaque arbre élaboré (voir figure 5-8). Donc chaque probabilité calculée dans ce qui va suivre correspond à l'occurrence d'un seul évènement redouté secondaire généré dans chaque arbre. Exemple pour l'AdE du système 1 (figure 4-8), la surpression génère quatre ERS différents. La trajectoire pour en aboutir à ces évènements est la même, donc ils sont équiprobables, il suffit alors de calculer une seule valeur de probabilité.

Nous notons $P_{1 \leq i \leq 4}$ la probabilité d'occurrence des ERS dans chaque sous-système.

1- Sous-système de filtration à deux étages

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » est calculée auparavant et elle vaut $P_{01} = 1.561 \times 10^{-6}$.

Donc la probabilité d'occurrence des évènements redoutés secondaires est égale à :

$$P_1 = P_{01} \times P_1 \times P_5 \times P_3 = 1.561 \times 10^{-6} \times 5.86 \times 10^{-6} \times 4.49 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6}$$

$$\text{Alors } P_1 = 1.1459 \times 10^{-22}.$$

2- Sous-système de réchauffement à vapeur

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » dans ce sous-système est égale à :

$$P_{07} = 1.651 \times 10^{-6}$$

Comme la figure 4-9 le montre, deux trajectoires sont possibles pour en arriver aux évènements redoutés secondaires. On note P_2 la probabilité pour la première trajectoire et Q_1 pour la deuxième.

$$P_2 = P_{07} \times (1 - P_4) \times P_1 \times P_2 \times P_3 = 1.651 \times 10^{-6} \times (1 - 5.48 \times 10^{-6}) \times 5.86 \times 10^{-6} \times 13.68 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6}$$

$$Q_1 = P_{07} \times P_4 \times P_3 = 1.651 \times 10^{-6} \times 5.48 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6}$$

$$\text{Donc } P_2 = 3.69 \times 10^{-22} \text{ et } Q_1 = 2.524 \times 10^{-17}.$$

3- Sous-système de réchauffement électrique

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » dans ce sous-système est égale à :

$$P_{08} = 1.561 \times 10^{-6}.$$

$$P_3 = P_{08} \times P_1 \times P_5 \times P_3 = 1.561 \times 10^{-6} \times 5.86 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6} \times 4.49 \times 10^{-6}$$

$$\text{Donc } P_3 = 1.146 \times 10^{-22}.$$

4- Sous-système d'épuration de gaz

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » dans ce sous-système est égale à :

$$P_{011} = 2.83 \times 10^{-9}$$

$$\text{Donc } P_4 = P_{011} \times P_5 \times P_3 = 2.83 \times 10^{-9} \times 2.79 \times 10^{-6} \times 4.49 \times 10^{-6} = 3.55 \times 10^{-20}.$$

L'ensemble des résultats de calcul est présenté dans le tableau 4-14 avec une classification d'apparition des ERS.

Tableau 4-14 : Probabilités d'occurrences des évènements redoutés secondaires.

Sous-système	Codification des évènements redoutés secondaires	Probabilité d'occurrence par heure	Probabilité d'occurrence par an	Classification
Filtration à deux étages	P ₁	1.146 x 10⁻²²	1.0038 x 10 ⁻¹⁸	1
Réchauffement à vapeur	P ₂	3.69 x 10⁻²²	3.23 x 10 ⁻¹⁸	1
	Q ₁	2.524 x 10⁻¹⁷	2.211 x 10 ⁻¹³	1
Réchauffement électrique	P ₃	1.146 x 10⁻²²	1.0038 x 10 ⁻¹⁸	1
Epuration	P ₄	3.55 x 10⁻²⁰	3.11 x 10 ⁻¹⁶	1

Nous présentons ci-dessous le tableau de classification des probabilités d'occurrence.

Tableau 4-15 : Classes des taux d'occurrences.

Niveau de Probabilité	Définition	Taux d'occurrence par an
5	Evènement très probable dans la vie du système. A été observé d'une façon répétitive sur d'autres sites	>10 ⁻²
4	Evènement probable dans la vie du système. A été observé plusieurs fois sur d'autres sites	De 10 ⁻³ à 10 ⁻²
3	Evènement peu probable dans la vie du système. S'est produit quelques fois sur d'autres sites	De 10 ⁻⁴ à 10 ⁻³
2	Evènement très peu probable dans la vie du système. S'est produit rarement sur d'autres sites	De 10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴
1	Evènement qui s'est produit très rarement sur d'autres sites	< 10 ⁻⁵

Les probabilités nous démontrent que l'apparition des ERS est très rare. Cependant, nous insistons sur le fait de ne pas les sous-estimer, car certains facteurs pouvant mener à une défaillance rapide des équipements de sécurité doivent être pris en considération ; citons par exemple l'environnement marin qui est de nature extrêmement corrosif dans lequel la centrale électrique de Hajret-Ennous se situe. De plus il est à noter que depuis son installation à ce jour (Mai 2017), le système de réchauffement et d'épuration du gaz combustible n'a subi aucune surpression qui aurait déclencher les équipements de sécurité tel que les soupapes. Donc le risque d'infirmité de ces dernier est assez considérable lors de la survenance de cet évènement.

4.5 Méthode nœud papillon

La construction des arbres de défaillances et des arbres d'événements nous a permis chacun en ce qui les concerne de mettre en évidence la combinaison des causes basiques qui engendrent la surpression ainsi que de déployer les événements redoutés secondaires provoqués. De plus ces deux arbres nous ont permis de calculer les probabilités d'occurrences. Dans le but visualiser les phénomènes dangereux et leurs effets majeurs, nous schématisons maintenant les scénarios d'accidents par l'application de la méthode nœud papillon avec la surpression comme évènement redouté centrale. Pour cela, nous combinons les AdD et les AdE élaborés pour chaque sous-système avec la mise en place des barrières de défense (protection sur les AdE et prévention sur les AdD) ; ensuite nous envisageons le développement de chaque scénario jusqu'à l'arrivée aux effets majeurs.

Les nœuds papillons sont élaborés et présentés dans les figures 4-12 à 4-15 ci-après.

Nous présentons dans le tableau 4-16 les barrières de défense et leurs codes couleur.

Tableau 4-16 : Identification des barrières de défenses.

Barriere de défense	Code couleur
Event manuel	
Soupape de sécurité	
Mesures de sécurité zone ATEX	
Vanne manuelle de drainage de liquide	
Calorifuge	
Vanne manuelle de réglage de pression	
Indicateur de position de vanne	
Alarme niveau très haut	
Transmetteur de pression	
Manomètre	
Alarme niveau haut	
Verre de gauge	

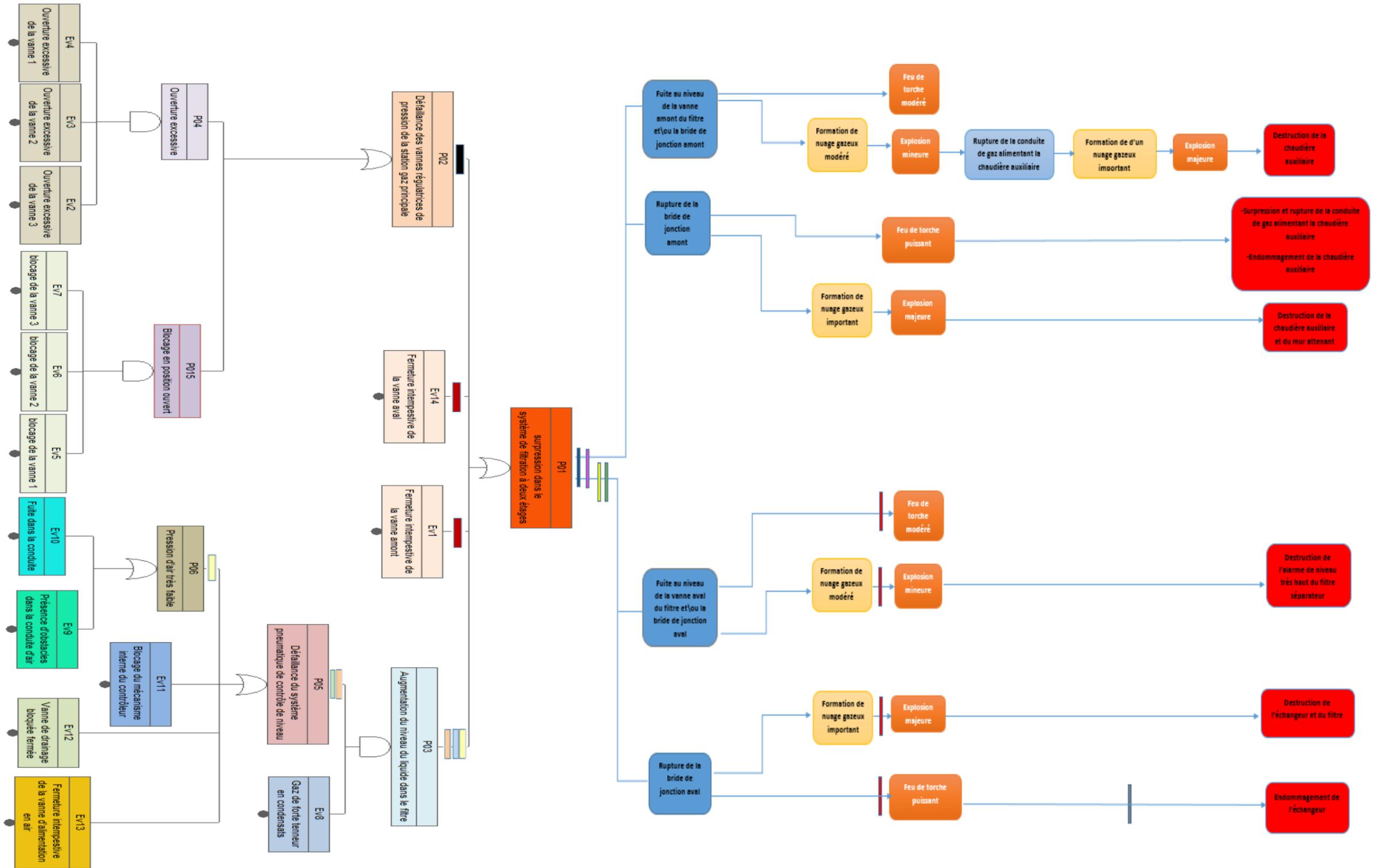


Figure 4-12 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de filtration à deux étages.

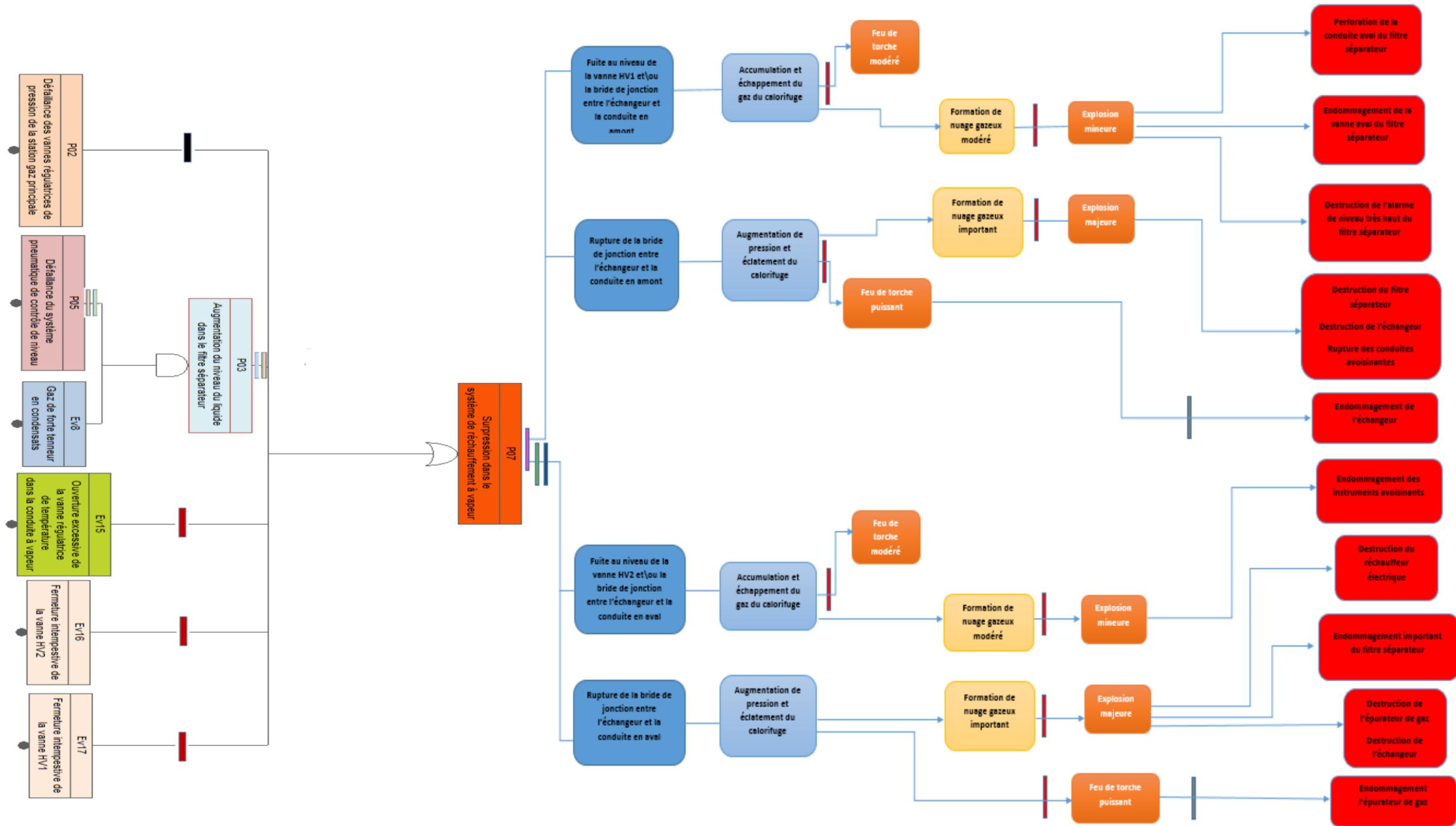


Figure 4-13 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de réchauffement à vapeur.

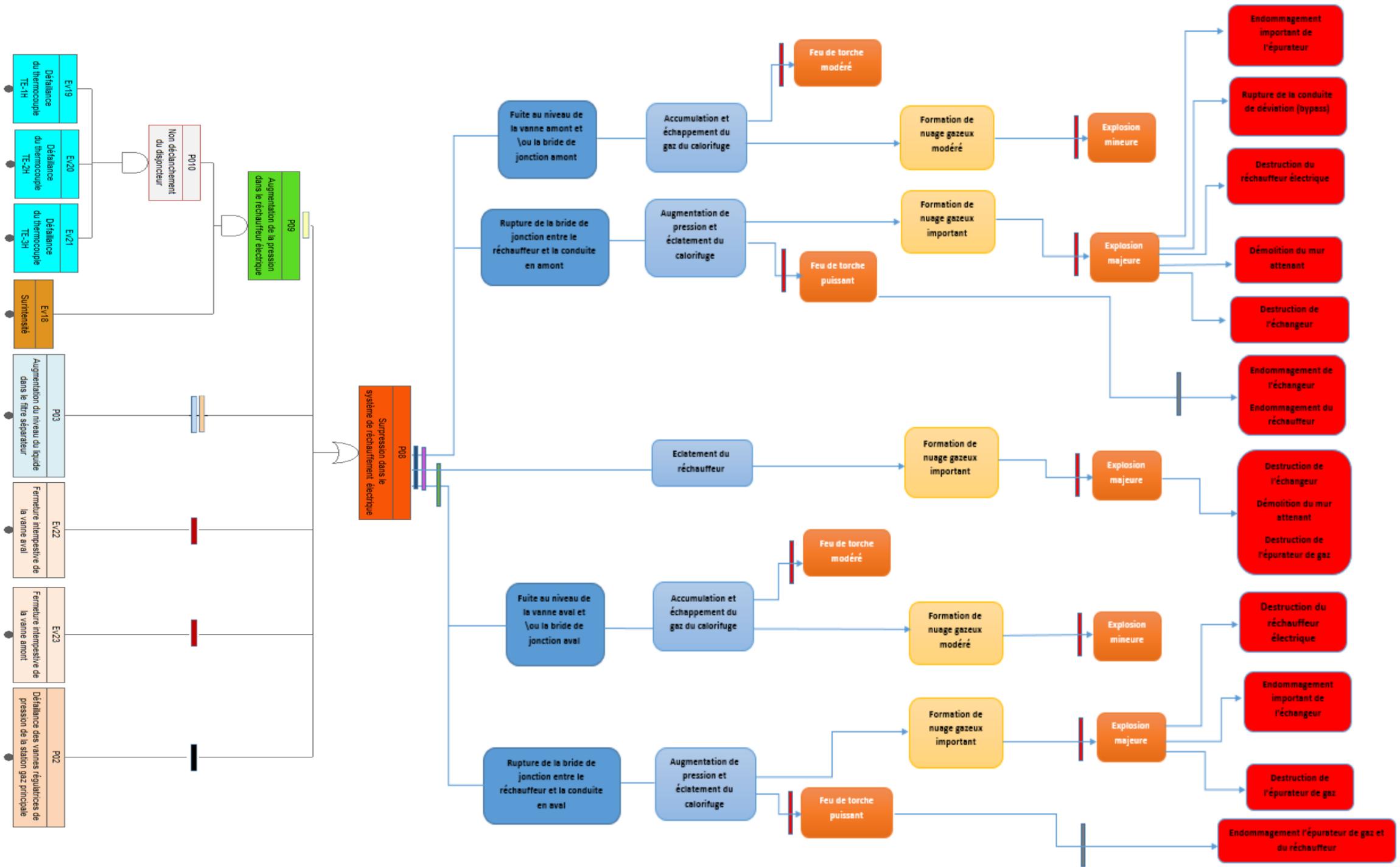


Figure 4-14 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système de réchauffement électrique.

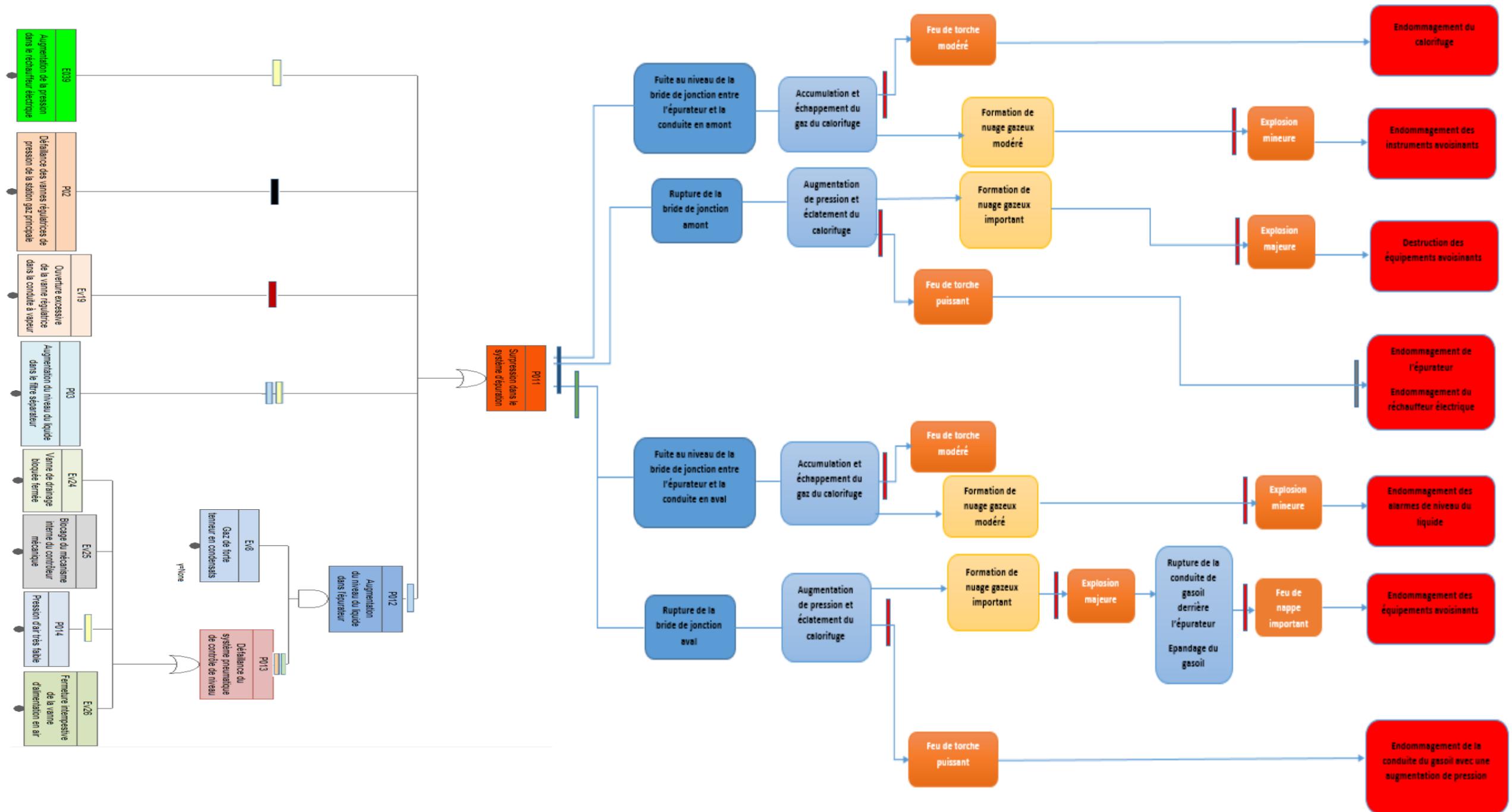


Figure 4-15 : Nœud papillon de l'ERC "surpression" dans le système d'épuration de gaz.

L'élaboration des nœud papillons nous a permis de visualiser clairement les scénarios d'accidents qui pourraient survenir au niveau des quatre sous-systèmes qui composent la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible. Elle nous a permis également de savoir quels genres de phénomènes dangereux auxquels nous pourrions être confrontés ainsi que la nature des conséquences néfastes qui pourraient en découler.

Pour estimer l'étendue des dégâts et de la détérioration de matériel et d'appareillage que pourrait causer l'explosion et le feu de torche, il nous paraît opportun de faire une simulation de ces deux phénomènes dangereux. C'est ce qui sera traité au point suivant.

4.6 Simulation des effets d'explosion

Les nœud-papillons élaborés ci-dessus montrent que l'explosion majeure peut avoir lieu dans tous les sous-systèmes étudiés. L'évènement redouté secondaire qui est à l'origine de ce phénomène dangereux est généralement la rupture des brides de jonction en amont ou en aval de chaque équipement. Donc c'est le scénario sur lequel notre simulation sera basée.

Comme précisé au chapitre 2, la simulation des effets d'explosion de nuage gazeux a pour objectif d'obtenir la courbe de variation de la surpression en fonction de la distance en employant les modèles analytiques empiriques suivants :

- Méthode TNT ;
- Méthode Multi-Energy ;
- Méthode Baker-Strehlow.

Pour notre cas, nous avons choisi d'employer le modèle Baker-Strehlow, cela peut être justifié par les raisons suivantes :

- La méthode TNT calcule la surpression d'une explosion sans tenir compte de la configuration de l'espace où l'explosion a lieu. Il faut avoir aussi le coefficient qui constitue la fraction de l'énergie libérée sous forme d'onde de choc. Ce paramètre dans la plupart des cas est inconnu, ce qui influence grandement la simulation des effets.
- La méthode Multi-Energy prend en compte la configuration de l'espace, cependant elle requiert de déterminer les régions obstruées ainsi que l'espace disponible pour la dispersion du nuage pour en déduire un coefficient qui caractérise la force de l'explosion. Cela nécessite d'avoir les dimensions des équipements mis en place dans l'installation ainsi que chaque distance qui les sépare. C'est ce qui nous paraît impossible d'obtenir.
- La méthode Baker-Strehlow prend en considération la configuration de l'espace dans lequel l'explosion a lieu sans avoir besoin de le dimensionner. Les valeurs fournies sont d'habitude très proches de celles obtenues avec la méthode Multi-Energy et son application est relativement aisée.

4.6.1 Description du modèle Baker-Strehlow

La méthode Baker-Strehlow est basée sur la même idée des régions obstruées qui sont initialement proposées par la méthode multi-énergie. Dans ces deux méthodes, la présence d'obstacles dans les directions d'expansion de la flamme provoque des explosions de nuages de vapeur ou de gaz d'une intensité très élevée.

Dans la méthode multi-énergie, les régions obstruées sont déterminées. Dans ces régions, le souffle explosif est d'une intensité très élevée et se caractérise par le coefficient de soufflage d'explosion très important.

Dans la méthode Baker-Strehlow, le paramètre le plus important pour déterminer l'intensité de l'explosion est la vitesse de propagation de la flamme. Ceci est déterminée en prenant en considération les trois paramètres suivants [10] :

- ✓ La manière dont le front de la flamme se propage,
- ✓ La réactivité du combustible,
- ✓ La densité des obstacles.

Comme tout autres modèles, pour calculer les valeurs de surpression générées par l'explosion, on doit suivre certaines étapes ; pour la méthode Baker-Strehlow, on adopte la démarche suivante :

1- Sélectionner la vitesse de la flamme

Comme il a été précisé, la vitesse de la flamme est un paramètre important dans la détermination de l'intensité de l'explosion. Les paramètres qui influent sur la vitesse de la flamme selon la méthode Baker-Strehlow sont la façon dont la flamme se propage, la réactivité du combustible et la densité des obstacles que la flamme peut rencontrer durant son expansion. Voir le tableau 4-17 :

❖ **La façon dont la flamme se propage** peut-être classifiée en trois catégories :

-3-D : Lorsque la flamme se propage en trois dimensions suivant un profil sphérique ou hémisphérique.

-2-D : Lorsque la flamme se propage en deux dimensions suivant un profil cylindrique.

-1-D : Lorsque la flamme se propage suivant une seule direction.

❖ **La réactivité du combustible** est aussi classifiée en trois catégories. La faible réactivité est démontrée par des gaz tels que le méthane et le monoxyde de carbone. La haute réactivité n'est présentée que par l'hydrogène, l'acétylène, l'oxyde d'éthylène, l'oxyde de propylène et l'éthylène. Tous les combustibles restants sont considérés comme des carburants d'une réactivité moyenne.

- ❖ **La densité des obstacles** est un paramètre difficile à quantifier. Selon le modèle Baker-Strehlow, la densité peut être seulement qualifiée selon trois classement (densité élevée, densité moyenne et densité faible).

En prenant en considération ces trois paramètres décrits ci-dessus, la vitesse de la flamme exprimée en nombre de Mach (vitesse de la flamme divisée par la vitesse du son) peut être sélectionnée à partir du tableau 4-17.

Tableau 4-17 : Vitesse de la flamme exprimée en nombre de Mach M_j [10].

Propagation de la flamme	Réactivité	Densité des obstacles		
		élevée	Moyenne	Faible
1-D	élevée	5.2	5.2	5.2
	Moyenne	2.27	1.77	1.03
	Faible	2.27	1.03	0.294
2-D	élevée	1.77	1.03	0.588
	Moyenne	1.24	0.662	0.118
	Faible	0.662	0.471	0.079
3-D	élevée	0.588	0.153	0.071
	Moyenne	0.206	0.100	0.037
	Faible	0.147	0.100	0.037

2- Calculer l'énergie dégagée par l'explosion

L'énergie libérée par l'explosion E (MJ) peut être calculée à partir de la chaleur de combustion ΔH_c (MJ. Kg⁻¹), du volume du nuage gazeux V (m³), de la densité du combustible ρ (Kg.m⁻³) et de la stœchiométrie s de la réaction (rapport combustible / air). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$E = V \times [\Delta H_c \times \rho \times s] \dots \dots \dots (1)$$

3- Calculer les valeurs de la distance réduite r'

r' est en fonction de la distance x (m) à laquelle on souhaite calculer la surpression, elle est donnée par la relation suivante :

$$r' = x \left(\frac{E}{Pa} \right)^{(-1/3)} \dots \dots \dots (2)$$

4- Déterminer les valeurs de la surpression réduite P'_s

Les valeurs de la surpression réduite P'_s sont extraites à partir du diagramme (P'_s en fonction de r') présenté dans la figure 4-16. La valeur de la surpression P_s (MPa) qui correspond à la distance x (m) est alors déduite de l'expression suivante :

$$P'_s = \frac{P_s}{Pa} \dots \dots \dots (3)$$

Où Pa désigne la pression atmosphérique, elle vaut **0.1 MPa**.

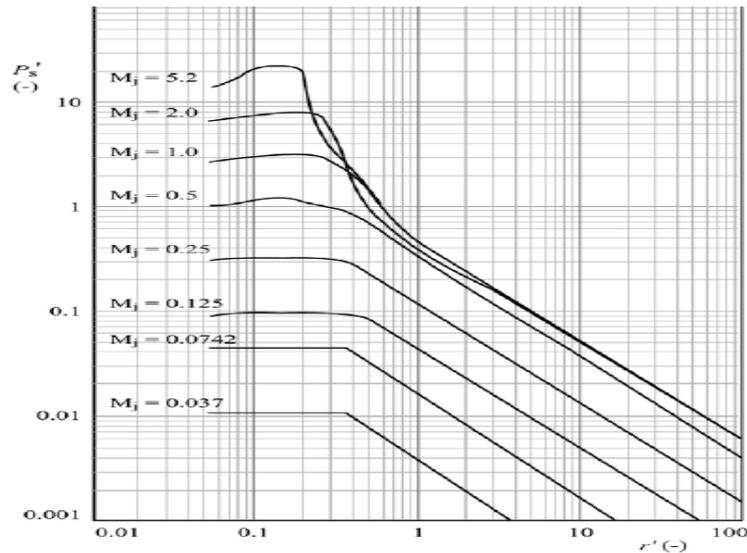


Figure 4-16 : diagramme P_s' en fonction de r' [10].

Chaque courbe est caractérisée par sa propre vitesse de flamme (nombre de Mach).

4.6.2 Application du Modèle Baker-Strehlow

Comme mentionné auparavant, notre simulation du phénomène d'explosion du gaz combustible est basée sur le scénario de rupture d'une bride de jonction (en amont ou en aval) au niveau d'un des sous-systèmes qui composent la station de réchauffement et d'épuration du gaz. En ce qui concerne l'équipement, notre choix s'est porté vers l'échangeur à chaleur pour les raisons suivantes :

- Selon les résultats de calculs, l'ERC « surpression » est plus probable d'y survenir.
- L'échangeur à chaleur se trouve au milieu des autres équipements, donc c'est un endroit congestionné et l'explosion sera d'une intensité importante.

❖ Sélectionnement de la vitesse de la flamme

-En cas d'explosion, l'expansion de la flamme peut être considérée comme une propagation **2-D** car les deux brides de jonction en amont et en aval de l'échangeur se trouvent très rapprochées des autres équipements (voir figure 4-17).

-Le gaz utilisé dans la centrale est le méthane, c'est un combustible de faible réactivité ; donc on prend la catégorie « **faible** ».

- L'échangeur à chaleur se trouve au milieu des autres équipements de la station de réchauffement et d'épuration du gaz. Cette dernière est encerclée par trois murs, sans oublier sa proximité de la chaudière de récupération ; donc la densité des obstacles que la flamme peut rencontrer en cas d'explosion est « **élevée** ».

En se basant sur les données du tableau 4-17, le nombre de Mach qui correspond à la vitesse de la flamme est égal à **0.662**.



Figure 4-17 : Position de la bride de jonction en amont.

❖ Calcul de l'énergie dégagée par l'explosion

Nous avons les données suivantes :

-Pouvoir calorifique du méthane : $\Delta H_c = 50.02 \text{ (MJ. Kg}^{-1}\text{)}$

-Masse volumique du méthane : $\rho = 0.67 \text{ (Kg.m}^{-3}\text{)}$

-Si nous considérons une fuite de gaz suivie d'une rupture de la bride de jonction, une vanne d'arrêt « *shutdown* » qui se trouve au niveau de la station gaz principale sera actionnée afin d'arrêter l'approvisionnement. Cependant, la quantité de gaz qui se trouve à l'intérieur des pipes sera entièrement évacuée à l'extérieur et forme un nuage gazeux explosif. Cette quantité est estimée de la manière suivante :

Le gaz est envoyé depuis la station principale jusqu'aux tranches de production à travers un pipe de diamètre $D_1 = 45.72 \text{ cm}$. La distance depuis cette station jusqu'au point de déviation pour desservir la station de réchauffement et d'épuration du gaz est de $L_1 = 184.23 \text{ m}$ (voir figure 4-18).

Depuis le point de déviation jusqu'à la station de réchauffement et d'épuration, le diamètre de la conduite diminue jusqu'à $D_2 = 30.5 \text{ cm}$ avec une longueur de $L_2 = 48.99 \text{ m}$.

A la sortie du filtre séparateur, le diamètre sera de $D_3 = 25.4 \text{ cm}$ avec une distance de $L_3 = 2.5 \text{ m}$ jusqu'à la bride de jonction en amont de l'échangeur à chaleur.



Figure 4-18 : longueur de la conduite gaz depuis la station principale jusqu'au point de déviation.

Donc le volume du gaz échappé en cas de rupture accidentelle de la bride de jonction est égal à : $V = \frac{\pi}{4} D_1^2 \times L_1 + \frac{\pi}{4} D_2^2 \times L_2 + \frac{\pi}{4} D_2^2 \times L_3 = 33.952 \text{ m}^3$

- La réaction de combustion du méthane avec l'oxygène est : $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$.
Le ratio **méthane : oxygène** est égal à : **1 : 2**. Donc le ratio **méthane : air** sera : **1 : 10** car l'air contient 21% d'oxygène. Donc le volume du nuage explosif (air + méthane) qu'on obtiendra est égale à : $V = 33.952 \times 10 = 339.52 \text{ m}^3$.

Alors l'énergie libérée par l'explosion est égale à :
 $E = 339.52 \times [50.02 \times 0.67 \times (1 \setminus 10)] = 1.138 \text{ GJ}$.

❖ Détermination des valeurs de surpression Ps

Nous commençons le calcul des valeurs de la suppression à partir d'une distance de valeur supérieure au rayon du nuage gazeux. Le rayon **R** du nuage est calculé comme suit :

Dans le modèle Baker-Strehlow, le nuage explosif est assumé à un hémisphère de volume

$$V = \frac{2}{3} \pi \times R^3. \text{ Donc } R = \sqrt[3]{\frac{3V}{2\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 339.52}{2\pi}} = 5.453 \text{ m.}$$

Dans le tableau ci-après, nous présentons l'ensemble des résultats de calcul des valeurs de la suppression Ps (mbar) générée par l'explosion à partir de la distance **x=6 m** jusqu'à **x=156 m**.

Tableau 4-18 : Valeurs de surpression en fonction des distances.

x (m)	6	16	26	36	46	56	66	76	86
r'	0.2667	0.7113	1.156	1.601	2.0451	2.490	2.934	3.378	3.823
Ps (mbar)	595.360	335.37	236.58	173.060	128.162	99.500	82.468	70.192	60.948
x (m)	96	106	116	126	136	146	156		
r'	4.270	4.713	5.157	5.602	6.046	6491	6.940		
Ps (mbar)	53.750	47.998	43.300	39.398	36.106	33.295	30.868		

Afin de visualiser clairement l'évolution de la surpression en fonction de la distance, nous présentons la courbe de variation dans la figure 4-19.

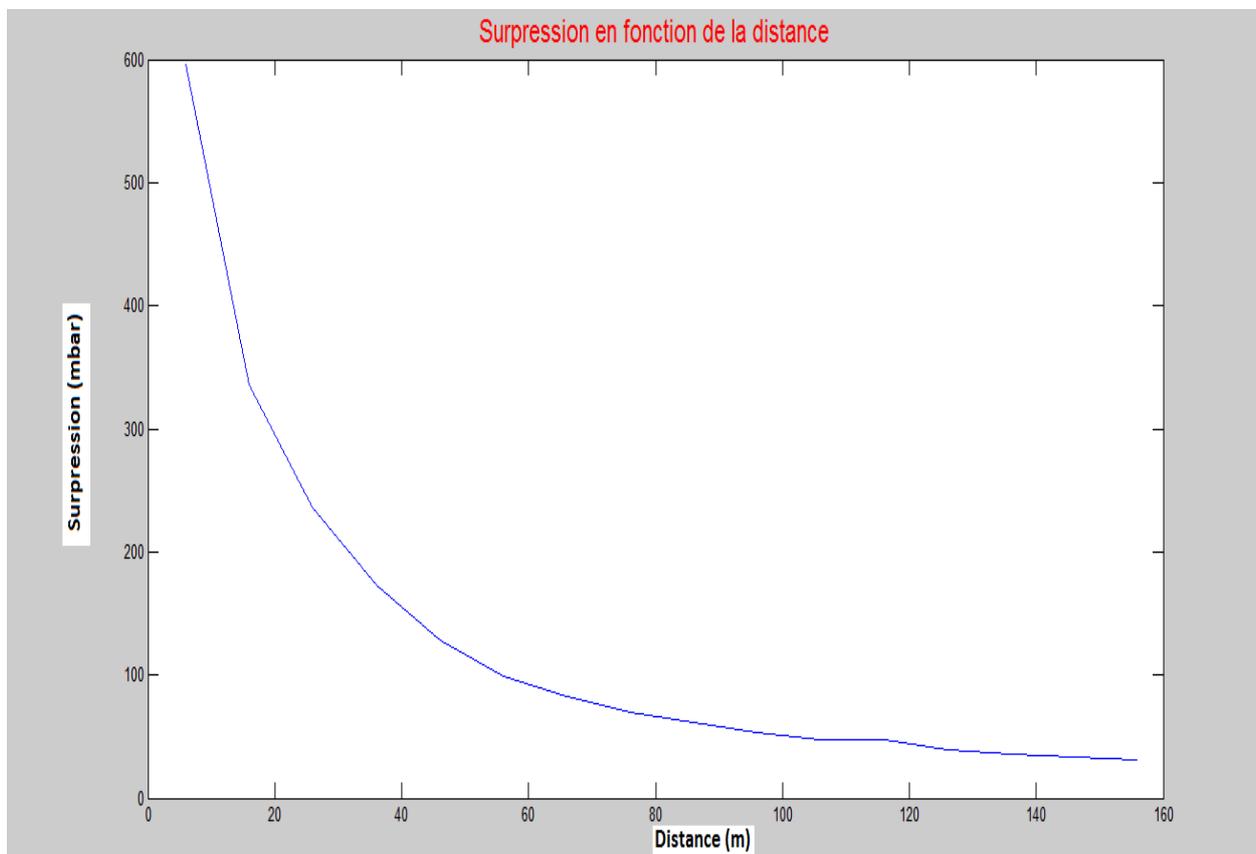


Figure 4-19 : Courbe de variation de la surpression P_s en fonction de la distance x .

4.6.3 Estimation des effets de l'onde de choc

Comme indiqué dans le chapitre 2, les effets d'une explosion d'un nuage gazeux sont dus à l'onde de choc générée par ce phénomène dangereux. Pour chaque catégorie d'éléments vulnérables (personnes et structures), les effets de l'explosion sont classés en différents niveaux selon la valeur de la surpression (voir tableaux 2-1 et 2-2, chapitre 2).

Dans notre cas, nous prenons en considération les effets de l'onde de choc pour les trois niveaux de surpression suivants :

❖ Pour les personnes :

- 50 mbar. Seuil des effets irréversibles

-140 mbar. Seuil des effets létaux

❖ Pour les structures :

-200 mbar. Seuil des effets domino.

- 300 mbar. Seuil des dégâts très graves.

En se servant de la courbe de variation de la surpression en fonction de la distance, nous avons pu déterminer les positions qui correspondent aux différents seuils définis ci-dessus.

Tableau 4-19 : Seuils des différents niveaux de surpression.

Surpression (mbar)	Position (m)
50	102.28
140	42.97
200	31.33
300	18.97

Afin d'estimer l'étendue des effets au niveau de la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible ainsi que les effets sur les équipements avoisinants, nous avons simulé l'explosion avec le logiciel PHAST. En effet, il nous a permis de représenter sur la carte géographiques les périmètres qui correspondent à chaque seuil de surpression. Nous représentons dans la figure 4-20 les seuils des effets létaux et irréversibles pour les personnes. Quant aux seuils des effets sur les structures, ils sont représentés dans la figure 4-21.

La simulation a été faite en prenant en considération les conditions climatiques auxquels la centrale électrique de Hajret-Ennous est exposée. C'est la catégorie 5\D :

-5 signifie que la vitesse du vent est égale à 5 m.s^{-1} ;

-La catégorie D correspond à un temps de moyennement ensoleillé à couvert.



Figure 4-20 : Seuils des effets létaux et irréversibles pour les personnes (140 et 50 mbar).



Figure 4-21 : Seuils des dégâts très graves et des effets domino sur les structures (300 et 200 mbar).

❖ Interprétation

La figure 4-20 nous indique qu'il y a possibilité d'effets létaux jusqu'à une distance maximale de 42.97 mètres sur les personnes (cercle en rouge). Quant aux effets irréversibles, la figure montre que l'onde de choc correspondante à ces effets (50 mbar) est ressentie jusqu'à une portée de 102.28 mètres (cercle en bleu). Nous remarquons sur la figure que le premier cercle (rouge) couvre une partie importante de la zone piétons de la deuxième tranche de production tandis que le deuxième (bleu) qui correspond à une surpression de 140 mbar inclue pratiquement toutes les zones dédiées aux piétons des trois tranches.

Nous signalons que toutes la voies de circulation sont fortement fréquentées par les opérateurs, donc en cas d'évènement d'explosion de gaz, la population se trouvant dans un rayon de 42.97 mètres sera exposée à une onde de choc mortelle de 140 mbar et celle qui se trouve dans une position quelconque entre 42.79 et 102.28 mètres subira une surpression de 50 mbar qui se caractérise par des effets irréversibles pour la vie humaine.

Donc l'explosion du gaz et particulièrement au niveau de la station de réchauffement et d'épuration de la deuxième tranche de production, génère des dégâts d'une ampleur très considérable pour la vie humaine.

En ce qui concerne l'impact sur les structures et le matériel avoisinant, la figure 4-21 indique que des dégâts très graves sont possibles jusqu'à une distance de 18.97 mètres. Quant aux effets domino, Nous pouvons remarquer que le risque est présent dans un rayon de 31.33 mètres.

Le tableau 4-20 représente l'ensemble des effets sur les équipements et les structures provoqués par les deux valeurs de suppression 200 et 300 mbar.

Tableau 4-20 : Effets de l'onde de choc sur les équipements avoisinants.

Surpression (mbar)	Effet
300	Destruction des deux filtres séparateurs
	Destruction de l'échangeur à chaleur
	Destruction du réchauffeur électrique
	Destruction de l'épurateur de gaz
	Démolition des trois murs attenants
	Endommagement de la première chaudière auxiliaire
	Rupture de la conduite du gasoil derrière l'épurateur
200	Endommagements du système de pompage de gasoil (skid-fuel)
	Destruction de l'ossature métallique de la chaudière de récupération de la deuxième tranche
	Effet domino sur la première chaudière auxiliaire avec possibilité de propagation jusqu'au bac à fuel de 18m ³

4.7 Simulation des effets de feu de torche

Le feu de torche est considéré comme étant le deuxième phénomène dangereux qui peut avoir lieu si l'ignition du gaz est immédiate. Nous allons dans cette partie simuler ce phénomène dangereux dans le but d'estimer les effets qu'il peut provoquer tant sur les personnes que sur les équipements avoisinants. Quant à l'endroit, nous avons choisi le coude de la conduite à gaz qui se trouve juste à l'entrée de la station de réchauffement et d'épuration (voir figure 4-22).



Figure 4-22 : Le coude dans la conduite gaz à l'entrée de la station de réchauffement et d'épuration.

Nous avons choisi de simuler le feu de torche dans cet endroit pour les raisons suivantes :

- En cas d'évènement de surpression, le coude est beaucoup plus faible qu'une conduite droite, donc il est fort probable d'avoir une fissuration à ce niveau.
- Ce coude est très proche de la première chaudière auxiliaire, 2.5m à droite environ (voir figure 4-24), le flux thermique peut provoquer une surpression dans la conduite de gaz qui alimente cette dernière, comme il peut endommager complètement la chaudière.

Pour pouvoir simuler avec le logiciel PHAST, il nous a fallu lui introduire les paramètres suivants :

- ✓ Débit du jet ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- ✓ Température du jet ($^{\circ}\text{C}$) ;
- ✓ Vitesse du jet ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).
- ✓ Angle d'inclinaison. Pour notre cas, la valeur zéro a été prise car le jet suivra l'axe horizontale.

Ces paramètres seront déterminés à partir des relations représentées ci-dessous.

La pression à l'intérieur du pipe sera assez importante en cas de surpression causée par la défaillance des vannes régulatrices de pression au niveau de la station à gaz principale (supérieure à 34 bar) donc pour le calcul on assumera un régime supersonique (vitesse du jet supérieure à la vitesse du son) et une pression de 55 bar à l'intérieur de la conduite à gaz.

-Débit du jet : $m' = \frac{P_o \pi d_0^2}{4} \sqrt{\frac{\gamma W_g}{R T_0}} \dots\dots\dots(4)$

-Température du jet : $T_j = T_s \left(\frac{P_a}{P_s}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \dots\dots\dots(5)$

-Vitesse du jet : $U_j = M_j \sqrt{\frac{\gamma R T_j}{W_g}} \dots\dots\dots(6)$

Tel que :

P_o : Pression au point de sortie (MPa) ; $P_o = P_s \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \dots\dots\dots(7)$

d_0 : Diamètre de l'orifice (on prendra 10 cm)

W_g : Masse molaire du gaz naturel (0.0186 kg.mol⁻¹)

γ : Rapport entre la capacité calorifique spécifique à la pression constante C_p (J. K⁻¹.Kg⁻¹) et la capacité calorifique spécifique à volume constant C_v (J.K⁻¹.Kg⁻¹). Pour le gaz naturel elle vaut 1.42

R : Constante des gaz parfait ($R= 8.314$ J.mol⁻¹.K⁻¹)

T_0 : Température à l'orifice (K) ; $T_0 = \frac{2T_s}{1+\gamma} \dots\dots\dots(8)$

T_s : Température à l'intérieur de la conduite (305 K)

P_a : Pression atmosphérique (0.1 MPa)

P_s : Pression à l'intérieur de la conduite (5.5 MPa)

M_j : Nombre de Mach ; $M_j = \sqrt{\frac{(\gamma+1)\left(\frac{P_o}{P_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 2}{\gamma-1}} \dots\dots\dots(9)$

❖ Application numérique

$T_0 = \frac{2 \times 305}{1+1.42} = 252.066$ K ; $P_o = 0.1 \left(\frac{2}{1.42+1}\right)^{\frac{1.42}{1.42-1}} = 0.525$ MPa .

Donc le débit est égal à $m' = \frac{525000 \times \pi \times 0.1^2}{4} \sqrt{\frac{1.42 \times 0.0186}{8.314 \times 252.066}} = 14.84$ Kg s⁻¹.

La température du jet est égale à $T_j = 305 \left(\frac{0.1}{5.5}\right)^{\frac{1.42-1}{1.42}} = 93.227$ K.

$M_j = \sqrt{\frac{(1.42+1)\left(\frac{0.525}{0.1}\right)^{\frac{1.42-1}{1.42}} - 2}{1.42-1}} = 2.16$. Nombre de Mach est supérieur à 1 donc le régime supersonique est confirmé

Donc la vitesse du jet est égale à $U_j = 2.16 \times \sqrt{\frac{1.42 \times 8.314 \times 93.227}{0.0186}} = 525.433$ m.s⁻¹.

A l'aide du logiciel PHAST, nous avons simulé un feu de torche issue d'un orifice de diamètre de 10 cm dans le coude sous les conditions climatiques de catégorie 5\D, cela nous a permis d'obtenir les périmètres qui sont présentés dans la figure 4-23 pour les quatre seuils du flux thermique suivants :

- Seuil des effets irréversibles pour la vie humaine : 3 Kw.m⁻² (en bleu) ;
- Seuil des effets létaux pour les personnes : 5 Kw.m⁻² (en vert) ;
- Seuil des effets dominos pour les équipements : 8 Kw.m⁻² (en rouge) ;
- Seuil des dégâts très graves pour le matériel :16 Kw.m⁻² (en violet).

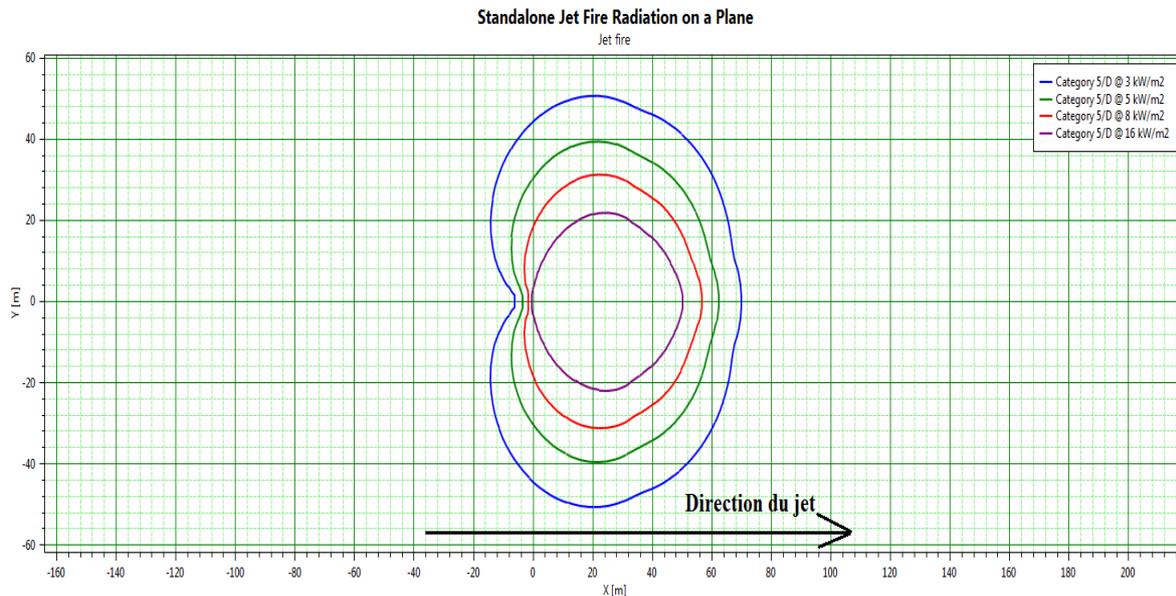


Figure 4-23 : Périmètres des différents niveaux d'intensité du flux thermique.

• Interprétation

Nous remarquons dans la figure que les dégâts très graves pour les structures et le matériel, pour un flux thermique de 16 KW.m⁻², sont possibles jusqu'à une distance de 50 m dans la direction du jet et jusqu'à 22 m dans une direction perpendiculaire à celle de la flamme. On peut déduire donc qu'un phénomène de feu de torche issue d'un orifice de 10 cm au niveau du coude endommage complètement la première chaudière auxiliaire y compris la tuyauterie du

gaz qui alimente cette dernière, donc le risque d'avoir une autre explosion avec effet domino sur les autres chaudières est fortement considérable. En ce qui concerne les effets sur les personnes, la figure montre que les effets létaux sont possibles jusqu'à une distance maximale de 62 mètres parallèle à la distance de la flamme, donc la voie de circulation (zone piéton) sera certainement atteinte.



Figure 4-24 : Position du coude par rapport aux chaudières auxiliaires.

L'application des méthodes d'analyse des risques nous a été très utile. En effet, l'AMDEC nous a permis de récolter au niveau de chaque sous-système étudié les modes de défaillances des différents composants et notamment elle nous a démontré qu'une proportion importante provoque l'évènement redouté « surpression ». L'application de la méthode HAZOP constitue un complément d'analyse. En effet, elle nous a fourni un supplément de causes basiques pour pouvoir construire les arbres de défaillances de la surpression qui nous ont permis de rassembler toutes les causes qui peuvent conduire cet évènement et de calculer la probabilité d'occurrence dans chaque sous-système. Grâce aux arbres d'évènements et aux nœud papillons nous avons pu visualiser les évènements redoutés secondaires provoqués par la surpression, nous avons pu également calculer leurs probabilités de survenance et de mettre en évidence l'enchaînement des évènements jusqu'aux phénomènes dangereux (explosion et feu de torche) et leurs effets majeurs.

Lors de la simulation des phénomènes dangereux, il a été démontré qu'une explosion d'un volume modéré de gaz échappé provenant d'une rupture de la bride de jonction pouvait être à l'origine de dégâts extrêmement considérables tant au niveau des installations qu'au niveau humain. Cela nous amène à juger que mettre en œuvre des mesures de protection et de prévention supplémentaires au niveau de la station de réchauffement et d'épuration du gaz naturel combustible est inéluctable ; c'est ce qui va faire l'objet du chapitre suivant.

MOYENS DE RÉDUCTION DES RISQUES

La simulation des effets des phénomènes dangereux (feu de torche et explosion du gaz) a renseigné que les conséquences sont gravissimes et que mettre en place des barrières de défense est inéluctable. Ce chapitre constitue l'objectif principale de notre travail, en effet, il sera consacré aux mesures techniques que nous proposerons de mettre en place dans la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible. Dans ce qui va suivre, nous allons proposer trois barrières de sécurité. Deux systèmes instrumentés de sécurité, le premier agit en cas d'évènement de surpression tandis que le deuxième sera sollicité en cas de défaillance du premier et survenance de fuite importante de gaz. Quant à la troisième barrière, il s'agira d'un mur anti-souffle qui aura pour rôle de résister à l'onde de choc en cas d'explosion.

Notre démarche est structurée de la manière suivante :

- Détermination des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) requis pour chacun des systèmes instrumentés de sécurité ;
- Proposition des architectures des deux systèmes et description de leurs modes opératoires ;
- Vérification de la conformité des architectures proposées par rapport aux niveaux d'intégrité de sécurité requis par le logiciel GRIF [24] ;
- Analyse fréquentielle du premier système instrumenté de sécurité ;
- Positionnement des deux systèmes instrumentés de sécurité proposés ;
- Dimensionnement du mur anti-souffle proposé.

5.1 Systèmes instrumentés de sécurité (SIS)

Les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) appartiennent à la catégorie générique établie par la norme internationale CEI 61508 [19] comme des systèmes liés à la sécurité. Le « système instrumenté de sécurité » est un terme plus utilisé actuellement dans l'industrie des procédés. Il est défini par CEI 61511 [20], une norme dérivée de la norme CEI 61508 pour ce secteur, en tant que « système instrumenté utilisé pour accomplir une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité (SIF) dans le but d'atténuer le danger et de mettre le processus en état de sécurité en cas d'évènement redouté. Un SIS est constitué d'une combinaison de capteurs, de résolveurs logiques et d'éléments finaux sous forme d'actionneurs ».

La conception du SIS implique la réalisation de certains niveaux minimaux d'intégrité de sécurité (SIL) comme l'exige la norme CEI 61508. Les exigences d'intégrité de sécurité incluent la restriction maximale de la probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation du SIS (PFD_{avg}) et un niveau minimum de tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes est la capacité d'un système à éviter que les échecs (fautes) individuels des composants ne conduisent à la défaillance complète du SIS [21]. Le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis pour le SIS est un niveau discret parmi quatre niveaux possibles (de 1 à 4), pour chacun il est associé une probabilité moyenne de défaillance à la demande (PFD_{avg}). Cette dernière est d'autant moins importante que le SIL est élevée (voir tableau 5-1). Il est à noter que les SIS sont caractérisés par une faible demande, en effet ils sont sollicités qu'en cas d'occurrence d'évènement redouté (surpression par exemple).

Tableau 5-1 : SIL pour mode de fonctionnement à faible demande [21].

SIL	(PFD_{avg})
4	$[10^{-5}; 10^{-4}]$
3	$[10^{-4}; 10^{-3}]$
2	$[10^{-3}; 10^{-2}]$
1	$[10^{-2}; 10^{-1}]$

5.1.1 Méthodes pour déterminer le SIL

L'affectation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) au système instrumenté de sécurité (SIS) est une décision basée sur la philosophie de tolérance aux risques. En effet, le niveau le plus haut (niveau 4) est généralement attribué à un SIS dont la défaillance à la demande en cas d'évènement redouté conduit à des conséquences gravissimes, tandis que le niveau 1 est d'habitude alloué lorsque les effets de la défaillance du SIS à la sollicitation seront mineurs. La détermination du SIL peut être effectuée en adoptant plusieurs méthodes, le choix dépend toujours de la disponibilité d'informations obtenues à l'issue de la phase d'analyse des risques afférents au système sur lequel le SIS va être implémenté [22] :

- **HAZOP modifiée** : C'est une extension du processus HAZOP existant. Il s'agit d'une affectation subjective du SIL en fonction de l'estimation de la gravité et de la probabilité de l'incident ou l'évènement redouté. Dans ce cas, le SIL est attribué en examinant qualitativement le potentiel de risque et en sélectionnant un niveau qui semble le plus approprié.
- **Attribution selon la conséquence seulement** : C'est une méthode basée sur une estimation de la conséquence potentielle de l'incident. La fréquence n'est pas prise en compte. Par conséquent, tous les incidents entraînant des décès potentiels par exemple auraient le même SIL, quelle que soit la fréquence probable.
- **Matrice des risques** : C'est une technique qui permet de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité requis à partir d'une grille normalisée après avoir estimé le niveau de gravité et de probabilité.

- **Graphe des risques :** La norme internationale CEI 61508 fournit une méthode alternative à la matrice des risques appelée méthode du graphe des risques. C'est une méthode qui permet de choisir le SIL en se basant sur les quatre facteurs suivants :
 - Les conséquences (C) qu'on peut avoir en cas de défaillance ou d'absence de SIS lors de l'occurrence d'un évènement redouté ;
 - La fréquence et la durée d'exposition des éléments vulnérables (F) ;
 - La possibilité d'éviter l'évènement dangereux (P) ;
 - La probabilité d'occurrence de l'évènement non souhaité (W).

Ces facteurs sont estimés puis utilisés dans la détermination du niveau d'intégrité de sécurité requis SIL qui doit être alloué au système instrumenté de sécurité (SIS). Selon la norme CEI 61508, la méthode du graphe des risques dispose de quatre niveaux de conséquence (C), deux niveaux de fréquence (F), deux niveaux de possibilité d'évitement (P) et trois niveaux de probabilité d'occurrence (W). Pour chaque niveau est assignée une description qualitative (voir tableau 5-2).

Tableau 5-2 : Niveaux de facteurs [22].

Facteur	Niveau	Signification
Conséquences (C)	Mineur (C _A)	Dégâts mineurs sur le matériel, blessure négligeable
	Sérieux (C _B)	Blessure sérieuse pour une ou plusieurs personnes avec des dégâts légers sur le matériel
	Critique (C _C)	Mort pour plusieurs personnes avec des dégâts significatifs sur le matériel
	Catastrophique (C _D)	Mort pour un nombre important de personnes avec une destruction complète du matériel
Fréquence et durée d'exposition (F)	F _A	Exposition rare dans la zone dangereuse
	F _B	Exposition permanente dans la zone dangereuse
Possibilité d'évitement (P)	P _A	Possible
	P _B	Pratiquement impossible
Probabilité d'occurrence (W)	W ₁	Faible
	W ₂	Moyenne
	W ₃	Elevée

Une fois ces facteurs déterminés, le graphe des risques, illustré dans la figure 5-1, est utilisé en suivant le chemin composé par les niveaux des facteur choisis pour déterminer le SIL qui doit être associé au système instrumenté de sécurité.

5.1.2 Détermination des SIL requis pour les SIS dans la station de réchauffement et d'épuration du gaz

Pour déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) qui doit être alloué pour chacun des deux systèmes instrumentés de sécurité, c'est la méthode du graphe des risques qui a été choisie car en prenant en considération les quatre facteurs décrits ci-dessus, elle semble être la plus proche de la réalité parmi les autres méthodes.

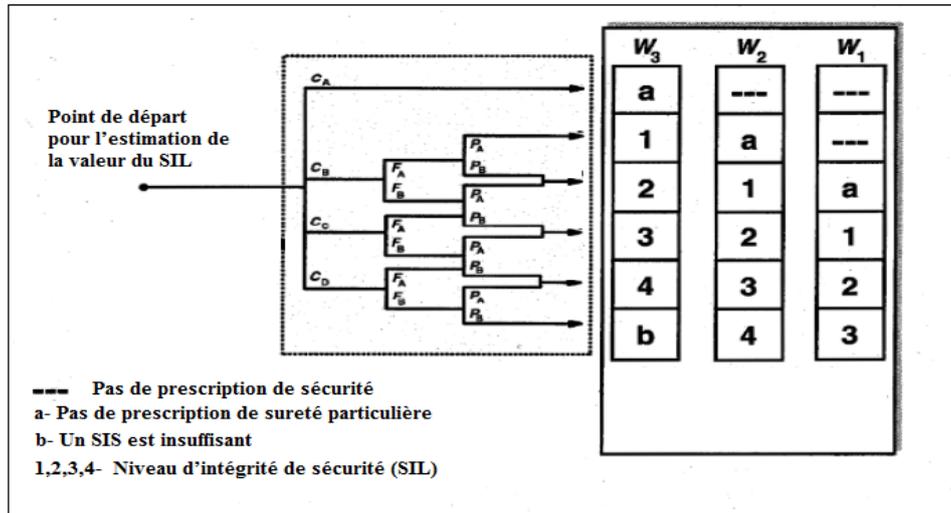


Figure 5-1 : Exemple de graphe des risques [22].

❖ Choix des niveaux de facteurs pour le premier SIS

Le choix des différents niveaux de facteurs dans ce cas est basé sur l'évènement redouté centrale « **surpression** ».

- **Conséquences (C)** : L'emploi de la méthode arbre des évènements (AdE) dans le chapitre précédent a démontré que l'évènement redouté « surpression » peut engendrer les évènements redoutés secondaires suivants :
 - Fuite au niveau des vannes ;
 - Fuite au niveau des brides de jonction ;
 - Rupture totale des brides de jonction entre les équipements et les conduites de gaz ;
 - Eclatement du réchauffeur électrique.

Donc c'est le niveau C_C (critique) qui sera attribué aux conséquences.

- **Fréquence et durée d'exposition (F)** : Concernant ce facteur, nous lui affectons le niveau F_B car la station est située au milieu de plusieurs équipements vulnérables et durant notre visite il a été remarqué que cet endroit est assez fréquenté par les opérateurs pour y effectuer leurs tâches quotidiennes.
- **Possibilité d'évitement (P)** : Il a été choisi le niveau P_A pour ce facteur car la station contient quelques équipements de sécurité (soupapes, évènements manuels), donc en cas de

suppression l'évitement des événements redoutés secondaires sera possible mais à condition que ces derniers soient fiables.

- **Probabilité d'occurrence (W) :** Le calcul de la probabilité d'occurrence après la construction des arbres de défaillances (AdD) a renseigné que la suppression est un événement très probable dans la vie de l'installation étudiée ; donc le niveau **W₃** pour le facteur probabilité d'occurrence semble être plus propice.

❖ **Choix des niveaux de facteurs pour le deuxième SIS**

Pour le deuxième système instrumenté de sécurité, l'attribution des différents niveaux de facteurs C, F, P et W sera basée sur les événements redoutés secondaires provoqués par la suppression.

- **Conséquences (C) :** L'élaboration des nœuds papillon dans le chapitre précédent a démontré que les événements redoutés secondaires seront suivis soit de feu de torche soit de formation de nuage gazeux et explosion. La simulation des effets de ces deux phénomènes dangereux nous a prouvé que les conséquences sont assez importantes tant sur les personnes (opérateurs) que sur les équipements situés à proximité de la station de réchauffement et d'épuration du gaz. Donc pour le facteur conséquence on associe le niveau **C_C** (critique).
- **Fréquence et durée d'exposition (F) :** Puisque c'est le même endroit (station de réchauffement et d'épuration) le niveau de la fréquence d'exposition ne change pas et reste **F_B**.
- **Possibilité d'évitement (P) :** En cas de perte de confinement du gaz combustible, il n'y a aucun dispositif de détection de gaz, en plus de cela dans la station on trouve beaucoup de boîtes électriques sans oublier l'absence de la mise à la terre, donc l'évitement de l'ignition du nuage gazeux et pratiquement impossible. On associe alors le niveau **P_B**.
- **Probabilité d'occurrence (W) :** Le calcul des probabilités après l'élaboration des arbres d'événements a renseigné que l'occurrence des événements redoutés secondaires est assez faible, donc on attribue le niveau **W₁**.

Le suivi de la succession des niveaux des quatre facteurs a conduit à déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) qui doit être attribué pour chacun des deux systèmes instrumentés de sécurité (voir figures 5-2 et 5-3).

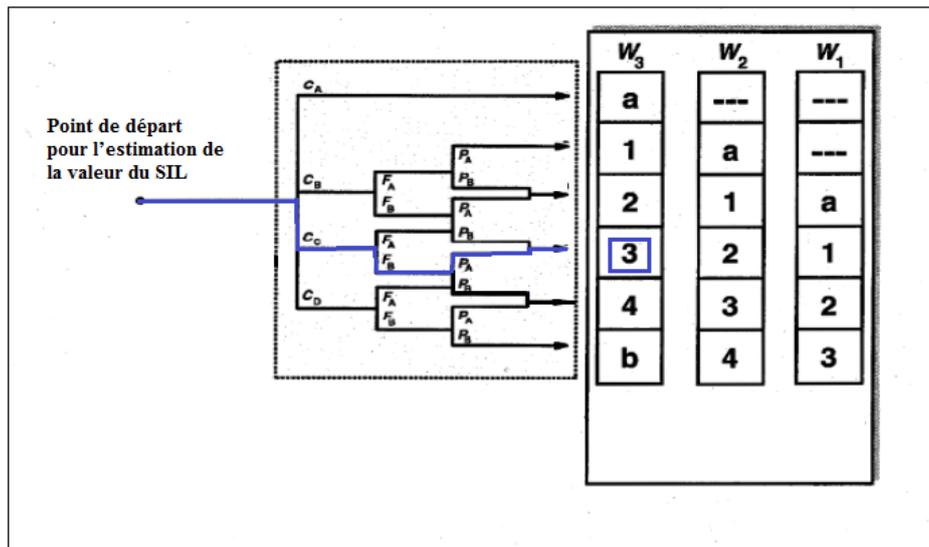


Figure 5-2 : Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) pour le premier SIS.

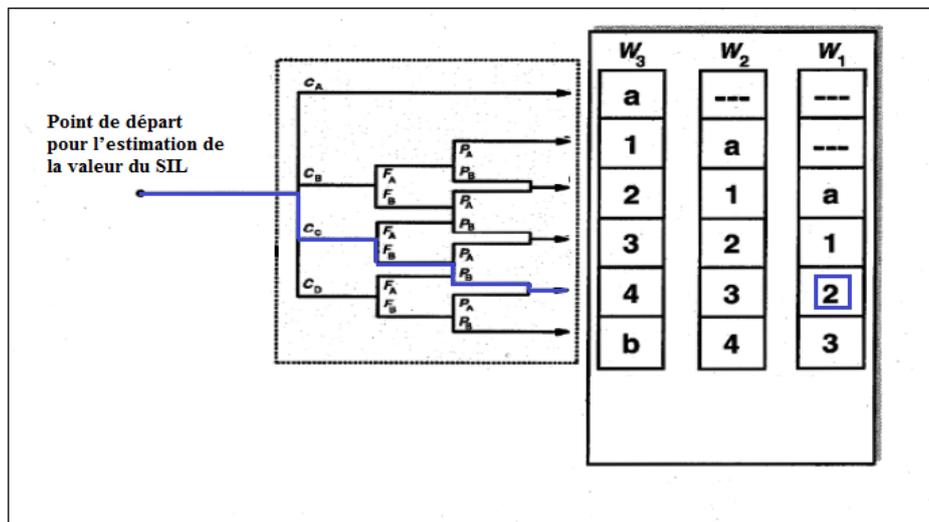


Figure 5-3 : Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) pour le deuxième SIS.

Selon les résultats, le SIL qui doit être attribué au premier système instrumenté de sécurité est égal à 3. Cela signifie que ce système doit présenter une fiabilité assez importante, ce qui veut dire que la probabilité de défaillance à la demande doit être très faible ($(\text{PFD}_{\text{avg}}) \in [10^{-4}; 10^{-3}]$). Tandis que pour le deuxième, le niveau d'intégrité de sécurité est égal à 2, la probabilité de défaillance à la sollicitation doit appartenir alors à l'intervalle suivant ($(\text{PFD}_{\text{avg}}) \in [10^{-3}; 10^{-2}]$).

5.1.3 Conception des SIS pour la station de réchauffement et d'épuration du gaz

Comme précisé auparavant, un système instrumenté de sécurité (SIS) est conçu pour accomplir une fonction instrumentée de sécurité (SIF). Ce système est la combinaison de trois principaux sous-systèmes.

-Sous-système de captation : Il comprend tout genre de capteurs (transmetteurs de pression, thermocouples, détecteurs) qui assurent la fonction de mesure ou de détection.

-Sous-système logique (ou le solveur logique) : Comprend les composants où les signaux issus des capteurs sont combinés et traités puis transmis au sous-système d'actionneurs.

- Sous-système d'actionnement : Il comprend les composants ou bien les éléments finaux qui reçoivent des instructions depuis le sous-système logique sous forme de signaux dont l'exécution est assurée par des actionneurs (électrovannes par exemple).

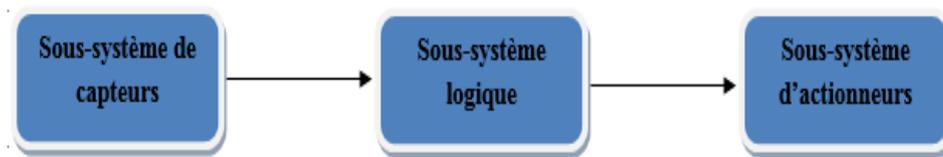


Figure 5-4 : Structure générique d'un système instrumenté de sécurité [23].

❖ Architecture du premier SIS

Le premier SIS est conçu pour assurer la fonction de sécurité (SIF) de réduction de la pression dynamique du gaz combustible dans la conduite en cas d'évènement de surpression. Pour cela, nous proposons les composants suivants :

-Sous-système de captation : 3 Transmetteurs de pression ;

- Sous-système logique : Un système de contrôle commande par PLC "*Programmable Logic Controller*". Il reçoit des entrées logiques et analogiques depuis le sous-système de captation, ensuite il exécute un programme implémenté dedans puis il transmet les instructions aux différents actionneurs ;

-Sous-système d'actionnement : 3 Vannes régulatrices ;

Le schéma du premier SIS est représenté dans la figure 5-5.

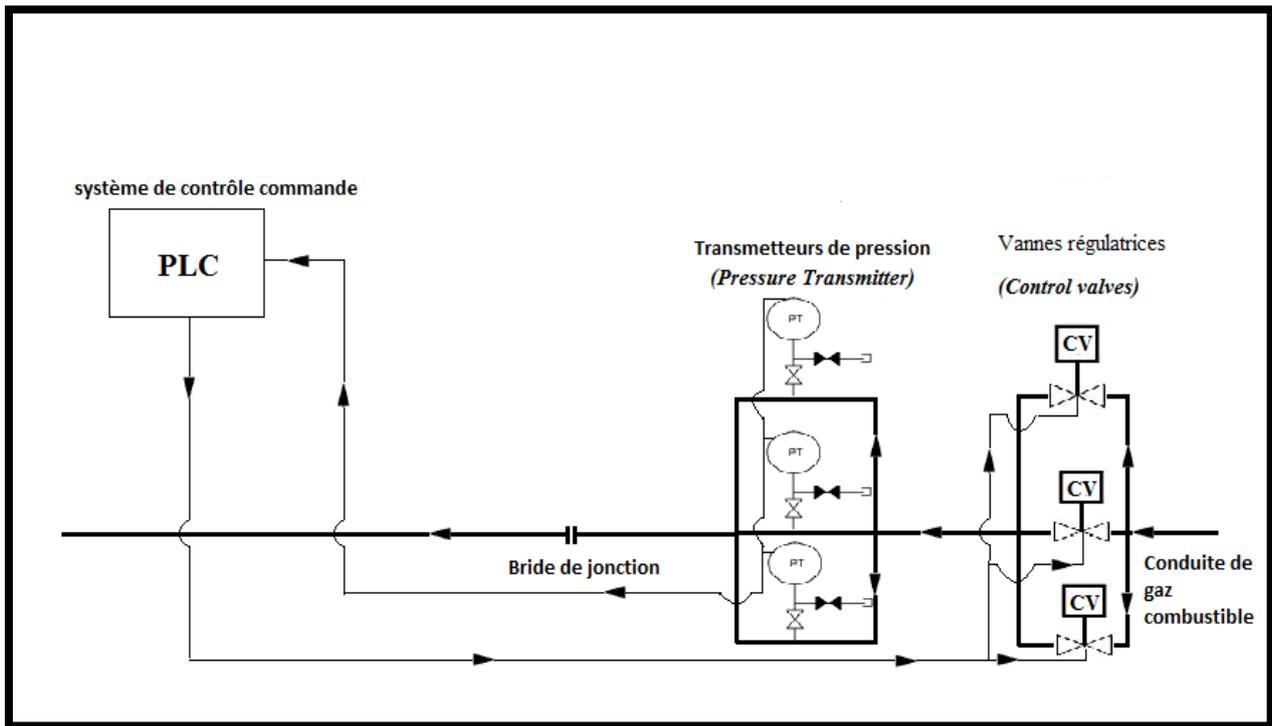


Figure 5-5 : Premier SIS.

❖ Mode opératoire

1- Les transmetteurs mesurent d'une manière permanente la pression dynamique du gaz combustible dans la conduite et envoient cette information sous forme d'entrée analogique au système de contrôle commande PLC.

2- Le système PLC compare la valeur de la pression dynamique reçue à celle qui doit être maintenue, si elle est supérieure à 34 bar il envoie une instruction aux vannes régulatrices pour se fermer partiellement jusqu'à ce que la pression dans la conduite soit réduite à 34 bar.

❖ Architecture du deuxième SIS

Le deuxième système instrumenté de sécurité a pour fonction d'arrêter l'écoulement du gaz dans le cas d'un événement de fuite ou de rupture totale d'une bride de jonction. Ce deuxième SIS se compose des éléments suivants :

- Sous-système de captation : 1 indicateur de pression différentielle, un détecteur de gaz ;
- Sous-système logique : Un système de contrôle commande par PLC ;
- Sous-système d'actionnement : 2 Electrovanes ;

Nous représentons le schéma dans la figure 5-6.

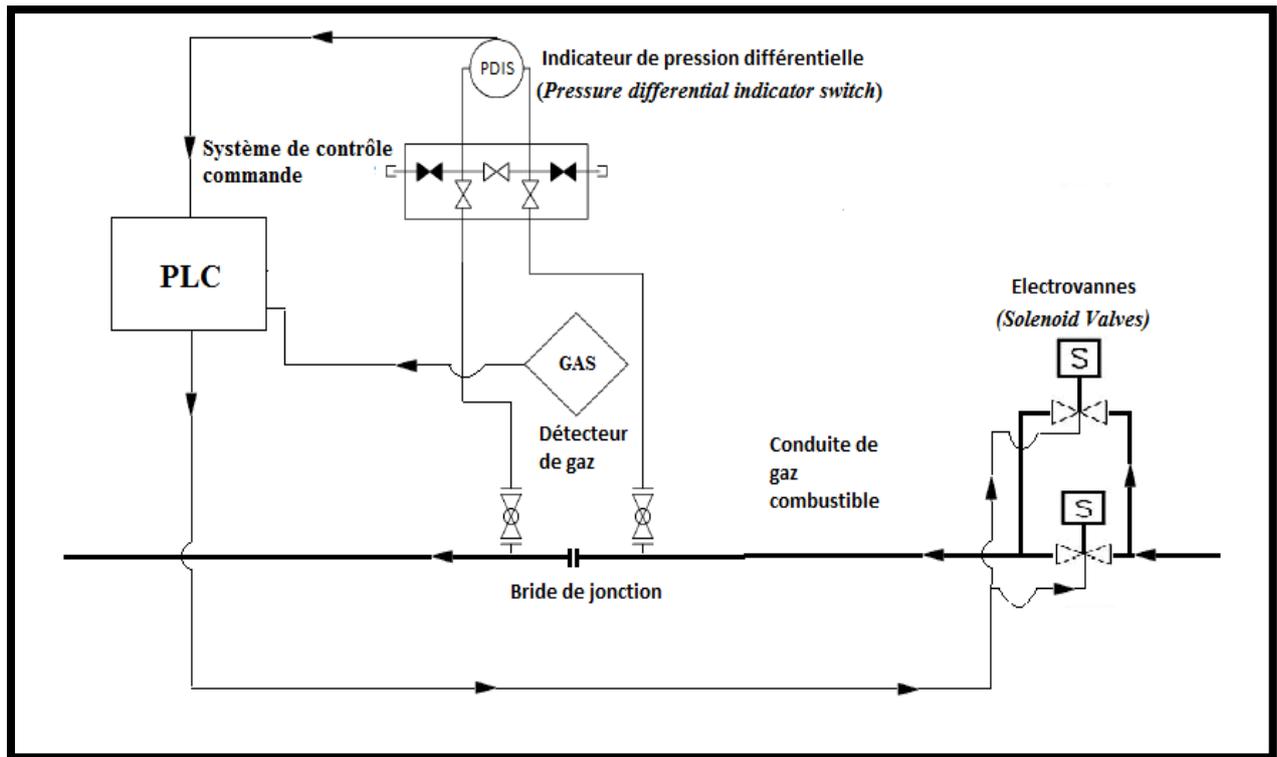


Figure 5-6 : Schéma du deuxième SIS.

❖ Mode opératoire

Dans le cas d'une fuite ou bien d'une rupture de la bride de jonction, la pression dynamique du gaz diminue en aval de cette dernière. L'indicateur de pression différentielle détecte alors la différence de pression entre l'amont et l'aval de la bride de jonction et transmet un signal électrique de 125 volts au système de contrôle commande. Pendant ce temps, le détecteur de gaz envoie également au PLC un signal de 24 volts en indiquant la présence de gaz dans l'atmosphère. Lorsque le système de commande reçoit deux entrées logiques depuis le détecteur de gaz et l'indicateur de pression différentielle, il transmet une instruction aux électrovannes pour se fermer complètement, la fuite du gaz sera alors arrêtée.

5.1.4 Vérification de la conformité des architectures par rapport au SIL requis

Les niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) des deux SIS proposés doivent être conformes aux niveaux requis, SIL=3 pour le premier et SIL=2 pour le deuxième. Pour vérifier cette condition, nous avons utilisé le logiciel GRIF [24]. Nous avons fourni à ce logiciel les données d'entrée (composants de chaque SIS et leurs fréquences de défaillance) ainsi que les architectures telle que schématisées ci-dessus, ensuite nous avons lancé le calcul des SIL et des probabilités de défaillance à la demande PFD_{svg} de chacun des systèmes instrumentés de sécurité proposés. Les architectures élaborées dans le logiciel ainsi que les résultats de calculs des SIL sont présentés dans les figures ci-après.

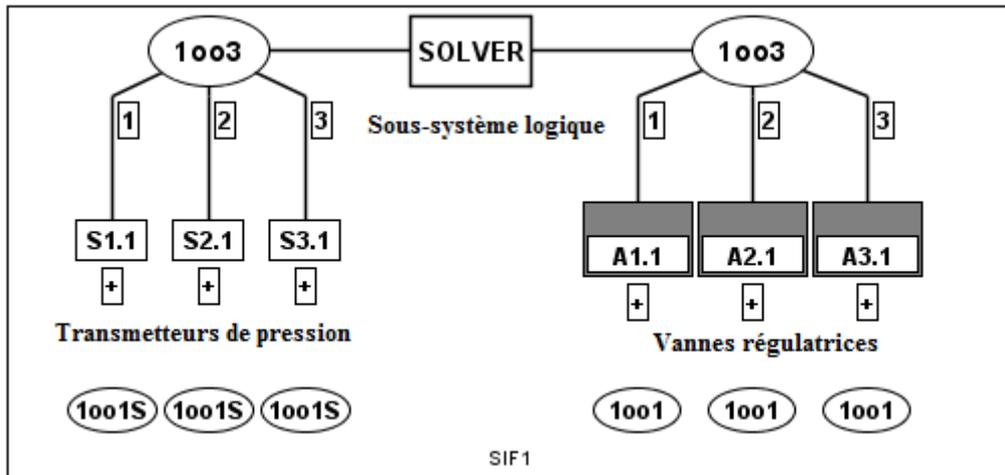


Figure 5-7 : Architecture du premier SIS.

Descriptif Résultat SIL Spurious-trip

Pour la SIF (capteurs + solveur + actionneurs)

Mode de sollicitation Sollicitation rare (PFD)

Valeur SIL requis 3 Valeur RRF requis 1000

Valeur max SIL atteignable due aux contraintes architecturales - IEC 61511 (E...)

Capteurs 4 HFT 2

Actionneurs 4 HFT 2

Calculs

Durée d'exploitation (années) 30 PFD Avg 7.2198E-4

SIL calculé 3 RRF calculé 1385

Résultats

Valeur SIL réalisé 3

Conclusion du SIL pour la SIF Conforme

Remarque

Commentaire

Action à effectuer

Synthèse

	PFD Avg	RRF	SIL Calculé	Contribution (%)
Partie Capteur...	2.18E-4	4579.58	3	30.24%
Partie Solveur	5.00E-5	20000.00	4	6.92%
Partie Actionn...	4.54E-4	2203.69	3	62.84%
SIF	7.22E-4	1385.08	3	100%

Figure 5-8 : Rapport de calculs pour le premier SIS.

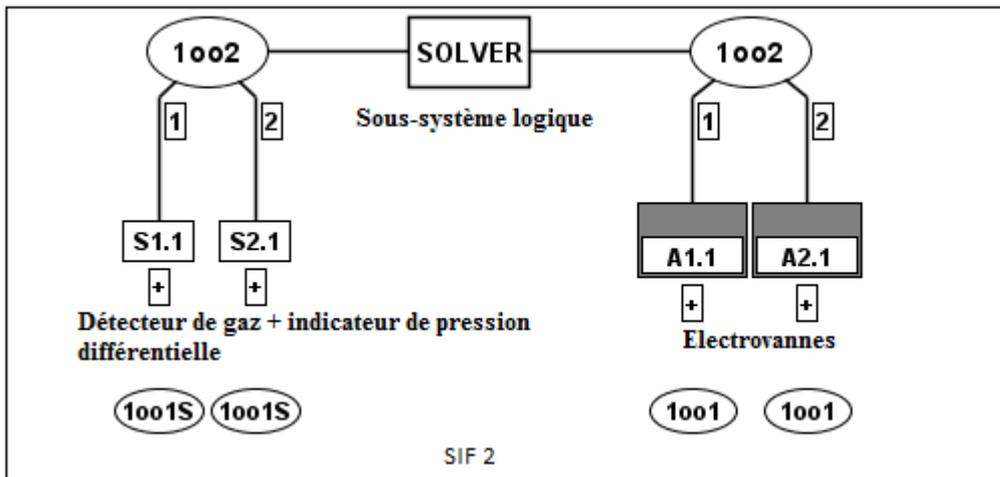


Figure 5-9 : Architecture du deuxième SIS.

Configuration des composants | Rapport | Paramètres

Configuration de l'architecture

Descriptif | Résultat SIL | Spurious-trip

Pour la SIF (capteurs + solveur + actionneurs)

Mode de sollicitation: Sollicitation rare (PFD)

Valeur SIL requis: 2 | Valeur RRF requis: 100

Valeur max SIL atteignable due aux contraintes architecturales - IEC 61511 (E...)

Capteurs: 3 | HFT: 1

Actionneurs: 3 | HFT: 1

Calculs

Durée d'exploitation (années): 30 | PFD Avg: 2.3113E-3

SIL calculé: 2 | RRF calculé: 432

Résultats

Valeur SIL réalisé: 2

Conclusion du SIL pour la SIF: Conforme

Remarque

Commentaire

Action à effectuer

Synthèse

	PFD Avg	RRF	SIL Calculé	Contribution (%)
Partie Capteur...	1.23E-3	814.15	2	53.10%
Partie Solveur	5.00E-5	20000.00	4	2.16%
Partie Actionn...	1.04E-3	966.12	2	44.74%
SIF	2.31E-3	432.66	2	100%

Figure 5-10 : Rapport de calculs pour le deuxième SIS.

Selon les résultats fournis par le logiciel GRIF (figures 5-7 et 5-8), nous déduisons que les deux systèmes proposés répondent parfaitement aux exigences de sécurité et les valeurs de leurs SIL sont conformes aux niveaux requis (3 pour le premier et 2 pour le deuxième).

5.1.5 Analyse temporelle du premier SIS

Le premier SIS proposée a pour fonction de réduire la pression du gaz combustible en cas d'évènement de surpression, donc il s'agit d'un système de régulation. Dans cette partie, nous allons procéder à une analyse fréquentielle de ce système dans le but d'avoir une vision globale de son comportement. C'est une démarche qui a pour but d'estimer le degré de la stabilité du système et de caractériser ses performances. Nous présentons dans la figure ci-dessous le schéma fonctionnel du SIS 1.

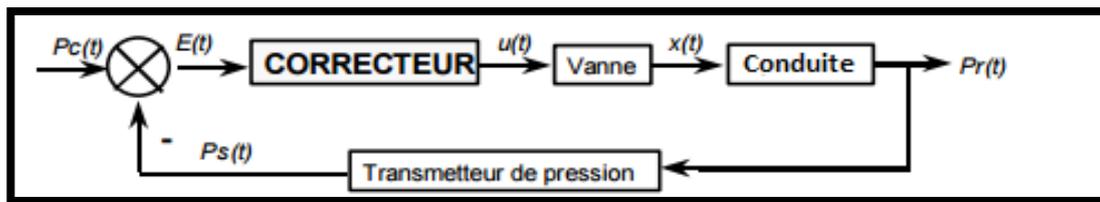


Figure 5-11 : Schéma fonctionnel du SIS 1.

- $P_c(t)$: Consigne de pression (34 bar) ;
- $u(t)$: Signal de commande issue du correcteur ;
- $P_r(t)$: Pression du gaz dans la conduite (réponse à la consigne) (bar) ;
- $P_s(t)$: Grandeur physique traduite par le transmetteur de pression (bar) ;
- $E(t)$: Erreur, écart entre la valeur consigne et la valeur de la réponse ;
- $x(t)$: Déplacement du clapet de la vanne (en pourcentage).

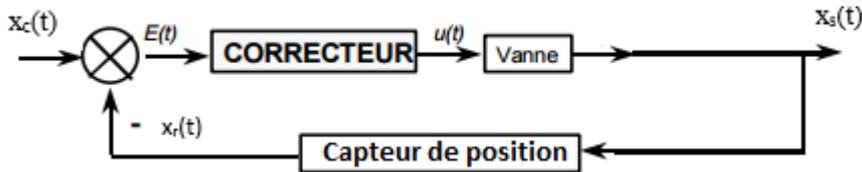
Il est à noter que la réponse du système à une excitation est caractérisée par deux régimes, un régime transitoire et un régime permanent. Pour caractériser les performances du système, nous allons vérifier la stabilité, la rapidité ainsi que la précision de la réponse. Pour cela, il nous faudra alors de déterminer les grandeurs suivantes :

- **En régime transitoire :**
 - ✓ Déterminer le temps de pic (t_{pic}) : Temps nécessaire pour atteindre la valeur maximale de la réponse ;
 - ✓ Déterminer le temps de montée (t_m) : Temps nécessaire pour passer de 10% à 90 % de la valeur consigne ;
 - ✓ Déterminer le temps de réponse à 5% ($t_r 5\%$) : Temps nécessaire au système pour entrer dans une bande de 5% autour de sa valeur consigne et ne plus en sortir ;
 - ✓ Visualiser le dépassement de la consigne (D %).
- **En régime permanent :**
 - ✓ Stabilité (absence de divergence entre l'entrée (consigne) et la réponse) ;
 - ✓ Précision (Déterminer l'écart statique entre la valeur réponse et la valeur consigne).

Le comportement de la vanne régulatrice du système est caractérisé par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 3 \frac{dx(t)}{dt} + 2 x(t) = 0.3 u(t) \dots \dots \dots (10)$$

Comme nous ne disposons pas de l'équation qui caractérise le comportement de la conduite, c'est-à-dire la relation entre le déplacement du clapet de la vanne régulatrice et la pression de sortie du gaz, dans ce qui va suivre, la réponse étudiée sera celle de la vanne régulatrice. Donc le schéma fonctionnel devient :



- $x_c(t)$: Déplacement consigne du clapet de la vanne qui correspond à la pression consigne (34 bar) ;

- $x_s(t)$: Réponse à la consigne ;

- $x_r(t)$: Position indiquée par le capteur.

Pour obtenir la réponse qui caractérise le comportement de la vanne régulatrice du système, nous avons simulé avec le logiciel Matlab (Simulink), auquel le schéma ci-dessous a été introduit.

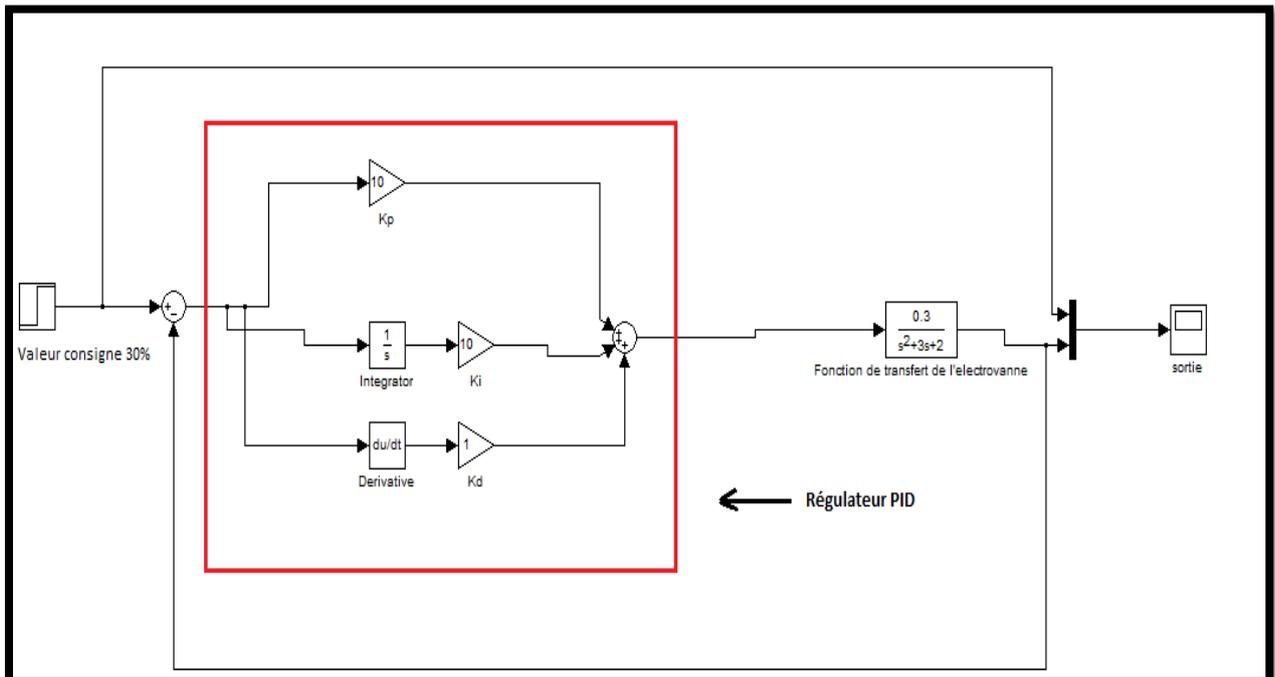


Figure 5-12 : Schéma fonctionnel introduit dans MATLAB.

La valeur consigne désigne le pourcentage du déplacement du clapet de la vanne régulatrice qui correspond à la pression consigne (34 bar). Pour notre simulation, il a été choisi à 30%.

Le régulateur de type PID est un régulateur qui agit selon trois types d'actions :

- Action proportionnelle : L'erreur est multipliée par un gain K_p ;
- Action intégrale : L'erreur est intégrée et multipliée par un gain K_i ;
- Action Dérivée : L'erreur est dérivée et multipliée par un gain K_d .

La fonction de transfert de l'électrovanne, modèle mathématique qui caractérise la relation entre l'entrée et la sortie d'un système, elle est égale à $\frac{0.3}{s^2+3s+2}$, elle a été déterminée à partir de l'équation (10), où s est un nombre complexe.

Nous avons exécuté la simulation de la réponse $x_s(t)$, nous présentons la courbe avec les grandeurs qui caractérisent la performance du système dans les figures 5-13 et 5-14.

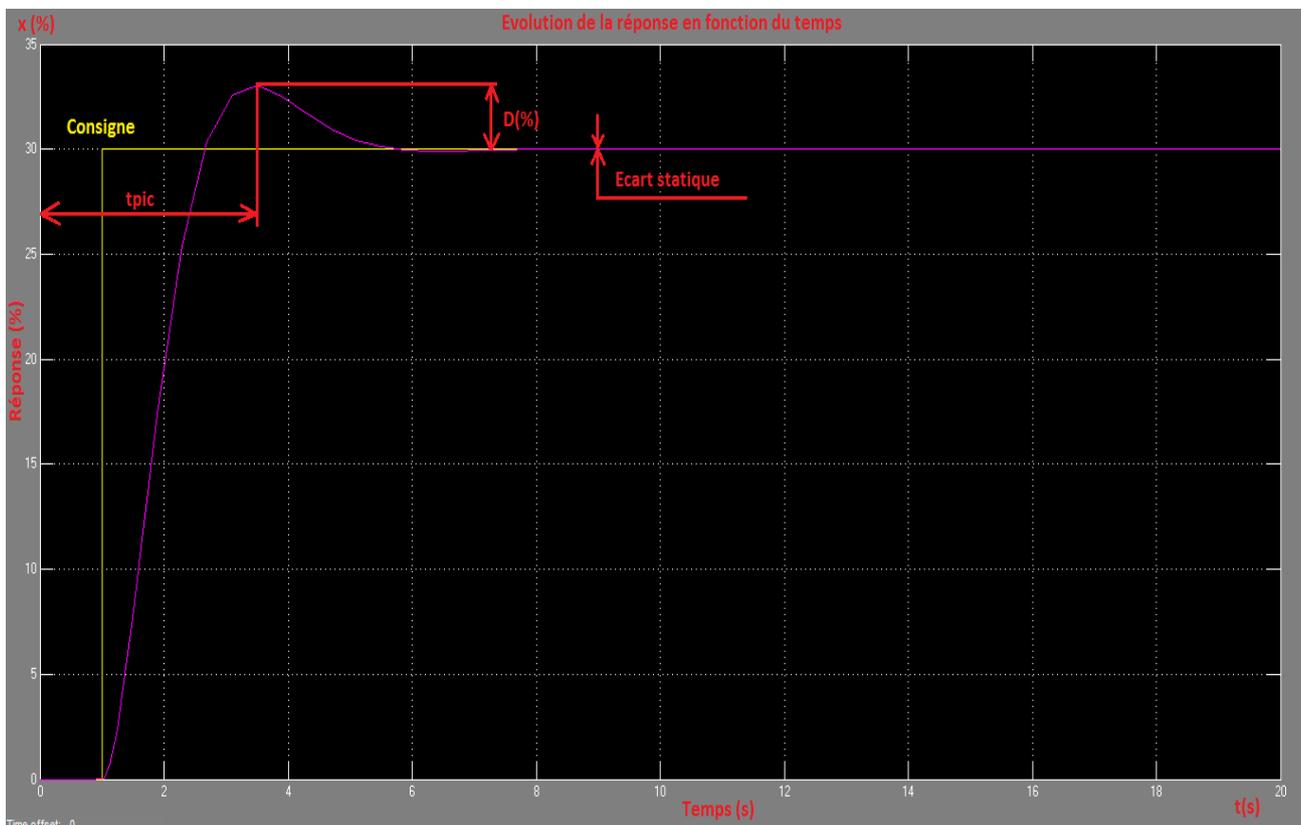


Figure 5-13 : Evolution de la réponse $x_s(t)$ en fonction du temps.

D'après la figure on a :

- Temps de pic (t_{pic}) = 3.2 secondes ;
- Dépassement par rapport à la consigne, $D= 10.83 \%$;
- Ecart statique (erreur) est nul.

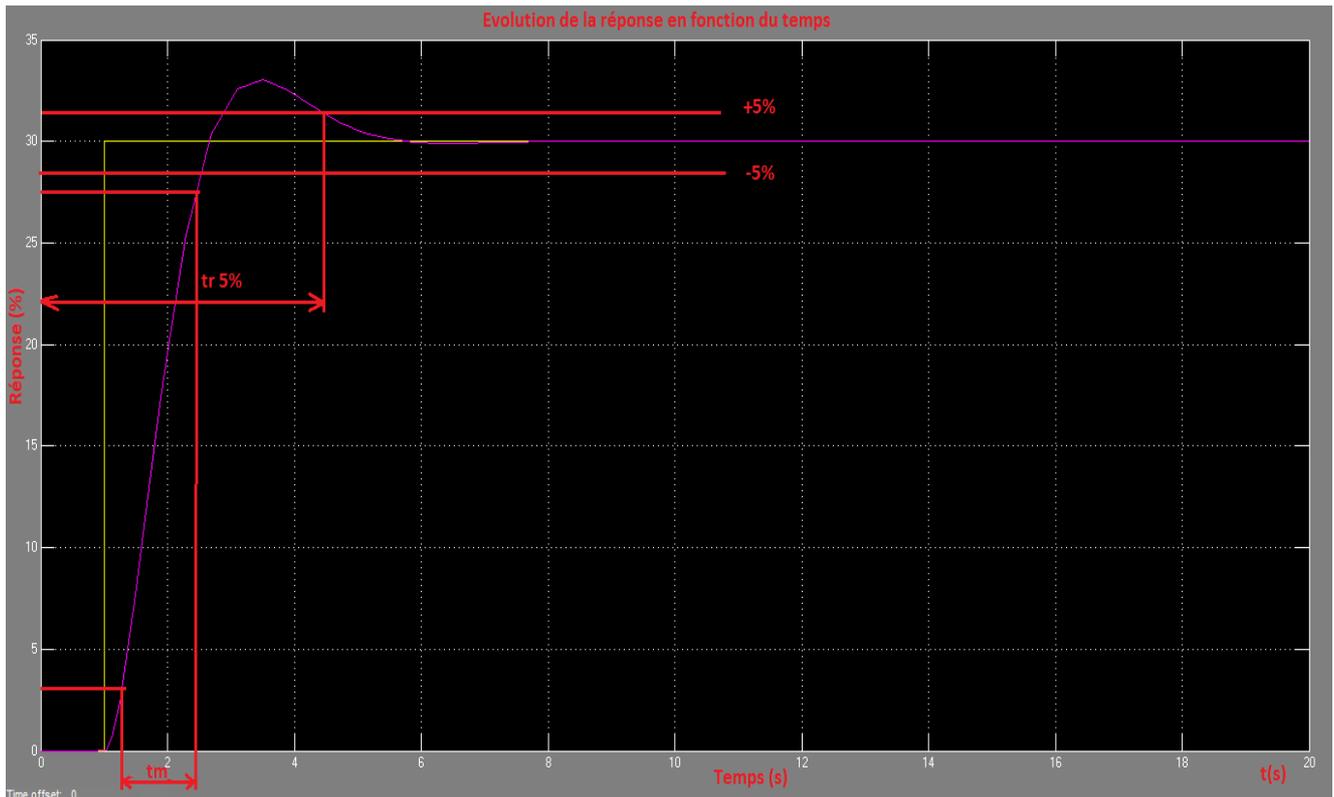


Figure 5-14 Evolution de la réponse $x_s(t)$ en fonction du temps [suite].

Cette figure nous renseigne que :

Le temps de réponse à 5% (tr 5%) vaut 4.52 secondes. Tandis que le temps de montée (t_m) vaut 1.17 secondes.

A partir de cela, on déduit que le système présente des performances assez considérables. En effet, les valeurs du temps de montée, du temps de pic et du temps de réponse, renseignent que la réponse du système en cas d'excitation est rapide. L'absence de divergence entre l'entrée (consigne) et la réponse indique que le système est stable. Quant à l'erreur, on remarque que l'écart statique entre la consigne et la réponse est nulle, cela nous amène à conclure que le système présente une précision parfaite.

5.1.6 Positionnement des SIS

Les endroits choisis où les SIS proposés seront mis en place dans la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible sont présentés dans le tableau ci-dessus :

Tableau 5-3 : Endroits d'emplacement des SIS.

Endroit	Justification
Bride de jonction à l'entrée de la station	Assurer la protection contre la surpression et ses effets (fuite ou rupture de bride) due à la défaillance des vannes régulatrices de pression au niveau de la station à gaz principale
Bride de jonction en amont de l'échangeur à chaleur	Assurer la protection contre la surpression et ses effets due à l'augmentation du niveau du liquide (condensats) dans le filtre séparateur
Bride de jonction en aval de l'échangeur à chaleur	Assurer la protection contre la surpression et ses effets due à l'ouverture excessive de la vanne régulatrice de température dans la conduite à vapeur
Bride de jonction en aval de l'épurateur de gaz	Assurer la protection contre la surpression et ses effets due à l'augmentation du niveau du liquide dans l'épurateur de gaz

Nous présentons les endroits choisis dans les figure 5-5 et 5-16.



Figure 5-15 : Positionnement des SIS (brides de jonction à l'entrée de la station et en amont de l'échangeur à chaleur).



Figure 5-16 : Positionnement des SIS (brides de jonction en aval de l'échangeur à chaleur et de l'épurateur de gaz).

5.1.7 Impact de la mise en place des SIS

Afin de visualiser le rôle du premier système instrumenté de sécurité (SIS 1) dans la réduction des risques, évènements redoutés secondaires liés à la surpression, nous avons reconstruit les arbres des évènements pour chaque sous-système dans lequel la mise en place du SIS 1 a été envisagée ; ensuite nous avons calculé les nouvelles probabilités d'occurrence des évènements redoutés secondaires suivants :

- Fuite au niveau des vannes ;
- Fuite au niveau des brides de jonction ;
- Rupture totale des brides de jonction entre les équipements et les conduites.

Avant de calculer les probabilités, on présente tout d'abord dans le tableau 5-4 les fréquences de défaillance des équipements de sécurité de chacun des sous-systèmes étudiés.

Tableau 5-4 : Fréquences de défaillance des équipements de sécurité.

Équipement	Fréquence de défaillance par heure	Codification
Vannes manuelles (amont\aval)	5.86×10^{-6}	P1
Event manuel de l'échangeur	13.68×10^{-6}	P2
Soupape de sécurité	2.79×10^{-6}	P3
SIS 1	721.98×10^{-6}	P4
Events manuels des autres équipements	4.49×10^{-6}	P5

Les arbres d'évènement de chaque sous-système ainsi que la probabilité d'occurrence des évènements redoutés secondaires sont présentés ci-dessous.

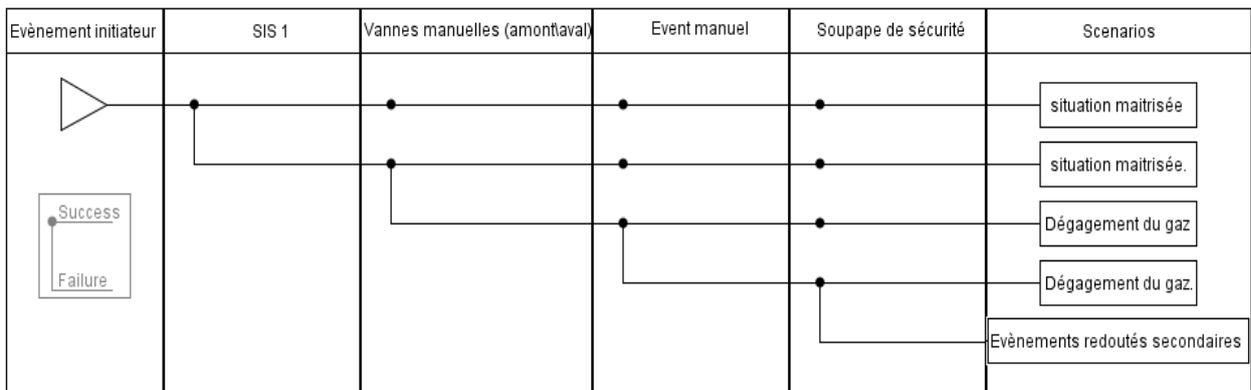


Figure 5-17 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système de filtration à deux étages.

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » est égale à **P01= 1.561 x 10⁻⁶**.

Donc la probabilité d'occurrence des évènements redoutés secondaires est égale à :

$$P_1' = P01 \times P4 \times P1 \times P5 \times P3 = 1.561 \times 10^{-6} \times 721.98 \times 10^{-6} \times 5.86 \times 10^{-6} \times 4.49 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6}$$

Alors **P₁' = 8.268 x 10⁻²⁷**.

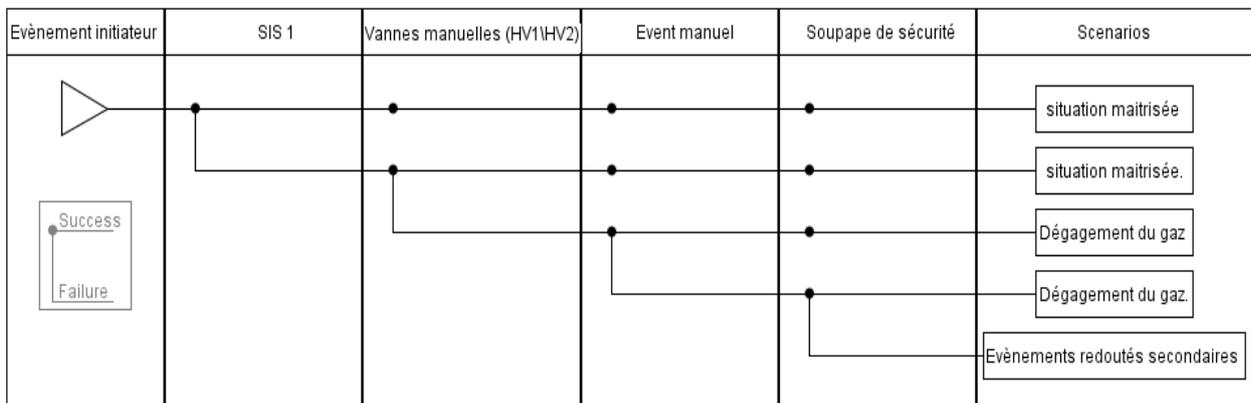


Figure 5-18 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système de réchauffement à vapeur.

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » dans ce sous-système est égale à :
 $P_{07} = 1.651 \times 10^{-6}$.

Donc la probabilité d'occurrence des évènements redoutés secondaires est égale à :

$$P_2' = P_{07} \times P_4 \times P_1 \times P_2 \times P_3 = 1.651 \times 10^{-6} \times 721.98 \times 10^{-6} \times 5.86 \times 10^{-6} \times 13.68 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6}$$

Donc **$P_2' = 2.66 \times 10^{-25}$.**

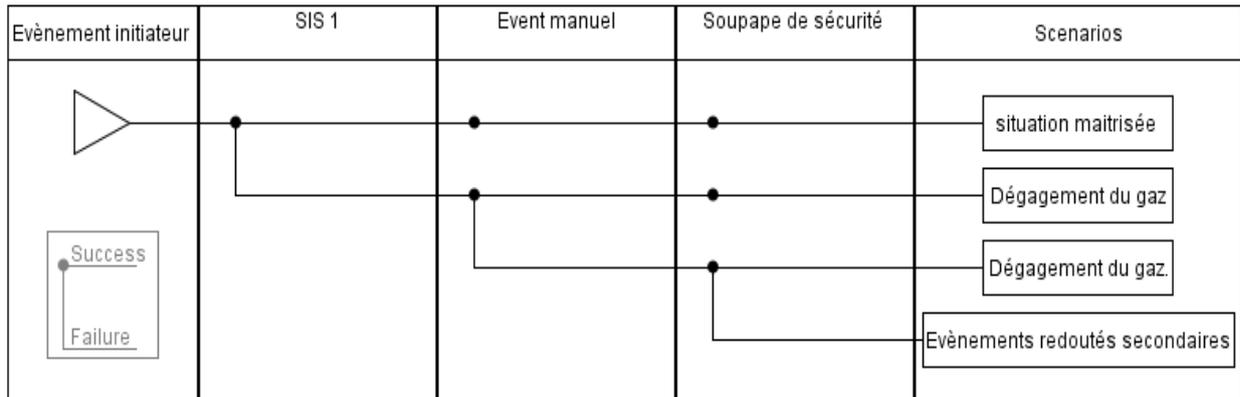


Figure 5-19 : Nouvel ADE de la surpression dans le sous-système d'épuration.

La probabilité de l'évènement initiateur « surpression » dans ce sous-système est égale à :

$P_{011} = 2.83 \times 10^{-9}$.

Donc la probabilité d'occurrence des évènements redoutés secondaires est égale à :

$$P_4' = P_{011} \times P_4 \times P_5 \times P_3 = 2.83 \times 10^{-9} \times 721.98 \times 10^{-6} \times 2.79 \times 10^{-6} \times 4.49 \times 10^{-6} = 25.60 \times 10^{-24}$$

Tableau 5-5 : Probabilités d'occurrences des évènements redoutés secondaires avant et après la mise en place du SIS 1.

Sous-système	Codification des évènements redoutés secondaires	Probabilité d'occurrence par heure	Probabilité d'occurrence par an	Probabilité avant la mise en place du SIS 1
Filtration à deux étages	P_1'	8.268×10^{-27}	7.243×10^{-23}	1.0038×10^{-18}
Réchauffement à vapeur	P_2'	2.66×10^{-25}	2.33×10^{-21}	3.23×10^{-18}
Epuration	P_4'	25.60×10^{-24}	2.243×10^{-19}	3.11×10^{-16}

Le tableau 6-5 montre bien l'impact de la mise en place du premier système instrumenté de sécurité. En effet, on remarque que la mise en place du SIS 1 a généré une diminution assez considérable de la probabilité d'occurrence des événements redoutés secondaires provoqués par la surpression, donc ce système constitue l'outil adéquat pour la protection contre l'évènement de surpression. Quant au deuxième système instrumenté de sécurité, sa mise en place a pour but d'arrêter l'écoulement de gaz en cas de fuite ou bien de rupture d'une bride de jonction et donc empêcher la formation de nuage gazeux explosif. Il peut alors être considéré comme la deuxième barrière de défense en cas de défaillance du premier SIS.

5.2 Mur anti-souffle

Les deux systèmes instrumentés de sécurité proposés constituent deux barrières de défenses. En effet, le premier SIS sera sollicité en cas d'évènement de surpression ; dans le cas de défaillance de celui-ci et apparition d'un évènement redouté secondaire (fuite de gaz ou rupture d'une bride de jonction) c'est le deuxième SIS sera actionné pour arrêter le flux du gaz combustible. La défaillance du deuxième SIS à la sollicitation en cas de situation d'urgence entraîne la formation d'un nuage gazeux, l'ignition de ce dernier donne lieu à une explosion majeure ; la simulation de ce phénomène dangereux dans le chapitre précédent a démontré que les effets létaux sur les individus qui correspondent à une onde de choc de 140 mbar sont possibles jusqu'à une distance de 42.97 mètres et la voie de circulation en face de la station de réchauffement et d'épuration du gaz y est incluse. Donc mettre en place un mur anti-souffle pour protéger cette voie de circulation est indispensable.

Dans ce qui va suivre, nous allons procéder au dimensionnement du mur, ce dernier sera implanté à la place du grillage qui délimite l'accès à la station qui est situé à 6.5 mètres environ des équipements qui constituent cette dernière. Selon le graphe de l'évolution de la surpression en fonction de la distance (figure 4-19), ce mur anti souffle sera capable de résister à une onde de choc de 580.50 mbar.

5.2.1 Méthodes de calcul de la résistance des structures aux Actions accidentelles

Afin de déterminer la résistance des structures aux action accidentelles, l'institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) décrit trois types de méthodes :

- Méthodes empiriques qui ne s'appuient que sur l'expérimentation ;
- Méthodes analytiques qui considèrent que la structure étudiée est analogue à un système masse-ressort, elles consistent à quantifier la contrainte que la structure subit lors d'une explosion et ensuite la comparer à la valeur de la rupture pour vérifier si la structure résiste.

- Méthodes numériques, elles se basent sur l'utilisation des logiciels (Ansys fluent par exemple), elles consistent à étudier le comportement d'une structure lors d'une action accidentelle avec une simulation en trois dimensions par l'implémentation d'un programme.

5.2.1.1 Méthode analytique

Comme précisé ci-dessus, les méthodes analytiques considèrent la structure comme un modèle masse-ressort, le comportement en cas de sollicitation $P(t)$ est exprimé par l'équation suivante [25] : $M \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - R(t)=P(t)$.

M et R sont la masse équivalente et la force de rappel équivalente pour un ressort élastique ($R(t)= K.x(t)$). Donc pour les méthodes analytiques on adopte l'approche « pression-temps » et pour calculer la réponse de la structure à la sollicitation il faut choisir entre deux modes de calcul selon le domaine choisi de la loi de comportement du matériau :

- Un calcul statique élastique linéaire équivalent si on est dans le domaine élastique, la déformation est réversible. (Voir la figure 5-20).
- Un calcul dynamique non linéaire si on est dans le domaine plastique, la déformation dans ce cas est irréversible.

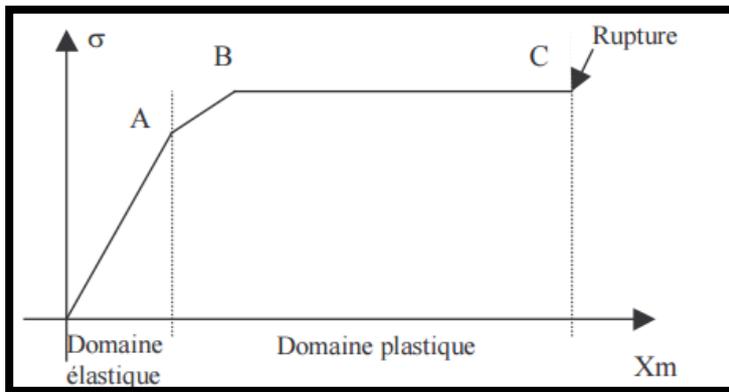


Figure 5-20 : Evolution de la contrainte appliquée sur la structure en fonction de la déformation.

Dans notre cas d'étude nous avons choisi d'adopter la méthode analytique basée sur les calculs statiques élastiques linéaires équivalents car en cas d'explosion dans la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible, le mur qui fera face à l'onde de choc sera conçu pour ne pas se déformer d'une manière irréversible. En employant cette méthode on va s'affranchir alors de l'aspect dynamique du comportement de la structure. En effet, c'est une méthode qui suppose qu'une pression dynamique peut être équivalente à une pression statique avec la prise en considération d'un facteur de chargement dynamique DLF (*Dynamic Load Factor*). Pour déterminer la pression statique équivalente, c'est la relation suivante qui est utilisée : $P_{se}= DLF \times P_{max}.....(11)$

- P_{se} : Pression statique équivalente

- P_{max} : Pression maximale exercée sur la structure par l'onde de choc de l'explosion.

Le facteur DLF dépend du rapport entre la durée de la surpression (onde de choc) et la période propre de la structure étudiée (t_L/T) et de la courbe $P(t)$.

Généralement pour pouvoir dimensionner une structure, la démarche suivante est suivie [26] :

- 1- Déterminer la pression maximale P_{max} et la durée de la surpression ;
- 2- Déterminer la période propre de la structure étudiée ;
- 3- Déduire le facteur DLF à partir de la courbe représentée dans la figure 5-21 ;
- 4- Calculer la pression statique équivalente P_{se} ;
- 5- Calculer les dimensions de la structure en utilisant les règles de génie civil.

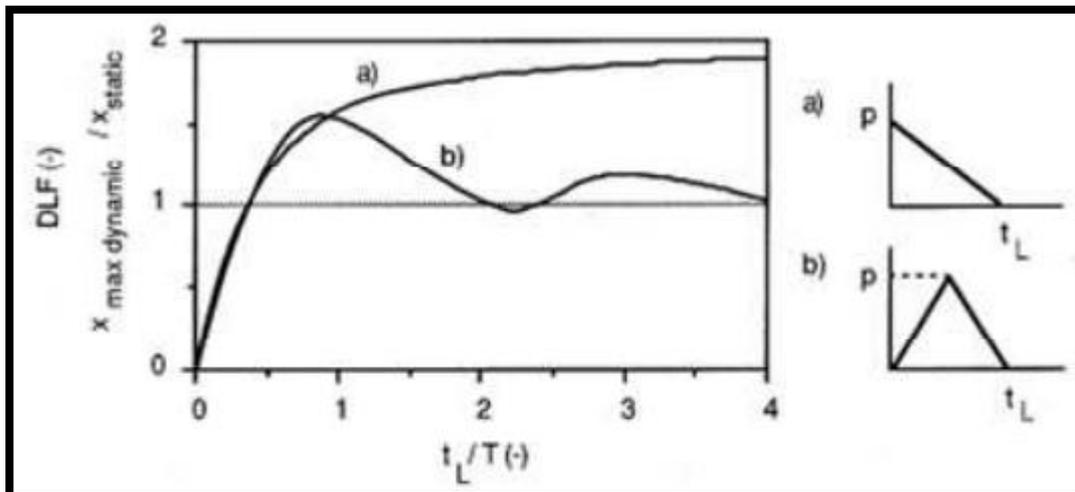


Figure 5-21 : Facteur DLF en fonction du rapport (t_L/T) pour un profil de surpression de forme triangulaire rectangle et triangulaire isocèle.

5.2.2 Détermination de l'épaisseur minimale requise pour le mur anti-souffle

Le dimensionnement du mur proposé consiste à déterminer son épaisseur minimale requise pour pouvoir résister à une onde de choc de 580.50 mbar. Pour cela, nous débutons avec la condition suivante [26] :

$$\frac{P_{se} \times H^2}{8} \leq M_{rd} .$$

P_{se} : Valeur de la surpression statique équivalente (MPa) ;

H : Hauteur du mur (m) ;

$$M_{rd} : \text{Moment ultime linéaire, } M_{rd} = A_s \times f_{ds} \left[d - \frac{A_s f_{ds}}{0.85 \times f'_{dc}} \right] \dots \dots \dots (12)$$

A_s : Section des armatures par mètre linéaire (m) ;

d : Distance qui sépare les fibres d'aciers comprimés des fibres tendus (m), $d = 0.9 \cdot e \dots (13)$

e : Epaisseur du mur (m).

f_{ds} : Contrainte dynamique de plastification des aciers (MPa) ;

$$f_{ds} = 1.2 f_y + \frac{(1.05 f_u - 1.2 f_y)}{4} \dots \dots \dots (14)$$

f_y : Contrainte limite élastique des aciers (MPa) ;

f_u : Contrainte ultime des aciers (MPa);

f'_{dc} : Contrainte dynamique limite en compression du béton (MPa) , $f'_{dc} = 1.25 \times f_c \dots (15)$

f_c : Contrainte statique limite en compression du béton (MPa)

Pour déterminer l'épaisseur minimale du mur, on suppose que $\frac{P \times H^2}{8} = M_{rd}$.

$$\text{Donc } \frac{P_{se} \times H^2}{8} = A_s \times f_{ds} \left[0.9 \times e_{min} - \frac{A_s f_{ds}}{0.85 \times f'_{dc}} \right] \rightarrow e_{min} = \frac{1}{0.9} \left[\frac{P_{se} \times H^2}{8 \times A_s \times f_{ds}} + \frac{A_s f_{ds}}{0.85 \times f'_{dc}} \right]$$

La pression statique équivalente est calculée à partir de l'équation (11) avec une valeur maximale de 1.9 du facteur de chargement dynamique RFD car nous ne disposons pas du profil d'évolution de l'onde de choc (surpression) en fonction du temps et la détermination de la période propre du mur anti-souffle ne sera pas possible.

Alors $P_{se} = 1.9 \times 0.5805 = 0.1103$ MPa.

Le mur que nous proposons aura pour objectif de couvrir l'intégralité de la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible, donc il sera de la même longueur de cette dernière ($L = 19.02$ m) avec une hauteur $H = 5$ m qui dépasse celle de l'équipement le plus grand (les filtres séparateurs de 4.431 m de hauteur).

Ce mur anti-souffle sera en béton armé avec les caractéristiques suivantes :

-Des barres en acier à haute adhérence avec une nuance Fe E500 d'une contrainte limite élastique f_y de 500 MPa et une contrainte ultime f_u de 550 MPa.

-Type de béton : C50 avec une haute résistance à la compression $f_c = 50$ MPa. Donc la contrainte limite dynamique de compression du béton est égale à $f'_{dc} = 1.25 \times f_c = 62.5$ MPa.

-Ferrailage 38 $\varnothing 14$ (38 barreaux avec un diamètre de 14 mm chacune réparties à travers toute la longueur du mur en formant deux lignes parallèles) : $A_s = 5.85 \times 10^{-3}$ m²/m linéaire.

$$\text{Donc } f_{ds} = 1.2 \times 500 + \frac{(1.05 \times 550 - 1.2 \times 500)}{4} = 594.375 \text{ MPa.}$$

$$\text{Alors } e_{\min} = \frac{1}{0.9} \left[\frac{0.1103 \times 5^2}{8 \times 0.00585 \times 594.375} + \frac{0.00585 \times 594.375}{(0.85 \times 62.5) \times 2} \right] = 0.146507 \text{ m.}$$

Donc les dimensions que doit avoir le mur anti-souffle pour résister à une onde de choc de 580.50 mbar en cas d'explosion d'un nuage gazeux seront :

- La longueur, $L=19.02$ m ;
- La hauteur, $H=5$ m et l'épaisseur, $e=14.65$ cm. On l'arrondi à 15 cm.

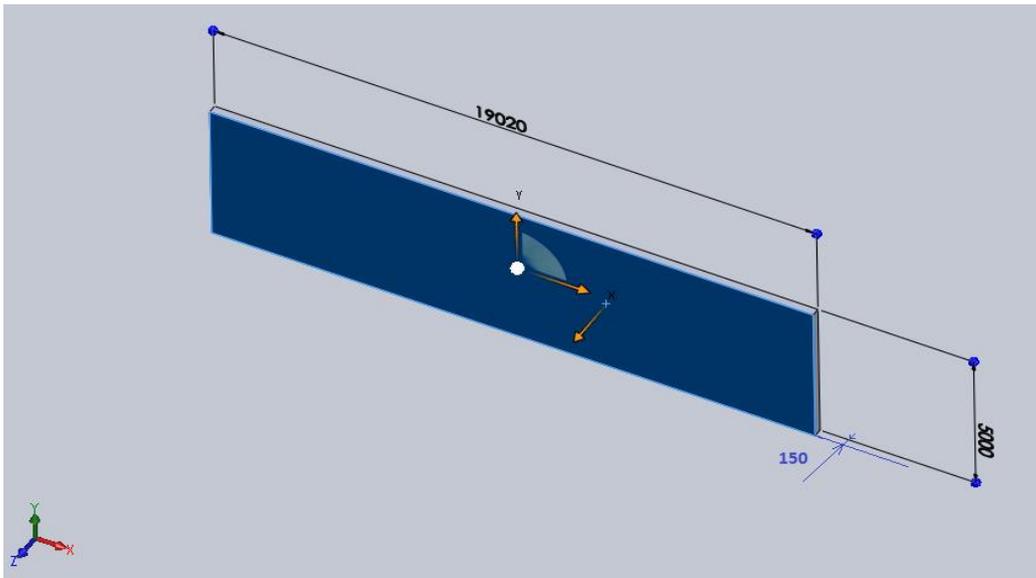


Figure 5-22 : Conception du mur anti-souffle proposé.

5.2.3 Emplacement du Mur

Le mur anti-souffle que nous venons de dimensionner, sera mis en place dans le but d'empêcher l'onde de choc générée en cas d'explosion de gaz dans la station de réchauffement et d'épuration de se propager et atteindre la voie de circulation qui se trouve en face de cette dernière. Donc il sera implanté à la place du grillage qui délimite l'accès à la station (voir figure 5-23).

Afin de permettre l'accès à la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible, nous proposons la configuration suivante ci-après.

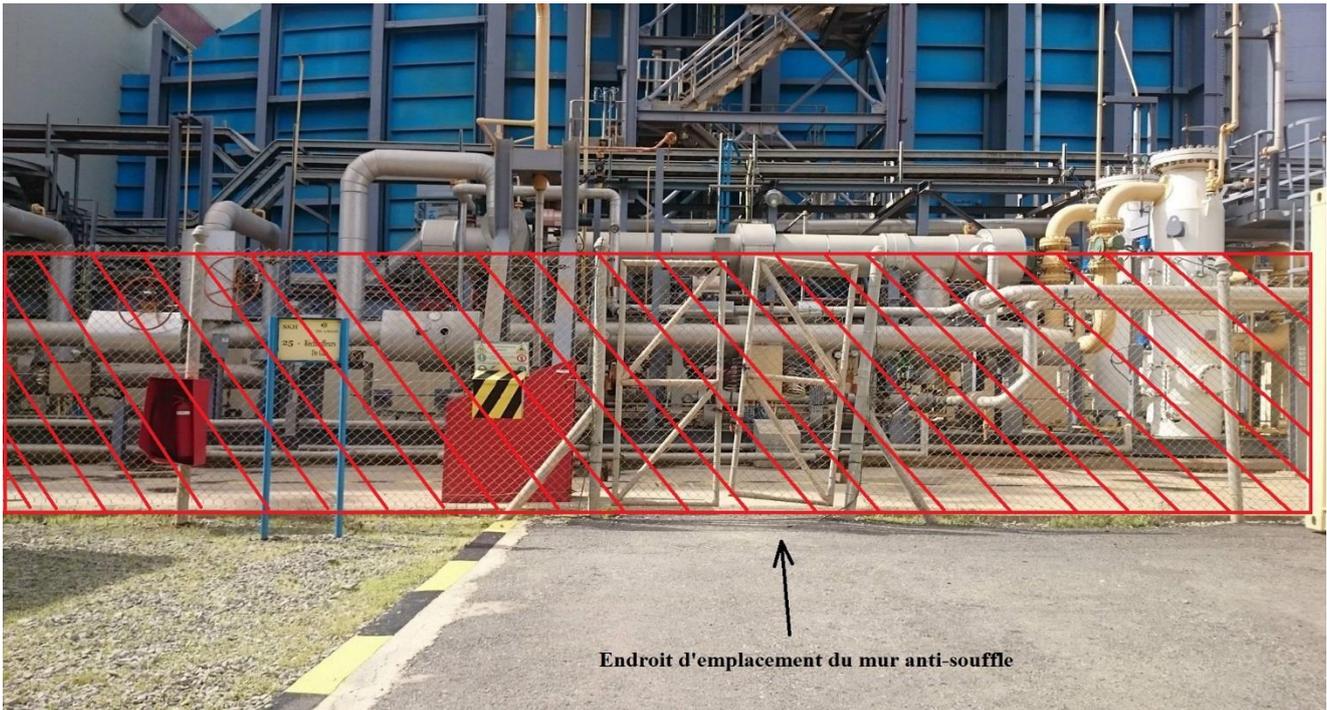


Figure 5-23 : Positionnement du mur anti-souffle.

-Le mur anti-souffle sera divisée en deux partie identique, 9.51 m de longueur chacune,

-La première partie (droite) reste en sa position, tandis que la deuxième partie (gauche) prendra un recul d'une manière à laisser un espace de 1.5 m suffisant pour permettre aux opérateurs d'accéder à la station en cas de besoin.

Pour plus d'évidence, nous schématisons cette configuration dans la figure ci-dessous.

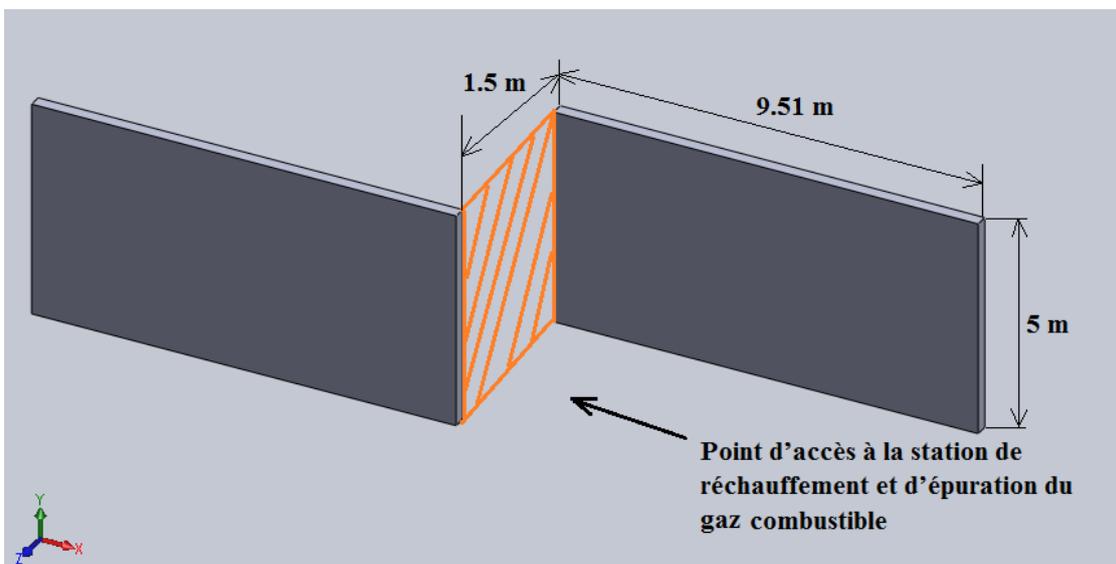


Figure 5-24 : Configuration du mur anti-souffle proposé.

Le choix de cette configuration se justifie par le fait que si nous avons opté pour la mise en place du mur en une seule portion avec installation d'une porte d'accès à la station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible, il nous paraît évident qu'en cas d'explosion d'un nuage de gaz, la porte n'aurait pas résisté à l'onde de choc générée par ce phénomène dangereux.

Dans la figure 5-25 ci- après, nous schématisons le positionnement du mur anti souffle par rapport à la station étudiée.

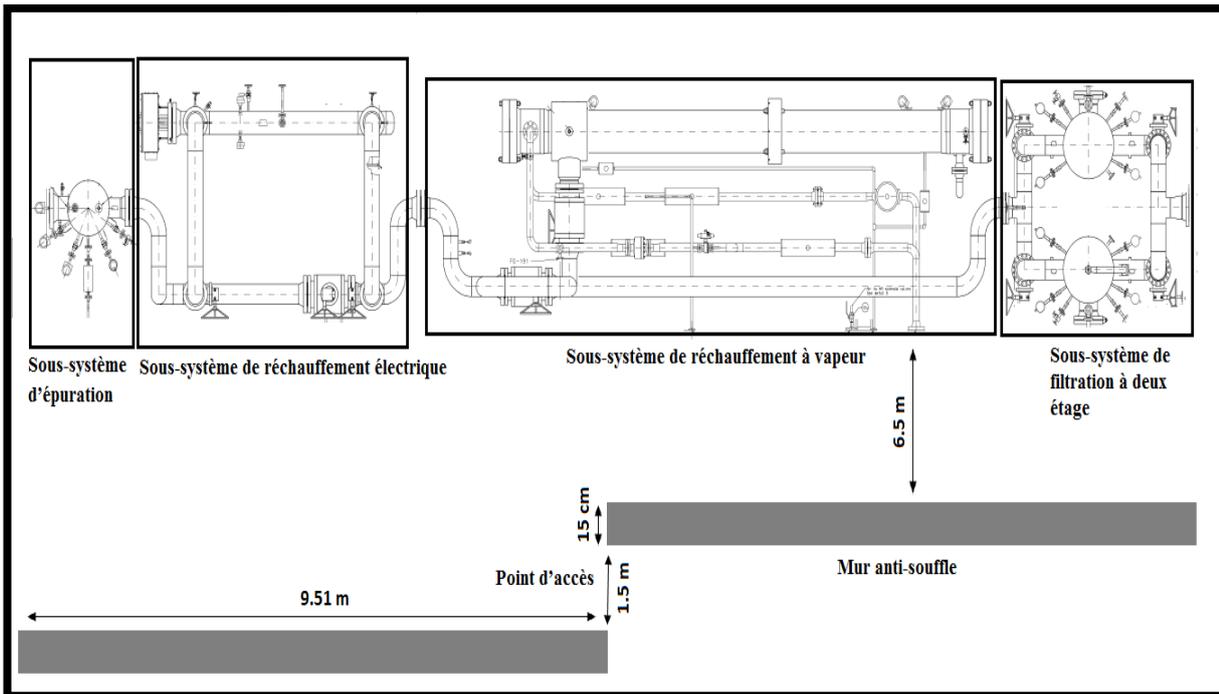


Figure 5-25 : Position du mur anti souffle par rapport à la station de réchauffement et d'épuration (Vue d'en haut).

Dans ce dernier chapitre, nous avons proposé des solutions d'ordre technique dans le but de maîtriser les risques majeurs liés au gaz naturel combustible. Les mesures de sécurité proposées constituent trois barrières de défense, leurs mises en place est indispensable dans le but de stopper la succession d'évènements qui auraient provoquer des phénomènes dangereux avec leurs effets majeurs. En effet, le premier SIS sert à réduire la pression du gaz en cas d'évènement de surpression. Le deuxième a pour rôle d'arrêter la fuite du gaz et d'empêcher donc la formation du nuage gazeux explosif. Tandis que le mur anti-souffle, il sert à protéger la voie de circulation qui se trouve en face de la station de réchauffement et d'épuration contre les effets de l'onde de choc.

Ces trois barrières contribuent donc fortement à maîtriser les risques majeurs liés à la manipulation d'une substance extrêmement dangereuse, leurs mises en place devient alors une nécessité.

Conclusion

Le projet que nous venons de réaliser a pour objectif principale la proposition de mesures d'ordre technique et d'ingénierie qui permettent la maîtrise des risques majeurs, notamment l'explosion, liés à une substance extrêmement dangereuse qui est le gaz naturel combustible circulant dans la station de réchauffement et d'épuration au niveau de la centrale de production d'électricité de Hajret-Ennous. Dans le but de répondre aux questions posées dans notre problématique, nous avons adopté une démarche de résolution logique en s'inspirant des lignes directrices prodiguées par la norme ISO 31000 tout en se basant sur des méthodes et des outils bien adaptés et soigneusement choisis.

L'analyse fonctionnelle du système qui a fait l'objet de notre étude ainsi que la description détaillée des éléments qui le composent, nous a amené à découvrir que le seul moyen exploité pour contrôler la pression dynamique du gaz combustible dans la station de réchauffement et d'épuration sont bien des vannes manuelles.

Le diagnostic réalisé dans le chapitre 3 nous renseigne que le taux de non-conformité par rapport aux prescriptions du constructeur GE est assez considérable, il est de l'ordre de 55%. Selon ce taux élevé de non-conformité, le système étudié a été mis en exploitation avec un manque important d'équipements qui contribuent étroitement à la sécurité. Donc, ce système est très vulnérable aux évènements pouvant découler de la variation de la pression dynamique du gaz.

L'application de la méthode AMDEC nous a permis de récolter l'ensemble des modes de défaillances des composants qui entraînent la surpression, elle nous a démontré ainsi que cet évènement est provoqué par 23 % de modes de défaillance analysés.

Le déploiement de la HAZOP a constitué un complément d'analyse. En effet, cette méthode nous a fournis un supplément de causes qui peuvent engendrer la surpression grâce à l'étude des dérives de certains paramètres qui peuvent avoir lieu sur l'installation étudié. Elle nous a amené aussi à déduire que la majorité des dérives conduit aux évènements de surpression, de perte de confinement du gaz (fuite) ou de rupture des conduites.

Grâce au déploiement de ces deux outils d'analyse, nous avons pu déduire que la surpression constitue un évènement redouté centrale.

La construction des AdD nous a permis de mettre en évidence toutes les combinaisons de causes possibles pour aboutir à la surpression au niveau de chaque sous-système étudié. Les valeurs des probabilités d'occurrence calculées de cet évènement nous ont prouvé qu'avec un taux d'occurrence annuel supérieur à 10^{-2} , la surpression est un évènement très probable dans la vie du système étudié selon l'échelle de classification.

Grâce à l'élaboration des AdE, nous avons pu déployer les ERS provoqués par la surpression et calculer leurs probabilités d'occurrence. Nous avons pu également juger que les dispositifs de sécurité existant sont insuffisants.

Conclusion

La construction des nœud papillons a permis de savoir que les phénomènes dangereux qui peuvent être provoqués par les ERS sont l'explosion d'un VCE et le feu de torche. Cette méthode nous a conduit ainsi à schématiser tous les scénarios d'accident possibles depuis les causes basiques, en passant par L'ERC jusqu'aux phénomènes dangereux et leurs effets majeurs au niveau de chaque sous-système qui compose la station étudiée.

La simulation de l'explosion d'un VCE et du feu de torche a permis de prouver que les dégâts engendrés par ces deux phénomènes tant sur les opérateurs que sur les équipements avoisinants sont d'une ampleur extrême et qu'il est impératif de proposer trois barrières de protection fiables à savoir :

- ✓ Un premier système instrumenté de sécurité SIS qui sera sollicité en cas d'évènement de surpression pour réduire la pression du gaz dans les conduites ;
- ✓ Un deuxième SIS qui sert à arrêter la fuite du gaz et empêcher la formation de nuage gazeux explosif en cas de surpression et défaillance du premier SIS ;
- ✓ Un mur anti-souffle en béton armé de 15 cm d'épaisseur capable de résister à une onde de choc de 580.50 mbar pour réduire les effets de l'explosion et protéger la zone dédiée aux piétons en cas de défaillance des deux SIS et survenue d'une explosion.

L'analyse fréquentielle du premier SIS a démontré qu'en cas de surpression, la réponse sera très rapide et la pression atteint la valeur consigne au bout de 4.52 secondes. Donc un système automate constitue l'outil adéquat pour répondre à des situations aussi urgentes.

Enfin, dans une perspective d'améliorer continuellement la situation, nous recommandons fortement d'une part, de mettre en œuvre les solutions suggérées tant au niveau du système étudié de la centrale électrique de Hajret-Ennous qu'au niveau de tous les systèmes similaires exploités dans les autres centrales clientes de GE à travers tout le territoire national. Et d'autre part, d'effectuer, selon des échéanciers, des diagnostics de conformité par rapport aux exigences de tous les équipements industriels fournis aux centrales électriques clientes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] International Organization for Standardization (ISO), 2009, ISO 31000 : Management du risque- Principes et Lignes directrices, Edition original.34p.
- [2] D. DEROUAZ-D. MAMERI, Maitrise des risques majeurs au niveau du « centre vrac GPL-CV 165 » de NAFTAL à Sidi Arcine, Baraki. 178p.
Mémoire de fin d'étude : QHSE-GRI : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2016.
- [3] International Organization for Standardization (ISO), 2009, ISO 31010 : Management du risque- Outils et techniques d'appréciation des risques. 176p.
- [4] A. AMIAR, Sécurité et sureté des installations et des équipements industriels. 30p.
Support de cours : QHSE-GRI : Alger, Ecole Nationale Polytechnique : 2015.
- [5] Michel.Ridoux, Techniques de l'ingénieur, AMDEC-Moyen, Juillet, 1999, 12p.
- [6] Analyse des risques : Identification et estimation : Démarches d'analyse des risques- Objectif et typologie des méthodes qualitatives d'analyse des risques. [En ligne]. [Consulté le 10 Mars 2017]. Disponible sur <http://www.unit.eu/cours/cyberrisques>.
- [7] DEBRAY.B, CHAUMETTE.S, DESCOURIERE.S, TROMMETER.V, INERIS-DRA-2006-P46055 CL47569, $\Omega 7$: Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.
- [8] D. DEROUAZ, Evaluation de la performance des systèmes industriels par l'application des méthodes et outils de la sureté de fonctionnement, 40p.
Projet séminaire : QHSE-GRI : Alger, Ecole nationale Polytechnique : 2015.
- [9] Yves MORTUREUX, La sureté de fonctionnement : Méthodes pour maîtriser les risques, Janvier, 2005,17p.
- [10] Marc J.Assael, Konstantinos E.Kakosimos.Fires,Explosions,and Toxic Gas Dispersions, Effects Calculation and Risk Analysis. Édition. USA : CRC Press, Taylor & Francis Group,2010.346p, ISBN 978-1-4398-2675-1.
- [11] INRS.Les mélanges explosifs.1. Gaz et vapeurs, ED 911.
- [12] INERIS, Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre,1999,166 pages.
- [13] Jamison Janawitz, James Masso, christopher childs. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations. GE Power and Water, Atlanta, GA ,2014,56p.
- [14] Companies: ENI S.p.A\AGIP Exploration & Production- BP Exploration Operating Company-ExxonMobil International- Norsk Hydro ASA- Phlipps Petroleum Company

Norway- Statoil ASA-Shell Exploration & Production- Total Final Elf, 2002. OREDA Offshore Reliability Data Handbook, 4^{ème} Edition, 835p, ISBN 82-14-02705-5.

[15] ARIA : Analyse, Recherche et Information sur les Accidents ; Retour d'expérience sur les accidents technologique,2001. [En ligne]. [Consulté le 19 février 2017]. Disponible sur <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr>.

[16] Bernard BARTHÉLÉMY, Jacques QUIBEL, Techniques de l'ingénieur, Gestion des risques de l'entreprise, 10 avril 2000, 15p.

[17] Alain GAYON, Techniques d'ingénieurs, Importance de la sécurité dans les entreprises ,10 juillet 2001, 17p.

[18] Jean-Pierre DAL PONT, Techniques d'ingénieurs, Sécurité et gestion des risques, juin 2003, 21p.

[18] Benjamin Le Roux, INERIS, Acculturation-notions générales sur la vulnérabilité du Bâti aux aléas technologiques, Octobre 2012, 33 p.

[19] Commission Internationale d'Electrotechnique CEI 61508, Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et programmables électroniques liés à la sécurité. Parties 1-7. Suisse, 1998-2005.

[20] Commission Internationale d'Electrotechnique CEI 61511, Sécurité fonctionnelle et système instrumenté de sécurité pour le secteur de l'industrie des procédés. Parties 1-3. Suisse; 2003.

[21] A.C. Torres Echeverria, S. Martorell, H.A Thompson, Design optimization of a safety-instrumented system based on RAMS+C addressing IEC 6108 requirements and diverse redundancy, Reliability Engineering and system safety, vol 94; 2009; p 164-179.

[22] Angela E. Summers, Techniques for assigning a target safety integrity level, ISA transaction; vol 37; 998; p 95-104.

[23] M. Catelani, L. Ciani, V. Luongo, A simplified procedure for the analysis of Safety Instrumented Systems in the process industry application, Microelectronics Reliability; vol 51; 2011; p 1503-1507.

[24] GRIF : Plate-forme logicielle d'analyse des systèmes qui permet de déterminer les indicateurs fondamentaux de la sûreté de fonctionnement : Fiabilité – Disponibilité – Performance – Sécurité. C'est un logiciel développé au sein de l'entreprise TOTAL, il laisse le choix à l'utilisateur d'opter pour la technique de modélisation la plus adéquate à la résolution du système étudié : Arbres de défaillance, arbres d'événements. Des architectures déjà intégrées dans le logiciel facilitent cette modélisation. Cette plate-forme dispose ainsi de moteurs de calcul matures, très performants et aux capacités de modélisation propres à répondre aux besoins de l'ensemble des études fiabilistes.

[25] Debray.B, Duplantier.S, Proust.C, Mavrot.G, Richomme, Reemerenger, INRIS-DRA-2007-N° 4605/77288, la résistance des structures aux actions accidentelles.

[26] Leroux.B, hebrard.J, Willot.A, 20 Octobre 2014, Annexe 21128309-09517A-Modélisation de l'explosion dans le post gaz CPCU.

ANNEXES

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N°0	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N°0	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
1	Système de filtration à deux étages <i>(Duplex dual stage absolute separator)</i>	- Combustible Brute (GN) Phase gazeuse Phase liquide Particules contaminants Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C	-Gaz combustible filtré Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C -Drains (condensats + particules contaminants)	1	Filtre Séparateur 1	Combustible Brute (GN) (Phase gazeuse+ phase liquide+ particules contaminants) Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C	-Gaz combustible filtré Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C -Drains (Condensats + particules contaminants)	Vannes manuelles (à l'entrée et à la sortie) <i>(Ball valve type)</i>
Pipes d'interconnexion Entrée (30.5 cm) Sortie (25.4 cm)								
2 Manomètres								
Bride de jonction d'entrée (30.5 cm)								
Bride de jonction de sortie (25.4 cm)								
2 Verres de gauge (premier et deuxième étage)								
1 Indicateur de température								
1 Indicateur de pression différentielle								
1 Système d'alarme de différence de pression <i>(Pressure Differential Switch)</i> réglé a 1 bar								
1 Soupape de sécurité (44.8 bar)								
1 Purgeur								
Alarme niveau de liquide haut <i>(Level Switch High, LSH 1A)</i> niveau de déclanchement : étage 1								
1 Contrôleur de niveau de liquide (étage 1) connecté à une vanne de décharge pneumatique (LC, LCV 1A)								

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N°0	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N°0	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
1	Système de filtration à deux étages (Duplex dual stage absolute separator)	- Combustible Brute (GN) Phase gazeuse Phase liquide Particules contaminants Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C	-Gaz combustible filtré Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C -Drains (condensats + particules contaminants)	1	Filtre Séparateur 1	Combustible Brute (GN) (Phase gazeuse+ phase liquide+ particules contaminants) Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C	-Gaz combustible filtré Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C -Drains (Condensats + particules contaminants)	-Alarme niveau de liquide haut (<i>Level Switch High</i> , LSH,2A) (niveau de déclanchement : étage 2) 1 Contrôleur de niveau (étage 2) connecté à une vanne de décharge pneumatique (LC, LCV 2A) Alarme niveau de liquide très haut (étage 2) (<i>Level Switch High High</i> , LSHH, 1A)
				2	Filtre Séparateur 2	Idem Filtre Séparateur 1	Idem Filtre Séparateur 1	Idem Filtre Séparateur 1

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N°	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N°	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
2	Système de réchauffement à vapeur (Fuel gas performance heater G010 Skid)	<p>Gaz frais Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C</p> <p>Vapeur Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=25 bar T=210°C</p>	<p>Gaz chaud Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=160°C</p> <p>-Eau condensée Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=11,6 bar T=48°C</p>	1	Circuit de vapeur	<p>Vapeur Q=2. 31 Kg.s⁻¹ P=25 bar T=210°C</p>	<p>Eau condensée Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=11.6 bar T=48°C</p>	<p>Canalisation (D= 7.62 cm)</p> <p>2 Manomètres</p> <p>1 Transmetteur de pression</p> <p>2 Indicateurs de température</p> <p>Bride de jonction d'entrée (7.6 cm)</p> <p>Bride de jonction de sortie (7.6 cm)</p> <p>-2 Electrovanes (ligne d'alimentation en vapeur)</p> <p>2 Electrovanes (Ligne d'eau condensée)</p> <p>1 Indicateur de pression différentielle (ligne vapeur)</p> <p>1 Filtre</p> <p>1 Débitmètre</p> <p>1 Vanne régulatrice de température</p> <p>Event sur canalisation vapeur</p> <p>Event sur canalisation eau condensée</p> <p>2 Electrovanes Situé sur chaque évent</p> <p>1 Soupape de sécurité (PSV1 :79.3 bar)</p> <p>Calorifuge</p>

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
2	Système de réchauffement à vapeur (<i>Fuel gas performance heater G010 Skid</i>)	<p>Gaz frais Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C</p> <p>Vapeur Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=25 bar T=210°C</p>	<p>Gaz chaud Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=160°C</p> <p>-Eau condensée Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=11,6 bar T=48°C</p>	2	Circuit de gaz	<p>Gaz frais Q=15,55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C</p>	<p>Gaz chaud Q=15,55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=160°C</p>	<p>Canalisation (D= 25.4 cm)</p> <p>2 Manomètres</p> <p>1 Transmetteur de pression</p> <p>2 Indicateurs de température</p> <p>2 Thermocouples</p> <p>Bride de jonction d'entrée (25.4cm)</p> <p>Bride de jonction de sortie (25.4 cm)</p> <p>Calorifuge</p> <p>1 Vanne manuelle de dérivation (by-pass)</p> <p>1 indicateur de pression différentielle</p> <p>2 Vannes manuelles pour régler la pression (en amont et en aval de l'échangeur à chaleur)</p>

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
2	Système de réchauffement à vapeur (<i>Fuel gas performance heater G010 Skid</i>)	<p>Gaz frais Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=32°C</p> <p>Vapeur Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=25 bar T=210°C</p>	<p>Gaz chaud Q=15.55 Kg.s⁻¹ P=34 bar T=160°C</p> <p>-Eau condensée Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=11,6 bar T=48°C</p>	3	Echangeur à chaleur	<p>-Vapeur Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=25 bar T=210°C</p> <p>-Gaz frais Q=15.55 Kg s⁻¹ P=34 bar T=32°C</p>	<p>-Eau condensée Q=2.31 Kg.s⁻¹ P=11,6 bar T=48°C</p> <p>-Gaz chaud Q=15.55 Kg s⁻¹ P=48.5 bar T=160°C</p> <p>-Drains (Condensats)</p>	<p>Calorifuge</p> <p>Deux pots de vidange (drainage)</p> <p>1 Soupape de sécurité (44,8 Bar)</p> <p>1 Event</p> <p>Système d'alarme du niveau haut de condensats (premier pot) <i>(Level switch High,LSH 4223)</i></p> <p>Système d'alarme du niveau haut de condensats (deuxième pot) <i>(Level switch High,LSH 4222)</i></p> <p>Système d'alarme du niveau très haut de liquide (deuxième pot) <i>(Level switch High High,LSHH 4222)</i></p> <p>2 électrovannes situées sur les lignes de drainage</p>

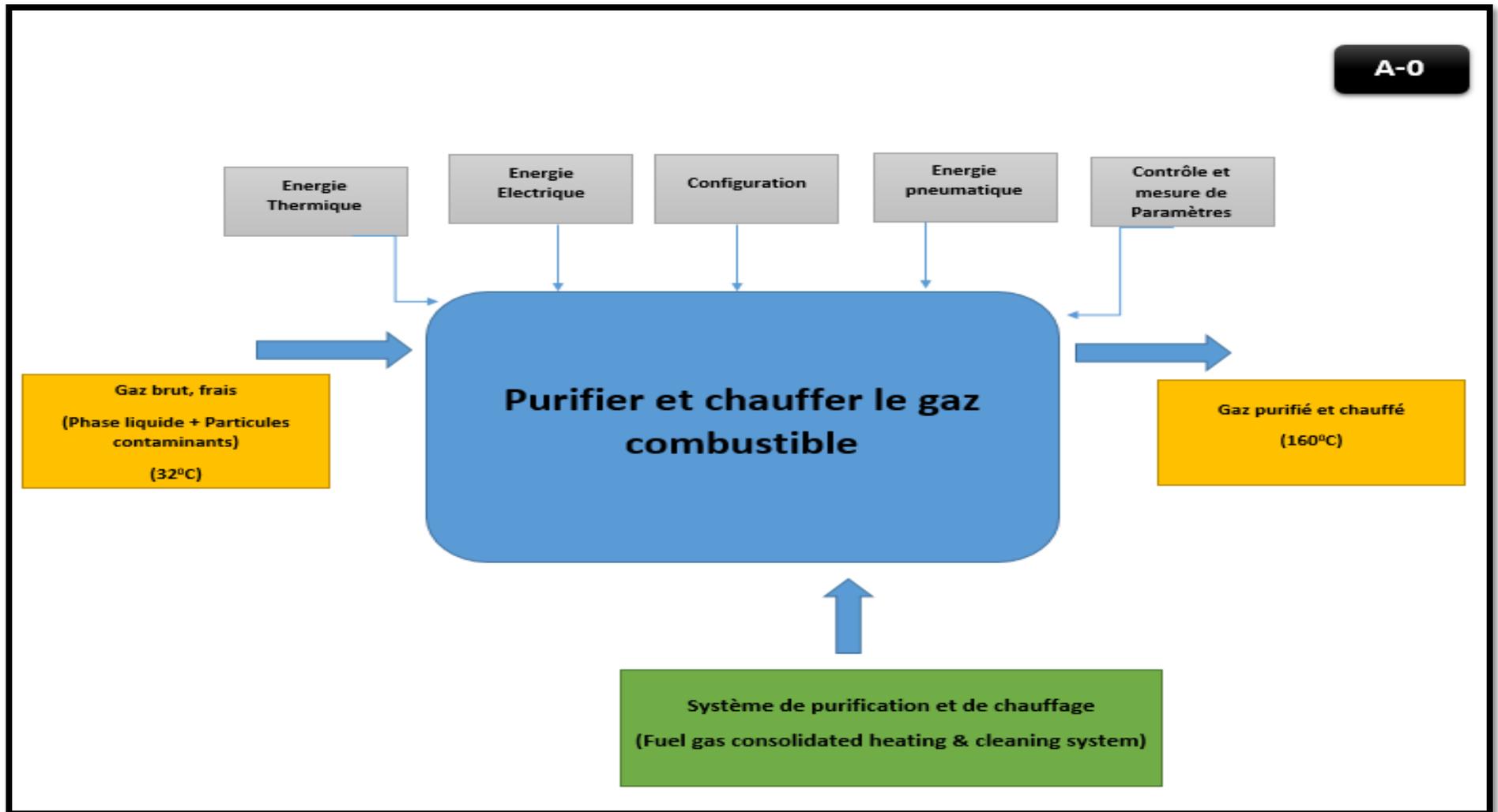
Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N ⁰	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
3	Système de réchauffement électrique	Gaz combustible Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=32°C	Gaz combustible Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=37.12 bar T=60°C	1	Réchauffeur électrique (Start-up electric heater G012) 300 KW 400 VAC 3 phases 50 HZ (Fonctionne en phase de démarrage)	Gaz combustible Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=32°C	Gaz combustible Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=37.12 bar T=60°C	2 manomètres
								2 Brides de jonction (entrée\sortie 25.4 cm)
								2 vannes manuelles (entrée\sortie)
								1 vanne manuelle de dérivation (by-pass)
								Pipes d'interconnexion (25.4cm)
								2 Vannes de purge (sur les pipes)
								1 Soupape de sécurité (44.8 bar)
								1 Vanne de drainage
								Système d'arrêt en cas de faible débit
								Thermocouples\Indicateur de température
								Disjoncteur Magnétique
								1 Event (sur la canalisation)
								Système d'alarme en cas de déclenchement du disjoncteur

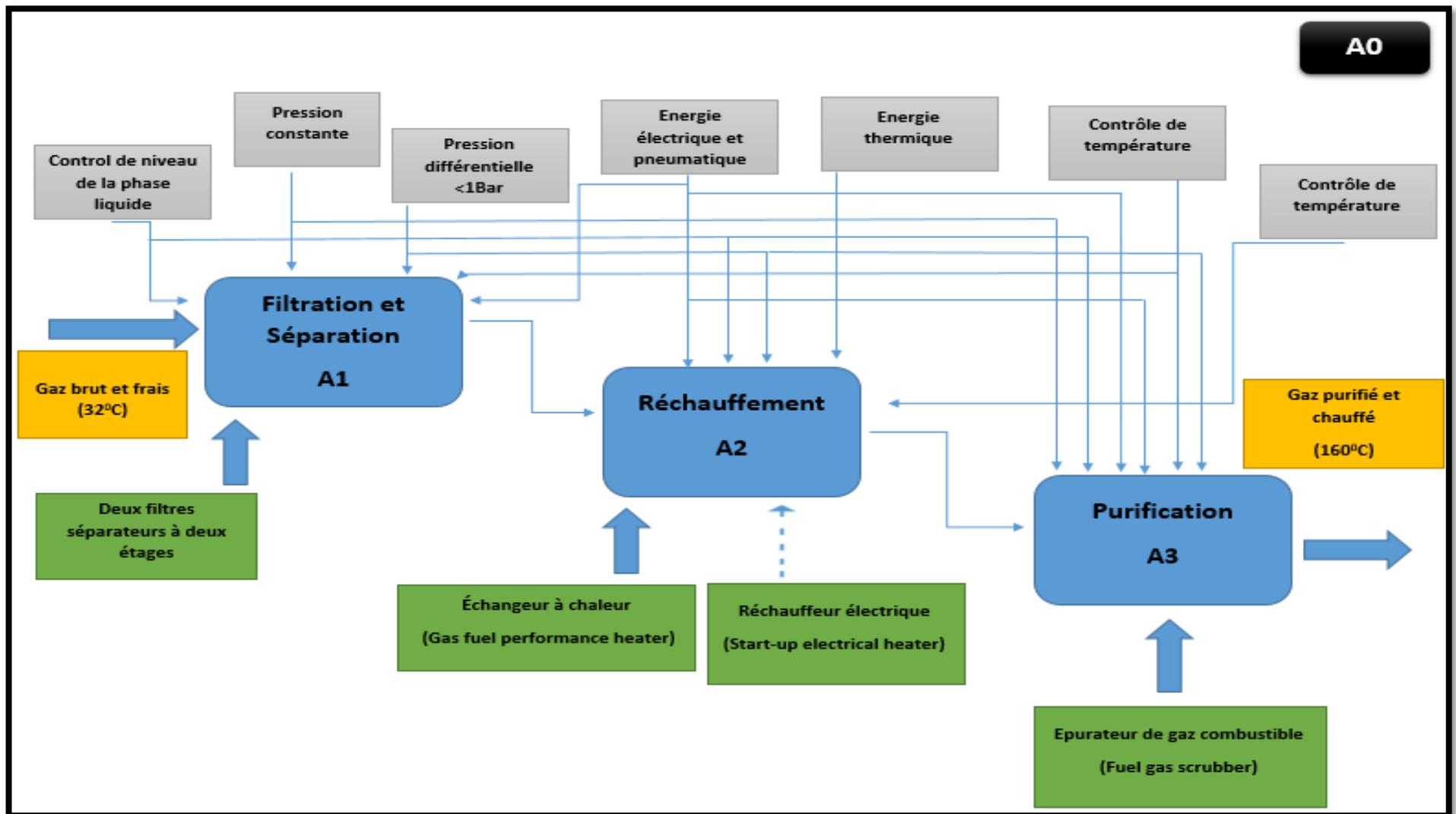
Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Systèmes				Sous-systèmes				
S-N°	Nom	Entrés	Sorties	Ss-N°	Nom	Entrés	Sorties	Equipements
4	Système d'épuration	Gaz + liquide et particules solides entrainées Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=160°C	Gaz purifié Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=160°C -Drains (Condensats)	1	Epurateur de gaz (Fuel gas scrubber G002)	Gaz avec liquide et particules solides entrainées Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=160°C	-Gaz purifié Q=15.55 Kg.s ⁻¹ P=34 bar T=160°C -Drains (Condensats)	Pipes d'interconnexion Entrée (25.4cm) ; Sortie (30.5cm)
								Système de drainage manuel
								1 Manomètre
								1 Indicateur de température
								1 Indicateur de pression différentielle
								1 Soupape de sécurité (44.8 bar)
								1 Event
								1 Verre de gauge
								Alarme de niveau haut de condensats (Level Switch High, LSH 1)
								1 Contrôleur de niveau haut de condensats connecté à une vanne de décharge pneumatique (LC, FC)
2 Alarmes de niveau très haut de condensats (Level Switch High High, LSHH 1,2)								

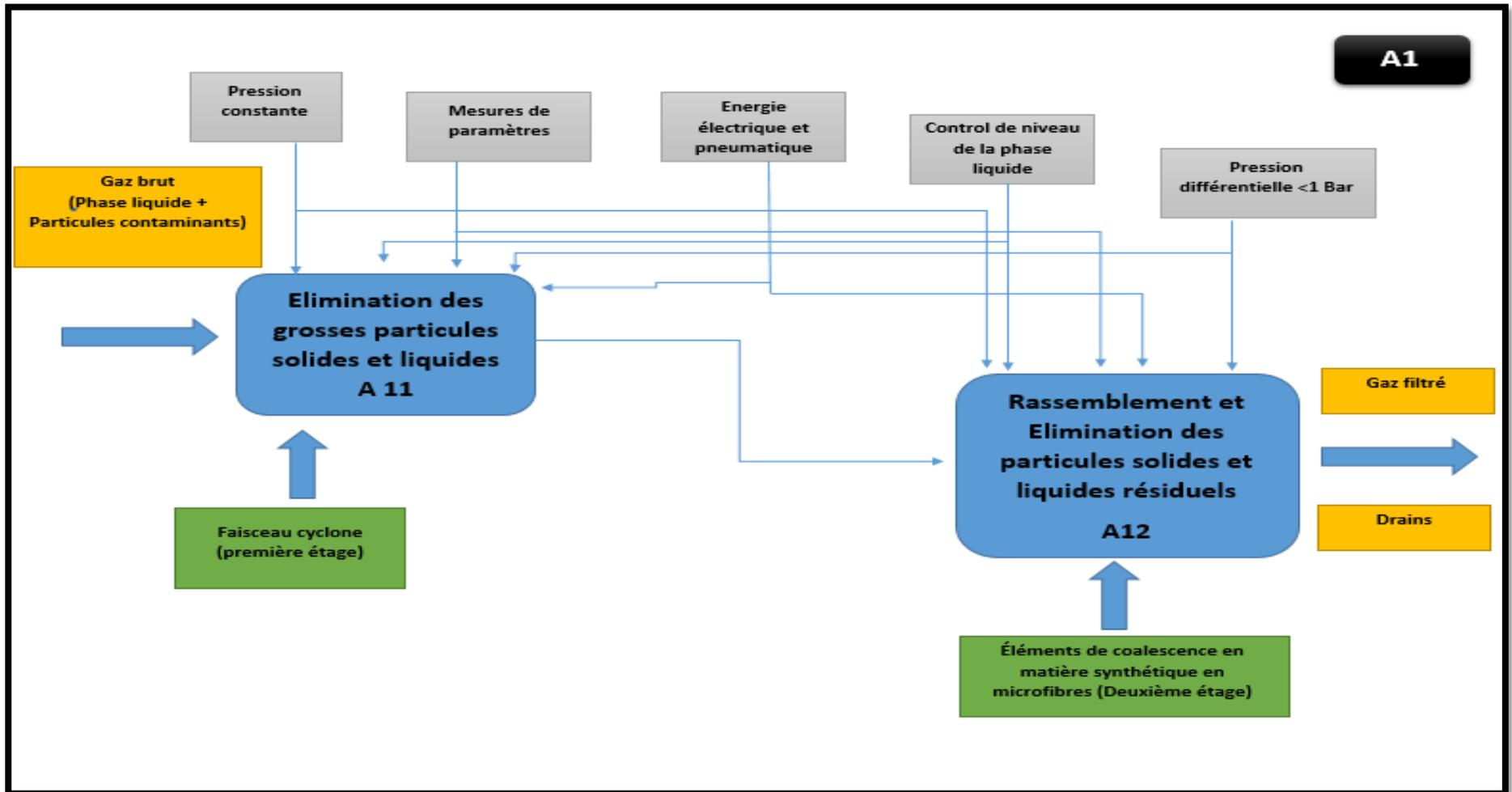
- Niveau A-0, il représente la fonction principale, les éléments d'entrée et de sortie, le système assurant l'activité et les données de contrôle :



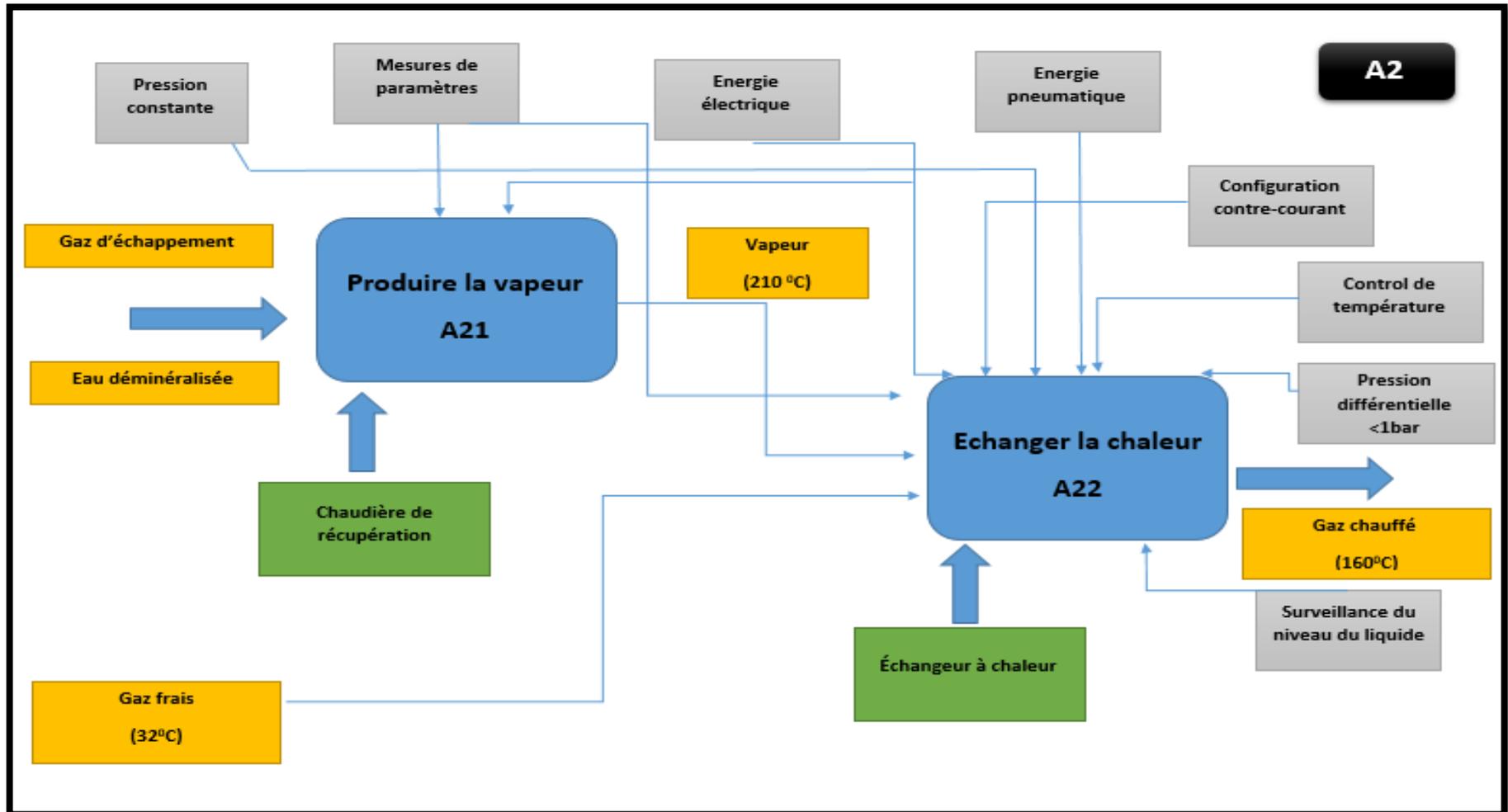
- La fonction principale se divise en trois sous- fonctions, ce qui nous donne trois sous-boîtes (A1 ; A2 et A3) :



- La fonction de filtration et de séparation est l'enchaînement des deux sous- fonctions (A11 et A12) :



- Le réchauffement du gaz combustible est assuré selon les deux fonctions (A21 et A22) :



AMDEC	Analyse de Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités											
	Système de réchauffement et d'épuration de gaz naturel combustible											
Sous Système	Mode d'exploitation	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Moyen de détection	Criticité				Actions correctives
								F	G	D	C	
Filtration à deux étages Filtre séparateur	Phase de démarrage\ Régime continue	Eléments de coalescence en micro fibres	-Regrouper et éliminer les particules solides et liquides résiduels dans un puisard supérieur	Colmatage	-Gaz de forte teneur en particules solides en suspension. -Absence de calendrier de maintenance	-Chute de pression de sortie du gaz	Indicateur de pression différentiel le muni d'un système d'alarme	4	2	1	8	-Etablir un calendrier de maintenance préventive des filtres -Surveiller continuellement la qualité du gaz fourni
		Vanne Manuelle amont	-Régler manuellement la pression dynamique d'entrée. - Fermer et isoler en cas de maintenance	Fuite externe	-Surpression -Usure du joint d'isolement	Formation d'un nuage gazeux explosif	-	4	4	4	16	-Vérification régulière des états des joints. -Surveillance périodique de l'évolution de la corrosion -Détecteur de gaz
				Blocage	Corrosion	Perte de contrôle de pression dynamique	-	5	3	4	15	-Mettre en place un bypass pour éviter le risque de laminage lors d'ouverture de la vanne
				Fuite interne	Laminage	Perte de la fonction d'isolation	-	3	3	4	9	

Filtration à deux étages Filtre séparateur	Phase de démarrage\ Régime permanent			Fermeture intempestive	Usure de l'arbre rotatif interne de la vanne	Surpression	Indicateur de position	2	4	1	8	-Mise en place d'une soupape de sécurité avant les vannes
		Vanne manuelle aval	Régler manuellement la pression de sortie. Fermer et isoler en cas de maintenance	Idem Vanne amont	Idem Vanne amont	Idem Vanne amont	Idem Vanne amont					Idem Vanne amont
		Pipes d'interconnexions	-Acheminer le gaz -Raccorder les équipements	Fuite	-Surpression Brèche\Corrosion -Usure des joints au niveau des brides	-Formation de nuage gazeux explosif -Chute de pression dans la conduite	-	4	4	4	16	-Mis en place d'une détection de fuite -Système d'arrosage -Soupapes de sécurité -Surveillance régulière de l'évolution de la corrosion
				Rupture	Surpression	Formation de nuage gazeux explosif	-	3	4	4	12	
				Baisse de débit	-Présence de particules solides à l'intérieur -Fuite	Alimenter la turbine en faible pression	-	2	3	4	6	-Débitmètre -Mettre en place un filtre
Purgeur manuel (Event)	Dégager manuellement le gaz en cas de surpression dans le filtre	Blocage	Corrosion	Non dégagement du gaz en cas de surpression dans le filtre	-	5	4	4	20	-Essai périodique. -Vérification régulière d'état -changement régulier selon la durée de vie		

Annexe 3 : Tableau AMDEC

<p align="center">Filtration à deux étages</p> <p align="center">Filtre séparateur</p>	<p align="center">Phase de démarrage\ Régime permanent</p>	Purgeur manuel (Event)		Ouverture intempestive	Usure du mécanisme interne	-Formation de nuage gazeux\gaspillage du gaz	-	1	4	4	4	
		<p align="center">Système pneumatique de contrôle de niveau (Premier étage)</p> <p align="center">Contrôleur mécanique + alimentation en air comprimé (8 bar)+ vanne de drainage</p>	<p align="center">Drainer automatiquement les condensats du puisard inferieur</p>	Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation en air comprimé	- Usure du ressort interne	-Pas de drainage du liquide -Surpression	<p align="center">Alarme niveau haut (LSH,1A)</p> <p align="center">Verre de gauge (premier étage)</p>	3	3	1	9	<p align="center">-Mise en place d'un filtre dans la conduite d'alimentation en air comprimé</p> <p align="center">- Protection cathodique contre la corrosion de la conduite d'air</p>
				Pression d'air très faible	-Présence d'obstacles dans la conduite d'air -Fuite dans la conduite d'air	-Mauvais drainage -Surpression probable		4	3	1	12	
				Blocage du mécanisme interne du contrôleur	Détérioration interne -Corrosion	-Pas de drainage du liquide Augmentation du niveau des condensats dans les filtre		5	3	1	15	
				Vanne de drainage bloquée fermée	-Corrosion -Usure	-Surpression		5	3	1	15	

Annexe 3 : Tableau AMDEC

Filtration à deux étages Filtre séparateur	Phase de démarrage\ Régime permanent	Système pneumatique de contrôle de niveau (deuxième étage)	Drainer automatiquement les condensats du puisard supérieur	Idem	Idem	Idem	-Alarme niveau très haut (LSH,2A) -Verre de gauge (deuxième étage)					Idem
		Soupape de sécurité	Dégager automatiquement le gaz en cas de surpression dans le filtre. Pression d'ouverture : 44,8 bar	Blocage	Corrosion	-Non dégagement du gaz en cas de surpression	-	5	4	4	20	Vérification régulière de l'évolution de la corrosion
				Ouverture intempestive	Usure du ressort interne	Gaspillage du gaz\ Formation d'un nuage gazeux explosif	Indicateur de pression différentielle	3	4	1	12	-Essai périodique -Changement selon la durée de vie -Système de détection de gaz

Réchauffement à vapeur (Echangeur à chaleur)	Régime permanent	Soupape de sécurité	Dégager automatiquement le gaz en cas de surpression dans l'enveloppe. Pression d'ouverture : 44,8 bar	Blocage	Corrosion	Non dégagement du gaz en cas de surpression	-	5	4	4	20	Vérification régulière de l'évolution de la corrosion
				Ouverture intempestive	Usure du ressort interne	Gaspillage du gaz\ Formation d'un nuage gazeux	Indicateur de pression différentielle	3	4	1	12	-Essai périodique Changement selon la durée de vie -Système de détection de gaz
		Event manuel	Dégager manuellement le gaz en cas de surpression	Blocage	Corrosion	Non dégagement du gaz en cas de surpression	-	5	4	4	20	-Essai périodique. -Vérification régulière d'état -Changement régulier selon la durée de vie
		Enveloppes (Carcasses)	Acheminer le gaz combustible+ Eliminer les Condensats	Fuite	Brèche\corrosion	-Chute de pression Accumulation du gaz dans le calorifuge\ 	Indicateur de pression différentielle	2	4	4	8	-Mise en place de transmetteur de pression -Peinture antirouille -surveillance régulière
				Chute de pression de sortie	-Présence de d'obstacles (particules solides en suspension) -Fuite	Alimenter la turbine en faible pression	Indicateur de pression différentielle	2	3	1	6	Maintenance préventive -Détecteur de gaz

Réchauffement à vapeur (Echangeur à chaleur)	Régime permanent	Tubes internes	Acheminer la vapeur à moyenne pression dans l'échangeur	Fuite	Corrosion	-Mauvais réchauffement du gaz combustible -Mélange de gaz avec de la vapeur d'eau - perturbation des brûleurs et mauvaise combustion	-	2	3	4	6	Maintenance et inspection régulière des tubes -Mis en place d'un transmetteur de pression -Mise en place d'un indicateur de pression différentielle
				Baisse de débit	-Présence de d'obstacles (formation de tartres) -Fuite	Mauvais réchauffements du gaz combustible	-	3	2	4	6	
		Electrovanne 1	Eliminer les condensats du pot de vidange n°1	Fermeture intempestive	Coupure d'énergie électrique	Non contrôle du niveau des condensats Dans l'échangeur	Alarme de niveau haut (LSH)	4	3	1	12	-Mise en place d'un système pneumatique de contrôle de niveau
		Electrovanne 2	Eliminer les condensats du pot de vidange n°2	Fermeture intempestive	Coupure d'énergie électrique	Non contrôle du niveau des condensats dans l'échangeur	-Alarme de niveau haut (LSH) -Alarme de niveau très haut (LSH)	4	3	1	12	-Mise en place des événements manuels sur les pots

Réchauffement Electrique (Réchauffeur Electrique)	Phase de démarrage	Pipes d'interconnec- tions	-Acheminer le gaz combustible -Liaison avec les autres équipements	Fuite	Surpression Brèche\ corrosion Usures des joints au niveaux des brides	-Accumulation du gaz dans le calorifuge -Chute de pression dans la conduite	-	4	4	4	16	-Mise en place d'une détection de fuite -Système d'arrosage -Soupapes de sécurité -Surveillance régulière de l'évolution de la corrosion -Débitmètre -Mettre en place un filtre
				Rupture	Surpression	Formation d'un nuage gazeux explosif	-	3	4	4	12	
				Baisse de débit	Présence de particules solides à l'intérieur	Actionnement du système d'arrêt	Détecteur de faible débit (Flow Switch Low)	2	3	1	6	
		Vanne manuelle d'entrée	Régler manuellement la pression d'entrée du gaz dans le réchauffeur électrique Fermer et isoler en cas de maintenance	Blocage	Corrosion	Perte de contrôle de pression	-	5	3	4	15	
				Fuite interne	Laminage	Perte de fonction d'isolation	-	3	3	4	9	
				Fermeture intempestive	Usure de l'arbre rotatif interne de la vanne	Surpression	Indicateur de position	2	4	1	8	
	Fuite Externe			Usure des joints d'isolement Surpression	Accumulation du gaz dans le calorifuge	-	4	4	4	16		
	Vérification régulière des états des joints. -Surveillance périodique de l'évolution de la corrosion -Transmetteur de pression -Mettre en place un bypass pour éviter le risque de laminage lors											

Annexe 3 : Tableau AMDEC

Réchauffement Electrique (Réchauffeur Electrique)	Phase de démarrage													-indicateur de pression différentielle -Système de détection de gaz
		Disjoncteur Magnétique	Protéger le réchauffeur contre la surintensité	Déclanchement intempestif	-Détérioration du mécanisme interne -Usure	Réduction de puissance de réchauffement	Système d'alarme en cas de déclanchement du disjoncteur	3	3	1	6	-Mise en place d'un système d'alarme en cas de surintensité		
				Non déclanchement en cas de surintensité	Défaillance des thermocouples	-Surchauffe -Surpression -Eclatement du réchauffeur	-	2	4	4	8	-Mise en place d'un deuxième disjoncteur (redondance)		
Epuration (Filtre épurateur)	Phase de démarrage\ Régime permanent	Pipes d'interconnexions	Acheminer le gaz combustible Liaison avec les autres équipements	Fuite	Surpression Brèche\corrosion \Usure de joints au niveau des brides	-Accumulation du gaz dans le calorifuge -Chute de pression dans la conduite	-	4	4	4	16	-Mis en place d'un transmetteur de pression -Système d'arrosage -Soupapes de sécurité -Surveillance régulière de l'évolution de la corrosion -Débitmètre -Mettre en place un filtre		
				Rupture	Surpression	Eclatement du calorifuge et formation d'un nuage gazeux explosif	-	3	4	4	12			
				Baisse de débit	Présence d'obstacles (particules solides)	Alimentation de la turbine en faible pression	-	2	3	1	6			
		Soupape de sécurité	Dégager automatiquement le gaz en cas de surpression	Blocage	Corrosion	Non dégagement du gaz en cas de surpression	-	5	4	4	20	-Vérification régulière de l'évolution de la corrosion		

Annexe 3 : Tableau AMDEC

Epuration (Filtre épurateur)	Phase de démarrage\ Régime permanent	Soupape de sécurité	Pression d'ouverture : 44,8 bar	Ouverture intempestive	Détérioration du ressort interne	Gaspillage du gaz \formation d'un nuage gazeux explosif	Indicateur de pression différentielle	3	4	1	12	-Essai périodique -Changement selon la durée de vie -Système de détection de gaz
		Vanne de drainage manuelle	Eliminer manuellement les condensats	Blocage	Corrosion	Non élimination des condensats en cas de défaillance du système de drainage automatique	-	5	2	4	10	-Mise en place d'un regard pour l'évacuation des condensats -Surveillance de l'évolution de condensat -Changer la vanne selon la durée de vie -Indicateur de position
				Ouverture intempestive	Usure de l'arbre rotatif interne de la vanne	Formation d'une flaque de condensats mélangée avec du gaz dissous	-	1	4	4	4	
		Event	Dégager manuellement le gaz en cas de surpression dans l'épurateur	Blocage	Corrosion	Non dégagement du gaz en cas de surpression dans l'épurateur	-	5	4	4	20	-Essai périodique. -Vérification régulière d'état -changement régulier selon la durée de vie

Epuration (Filtre épuration)	Phase de démarrage\ Régime permanent	Système pneumatique de contrôle de niveau (Contrôleur mécanique + alimentation en air comprimé (8 bar) + vanne de drainage)	Surveiller le niveau et drainer automatiquement les condensats	Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation en air comprimé	- Usure du ressort interne	-Pas de drainage du liquide -Surpression	Alarme niveau haut (LSH,2) Verre de gauge Alarme niveau très haut (LSHH,2)	3	3	1	9	-Mise en place d'un système de drainage pneumatique au niveau supérieur -Mise en place d'un filtre dans la conduite d'alimentation en air comprimé - Protection cathodique contre la corrosion de la conduite d'air -Vérification périodique de l'état des vannes et du contrôleur mécanique
				Pression d'air très faible	-Présence d'obstacles dans la conduite d'air -Fuite dans la conduite d'air	-Mauvais drainage -Surpression probable		4	3	1	12	
				Blocage du mécanisme interne du contrôleur	-Détérioration interne -Corrosion	-Pas de drainage du liquide Augmentation du niveau des condensats dans les filtre		5	3	1	15	
				Vanne de drainage bloquée fermée	-Corrosion -Usure	-Surpression						

AMDEC	Analyse de Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités											
	Station Gaz Principale											
Sous Système	Mode d'exploitation	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Moyen de détection	Criticité				Actions correctives
								F	G	D	C	
Rampes de détente	Régime permanent	Vannes régulatrices de pression	Réduire la pression jusqu'à 37 bar et alimenter les trois tranches de production	Fermeture intempestive	Détérioration du ressort interne	-Non alimentation des tranches/arrêt de production -Surpression au niveau des rampes	Indicateur de position de vanne	3	4	1	12	-Inspection périodique de la corrosion et de l'état des joints -Mise en place des détecteurs de gaz
				Ouverture excessive	Fuite\rupture guillotine des tubes de connections entre le pipe et la vanne	Surpression au niveau des stations gaz (tranches)	-	3	4	4	12	-Mise en place d'un système d'arrosage -changement des vannes selon la durée de vie
				Bloquées ouvertes	Corrosion	-Perte de de contrôle pression -surpression au niveau des tranches	-	5	4	4	20	-Mise en place des transmetteurs de pression sur les pipes de transport en aval
				Fuite externe	Usure des joints -Surpression	Formation de nuage gazeux explosif	Manomètres	5	4	2	20	

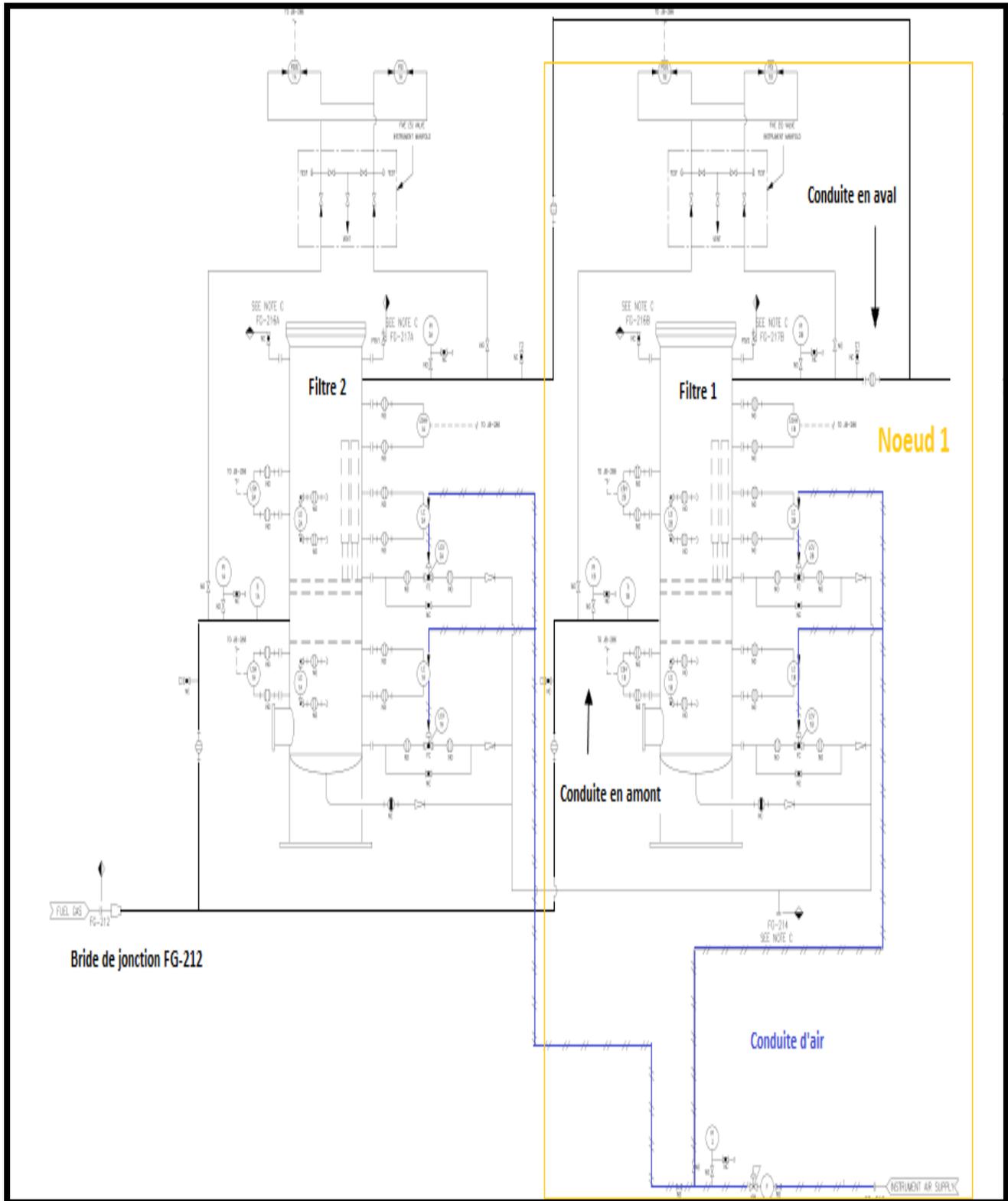
Grille AMDEC		Gravité			
		1	2	3	4
Fréquence	6	6	12	18	24
	5	5	10	15	20
	4	4	8	12	16
	3	3	6	9	12
	2	2	4	6	8
	1	1	2	3	4

Classification des modes de défaillance selon la fréquence	
Classement	
1	Défaillance pratiquement inexistante
2	Défaillance improbable
3	Défaillance rare
4	Défaillance occasionnelle
5	Défaillance probable
6	Défaillance fréquente

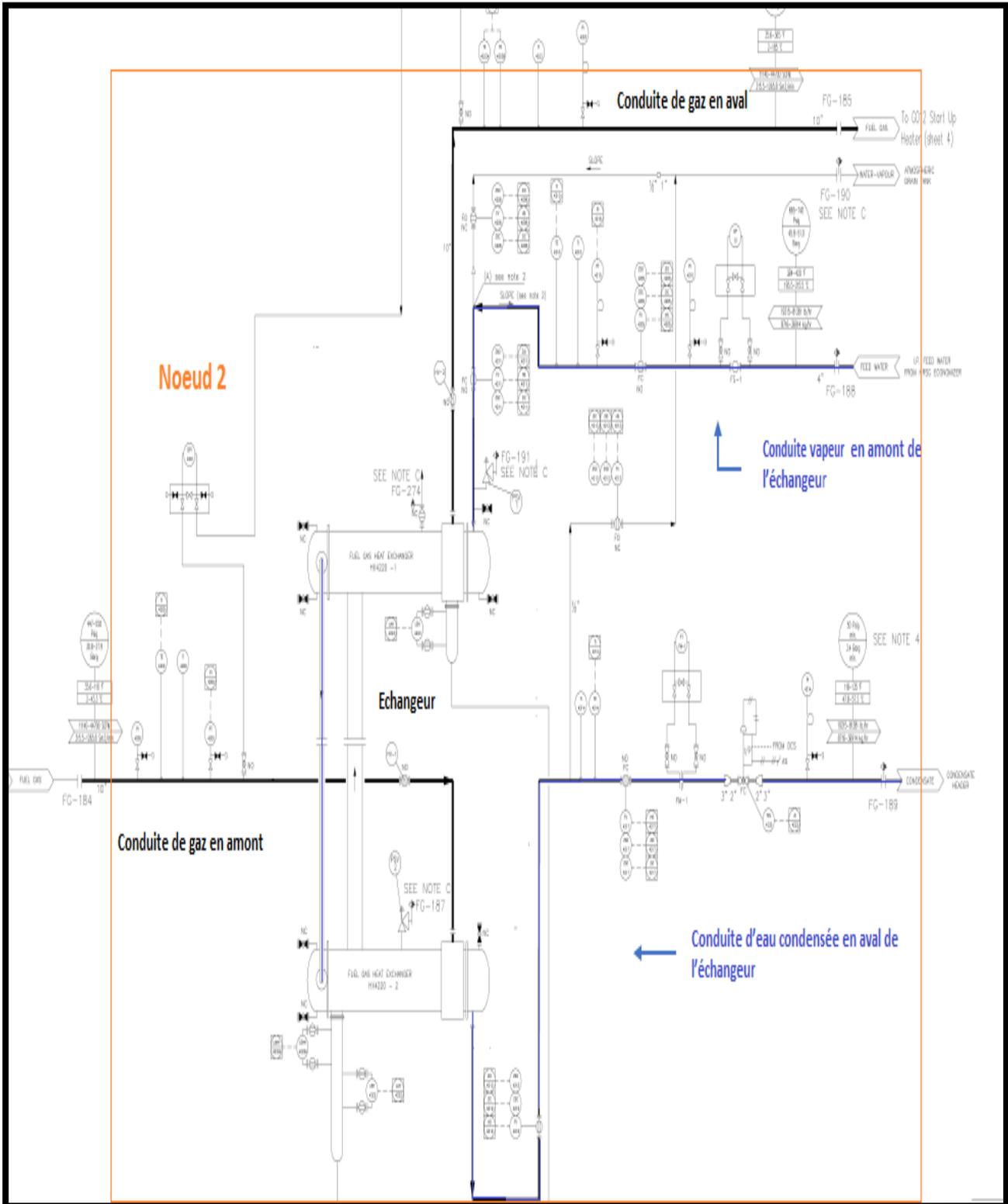
Classification des modes de défaillance selon la gravité		
Classement		Signification
1	Défaillance mineure	Défaillance qui nuit au bon fonctionnement du système en causant un dommage négligeable au système ou à son environnement sans présenter de risque pour l'homme
2	Défaillance significative	Défaillance qui nuit au bon fonctionnement sans causer de dommage notable ni présenter de risques importants pour l'homme
3	Défaillance critique	Défaillance entraîne la perte d'une fonction essentielle du système en ne présentant qu'un risque négligeable de mort ou de blessure
4	Défaillance catastrophique	Défaillance entraîne la perte d'une fonction essentielle du système en causant des dommages importants au système ou à son environnement et\ou entraîne la mort ou des dommages corporels

Classification des niveaux de détection	
Classement	Signification
1	Détection automatique
2	Détection manuelle
3	Détection visuelle
4	Sans détection

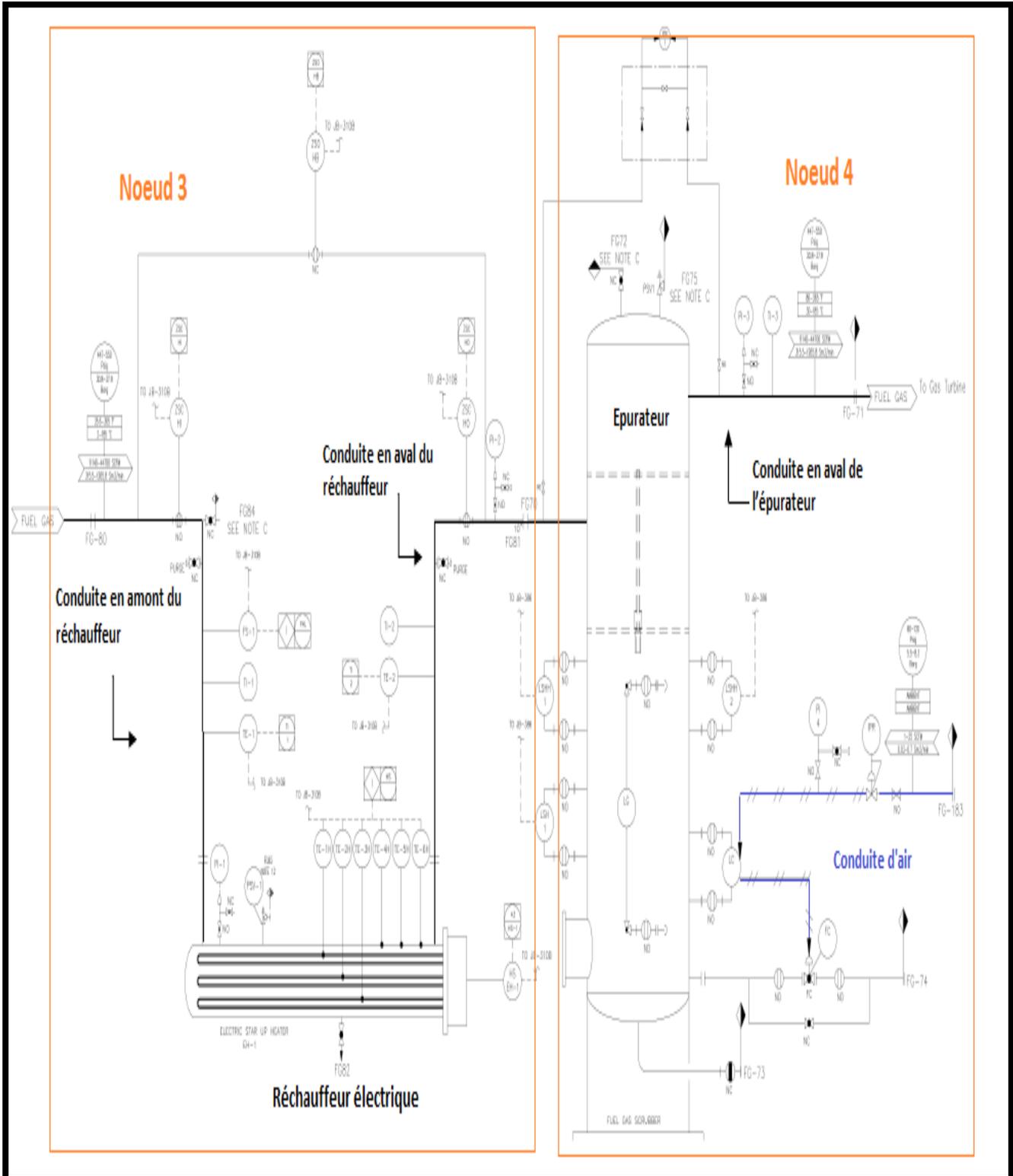
Nœud 1 ; sous-système de filtration à deux étages :



Nœud 2 ; sous-système de réchauffement à vapeur :



Nœuds 3 et 4 ; sous-système de réchauffement électrique et d'épuration du gaz :



Annexe 6 : Tableau HAZOP

HAZOP		Nœud : Sous-système de filtration à deux étages Unité : Station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible							
Composant	Matière	Mot-clé	Paramètre	Cause	Conséquence	Détection	Sécurité	Proposition d'amélioration	Observations
Conduite d'air	Air comprimé (8 bar)	Moins de	Pression	-Dépôts dans la conduite - Fuite dans la conduite -Colmatage du filtre placé dans la conduite	-Mauvais drainage et augmentation du niveau du liquide dans le filtre -Surpression (Augmentation de la pression dynamique du gaz)	Manomètre	-Soupape de sécurité	-Changement régulier du filtre de la conduite - Protection cathodique contre la corrosion de la conduite -Transmetteur de pression sur la conduite d'air comprimé	Dérive critique
		Pas de	Pression	-Rupture de la conduite -Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation -Défaillance du compresseur	Pas de drainage des condensats - Augmentation du niveau du liquide dans le filtre -Surpression (Augmentation de la pression dynamique du gaz)	Alarme niveau haut (LSH) Alarme niveau très haut (LSHH)	-Event manuel -Vanne de drainage manuelle	- Maintenance préventive et vérification périodique de l'état de la vanne d'alimentation -Mise en place d'une deuxième vanne (redondance)	Dérive critique
Conduite en amont	Gaz combustible	Plus de	Pression	Ouverture excessive \Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Fermeture intempestive de la vanne amont	-Fuite au niveau de la vanne amont du filtre -Fuite\Rupture de la bride de jonction (FG-212)	Manomètre Indicateur de position de vanne	-Réglage manuel de pression (Vanne manuelle amont) -Event manuel	-Substituer la vanne manuelle par une autre régulatrices de pression -Mise en place d'une soupape de sécurité	Dérive inacceptable

Annexe 6 : Tableau HAZOP

Conduite en amont	Gaz combustible		Pression			Manomètre	-	-Mise en place d'un un transmetteur de pression	
		Moins de		-Présence de particules solides à l'intérieur -Fuite dans la conduite -Fermeture partielle de la vanne amont	-Mauvaise alimentation de la turbine			-Installer des filtres au niveau des conduites de transport du gaz -Nettoyage périodique pour éliminer les dépôts	Dérive indésirable
Conduite en amont	Gaz combustible	Pas de	Pression	-Fermeture intempestive des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Arrêt d'approvisionnement	-Non alimentation de la turbine -Arrêt de production d'électricité	-	Combustible de secours (gasoil) en circulation permanente	-Mettre en place une sphère de stockage de gaz combustible	Dérive indésirable
Conduite en aval	Gaz combustible	Plus de	Pression	-Fermeture intempestive de la vanne aval -Augmentation du niveau du liquide dans le filtre -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale	-Fuite au niveau de la vanne aval du filtre -Fuite\Rupture de la bride de jonction	Manomètre Indicateur de position de vanne	-Réglage manuel de pression (Vanne manuelle amont) -Event manuel	-Mise en place d'une soupape de sécurité -Substituer la vanne manuelle par une autre régulatrices de pression -Mise en place d'un transmetteur de pression	Dérive inacceptable
		Moins de		-Colmatage du filtre -Présence de particules solides à l'intérieur -Fuite dans les conduites	Mauvaise alimentation de la turbine	-Indicateur de pression différentielle -Manomètre -Indicateurs de position de vannes	-Redondance (Filtre séparateur 2)	Maintenance préventive régulière du filtre -Transmetteur de pression	Dérive indésirable

Annexe 6 : Tableau HAZOP

Conduite en aval	Gaz combustible		Pression	-Fermeture partielle de la vanne amont et\ou aval.				-Détecteur de gaz en cas de fuite	
		Pas de		-Fermeture intempestive de la vanne amont -Fermeture intempestive des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Arrêt d'approvisionnement	-Non alimentation de la turbine -Arrêt de production d'électricité	-Manomètre -Indicateur de position de vanne	-Combustible de secours (gasoil) en circulation permanente	-Mettre en place une sphère de stockage -Mettre en place un bypass sur la vanne amont	Dérive indésirable

Annexe 6 : Tableau HAZOP

HAZOP			Nœud : Sous-système de Réchauffement à vapeur Unité : Station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible						
Composant	Matière	Mot-clé	Paramètre	Cause	Conséquence	Détection	Sécurité	Proposition d'amélioration	Observations
Conduite de gaz (Avant l'échangeur à chaleur)	Gaz combustible	Plus de	Pression	-Augmentation du niveau du liquide dans le filtre séparateur -Fermeture intempestive de la vanne avant échangeur (HV1) -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale	-Fuite au niveau de la vanne amont de l'échangeur (HV 1) Fuite\Rupture de la bride de jonction entre la conduite d'entrée et l'échangeur	Manomètres Transmetteurs de pression	Réglage manuel de pression (Vanne amont de l'échangeur HV1)	Mise en place d'une soupape de sécurité Mise en place d'une évent manuel	Dérive inacceptable
Conduite de gaz (Avant l'échangeur à chaleur)	Gaz combustible	Moins de	Pression	-Fuite dans les conduites -Colmatage du filtre séparateur -Présence de particules solides à l'intérieur -Fermeture partielle de la vanne avant échangeur (HV1) -Fermeture partielle de la vanne amont et\ou aval du filtre	Mauvaise alimentation de la turbine	-Manomètres Transmetteurs de pression -Indicateurs de positions de vannes	-	-Mise en place de détecteur de gaz en cas de fuite -Vérification périodique de l'évolution de la corrosion des pipes -Système d'arrosage	Dérive indésirable

Annexe 6 : Tableau HAZOP

<p align="center">Conduite de gaz (Avant l'échangeur à chaleur)</p>	<p align="center">Gaz combustible</p>	<p align="center">Pas de</p>	<p align="center">Pression</p>	<p>-Fermeture intempestive de la vanne amont et/ou aval du filtre -Fermeture intempestive des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Arrêt d'approvisionnement</p>	<p>-Non alimentation de la turbine -Arrêt de production d'électricité</p>	<p>-Manomètres Transmetteurs de pression -Indicateurs de positions de vannes</p>	<p align="center">Combustible de secours (gasoil) en circulation permanente</p>	<p>Mise en place d'un bypass au niveau des vannes manuelles</p>	<p align="center">Dérive indésirable</p>
<p align="center">Conduite de gaz (Après l'échangeur à chaleur)</p>	<p align="center">Gaz combustible</p>	<p align="center">Plus de</p>	<p align="center">Pression</p>	<p>-Augmentation du niveau du liquide dans le filtre séparateur -Fermeture intempestive de la vanne après échangeur (HV2) -Augmentation du débit de vapeur dans l'échangeur -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale</p>	<p>-Fuite au niveau de la vanne aval de l'échangeur(HV2) -Fuite\Rupture de la bride de jonction entre la conduite de sortie et l'échangeur</p>	<p>-Manomètre -Indicateurs de positions de vannes</p>	<p align="center">Réglage manuel de pression (Vanne aval de l'échangeur HV2)</p>	<p>-Mise en place d'une soupape de sécurité -Mise en place d'un événement -Mise en place d'un transmetteur de pression</p>	<p align="center">Dérive inacceptable</p>
<p align="center">Conduite de gaz (Après l'échangeur à chaleur)</p>	<p align="center">Gaz combustible</p>	<p align="center">Moins de</p>	<p align="center">Pression</p>	<p>-Présence d'obstacles et de particules solides dans l'enveloppe de l'échangeur</p>	<p>Mauvaise alimentation de la turbine</p>	<p>-Manomètre</p>	<p align="center">-</p>	<p>-Mise en place de détecteur de gaz en cas de fuite</p>	<p align="center">Dérive indésirable</p>

Annexe 6 : Tableau HAZOP

<p>Conduite de gaz (Après l'échangeur à chaleur)</p>	<p>Gaz combustible</p>	<p>Moins de</p>	<p>Pression</p>	<p>-Fuite au niveau de l'enveloppe de l'échangeur -Fuite au niveau des conduites -Fermeture partielle de la vanne avant et\ou après échangeur -Fermeture partielle de la vanne amont et\ou aval du filtre</p>				<p>-Vérification périodique de l'évolution de la corrosion des pipes -Inspection périodique des vannes</p>	
<p>Conduite de gaz (Après l'échangeur à chaleur)</p>	<p>Gaz combustible</p>	<p>Plus de</p>	<p>Température</p>	<p>Ouverture excessive de la vanne régulatrice de température dans la conduite vapeur</p>	<p>(Surpression) Augmentation de la pression de sortie dans la conduite aval de l'échangeur</p>	<p>-Indicateur de température -Manomètre -thermocouple</p>	<p>Réglage manuel de pression (Vanne aval de l'échangeur HV2)</p>	<p>-Mise en place d'une soupape de sécurité -Mise en place d'un évent -Mise en place d'une vanne régulatrice de température -Substituer la vanne manuelle par une autre régulatrice de pression</p>	<p>Dérive critique</p>
<p>Conduite de gaz (Après l'échangeur à chaleur)</p>	<p>Gaz combustible</p>	<p>Moins de</p>	<p>Température</p>	<p>-Fuite au niveau des tubes interne acheminant la vapeur -Présence d'obstacles dans les tubes internes -Fermeture intempestive\partielle de la vanne régulatrice de température dans la conduite vapeur</p>	<p>-Combustion non optimale</p>	<p>-thermocouple -Indicateur de température</p>	<p>Réchauffeur électrique</p>	<p>-Inspection périodique des tubes interne de l'échangeur -Mise en place d'une deuxième vanne régulatrice de la température dans la conduite</p>	<p>Dérive indésirable</p>

Annexe 6 : Tableau HAZOP

				-Fuite dans la conduite de vapeur				vapeur (redondance)	
Conduite d'alimentation en vapeur (Avant l'échangeur à chaleur)	Vapeur	Moins de	Débit	-Fuite dans la conduite -Ouverture intempestive de la soupape de sécurité -Ouverture intempestive de l'électrovanne de l'évent -Colmatage du filtre placé sur la conduite -Présence de dépôts à l'intérieur de la conduite	-Mauvais réchauffement du gaz combustible -Mauvaise combustion	-Manomètres Transmetteurs de pression -Indicateur de position de vanne	-	-Surveillance de l'état des électrovannes -Inspection périodique de la conduite -surveillance de l'évolution de la corrosion -Protection cathodique -changer régulièrement le filtre	Dérive indésirable
		Plus de		Ouverture excessive de la vanne régulatrice de température	-Augmentation de la température du gaz -Surpression dans les conduites de gaz	-Manomètres Transmetteurs de pression -Débitmètre	Soupape de sécurité Event automatique Event manuel	-Mettre en place un système d'alarme en cas de surpression - Maintenance préventive de la vanne régulatrice	Dérive critique
Conduite d'eau condensée (Après l'échangeur à chaleur)	Eau	Plus de	Pression	Fermeture intempestive d'une ou des deux électrovannes sur la conduite -Fermeture intempestive de la vanne régulatrice de température	-Fuite au niveau des électrovannes -Fuite\Rupture des brides de jonction	Manomètre Indicateur de position de vanne	Event manuel	Mise en place d'une soupape de sécurité -Système d'alarme en cas de surpression	Dérive indésirable

HAZOP		Nœud : Sous-système de Réchauffement Electrique Unité : Station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible							
Composant	Matière	Mot-clé	Paramètre	Cause	Conséquence	Détection	Sécurité	Proposition d'amélioration	Observations
Conduite de gaz avant le réchauffeur électrique	Gaz combustible	Plus de	Pression	<ul style="list-style-type: none"> -Fermeture intempestive de la vanne amont du réchauffeur -Augmentation du niveau du liquide dans le filtre séparateur -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale 	<ul style="list-style-type: none"> -Fuite au niveau de la vanne amont du réchauffeur -Fuite\Rupture de la bride de jonction entre la conduite d'entrée et le réchauffeur électrique 	Indicateur de position de vanne	<ul style="list-style-type: none"> -Event manuel -Réglage manuel de pression (Vanne amont du réchauffeur) 	<ul style="list-style-type: none"> -Mettre en place une soupape de sécurité -Substituer les vannes manuelles par une autre régulatrice de pression -Système d'alarme -Système d'arrosage 	Dérive inacceptable

Annexe 6 : Tableau HAZOP

<p>Conduite de gaz après le réchauffeur électrique</p>	<p>Gaz combustible</p>	<p>Plus de</p>	<p>Pression</p>	<p>-Fermeture intempestive de la vanne aval du réchauffeur -Augmentation du niveau du liquide dans le filtre séparateur -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Surintensité électrique dans le réchauffeur</p>	<p>-Fuite au niveau de la vanne en aval -Fuite\Rupture de la bride de jonction entre la conduite de sortie et le réchauffeur électrique</p>	<p>Indicateur de position de vanne Manomètre</p>	<p>Event manuel Réglage manuel de pression (Vanne aval du réchauffeur)</p>		<p>Dérive inacceptable</p>
---	------------------------	----------------	-----------------	---	--	---	---	--	----------------------------

Annexe 6 : Tableau HAZOP

HAZOP		Nœud : Sous-système d'épuration du gaz combustible Unité : Station de réchauffement et d'épuration du gaz combustible							
Composant	Matière	Mot-clé	Paramètre	Cause	Conséquence	Détection	Sécurité	Proposition d'amélioration	Observations
Conduite d'air	Air comprimé (8 bar)	Moins de	Pression	-Dépôts dans la conduite - Fuite dans la conduite	-Mauvais drainage et augmentation du niveau du liquide dans l'épurateur -Surpression (Augmentation de la pression dynamique du gaz)	Manomètre Alarme niveau haut (LSH) Alarme niveau très haut (LSHH)	-Soupape de sécurité -Event manuel -Vanne de drainage manuelle	- Protection cathodique contre la corrosion de la conduite -Transmetteur de pression sur la conduite d'air comprimé - Maintenance préventive et vérification périodique de l'état de la vanne d'alimentation -Mise en place d'une deuxième vanne (redondance)	Dérive critique
		Pas de	Pression	-Rupture de la conduite -Fermeture intempestive de la vanne d'alimentation -Défaillance du compresseur	-Pas de drainage des condensats -Augmentation du niveau du liquide dans l'épurateur -Surpression (Augmentation de la pression dynamique du gaz)				

Annexe 6 : Tableau HAZOP

<p>Conduite de gaz en aval de l'épurateur</p>	<p>Gaz combustible</p>	<p>Plus de</p>	<p>Pression</p>	<p>-Augmentation du niveau du liquide dans l'épurateur -Augmentation du niveau du liquide dans le filtre séparateur -Augmentation de la température du gaz dans l'échangeur -Ouverture excessive \ Blocage en position ouvert des vannes régulatrices de pression de la station gaz principale -Augmentation de la pression dans le réchauffeur électrique</p>	<p>-Fuite au niveau de la bride de jonction (FG-71) -Fuite\Rupture des brides de jonction entre la conduite et l'épurateur</p>	<p>Manomètre Indicateur de température</p>	<p>-</p>	<p>-Mise en place d'un transmetteur de pression -Système d'alarme en cas de surpression - système d'arrosage -soupape de sécurité -Event manuel</p>	<p>Dérive inacceptable</p>
--	------------------------	----------------	-----------------	--	---	---	----------	---	-----------------------------------

Exigence	Conforme	Non-Conforme	Partiellement Conforme	Commentaire
Des soupapes de sécurité doivent être mis en place			X	Absence de soupapes de sécurité dans le circuit gaz (système de réchauffement à vapeur)
Équipement approprié pour la protection contre la surchauffe			X	Absence de vanne régulatrice de température dans le circuit gaz
Isolation thermique pour surfaces chaudes	X			Les conduites sont couvertes par des calorifuges
Un système d'alarme et d'extinction d'incendie			X	Pas de système d'alarme. Pas de système d'extinction automatique. Présence d'un seul extincteur manuel à CO ₂

Exigence	Conforme	Non-Conforme	Partiellement Conforme	Commentaire
Mise en place des détecteurs de flamme		X		
Mis en place d'un système de protection contre la foudre	X			
Mise en place d'un mur anti-souffle			X	Absence de mur anti-souffle en face la voie de circulation
Mise en place des vannes régulatrice de pression		X		Le réglage des pressions se fait manuellement avec des vannes manuelles
Utiliser seulement les équipements anti déflagrants	X			
Système de mise à la terre		X		
Mise en place des détecteurs de fuite		X		

Exigence	Conforme	Non-Conforme	Partiellement Conforme	Commentaire
Des soupapes de sécurité doivent être mis en place			X	Absence de soupapes de sécurité dans le circuit gaz (système de réchauffement à vapeur)
Équipement approprié pour la protection contre la surchauffe			X	Absence de vanne régulatrice de température dans le circuit gaz
Isolation thermique pour surfaces chaudes	X			Les conduites sont couvertes par des calorifuges
Un système d'alarme et d'extinction d'incendie			X	Pas de système d'alarme. Pas de système d'extinction automatique. Présence d'un seul extincteur manuel à CO ₂

Exigence	Conforme	Non-Conforme	Partiellement Conforme	Commentaire
Mise en place des détecteurs de flamme		X		
Mis en place d'un système de protection contre la foudre	X			
Mise en place d'un mur anti-souffle			X	Absence de mur anti-souffle en face la voie de circulation
Mise en place des vannes régulatrice de pression		X		Le réglage des pressions se fait manuellement avec des vannes manuelles
Utiliser seulement les équipements anti déflagrants	X			
Système de mise à la terre		X		
Mise en place des détecteurs de fuite		X		