

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

Filière QHSE-GRI

**Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du
diplôme d'Ingénieur d'État en QHSE-GRI**

Thème

Maîtrise des risques majeurs au niveau du four sous-vide

Cas : Centre de maintenance de la turbo machinerie GE

M^{lle}. BELKEBIR Imene Tassadit

Présentée et soutenue publiquement le (12/06/2016)

Composition du jury:

Président	M ^f . OUDJAOUT MOHAMED	Maître assistant ENP
Rapporteur 1	M ^{me} . Ouzna HAOUCHINE	Maître de conférences ENP
Rapporteur 2	M ^f . Amin BENMOKHTAR	Maître assistant ENP
Rapporteur 3	M ^f . Baddredine BOUSBAI	Manager EHS GE
Examineur 1	M ^f . TOUAHAR BACHIR	Maître assistant ENP
Examineur 2	M ^f . ATTOUCHI Tarek	Maître assistant ENP

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique



École Nationale Polytechnique

Filière QHSE-GRI

**Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention du
diplôme d'Ingénieur d'État en QHSE-GRI**

Thème

Maîtrise des risques majeurs au niveau du four sous-vide

Cas : Centre de maintenance de la turbo machinerie GE

M^{lle}. BELKEBIR Imene Tassadit

Présentée et soutenue publiquement le (12/06/2016)

Composition du jury:

Président	M ^f . OUDJAOUT MOHAMED	Maître assistant ENP
Rapporteur 1	M ^{me} . Ouzna HAOUCHINE	Maître de conférences ENP
Rapporteur 2	M ^f . Amin BENMOKHTAR	Maître assistant ENP
Rapporteur 3	M ^f . Baddredine BOUSBAI	Manager EHS GE
Examineur 1	M ^f . TOUAHAR BACHIR	Maître assistant ENP
Examineur 2	M ^f . ATTOUCHI Tarek	Maître assistant ENP

Dédicaces

Je profite de cette occasion pour dédier ce modeste travail :

À la mémoire de ma grand-mère « Jida » ;

À mon père et ma mère ;

À ma sœur Lamia ;

À ma copine Rania que j'aime beaucoup ;

À ma grand-mère « Nana » ;

À mes tantes et mes oncles ;

À mes cousines « Sonia et Samia » ;

À tous ceux et celles qui me sont chères « Rachia et Amira ».

Imène

Remerciements

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH Le Tout Puissant pour la force qu'il m'a donnée pour atteindre mon objectif et arriver où j'en suis à présent.

Le présent rapport n'aurait pas pu voir le jour sans la contribution de nombreuses personnes à qui j'aimerais adresser mes vifs remerciements :

À Monsieur Bousbai, B. Leader EHS à Algesco GE pour m'avoir donnée la chance d'effectuer le stage au sein de Algesco GE et m'avoir aidée toute au long de son déroulement.

À Monsieur Benmokhtar, A. Maître assistant à l'ENP pour sa disponibilité, sa présence et ses conseils qui ont contribué à l'exceptionnel encadrement dont j'ai eu l'occasion de bénéficier.

À Madame Haouchine, O. Maître de conférences à l'ENP pour sa patience et son aide dans la réalisation de ce rapport.

À Monsieur Ouadjaout, M. Enseignant-chercheur en mathématiques pour avoir partagé son temps et son savoir pour m'aider à conduire au mieux mon projet et aussi d'avoir accepté de présider le jury.

À Monsieur Touahar, B. Maitre-assistant à l'ENP et Monsieur Attouchi, M. Maitre-Assistant à l'ENP en tant qu'examineurs pour l'effort prodigué afin de corriger et d'apporter la touche finale au projet.

À Monsieur Touileb, M. Technicien et à Mr Hocini, T. Superviseur maintenance à Algesco GE pour m'avoir accordée toute leur attention et m'avoir orientée dans mon travail.

Je remercie également les employés d'Algesco GE qui ont contribué de près ou de loin à mon intégration au niveau du centre de maintenance et à la réalisation de ce projet.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe pédagogique qui nous a accompagnés tout au long de notre formation à l'École Nationale Polytechnique pour la qualité de l'enseignement prodigué et l'engagement dont ils ont fait preuve.

Un remerciement particulier à madame Berkache, S. Ingénieur QHSE-GRI et Monsieur Chaïb, M. Ingénieur Génie Civil pour leurs aides, leurs patiences et aussi leurs conseils dans la réalisation de ce travail.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

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

ملخص

هدف هذا العمل التحكم على المخاطر الرئيسية في الفرن، وللقيام بذلك تم تقسيم العمل الى ثلاثة أجزاء: الجزء الأول يتعلق بسياق المشروع من خلال لمحة عامة عن طرق صيانة توربينات الغاز ووصف عام لخطوات التحكم في المخاطر المتبعة في منهجية العمل وأخيرا مراجعة أدوات تحليل المخاطر المستعملة في إطار هذا المشروع. يتناول الجزء الثاني التحليل النقدي لدراسة الخطر التابعة للمؤسسة وبناءا على النتائج المتحصل عليها تم تطبيق طرق التحليل النوعية لتحديد المخاطر والكمية لتقدير وتيرة هذه الاخيرة، وبالإضافة الى ذلك فقد وجد انه من الضروري استعمال كل من البرامج فاست ومطالاب لتقدير شدة الآثار وعلى نفس المجال نم تقييم المخاطر بتطبيق طريقة مستعملة من طرف المؤسسة. ويحدد الجزء الأخير الخطوة الأكثر أهمية في طرق التحكم في الخطر الا وهي التدابير المقترحة ذات أصل تقني، هندسي وتنظيمي التي تم اقتراحها من اجل الحد من وتيرة وشدة الخطر الرئيسي في الفرن.

الكلمات المفتاحية: التحكم، المخاطر الرئيسية، تحليل المخاطر، تحديد المخاطر، تقدير، التدابير أمنية

ABSTRACT

This work is about the control of the major risks at the level of (vacuum oven). It is divided on three parts. The first part is about the characterization of the project through an overview of the Maintenance Process of the gas turbines, a description of the main process followed in the methodology of work and finally a theoretical review of the tools used in the risk analysis. The second part deals with the study of danger assessment as well as the application of qualitative analysis methods for risk identification and quantitative methods to estimate the frequency of the risk. In addition, it was found necessary to use PHAST and MATLAB software to estimate the severity of the effects. To assess the acceptability of the risks the Heat Map method used by the business was applied. The final section outlines the most essential step in the risk control process, it is based on the security technical measures, as well as engineering and organizational that were proposed in order to reduce the probability and the severity of the major risks in the vacuum oven.

Keywords: Bachelor Major Hazards, Risk Analysis, Risk Identification, Appraisals, security measures.

RESUME

Le présent travail a pour objectif la maîtrise des risques majeurs au niveau du four sous-vide. Il a été divisé en trois parties. La première partie porte sur la mise en contexte du projet à travers un aperçu sur les procédés de maintenance des turbines à gaz, une description du processus de maîtrise suivi dans la méthodologie du travail et enfin une revue théorique sur les outils d'analyse des risques utilisés. La seconde partie, traite l'analyse de l'étude de danger ainsi que l'application des méthodes d'analyse qualitative pour l'identification des risques et quantitative pour l'estimation de la fréquence des risques. En plus, Il a été jugé nécessaire d'utiliser les logiciels PHAST et MATLAB pour l'estimation de la gravité des effets. Et pour évaluer l'acceptabilité des risques une méthode *Heat Map* de l'entreprise a été appliquée. La dernière partie, expose l'étape la plus essentielle du processus de maîtrise des risques. Elle se base sur les mesures de sécurité techniques, ingénieries et organisationnelles proposées dans le but de réduire la probabilité et la gravité du risque majeur au sein du four sous-vide.

Mots clés : Maîtrise, Risques majeurs, Analyse des risques, Identification des risques, Estimations, Mesures sécuritaires.

Table des matières

Liste de figures	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des abréviations	X
Introduction	11
Chapitre 1 : contexte général, problématique et méthodologie.....	12
1.1. Présentation de General Electric (GE)	12
1.2. Description des procédés de maintenance des turbines à gaz	15
1.3. Problématique et objectifs.....	20
1.4. Méthodologie	21
Chapitre 2 : maîtrise des risques et leurs outils.....	23
2.1. Définition du risque majeur industriel	23
2.2. Maîtrise des risques	24
2.3. Démarche de maîtrise des risques	24
2.4. Outils d'analyse des risques	27
2.4.1. Méthodes qualitatives.....	27
2.4.2. Méthodes quantitatives	32
Chapitre 3: application des méthodes d'analyse des risques.....	37
3.1. Analyse et critique de l'étude de danger (EDD)	37
3.2. Identification du système critique	44
3.2.1 Décomposition fonctionnelle des différents systèmes.....	44
3.2.2 Analyse préliminaire des risques (APR).....	44
3.3. Définition du système critique : Four sous-vide	47
3.4. Identification et estimation des facteurs de risque	50
3.4.1 Analyse des modes de défaillance leurs effets et leurs criticités (AMDEC)	50
3.4.2 Arbre de défaillance (AdD).....	51
3.4.3 Arbre d'évènement (AdE).....	61
3.4.4 Définition des scénarios plausible au niveau du four sous-vide : Nœud papillon	63
Chapitre 4 : modélisation des effets et évaluation des risques	68
4.1 Sélection du phénomène dangereux : Explosion.....	68
4.1.1 Régimes d'explosion.....	69
4.2 Modélisation des effets d'explosion.....	70
4.2.1 Description du Model TNT.....	70

4.2.2	Application sur le logiciel PHAST	71
4.3	Modélisation mathématique	75
4.4	Évaluation des risques : Méthode Heat Map.....	78
Chapitre 5 : réduction du risque		82
5.1	Mesure technique de prévention : Système instrumenté de sécurité SIS	82
5.1.1	Calcul d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité du SIL : graphe de risque	82
5.1.2	Proposition d'un système instrumenté de sécurité (SIS)	86
5.1.3	Calcul du niveau d'intégrité de sécurité du SIS proposée avec le logiciel GRIF	88
5.1.4	Estimation des coûts du SIS.....	91
5.2	Mesure de protection : Mur anti déflagration.....	91
5.2.1	Méthode de calcul de la résistance des structures aux explosions	91
5.2.2	Dimensionnement du mur	93
5.2.3	Estimation des coûts	96
5.3	Mesure d'origine organisationnelle : Modification du plan de maintenance.....	99
Conclusion.....		100
Références bibliographiques		102
Annexes.....		104
Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle		105
Annexe 2 : APR Four sous vide		110
Annexe 3 : APR Machine Coating		117
Annexe 4 : APR Silos de stockage des gaz/liquide.....		121
Annexe 5 : APR Système décapage chimique		123
Annexe 6 : APR Silos de produits chimiques		125
Annexe 7 : APR Sablage		127
Annexe 8 : Échelle de cotation APR		129
Annexe 9 : Grilles de criticités APR		130
Annexe 10 : AMDEC four sous-vide		132
Annexe 11 : Échelle de cotation AMDEC		134
Annexe 12 : Échelle de cotation <i>Heat Map</i>		136
Annexe 13 : Plan de maintenance préventive Algesco		137

Liste de figures

Figure 1-1: Activités de GE.	12
Figure 1-2 : Entreprise Algesco GE Oil & Gas.	13
Figure 1-3: Plan du centre de maintenance de turbo machineries Algesco GE Oil & Gas... 14	14
Figure 1-4: Valeurs de General Electric.	14
Figure 1-5 : Four sous-vide.....	15
Figure 1-6 : Zone de stockage des liquides/Gaz.....	17
Figure 1-7: Processus méthodologique de l'étude.	22
Figure 2-1: Processus de la maîtrise des risques [3].....	24
Figure 2-2 : Types de méthode d'analyse des risques.....	27
Figure 2-3 : Méthode du nœud papillon GE.....	35
Figure 3-1 : Démarche d'analyse critique des EDD.....	39
Figure 3-2: Identification et décomposition de l'écart résultat des EDD.....	40
Figure 3-3: Répartition des procédés par rapport aux risques critiques.....	46
Figure 3-4 : Tableau de commande des composantes du four sous-vide.	47
Figure 3-5: Système de refroidissement du four sous-vide.....	49
Figure 3-6: Résultat de l'AMDEC.	51
Figure 3-7 : Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Surpression ».	54
Figure 3-8: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Mélange O ₂ + H ₂ ».	55
Figure 3-9: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Surchauffe ».	56
Figure 3-10: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Fuite de l'huile de silicone ».	57
Figure 3-11: AdE du mélange O ₂ + H ₂	61
Figure 3-12: AdE de la surpression.	62
Figure 3-13: AdE de surchauffe.....	62
Figure 3-14: Nœud papillon pour l'évènement mélange O ₂ + H ₂	63
Figure 3-15: Nœud papillon pour l'évènement de surpression.....	64
Figure 3-16 : Nœud papillon pour l'évènement de surchauffe.....	64
Figure 3-17 : Nœud papillon pour l'évènement de mélange de O ₂ +H ₂	65
Figure 3-18 : Nœud papillon pour l'évènement de surpression.....	66
Figure 3-19 : Nœud papillon pour l'évènement de surchauffe.....	66
Figure 4-1 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion de gaz.	68
Figure 4-2 : Mécanisme de l'explosion.	69
Figure 4-3: Courbe de variation de la surpression en fonction de la distance donnée par PHAST.....	72
Figure 4-4 : Propagation du nuage radial et vertical selon PHAST.....	73
Figure 4-5 : Effets de surpression dans la zone (l'explosion du four sous-vide).....	73
Figure 4-6: Courbe de nuage de points donnée par le logiciel MATLAB.....	76
Figure 4-7 : Courbe du modèle mathématique donnée par le logiciel MATLAB.....	76
Figure 4-8 : Rôle des mesures de défense.....	79

Figure 4-9: Grille des risques Heat Map.....	81
Figure 5-1 : Schéma général du graphe de risque.....	84
Figure 5-2 : Résultat de l'application la méthode graphe de risque.....	85
Figure 5-3 : Composants d'un SIS.....	86
Figure 5-4 : Schéma du SIS proposé.....	87
Figure 5-5 : Architecture du SIS proposé.	88
Figure 5-6 : Cercle de pourcentage pour la contribution de chaque partie.....	89
Figure 5-7: Rapport donné par le logiciel GRIF après calcul du SIL.....	90
Figure 5-8 : Courbe des PFDavg maximum.	90
Figure 5-9 : Représentation du comportement d'un système physique par un modèle masse-ressort.	92
Figure 5-10 : Facteur d'amplification dynamique.	93
Figure 5-11 : Dimension du Mur anti déflagration avec le logiciel Solid Works.	97
Figure 5-12 : Emplacement du mur par rapport aux bureaux des ingénieurs.	98

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Activités du centre de maintenance.	13
Tableau 2-1: Déploiement de l'APR	29
Tableau 2-2: Déploiement de l'AMDEC	31
Tableau 2-3: Définitions de la terminologie du nœud papillon.	36
Tableau 3-1: Identification des insuffisances de l'EDD d'Algesco GE Oil & Gas.	41
Tableau 3-2: Classement des insuffisances sous forme d'écart	42
Tableau 3-3 : Répartition des niveaux de risque	45
Tableau 3-4: Niveau du risque par rapport au système	46
Tableau 3-5: Pourcentage de chaque niveau de risque	50
Tableau 3-6: Probabilités de défaillance des équipements	52
Tableau 3-7: Probabilités de défaillance d'autres causes.	53
Tableau 3-8: Données de l'AdD du mélange O₂+H₂	58
Tableau 3-9: Données de l'AdD de la surchauffe	59
Tableau 3-10 : Données de l'AdD de la fuite de l'huile de silicone	60
Tableau 3-11: Probabilités de défaillance des équipements de sécurité	61
Tableau 4-1: Paramètres d'entrés pour le logiciel PHAST.	71
Tableau 4-2: Suppressions en fonction des distances	72
Tableau 4-3: Seuil de suppression donnée le logiciel PHAST.	72
Tableau 4-4: Installation, bureaux et personnes recensés dans le périmètre du premier cercle.	74
Tableau 4-5: Erreurs des deux modèles mathématiques	77
Tableau 4-6 : Matrice de défense/l'évènement suppression	79
Tableau 4-7: Matrice de défense / l'évènement mélange O₂+H₂	80
Tableau 4-8 : Matrice de défense / l'évènement surchauffe	80
Tableau 5-1: Description qualitative et quantitative des paramètres	83
Tableau 5-2: Paramètres choisis pour la méthode graphe de risque étalonnée	85
Tableau 5-3: Les différents niveaux SIL définis par la norme CEI 61508	86
Tableau 5-4: Résultat donnée par le logiciel GRIF	89

Liste des abréviations

- AdD Arbre de défaillance
- AdE Arbre d'évènement
- Algesco Algerian service company
- AMDEC Analyse des modes de défaillances leurs effets et leurs criticité
- APR Analyse Préliminaire des risques
- CEI Commission électrotechnique international
- ED Élément dangereux
- EDD Étude De Danger
- EHS Environmental Health and Safety
- ENS Evenement Non Souhaité
- GE General Electric
- HVOF Hight Vilosité Oxygène Fioul
- ICPE Installation Classé pour la protection de l'environnement
- INRS Institut national de recherche et de sécurité
- ISO International Organization for standardization
- LOPA Layer of Protection Analysis
- NDT Nondestructive testing
- PFDavg Probability of Failure on Demand average
- SD Situation Dangereuse
- SIF Safety Instrumented Function
- SIL Safety Integrity Level (niveau d'intégrité du système)
- SOD Strength Of Defense
- SIS Système Instrumenté de Sécurité
- TNT Tri Nitro Toluène
- VCE Vapor Cloud Explosion

Introduction

La sécurité énergétique est devenue une préoccupation mondiale, dans un monde de plus en plus dépendant de l'énergie et qui tend vers un avenir dans le tout électrique. L'Algérie ne fait pas exception à la règle et c'est dans cette optique que des partenariats sont mis en place avec de grands groupes internationaux tel que General Electric afin d'être à l'avant-garde des challenges qui attendent les générations futures et d'assurer la pérennité des citoyens. La sécurité énergétique ne peut être assurée sans passer par la sécurité des installations qui est devenue un enjeu majeur ces dernières années vue les catastrophes et les pertes engendrées par les accidents industriels enregistrés durant ce siècle.

Pour l'industrie contemporaine, la maîtrise des risques devient un volet incontournable.

Cela découle de la prise de conscience des dommages causés par les catastrophes dont on en parle jusqu'à présent et qui ont marqués l'histoire de l'industrie pétrochimique comme Seveso, Piper Alpha, AZF Toulouse, etc. Au sujet de ces grandes catastrophes, les avis sont partagés : certains disent qu'elles sont d'origine organisationnelle, d'autres disent qu'elles sont d'origine technique. Cependant, les rapports d'enquêtes relèvent que la combinaison de ces deux raisons a fait perdre des millions de dollars à des firmes de renommées tel que Total, British Petroleum, etc.

De nos jours, de nombreuses méthodes techniques et conventionnelles permettent de recenser les différents risques présents au préalable dans l'industrie en question. Ces dernières représentent, pour la gestion du risque, un outil de prise de décision qui fait ressortir les événements redoutés les plus appropriés afin de s'en prévenir et de mettre des lignes de défense adéquates aux capacités des ressources de l'entreprise.

Aussi, dans le but d'éviter tous dommages sur l'homme, les installations et l'environnement que peut générer un matériel dangereux dans un terrain d'exploitation, la compagnie General Electric se porte garant d'appliquer toutes solutions proposées dans ce projet et qui pèsent lourd en matière de sécurité en inscrivant le travail fait comme valeur ajoutée dans la partie analyse des risques de l'étude de danger.

Le présent travail comporte cinq chapitres dans lesquels nous allons détailler le travail effectué pour maîtriser les risques majeurs au niveau du centre de maintenance.

Le premier chapitre est essentiel pour le cadrage du projet. Il comportera la problématique posée ainsi que les objectifs tracés pour résoudre cette problématique et la méthodologie suivie pour atteindre les objectifs. Le second chapitre traite la démarche conduite pour la maîtrise des risques majeurs et des outils adéquats pour son application (APR, AMDEC, ADD, ADE, etc.). À cet effet, différentes bases de données ont été explorées telles que Les Techniques de l'ingénieur, INRS et Science direct.

Le troisième chapitre est consacré à l'application des méthodes d'analyse et aux résultats relevés de celle-ci. Tandis que le quatrième et cinquième chapitre sont consacrés à la modélisation des effets et aux solutions adaptées pour la maîtrise des risques.

Chapitre 1 : contexte général, problématique et méthodologie

Les industriels manifestent un grand intérêt dans la sécurisation de leurs installations industrielles et ce, dans le but d'éviter tous dommages sur l'homme, les installations et l'environnement que peut générer un matériel dangereux dans un terrain d'exploitation.

General Electric qui s'inscrit dans cette politique est le siège de notre travail. Aussi, ce chapitre traitera dans un premier temps de la présentation de cette entreprise. Il décrira les procédés de maintenance des turbines à gaz ainsi que les installations qui entrent dans cette dernière. Dans un deuxième temps, ce chapitre abordera la problématique posée par l'entreprise ainsi que la démarche suivie pour atteindre les objectifs fixés pour cette étude.

1.1. Présentation de General Electric (GE)

GE, est un groupe diversifié dans la technologie, les médias et les services financiers qui s'attachent à résoudre des grands problèmes mondiaux avec les produits et services allant des moteurs d'avion à la production d'énergie, du traitement de l'eau à l'imagerie médicale, du financement des entreprises et des consommateurs aux contenus médias et aux produits industriels. GE opère dans plus de 150 pays et emploie plus de 300 000 personnes dans le monde. Il est constitué de plusieurs branches d'activités, chacune comprenant un certain nombre d'unités organisées pour optimiser la croissance du groupe. Ces activités irriguent l'économie mondiale et améliorent la vie des personnes.

General Electric intervient dans plusieurs activités dans le monde, et celle présentée en Algérie sont données sur la figure 1-1 :

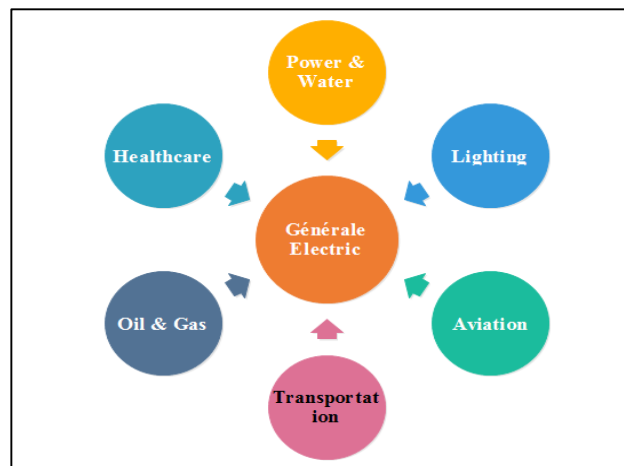


Figure 1-1: Activités de GE.

Algerian service company filiale du groupe américain GE Oil & Gas représente le plus grand centre de service de turbo machineries GE au monde. Cette usine est dotée d'une technologie récente de revêtement, d'un système de réparation innovant et des dernières technologies d'usinage.

Ce centre d'excellence offre des services de maintenance des turbines à gaz, compresseurs, pompes, vérification des pipelines pour les clients Algérien (Sonatrach, Sonalgaz). Ce grand pôle industriel (figure1-2) situé au sud de la région de Boufarik (30km de la capitale) représente un investissement de 36 millions de dollars. L'un des objectifs du projet est de soutenir la croissance des industries pétrolière, gazière et électrique en Algérie, tout en faisant la promotion de l'innovation technologique.



Figure 1-2 : Entreprise Algesco GE Oil & Gas.

Algesco GE Oil & Gas dispose d'un grand *Shop* dont lequel se trouve toutes les dernières installations européennes pour le traitement métallurgique des pièces (ailettes, liner, rotor).

Le *Shop* se répartit en quatre grands hangars parallèles séparé par de grands couloirs. Les activités de chaque hangar sont données dans le tableau 1-1 :

Tableau 1-1 : Activités du centre de maintenance.

Hangar 1	Hangar 2	Hangar 3	Hangar 4
✓ Traitement thermique	✓ Rotorique	✓ Statorique	✓ Réception des
✓ Revêtement thermique	✓ Équilibréuse		pièces de
✓ Sablage	✓ Tourneur		rechange
✓ NDT (CND)			✓ Magasin
✓ Décapage chimique			✓ Entrepôt des
✓ Ateliers du soudage			pièces
✓ Atelier du meulage			

Le schéma du centre de maintenance est donné dans la figure 1-3 :

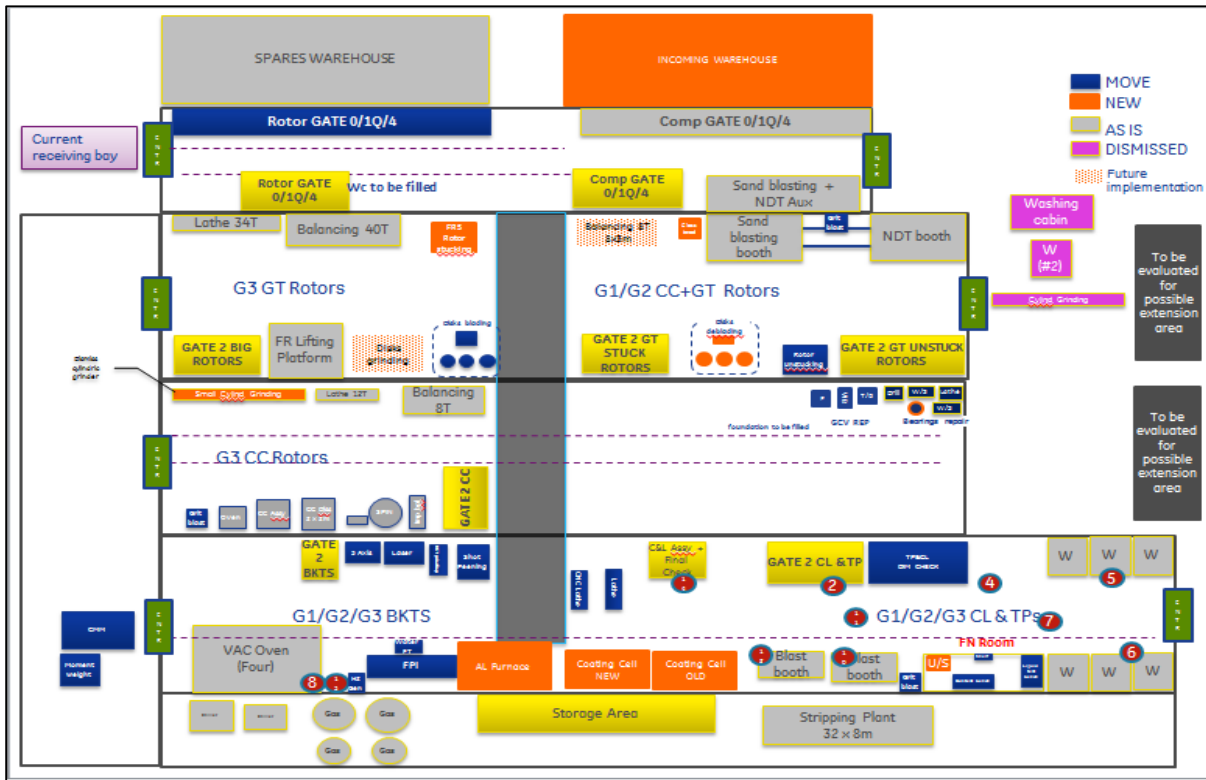


Figure 1-3: Plan du centre de maintenance de turbo machineries Algesco GE Oil & Gas.

En plus des moyens techniques et logistiques que détient GE ALGESCO. Cette compagnie repose sur des valeurs rigides sur lesquels est bâtie la politique GE.

Les valeurs GE sont une priorité à respecter et à appliquer pour être conforme au standard du groupe. Ces valeurs sont données sur la figure 1-4 :

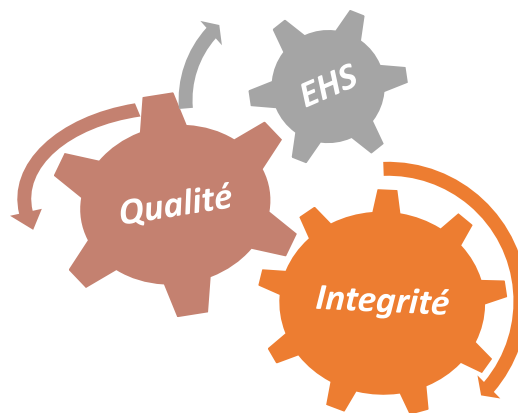


Figure 1-4: Valeurs de General Electric.

1.2. Description des procédés de maintenance des turbines à gaz

Les composantes de cette dernière passent par plusieurs procédés de traitement durant le processus de maintenance. Et cela dans le but d'augmenter la durée de vie de la pièce et de perfectionner le rendement de la turbine à gaz.

Le traitement des pièces ne suit pas un ordre bien précis. C'est pour cela, que dans un premier temps toute pièce (ailettes, aubes, liners...) doit passer par une inspection (contrôle géométrique et dimensionnelle, un contrôle non destructif) afin de déterminer le type de traitement recommandé tout en suivant des procédures de qualité et des instructions de réparation bien déterminées.

Le processus de maintenance certifié GE est détaillé dans ce qui suit.

1.2.1. Traitement thermique (four sous-vide)

Le four constitue la première étape par laquelle une pièce de turbine passe dans le processus de maintenance. En premier lieu la pièce subit un cycle de chauffage à des températures supérieures à 1200°C. A la fin du cycle la température est baissée par refroidissement jusqu'à atteindre une température de 80°C afin d'ouvrir le four en toute sécurité. Cette première phase permet donc de remonter les impuretés et faire apparaître les fissures profondes de la pièce (ailette, bride...). Ce traitement permet de changer les caractéristiques physiques de la pièce : elle devient malléable et accepte les différents traitements ou maintenance tel que le revêtement thermique (caoting), le décapage chimique ou la soudure et le meulage.

En fin de cycle de maintenance. Ces pièces subissent un autre cycle de chauffage et refroidissement dans le four sous-vide. La pièce retrouve ses caractéristiques originales (cette étape est donc appelée phase de durcissement). Le four sous-vide est représenté dans la figure 1-5 :



Figure 1-5 : Four sous-vide.

Durant l'enfournage des pièces, ces dernières vont subir deux cycles (chauffage et refroidissement) caractérisant le fonctionnement du four sous-vide, ces deux cycles sont détaillés dans de qui suit :

- Cycle de chauffage

Le cycle de chauffage est actionné lorsque les pièces sont mises en place dans l'enceinte du four. La programmation de fermeture de la porte est mise en marche par le biais du contact des fins de courses avec la surface de la porte et l'ouverture des deux vérins hydraulique et pneumatique.

Après avoir introduit les paramètres (vitesse, pression partielle, température, temps) dans le système de commande, la pompe mécanique commence à fonctionner en aspirant le vide. Ce qui va entraîner une diminution de pression dans l'enceinte jusqu'à atteindre une valeur qui permettra à la pompe de roots de se déclencher automatiquement pour aider la pompe mécanique à aspirer le vide; ce qui représente un cycle bas-*vide*. Pour obtenir un vide presque absolu, la pompe de diffusion est mise en marche à partir d'une pression bien déterminée pour créer un haut vide dans l'enceinte. Cet environnement est maintenu à l'aide de la pompe de maintien qui est mise en marche juste après la pompe de diffusion. Ce cycle est donc appelé le haut-*vide*.

Un traitement hydrogène est déclenché dans un temps bien déterminé afin de nettoyer les pièces de toutes les impuretés qui remontent en surface durant le traitement thermique. Lorsque la soupape de pression partielle d'hydrogène injecte à l'intérieur du four de l'hydrogène, la pompe de diffusion s'arrête. À ce moment-là, seule la pompe mécanique et la pompe roots fonctionnent c'est-à-dire que le four est en bas-*vide*.

Durant tout le chauffage sous-*vide* des pièces, un système de refroidissement des parois vulnérables du four est mis en marche à l'aide de l'eau refroidie par le Chiller puis alimenté par une pompe à eau vers les entrées du four où l'eau circule entre les parois pour protéger les composantes sensibles du four.

- Cycle de refroidissement

Le cycle de refroidissement des pièces est assuré par des gaz (Argon, Azote) alimentés à partir de la zone de stockage directement vers les connexions du four. Une fois que la température des pièces atteint 80°C, l'eau qui circule dans les parois est évacuée en dehors, la pression atmosphérique reprendra et la porte du four peut être ouverte en toute sécurité pour faire sortir les pièces.

✓ **Zone de stockage des liquides/gaz**



Figure 1-6 : Zone de stockage des liquides/Gaz.

La zone de stockage représentée sur la figure 1-6 comporte trois silos des gaz (argon, azote, oxygène) liquéfiés implantés à l'extérieur du centre de maintenance dans un espace ouvert. Les silos d'argon et d'azote sont connectés chacun d'eux à un échangeur. Ce dernier transforme le liquide en gaz puis l'envoie dans deux autres silos de gaz. Seul l'oxygène est utilisé liquide dans le procès de revêtement thermique. Cette zone de stockage alimente le four sous-vide et les machines de revêtement thermique.

1.2.2. Revêtement thermique (Machine *coating*)

Le revêtement thermique est une opération qui permet d'augmenter la durée de vie de la pièce durant le cycle de fonctionnement de la turbine sur le site industriel.

La machine du *coating* assure le revêtement thermique avec trois procédés différents. Le fonctionnement de chaque procédé est décrit comme suit :

- **Système *Hight Vilosité Oxygène Fioul (HVOF)*** : Ce procédé utilise l'oxygène et le kérosène comme combustibles. Ces derniers sont utilisés, en présence d'une source d'étincelle (bougie), pour allumer une flamme dans la chambre de combustion. Cette flamme est orientée par l'action de l'air comprimé vers la sortie du pistolet pour bruler une poudre spéciale revêtement sur la surface de la pièce ;
- **Système *plasma (APS)*** : L'installation est alimentée en hydrogène, argon et azote à partir de la zone de stockage. La flamme s'allumera au contact de l'électrode positive avec le nozzel négative en créant un court-circuit en présence des gaz à température très élevée. Le robot oriente la flamme vers la surface de la pièce pour effectuer sa tâche ;

- **Système ARC Aluminium** : Ce procédé est assuré par l'appareil *Smart Arc*. L'opération consiste à faire passer un fil d'aluminium dans un pôle négatif et l'autre dans un pôle positif. Leur rencontre crée un court-circuit qui permet de faire fondre l'aluminium. L'aluminium fondu est projeté à l'aide de l'air comprimé sur la surface de la pièce pour réaliser le revêtement.

La cabine dans laquelle le revêtement thermique s'effectue dispose d'un double système d'aspiration des poussières placé en face du robot et juste à côté de la table où la pièce est fixée. Le but du système de ventilation est de vider la cabine de toutes poussières dues à l'utilisation de la poudre cancérogène spéciale revêtement.

1.2.3. Sablage (Machine de sablage automatique)

Le sablage de la pièce se fait généralement pour le type liner. Cette opération a pour objectif de :

- ✓ Décaper la pièce de l'ancien revêtement thermique ;
- ✓ Préparer la surface de la pièce pour un nouveau revêtement thermique ;
- ✓ Éliminer les corrosions présentes sur la pièce.

Le sablage est assuré par la machine automatique MEC modèle PB-212126 SPL. Lors de la mise en marche de cette dernière, l'air comprimé est utilisé pour pressuriser le sable et l'orienter vers la buse de projection. Le sable quitte finalement la buse de sablage qui est munie d'un mouvement alternatif vertical sous forme d'un flux pour accomplir l'opération de sablage. Le générateur de sable est pressurisé ou dépressurisé une fois que le cycle commence et se termine.

Durant l'opération un système de ventilation aspire le sable à travers des conduites d'aspiration métalliques. Ces conduites sont connectées à un récupérateur de sable. Le sable récupéré est filtré et nettoyé de très grands et très petits grains et des particules de poussière.

Le système de récupération de sable assure donc, un traitement continu de l'abrasif par séparation régulière des salissures, de la poussière et de l'abrasif usagé garantissant un circuit de sable fermé et une installation étanche de poussière.

1.2.4. Décapage chimique (Système *stripping*)

Le décapage chimique constitue l'une des premières étapes par lesquelles passe la pièce juste après son démontage de la turbine. Ce procédé a pour but de supprimer l'ancien revêtement thermique qui se trouve dans les pièces (aubes, ailettes)

Il y a deux types de pièce : haute pression destinée à un traitement acide et basse pression destinée à un traitement alcalin.

Le passage de la pièce à travers les différentes étapes du décapage chimique se fait automatiquement par le robot à l'aide d'un système de commande à distance dans tous les bassins suivant l'ordre de leur positionnement.

- Bassin d'acide fort ($\text{HFS} + \text{H}_3\text{PO}_4$) : cette étape permet de faire dissoudre l'ancien décapage ;
- Bassin H_2O : pour le rinçage des pièces afin d'enlever le fil d'acide qui est superposé sur la surface de l'aube ;
- Bassin $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}$: pour neutraliser les aubes de toutes les traces d'acide restantes après rinçage ;
- Bassin ultrason : Ce dispositif se compose de générateur d'onde et des plaques diffusantes d'ondes, ces dernières traverse l'aube et éliminer les particules microscopique du revêtement logé dans les interstices des pièces ;
- Bassin de séchage : Pour rendre la pièce prête à faire passer dans un autre procès. .

Les bassins sont reliés à un système d'aspiration des vapeurs. Ces dernières seront ensuite traitée dans une tour d'absorption (scrubber) qui est munie de deux ouvertures d'injection d'eau et deux tamis plein d'écoring (matière en vrac) qui a pour but de maximiser le contact entre liquide-vapeur.

✓ **Zone de stockage des produits chimique**

Cette zone comporte quatre grands bacs de produits chimiques acide hydro-fluosilicique, acide phosphorique, acide chlorhydrique, soude caustique, déchets acides implantés dans un hangar fermé. Chaque bac dispose de deux sorties d'alimentation vers les bassins du décapage chimique, chaque canalisation dispose d'une pompe. Lors de la réception des produits chimiques, le remplissage du bac se fait par une canalisation flexible spéciale produit en question (exemple : canalisation 1 est celle de l'acide). Chaque bac dispose d'un bac de rétention en cas de fuite du produit chimique puisque cela peut causer un contact entre des produits incompatibles.

La pièce durant son passage dans le processus de maintenance certifié GE subi plusieurs traitements commençant par le traitement thermique dans le but de changer les caractéristiques physiques de la pièce et la rendre apte à recevoir d'autres traitements comme le revêtement thermique (coating), décapage chimique (stripping plant) pour les aubes, sablage pour les liners, meulage, soudage..., le passage de la pièce n'est pas suivant un ordre bien précis, cela dépend des consignes reçues par le service engineering. Après avoir subi tous ces traitements, la pièce doit repasser une dernière fois dans un traitement thermique pour retrouver ses caractéristiques originales.

1.3. Problématique et objectifs

1.3.1. Problématique

L'industrie pétrolière et gazière se classe parmi les industries les plus dangereuses du fait qu'elle dispose d'installations à haut risque qui représentent un danger potentiel sur leurs terrains d'exploitation et de leur environnement.

A l'instar de ces industries, Algesco (GE Oil & Gas) possède une politique de gestion des risques stricte afin d'éviter tout dommage qui puisse porter atteinte aux personnes, à l'économie, à l'environnement et à l'image de marque de l'entreprise.

Le centre de maintenance Algesco GE a connu un incident en juillet 2015 causé par le fournisseur des gaz liquéfiés, et cela suite à une erreur de remplissage avec de l'oxygène des silos de stockage réservés à l'argon. Cette négligence aurait pu coûter cher à l'entreprise si le four sous-vide auquel il est connecté n'était pas à l'arrêt.

Suite à cet incident, le service sécurité de GE a soulevé la nécessité de revoir l'étude de danger dans laquelle ce scénario n'a pas été identifié et d'apporter tous manquements en matière de prévention permettant d'assurer la sécurisation du four sous-vide et de toutes les autres installations présentes dans le centre de maintenance. À partir de là découle le besoin de l'entreprise qui est la maîtrise des risques majeurs au sein du centre de maintenance.

Aussi les questions posées par Algesco GE sont : **Sommes-nous suffisamment protégés contre les risques d'explosion au niveau du four sous vide ? Quelle est la démarche et les outils adéquats pour une meilleure maîtrise de risque au niveau du four sous-vide ?**

1.3.2. Objectifs de l'étude

L'objectif général constitue un outil primordial pour le cadrage du projet. Pour cela nous nous sommes fixés un certain nombre d'objectifs spécifiques à réaliser dans l'ordre chronologique afin d'atteindre l'objectif général qui est de résoudre le problème posé par l'entreprise.

L'objectif général de notre travail est donc : l'établissement d'une démarche adéquate d'analyse des risques pour une meilleure maîtrise de ces derniers avec une proposition de solutions techniques.

Les objectifs spécifiques sont :

- ✓ Analyse critique de l'étude de danger ;
- ✓ Identification des équipements à haut risque présents dans le centre de maintenance ;
- ✓ Définition des scénarios d'accidents et l'estimation de leurs probabilités et gravités ;
- ✓ Réduction des risques par des mesures techniques de prévention et de protection.

1.4. Méthodologie

La méthodologie suivit, pour atteindre l'objectif général de cette étude, reprend parfaitement l'enchaînement du processus méthodologique de maîtrise des risques majeurs donné par la norme ISO 3100. Les principales étapes sont :

- Étape 1 : Identification des systèmes critiques.

Cette étape définit le système sur lequel portera l'étude. Elle comprend :

- ✓ L'analyse fonctionnelle des systèmes qui consiste en un découpage fonctionnel des systèmes en sous-systèmes pour faciliter l'analyse préliminaire des risques ;
- ✓ Analyse préliminaire du risque : identification des risques au niveau de chaque système étudié afin de trouver le système qui présente le plus de risque dans le centre de maintenance.

- Étape 2 : Identification et estimation des facteurs de risque

Cette étape constitue l'étape d'analyse des risque dans sa globalité puisque c'est durant cette dernière que nous allons appliquer toute les méthodes d'analyse quantitative qui permettent de compléter l'APR, et ce, dans le but d'arriver à faire ressortir tous les scénarios plausibles susceptible de se produire.

Les outils utilisés dans cette étape sont :

- ✓ **Analyse des Modes de Défaillance, leurs effets et leurs Criticité (AMDEC)** : identification des risques au niveau du composant et détermination des modes de défaillance susceptibles de se produire pouvant générer un risque majeur ;
- ✓ **Arbre De Défaillance (ADD)** : identification des combinaisons de causes qui pourraient être à l'origine d'un évènement non souhaité ;
- ✓ **Arbre D'Évènement (ADE)** : définition du type de phénomène qui peut se produire après l'échec ou le succès des barrières de sécurité ;
- ✓ **Nœud papillon** : le nœud papillon que nous allons utiliser est adapté GE, puisqu'il se base sur l'approche qualitative. Nous allons donc le compléter d'avantage avec l'approche quantitative afin de déterminer le phénomène le plus probable ;
- ✓ **Modélisation des effets** : à l'aide du logiciel PHAST nous allons modéliser le phénomène dangereux le plus probable.

- Étape 3 : Évaluation du risque.

- ✓ **Heat Map** : évaluation des risques industriels dans le but d'avoir la cotation des risques critiques déterminés précédemment suivant les critères d'évaluation de GE.

- **Étape 4 : Réduction de risque.**

- ✓ **Graphe de risque étalonné** : détermination du niveau d'intégrité de sécurité du système (SIL) ;
- ✓ Solutions techniques de sécurité (prévention et protection).

Les étapes précédentes sont schématisées dans la figure 1-15 :

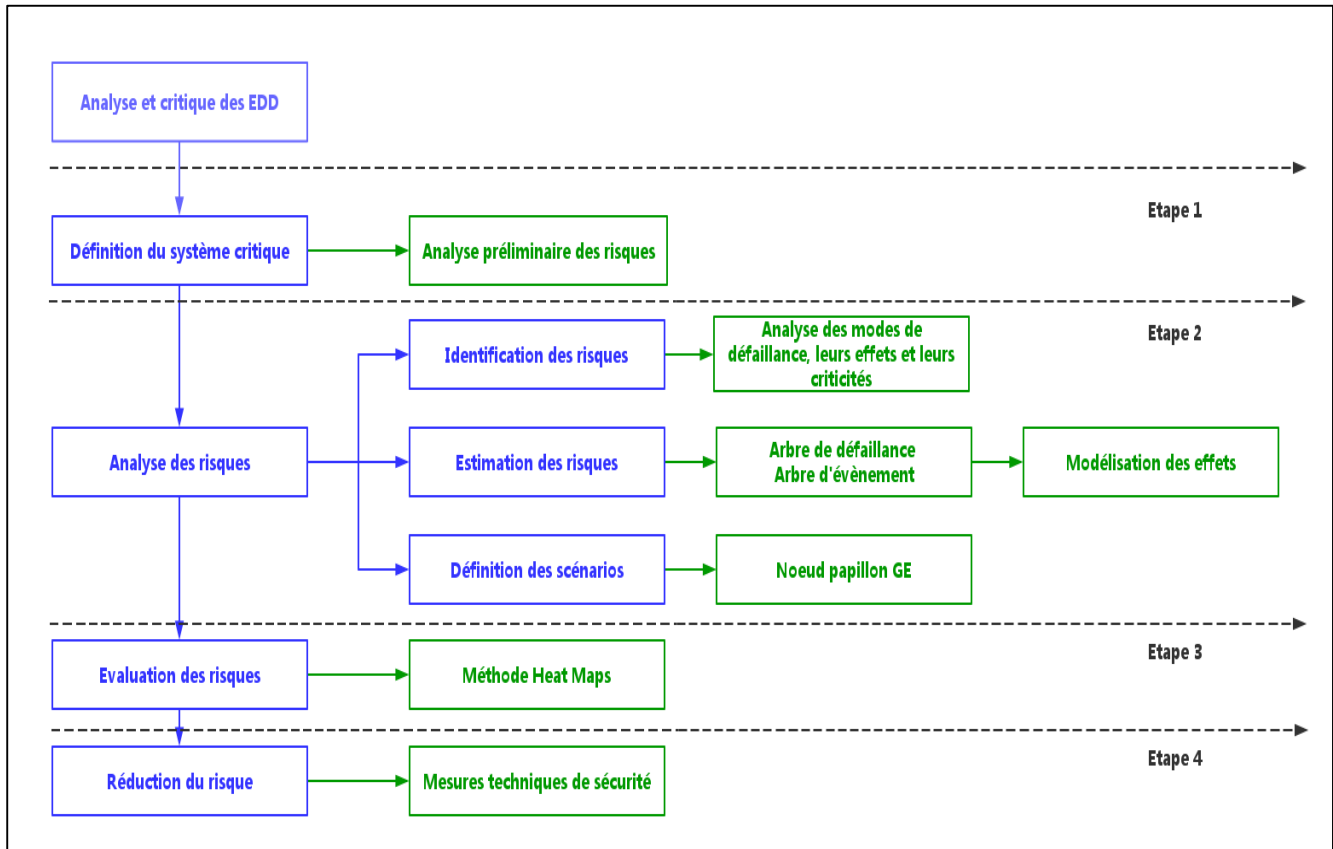


Figure 1-7: Processus méthodologique de l'étude.

Ce chapitre nous a permis de situer la problématique posée dans son contexte et une méthodologie est proposée pour la maîtrise des risques au niveau du centre de maintenance Algesco GE.

Chapitre 2 : maîtrise des risques et leurs outils

Les risques majeurs ont été définis dès l'apparition du monde industriel, sauf que leur gestion n'a pas été prise en considération vu la préoccupation de l'homme par les bienfaits qu'apporte l'industrie pour l'évolution de la civilisation. Mais dès que la prise de conscience a été réveillée après la survenue des grandes catastrophes, le management des risques s'est proposé comme une solution pour réduire la probabilité et la gravité du risque majeur. Encore une fois cette dernière est nuancée, et il se trouve que les termes « management des risques » et « maîtrise des risques » sont employés pour désigner la même étude. Il en est de même pour l'évaluation et l'estimation voire aussi l'appréciation des risques.

Dans le présent chapitre, nous allons mettre en avant l'explication du processus de maîtrise des risques suivit dans notre étude ainsi que les outils d'analyse utilisés dans chaque étape.

2.1. Définition du risque majeur industriel

D'après Haroun TAZIEFF le risque majeur est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre [1].

Le risque majeur est aussi la possibilité d'un événement d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société.

L'existence d'un risque majeur est liée :

D'une part, à la présence d'un événement qui est la manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique. D'autre part, à l'existence d'enjeux qui représentent l'ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non monétaire) pouvant être affectés par un phénomène. Les conséquences d'un risque majeur sur les enjeux se mesurent en termes de vulnérabilité.

Un risque majeur est caractérisé par sa faible fréquence et par son énorme gravité d'une manière à déclencher une situation de crise après sa survenue. Quoique, les conséquences des risques majeurs peuvent être catastrophiques, reste les effets, ainsi que les modes de gestion et de prévention de ces événements sont très différents.

D'après la loi cadre 04-2 portant sur la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes, le risque majeur est défini comme toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et/ou du fait d'activités humaines [2].

2.2. Maîtrise des risques

Dans la norme [ISO/CEI, 2002], le management des risques est défini comme étant l'ensemble des activités coordonnées visant à diriger et piloter un organisme vis-à-vis du risque. Le management du risque inclut typiquement l'appréciation du risque, le traitement du risque, l'acceptation du risque et la communication relative au risque.

Selon la norme [ISO/CEI, 2002], la maîtrise du risque est une action de mise en œuvre des décisions de management du risque. La maîtrise du risque peut impliquer la surveillance, la réévaluation et la mise en conformité avec les décisions.

La maîtrise des risques est un processus conduisant à évaluer et choisir l'une des différentes possibilités de réduction des risques. C'est d'une manière générale l'ensemble des actions de mise en œuvre des décisions de la gestion des risques visant à les ramener sous le seuil d'acceptabilité [3].

La démarche de maîtrise des risques s'inscrit dans une perspective plus globale de gestion des risques, définie comme un processus régulier, continu et coordonné, intégré à l'ensemble de l'organisation, qui permet l'identification, le contrôle, l'évaluation des risques et des situations à risques, qui ont causés ou qui auraient pu causer des dommages aux personnes, aux installations et à l'environnement.

2.3. Démarche de maîtrise des risques

Le processus de maîtrise des risques est un processus incluant les étapes résumées dans la figure 2-1 :

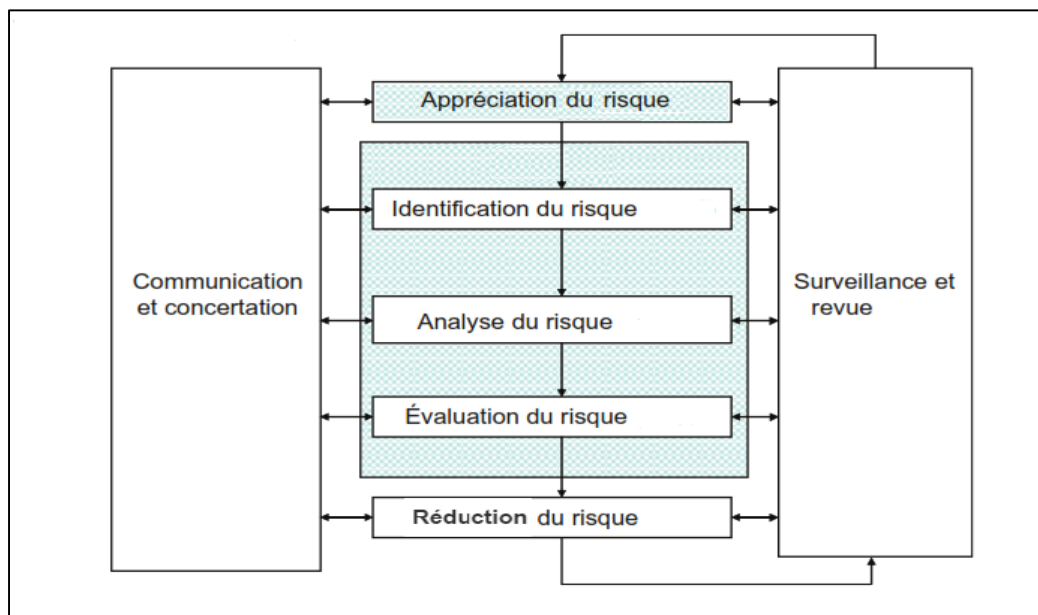


Figure 2-1: Processus de la maîtrise des risques [3].

2.2.1. Appréciation des risques

L'appréciation du risque est le processus global d'identification, d'analyse et d'évaluation du risque. Elle comprend plusieurs étapes [3] :

2.2.1.1. Identification des risques

Durant cette étape nous allons identifier les risques ainsi que leurs causes et conséquences potentielles. Cette étape a pour objectif de dresser une liste exhaustive des risques basés sur les événements susceptibles de provoquer, de stimuler, d'empêcher, de gêner, d'accélérer ou de retarder l'atteinte des objectifs. Il est important d'identifier les risques associés au fait de ne pas saisir une opportunité. L'identification du risque comporte l'examen d'un large éventail de conséquences, même si la source ou la cause du risque peuvent ne pas être évidentes. Tout en identifiant ce qui peut se produire, il est nécessaire d'examiner les causes possibles et les scénarios des conséquences éventuelles. Dans ce volet, les principales sources de danger et les scénarios d'accident doivent être recensés et identifiés afin de mener une analyse efficace et d'atteindre les objectifs voulus en matière de maîtrise des risques.

L'identification des risques permet d'utiliser des outils et des techniques adaptés à ses objectifs et ses aptitudes, et aux risques auxquels il est exposé. Il est essentiel que les informations utilisées pour l'identification des risques soient pertinentes et se basent sur la connaissance des experts et sur le retour d'expérience.

2.2.1.2. Analyse de risque

L'analyse des risques occupe une place centrale dans le processus de maîtrise des risques. Cette étape permet de fournir des données pour évaluer les risques et prendre la décision de les traiter ou non. Elle sert aussi pour le choix des stratégies et des méthodes de traitement les plus appropriées.

Une fois le danger est identifié, le risque associé doit être effectué pour passer à l'estimation. Cette dernière peut être qualitative, semi- quantitative et/ ou quantitative en terme de probabilité de son occurrence et de la gravité de ses conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement.

L'estimation d'un risque se définit comme un : « Processus utilisé pour affecter des valeurs à la probabilité et aux conséquences d'un risque. L'estimation du risque peut considérer le coût, les avantages, les préoccupations des parties prenantes, et d'autres variables requises selon le cas pour l'évaluation du risque ».

2.2.1.3. Évaluation du risque

Après avoir estimé le risque, nous devons le comparer aux critères d'acceptabilité établis au préalable par l'entreprise concernée. Cette évaluation permet de prendre une décision sur

l'acceptabilité ou non de chaque risque, c'est-à-dire, déterminé s'il convient d'accepter le risque tel qu'il est ou bien de le réduire en mettant en place des mesures supplémentaires de maîtrise.

2.2.1.4. Réduction du risque

Cette étape consiste à mettre en œuvre les différentes mesures et barrières de prévention et de protection afin de réduire l'intensité du phénomène (réduction potentielle de danger, atténuation des conséquences) et à diminuer la probabilité d'occurrence par la mise en place de barrières visant à prévenir les accidents. Outre les améliorations techniques et de fiabilité d'équipements, la prévention passe aussi par une meilleure prise en compte des facteurs de risque liés à l'organisation et aux personnes. Le choix des actions préventives à engager est effectué en comparant les coûts de leur mise en œuvre avec les coûts des conséquences de risque, en tenant compte de leur probabilité d'apparition. Un suivi régulier de l'évolution des risques est recommandé dans la démarche du management des risques afin de contrôler et d'assurer la pertinence des actions préventives engagées et de corriger les dispositions prévues [4].

De manière très générale, les mesures de maîtrise des risques se répartissent en :

- Mesures ou barrières de prévention : mesure visant à éviter ou limiter la probabilité d'un événement indésirable, en amont du phénomène dangereux ;
- Mesures ou barrières de protection : mesure visant à limiter les conséquences sur les cibles potentielles par diminution de la vulnérabilité.

2.2.1.5. Communication et concertation

La communication et la concertation avec les parties prenantes internes et externes doivent avoir lieu à toutes les étapes du processus de maîtrise du risque [3].

Une approche consultative en équipe peut :

- S'assurer que les risques sont correctement identifiés ;
- Réunir différents domaines d'expertise pour l'analyse des risques ;
- S'assurer que les différents points de vue sont pris en compte de manière appropriée dans la définition des critères de risques et dans l'évaluation des risques ;
- Conforter l'adhésion et le soutien à un plan de réduction du risque.

2.2.1.6. Surveillance et revue

Les processus de surveillance et de revue s'appliquent sur tous les aspects du processus de maîtrise du risque afin de pouvoir [3].

- S'assurer que les moyens de maîtrise sont efficaces et performants aussi bien dans leur conception que dans leur utilisation ;

- Obtenir des informations supplémentaires pour améliorer l'appréciation du risque ;
- Analyser et tirer les leçons des événements (y compris des incidents), des changements, des tendances, des succès et des échecs.

2.4. Outils d'analyse des risques

Dans cette partie, nous allons décrire brièvement les principales méthodes utilisées dans notre démarche d'analyse des risques établies dans le cadre de la maîtrise des risques au niveau du centre de maintenance. Les méthodes d'analyse des risques utilisées se divisent en deux catégories comme le montre la figure 2-2 :

- Méthodes qualitatives ;
- Méthodes quantitatives.

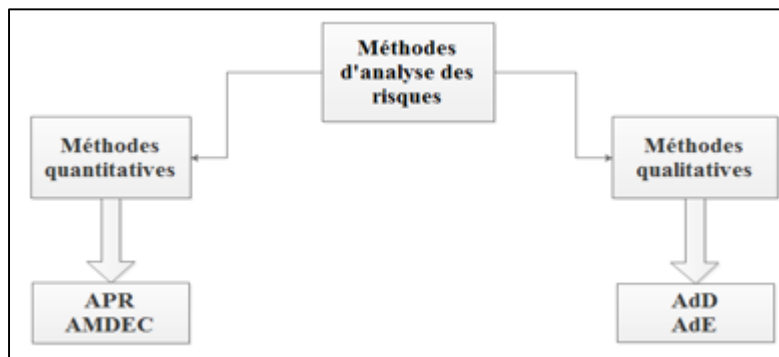


Figure 2-2 : Types de méthode d'analyse des risques.

2.4.1. Méthodes qualitatives

L'analyse qualitative des risques constitue un préalable à toutes autres analyses. En effet elle permet la bonne compréhension et connaissance systématique du système étudié et de ses composants. Pour une bonne évaluation qualitative du risque cette approche ne s'appuie pas explicitement sur les données chiffrées, mais elle se réfère à des observations pertinentes sur l'état du système et surtout sur le retour d'expérience (REX) et les jugements d'expert. Cette approche nécessite alors une très bonne connaissance des différents paramètres et causes liés au système étudié. Dans quelques études de dangers, cette approche peut être suffisante pour atteindre les objectifs voulus si elle est bien menée et justifiée [5].

L'APR et l'AMDEC qui font partie de nombreux outils d'analyse et d'évaluation des risques à caractère qualitatif, ces méthodes sont détaillées dans ce qui suit :

2.4.1.1. Analyse Préliminaire des Risques

Selon la norme [CEI-300-3-9, 2015], « L'APR est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité ».

✓ **Domaine d'application**

L'APR est applicable à tout type d'installation et comme son nom l'indique, c'est une méthode généralement utilisée afin d'identifier les risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. Cette méthode est aussi appliquée dans le cadre des études de danger car elle ne nécessite pas une connaissance approfondie de l'installation étudiée [4].

En ce sens, cette méthode s'avère pertinente dans les situations suivantes:

- La phase conception d'une installation complexe ;
- La phase exploitation d'une installation complexe ;
- La phase conception/exploitation d'une installation Simple.

✓ **Principe de l'APR**

L'APR s'occupe dans un premier temps de recenser les éléments dangereux relatifs au système étudiée et cela après avoir effectué une décomposition fonctionnelle de ce dernier en sous-système. Ces éléments dangereux peuvent être [4] :

- Un produit ou un gaz dangereux (inflammable, explosive...etc), mélange de produit ou de gaz dangereux susceptible de provoquer un phénomène dangereux ;
- Des équipements dangereux, par exemple : bac de stockage, pompe, soupape...etc ;
- Des opérations dangereuses, par exemple : chauffage, revêtement avec une flamme chaude, traitement acide.

Pour chaque élément dangereux préalablement recensé, l'APR vise à identifier une ou plusieurs situations dangereuses susceptibles de se produire en présence d'une source de danger ou d'un élément causant la situation dangereuse.

Cette dernière peut engendrer un évènement non souhaité lorsqu'elle sera suivie d'un évènement initiateur ou un élément causant un évènement non souhaité.

Pour chaque situation dangereuse, il faut envisager les causes susceptibles de provoquer des évènements non souhaités et les conséquences qui découlent de leur apparition. Ensuite l'APR est appelée à identifier les sécurités existantes sur le sous-système étudié, si ces dernières sont jugés insuffisantes pour réduire le risque à un niveau acceptable, des propositions d'amélioration doivent être envisagées.

✓ **Étapes du déroulement de l'APR**

Schématiquement, la méthode que l'on classe en principe parmi les méthodes inductives, consiste à déterminer les accidents potentiels que peuvent provoquer les évènements non souhaités.

Le support utilisé pour la mise en œuvre de la méthode est un tableau proposé par l'équipe de travail et qui constitue le produit de l'APR [6].

Nous avons choisi le modèle donnée dans le tableau 2-1 comme un tableau d'APR lors du déploiement de la méthode :

Tableau 2-1: Déploiement de l'APR

Sous-système	Élément Dangereux	Situation Dangereuse	Cause	Conséquence	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition
--------------	-------------------	----------------------	-------	-------------	---	---	---	----------------------	----	----------------------	----	----	-------------

En se basant sur le retour d'expérience et les connaissances des experts, chaque sous-système identifié dans la phase de décomposition fonctionnelle a été revu, et les situations dangereuses ont été examinées de manière systématique.

À partir de ce tableau, nous avons adopté une démarche systématique sous la forme suivante :

Étape 1 : Décomposition fonctionnelle de chaque système

L'APR s'appuie au début sur la décomposition fonctionnelle du système étudié en sous-système détaillé ce qui permet de faire ressortir toutes les parties qui peuvent être à l'origine d'un évènement non souhaité.

Étape 2 : Énumération des éléments dangereux (ED)

À partir de cette décomposition, nous allons énumérer les éléments dangereux qui constituent un danger pour le système. Ce dernier peut être un équipement ou un produit approprié au sous-système.

Étape 3 : Identification des situations dangereuses (SD)

Durant cette étape, nous allons nous baser sur le retour d'expérience et la connaissance des experts pour identifier les situations dangereuses réelles qui se rapprochent du sous-système en question.

Étape 4 : Identification d'un évènement non souhaité (ENS)

Après l'apparition de chaque situation dangereuse en présence d'un évènement initiateur résulte un évènement non souhaité susceptible d'infliger un dommage à des cibles vivantes ou matérielles.

Étape 5 : Détermination des causes et conséquences

L'énumération des causes susceptibles de provoquer directement une situation dangereuse et un événement non souhaité est un élément essentiel pour faire ressortir les conséquences qui découlent de l'apparition d'un événement non souhaité.

Étape 6 : Évaluation du risque par calcul de la criticité (C)

Cette étape permet d'attribuer la probabilité d'occurrence (P) de l'événement non souhaité et la gravité de ses conséquences (G), sans prise en compte des barrières de sécurité existantes et en utilisant les échelles de cotation qui ont été validés en équipe. Cela permet ensuite de calculer la criticité (C) à l'aide de la grille de criticité et voir dans quel niveau elle est positionnée (risque acceptable, tolérable, inacceptable).

Étape 7 : Réévaluation du risque par calcul de la criticité (C')

La réévaluation du risque se fait après avoir mis en place des mesures de prévention et de protection adéquates et conformes qui permettent de réduire la première évaluation de la gravité et la probabilité d'apparition d'un événement non souhaité jusqu'à un niveau acceptable ou tolérable. Cette réévaluation permet de nous assurer le niveau de confiance des barrières de sécurité en considérant aussi leur indépendance, leur capacité de réalisation ou efficacité du temps de réponse.

Étape 8 : Proposition

Proposition donnée sous forme de mesures sécuritaire pour améliorer la maîtrise des risques.

En dernier, si tous les enchainements ont été étudiés, le choix d'un nouvel ED pour le même sous système s'impose, sinon lorsque tous les ED approprié au sous-système ont été examinés, il faut procéder au choix d'un nouveau sous-système ou d'un système.

Étape 9 : Classification des risques

Classification des risques identifiés sur la grille de criticité, afin de positionner les risques dans leur niveau approprié. Ces grilles permettent de faire apparaître les risques inacceptables et critiques qui doivent être traités par des approches spécifiques.

2.4.1.2. Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et leurs Criticités (AMDEC)

Selon la norme [CEI 300-3-9, 1995], l'AMDE est une technique fondamentale d'identification et d'analyse de la fréquence des dangers qui analyse tous les modes de défaillances d'un équipement donné et leurs effets tant sur les autres composants que sur le système lui-même.

✓ **Domaine d'application**

L'AMDEC se trouve parmi les méthodes les plus répandues dans l'industrie chimique, pétrolière et le nucléaire. De fait, qu'elle s'adapte à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi à des systèmes de différentes technologies (électrique, mécanique, hydraulique...).

✓ **Principe de l'AMDEC**

Cette analyse vise d'abord à identifier l'impact de chaque mode de défaillance des composants d'un système sur ses diverses fonctions et ensuite hiérarchiser ces modes de défaillances en fonction de leur facilité de détection et de traitement [4].

L'AMDE(C) traite des aspects détaillés pour démontrer la fiabilité et la sécurité d'un système.

Elle contient quatre (04) parties primaires :

1. Identification des modes de défaillance ;
2. Identification des causes potentielles de chaque mode ;
3. Estimation des effets engendrés ;
4. S'il s'agit d'une AMDEC : évaluation de la criticité de ces effets.

L'analyse commence toujours par l'identification des défaillances potentielles des modes opérationnels. Elle se poursuit, par des inductions afin d'identifier les effets potentiels de ces défaillances (situation dangereuse, événement dangereux et dommages). Une fois les effets potentiels établis, on estime le risque en spécifiant les actions de contrôle.

✓ **Déroulement de l'AMDEC**

Le déroulement de l'AMDEC utilisé dans cette étude est donné dans le tableau 2-2 [7] :

Tableau 2-2: Déploiement de l'AMDEC

Sous-système	Composant	Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effets	P	G	D	C	Mesure de prévention	P'	C'
--------------	-----------	----------	---------------------	--------	--------	---	---	---	---	----------------------	----	----

De manière très schématique, une AMDEC se déroule de la façon suivante :

Étape 1 : Choisir les éléments ou composants du système identifié lors de la décomposition fonctionnelle. Notre cas est porté sur les équipements qui peuvent être à l'origine d'un phénomène dangereux déjà identifié dans l'APR.

Étape 2 : Décrire la fonction du composant choisi pour l'analyse afin de bien comprendre l'endroit dans lequel le composant intervient et quels sont les équipements avec lesquels il est directement lié.

Étape 3 : Retenir un mode de défaillance susceptible d'apparaître dans le composant en question.

La définition du mode possible de défaillance pour un équipement peut être réalisée à partir du retour d'expérience et des connaissances d'experts.

Étape 4 : Identifier les causes de chaque mode de défaillance ainsi que les conséquences tant au niveau du voisinage du composant que sur tout le système.

Étape 5 : Procéder à l'évaluation de la criticité de ce mode de défaillance en termes de probabilité et de gravité. Ensuite positionner les modes de défaillance sur la grille pour voir dans quel niveau de risque ils sont classés

Étape 6 : Prévoir des mesures ou moyens supplémentaires si l'évaluation du risque en montre la nécessité.

Étape 7 : Réévaluer après mise en place des mesures de sécurité et vérifier que le couple (P, G) peut être jugé acceptable et enfin, envisager un nouveau mode de défaillance et reprendre l'analyse. Si tous les modes de défaillances ont été examinés, le choix d'un nouveau composant s'impose.

2.4.2. Méthodes quantitatives

L'analyse quantitative des risques est considérée comme l'approche la plus retenue pour une bonne prise de décision sur les risques. Cette approche consiste à caractériser les différents paramètres d'analyse des risques par des mesures probabilistes.

L'obtention de ces mesures passe généralement par un traitement mathématique en prenant en compte les données relatives aux différents paramètres évalués et aussi aux informations qui sont de nature quantitative.

À l'égard de l'application de cette démarche, une attention particulière aux données utilisées, à leur origine et à leur adéquation aux cas étudiés doit être portée car une simple erreur remettra l'étude en cause [7].

Dans ce qui suit quelques méthodes quantitatives sont représentées parmi les plus utilisées et surtout appliquées dans le cas de notre four sous vide.

2.4.2.1. Arbre de défaillance (AdD)

L'analyse par Arbre de Défaillances est employée pour identifier les causes relatives aux événements redoutés. En partant d'un événement unique, il s'agit de rechercher les combinaisons d'événements conduisant à la réalisation de ce dernier. L'analyse par Arbre de Défaillances peut également être utilisée dans le cadre d'une reconstitution des causes d'un accident [4].

La méthode consiste en une représentation graphique des multiples causes d'un événement redouté.

Elle permet de visualiser les relations entre les défaillances des équipements, les erreurs humaines et les facteurs environnementaux qui peuvent conduire à des accidents. On peut donc éventuellement y inclure des facteurs reliés aux aspects organisationnels.

L'analyse par Arbre de Défaillances se déroule généralement en trois étapes :

- Spécification du système et de ses frontières ;
- Spécification des événements redoutés préalablement identifiés par exemple par APR ;
- Construction des arbres de défaillances : On cible les événements redoutés un par un et on essaye d'identifier les successions et les combinaisons d'événements de base permettant de les atteindre.

Toutefois, un événement de base doit répondre à un certain nombre de critères, en l'occurrence:

- Il doit être indépendant des autres événements de base ;
- Il ne doit pas être décomposable en éléments plus simples ;
- Il doit avoir une fréquence évaluable.

Le calcul de la probabilité de l'événement sommet se fait à travers la propagation des probabilités d'occurrence des événements de base vers le sommet. Le calcul des coupes minimales peut s'effectuer avec le même principe en essayant cette fois de trouver les plus petits ensembles d'événements de base pouvant mener à un événement redouté. Ceci permettrait de hiérarchiser les événements et d'implanter stratégiquement les barrières de défense afin d'améliorer la fiabilité et la sécurité en même temps.

Une coupe minimale représente la plus petite combinaison d'évènements (chemin critique) pouvant conduire à un événement indésirable (intermédiaire) ou redouté (final). Plus l'ordre d'une coupe minimale est petit, plus l'occurrence de l'événement final suivant ce chemin critique peut paraître probable.

L'affectation des probabilités des événements de base se fait par extraction des bases de données, essais, retour d'expérience (REX), jugement d'experts, audits, etc.

2.4.2.2. Arbre d'évènement (AdE)

L'analyse par Arbre d'Évènements est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence des dangers moyennant un raisonnement inductif pour convertir différents événements initiateurs en conséquences éventuelles relatives au fonctionnement ou à la défaillance des dispositifs techniques/humains/organisationnels de sécurité [4].

À l'inverse de l'analyse par Arbre de Défaillances, l'analyse par Arbre d'Évènements suppose la défaillance d'un composant ou d'une partie du système et s'attache à déterminer les évènements qui en découlent.

L'analyse par Arbre d'Évènements se déroule en plusieurs étapes préliminaires :

- Considération d'un événement initiateur ;
- Identification des fonctions de sécurité prévues pour contrôler son évolution ;
- Construction de l'arbre ;
- Description et exploitation des séquences d'évènements identifiées ;
- Il serait plus pertinent d'élaborer un Arbre d'Évènements à l'issue d'une première analyse identifiant les accidents potentiels à l'image de l'APR.

Les fonctions de sécurité doivent être assurées par des barrières ayant pour objectif d'empêcher le processus de matérialisation d'un accident provoqué par un événement initiateur.

La construction de l'arbre consiste à envisager soit le bon fonctionnement soit le dysfonctionnement de la première fonction de sécurité en partant de l'événement initiateur.

La suite de la méthode consiste à examiner le développement de chaque branche en considérant systématiquement le fonctionnement ou la défaillance de la fonction de sécurité jusqu'à l'atteinte d'un accident potentiel. La propagation des probabilités d'occurrence des évènements initiateurs permet de calculer la probabilité de l'évènement redouté.

2.4.2.3. Nœud papillon (*Bowtie GE*)

Le nœud papillon est une approche de type arborescente qui permet de montrer clairement la relation entre les menaces et les conséquences, ainsi que la performance relative aux défenses [8].

Le véritable avantage du nœud papillon est le fait qu'elle offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents c'est pour cette raison qu'elle est structurée d'une façon à positionner un grand nombre de cause et de conséquence d'une manière schématisée allant des causes initiales jusqu'aux conséquences. De plus, cet outil met en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques.

La méthode NP est un outil qui combine l'arbre de défaillance et l'arbre d'évènement.

Dans le standard GE, la méthode NP suit une démarche généralement similaire à celle décrite dans les bibliographies d'outils de gestion des risques, puisque le concept est le même, la différence repose dans la façon d'adapter la méthode au référentiel de sécurité de l'entreprise afin de rendre la méthode appropriée à cette dernière.

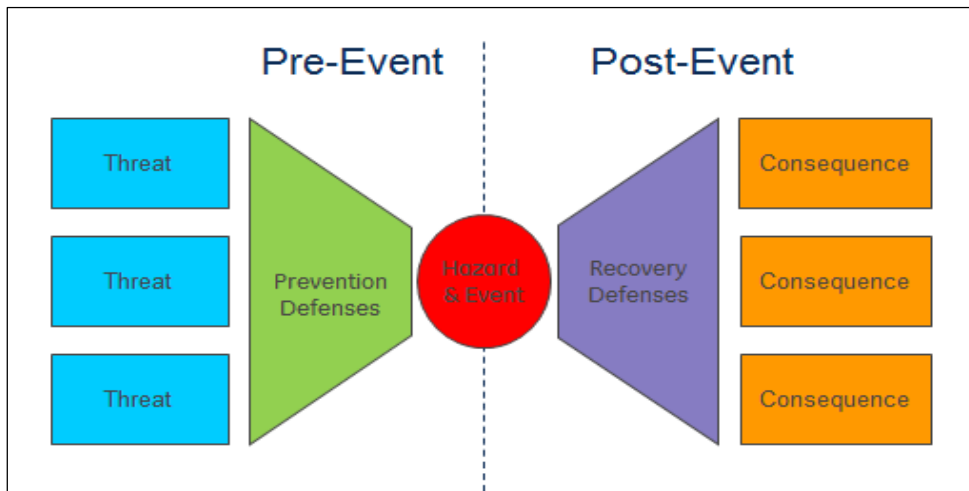


Figure 2-3 : Méthode du nœud papillon GE.

Selon GE la démarche de la méthode du nœud papillon se déroule comme suit :

Étape 1 : elle permet de définir le phénomène dangereux associé à un évènement dangereux déterminé au préalable par l'une des méthodes d'identification comme l'APR.

Étape 2 : elle détermine les causes qui pourraient être susceptibles de provoquer l'apparition de l'évènement dangereux. Cette étape nécessite la construction du côté gauche en arbre de défaillance (menaces) dont lequel les barrières de prévention existantes seront positionnées d'une manière structurée. Le rôle de chaque défense (barrière de prévention) est de prévenir une menace (cause).

Étape 3 : elle s'intéresse à la partie droite qui concerne la construction de l'arbre d'évènement, ce dernier permet de répertorié toutes les conséquences susceptibles de se produire suite à l'apparition de l'évènement dangereux. Entre l'évènement dangereux et la conséquence se classe les barrières de protection existantes pour ce type de cas.

Étape 4 : dans cette étape, les défenses de prévention et de protection sont déterminées et classées dans la matrice de défense établie par la méthode d'évaluation *Heat map*, il restera donc leur positionnement dans le nœud papillon.

La terminologie de la méthode nœud papillon adapté par GE est donnée dans le tableau 2-3 :

Tableau 2-3: Définitions de la terminologie du nœud papillon.

Terme	Définition
Danger (<i>Hazard</i>)	C'est le potentiel de causer des dommages et tout ce qui est source de danger (les risques de blessures, pertes, dommages ou interruption d'activités).
Évènement dangereux (<i>Hazard Event</i>)	Un évènement dans le temps qui décrit la perte de contrôle sur un danger.
Menace (<i>Threat</i>)	Tout ce qui va potentiellement causer le danger de produire un évènement dangereux.
Défenses de prévention (<i>Prevention Defenses</i>)	Moyens de contrôle (barrières de prévention) sur la menace (par exemple : la conception / ingénierie, Instrumentation, procédures, programmes de PM).
Conséquence	Tout ce qui est causé par la survenance de l'évènement dangereux.
Défenses de protection (<i>Protection Defenses</i>)	Moyens de réduction et/ou d'atténuation des conséquences de l'évènement dangereux (par exemple : les soupapes, arrêt d'urgence).
Échec des défenses (<i>Defense Impairments</i>)	Défaillances ou faiblesses au niveau des défenses.

La différence entre la méthode Nœud Papillon GE et celle décrite dans la littérature des risque se situe dans la partie logique de la combinaison des causes et l'enchaînement des conséquences, car celle de GE est conçue d'une manière purement qualitative et se résume à recenser les différentes causes et conséquences possibles sans aucun ordre d'apparition.

Chapitre 3: application des méthodes d'analyse des risques

L'étape analyse des risques constitue le cœur de la démarche de maîtrise de risque sur laquelle nous allons nous baser pour définir les scénarios critiques qui doivent être maîtrisés, car connaître le risque auquel nous sommes confrontés permettra de s'en prémunir de son existence.

Dans ce chapitre nous allons aborder l'analyse de risque dans toute sa globalité. Il sera donc exposé tout détail sur les résultats obtenus après l'application des méthodes d'analyse (APR, AMDEC, ADD, ADE) et ce, dans le but :

- D'analyser et de critiquer l'EDD d'Algesco GE Oil & Gas ;
- D'identifier le système critique ;
- D'identifier les risques critiques ;
- D'estimer les facteurs de risque ;
- De définir les scénarios plausibles.

3.1. Analyse et critique de l'étude de danger (EDD)

L'étude de danger est une exigence réglementaire permettant d'autoriser l'exploitation des sites industriels classés. Elle s'inscrit dans la démarche de maîtrise des risques qu'un exploitant doit mettre en place en vue de sécuriser son établissement.

L'étude de danger est aussi un document technique qui caractérise les risques et qui a un rôle démonstratif, notamment pour ce qui est de l'identification des scénarios d'accidents majeurs et de la performance des mesures de maîtrise des risques.

3.1.1. Cadre réglementaire

En Algérie le décret exécutif n°06-198 du 4 jourada El oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement (ICPE) [9].

Ce décret comporte deux articles 14 et 28 portant sur les EDD. Selon l'article 14 de ce décret, l'EDD doit comporter les éléments suivants [9]:

- Présentation générale du projet ;
- Description de l'environnement immédiat du projet et du voisinage potentiellement affecté en cas d'accidents comprenant les données physiques (géologie, hydrologie, météorologie et les conditions naturelles) et les données socio-économiques et culturelles (population, habitat, occupation des sols, activités économiques, voies de communication ou de transport et aires protégées) ;
- Description du projet et ses différentes installations (implantation, taille et capacité, accès, choix du procédé retenu, fonctionnement, produits et matières mis en œuvre...) en se

servant au besoin de cartes (plan d'ensemble, plan de situation, plan de masse, plan de mouvement ...);

- Identification de tous les facteurs de risque générés par l'exploitation de chaque installation considérée. Elle doit tenir compte non seulement des facteurs intrinsèques propre aux installations mais également à l'environnement auquel la zone est exposée ;
- Analyse des risques et des conséquences au niveau de l'établissement classé afin d'identifier de façon exhaustive les événements accidentels pouvant survenir. Leur attribuer une cotation en terme de gravité et de probabilité permettant de les hiérarchiser avec la méthode d'évaluation des risques utilisée pour l'élaboration de l'étude de danger ;
- Analyse des impact potentiels en cas d'accidents sur les populations (y compris les travailleurs au sein de l'établissement), l'environnement ainsi que les impacts économiques et financiers prévisibles ;
- Modalité de prévention des accidents majeurs et du système de gestion de la sécurité et des moyens de secours.

Suivant l'article 28 du décret exécutif n°06-198, l'EDD a pour objectif de [9]:

- Préciser les risques directs ou indirects par lesquels l'activité de l'établissement classé met en danger les personnes, les biens et l'environnement, que la cause soit interne ou externe ;
- Définir les mesures d'ordre technique propres à réduire la probabilité et les effets des accidents ainsi que les mesures d'organisation pour la prévention et la gestion de ces accidents ;
- Procéder à l'information préventive sur les risques du public, du personnel et des exploitants des installations voisines ;
- Favoriser l'émergence d'une culture du risque au voisinage des établissements ;
- Servir de base à l'élaboration des règles d'urbanisation et des plans d'urgence.

3.1.2. Démarche d'analyse critique des EDD

Dans cette partie nous allons exposer les différentes étapes constituant notre démarche d'analyse critique d'EDD. Ensuite, nous allons montrer l'application sur le cas pratique d'Algesco GE.

Cette approche a été adoptée dans le cadre d'une analyse critique des EDD [10]. Les différentes étapes d'une critique d'EDD sont résumées dans la figure 3-1 :

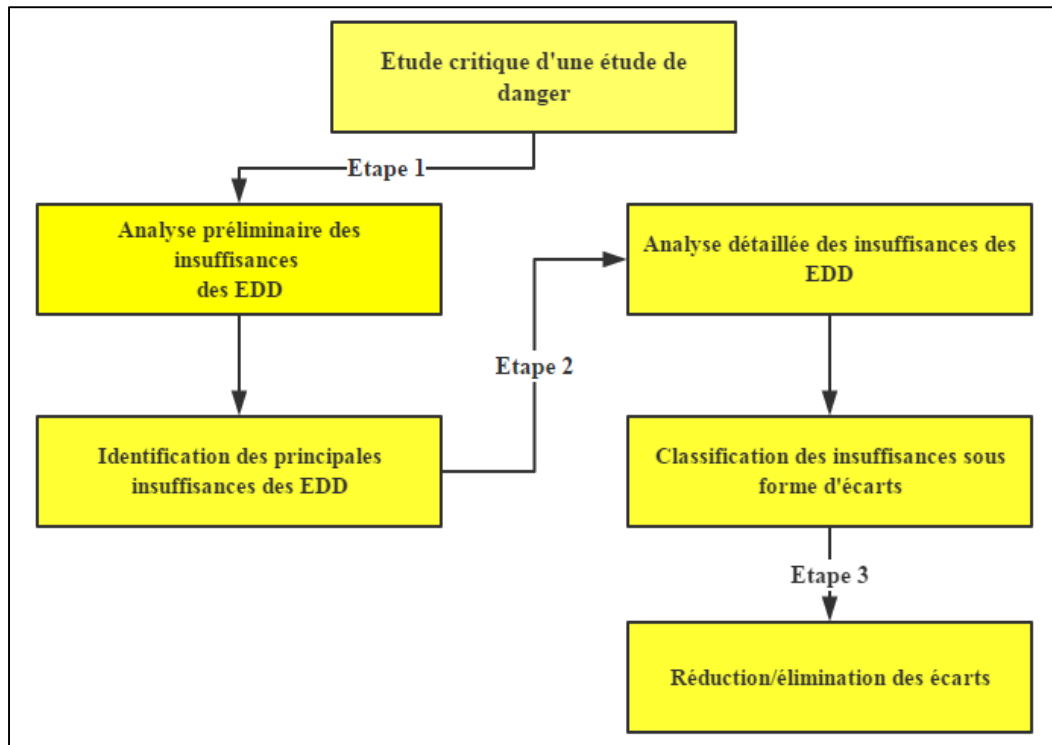


Figure 3-1 : Démarche d'analyse critique des EDD.

La démarche comporte plusieurs étapes [10] :

Étape 1 : Identification des principales insuffisances des EDD

Dans cette étape, nous avons caractérisé toutes les insuffisances du contenu de l'EDD, par rapport à ce qu'il a été mentionné dans l'article 14 du décret exécutif 06-198. Les insuffisances sont classées dans un tableau en fonction des chapitres développés dans l'EDD.

Étape 2 : Formulation des insuffisances sous forme d'écarts

La classification des écarts s'est faite en fonction des sous-écarts et des responsables de la mise en œuvre. Tous les écarts identifiés ont été classés par catégorie. Le schéma de la figure 3-2 explique la répartition de l'écart résultat.

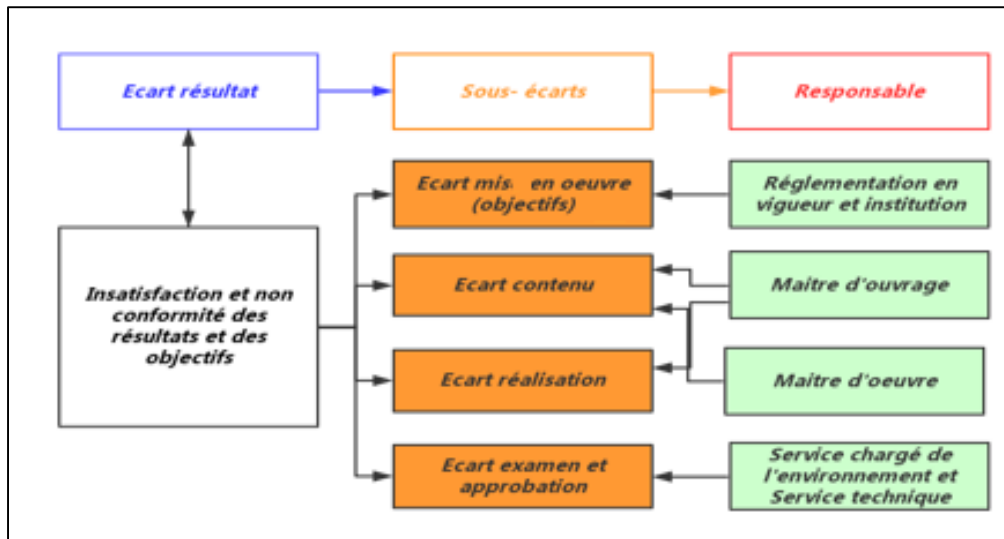


Figure 3-2: Identification et décomposition de l'écart résultat des EDD.

Les types de sous écarts expliqués précédemment sont :

Écart mise en oeuvre : c'est l'écart entre ce qui a été tracé comme objectif et ce qui a été fait dans l'étude de danger (le résultat).

Écart contenu : ce sont des chapitres qui n'ont pas été traités dans l'EDD et qui ont été essentiellement décrits dans le cadre réglementaire.

Écart réalisation : l'absence de toute évaluation des risques en utilisant des méthodes d'analyse (APR, AMDEC, AdD, Nœud papillon...) permettant de faire ressortir des scénarios plausibles susceptibles de se produire dans une installation bien déterminée. Cet écart peut être dû suite au mauvais déploiement d'une méthode d'analyse (la méthodologie suivie ne correspond pas à celle décrite dans la bibliographie).

Écart examen et approbation : c'est l'écart qui correspond aux critères d'examen qui n'ont pas été pris en considération lors de l'approbation de l'étude de danger.

Étape 3 : Réduction/élimination des écarts

Cette dernière étape de la critique permet de nous renseigner sur les mesures à prendre en considération pour avoir une étude de danger conforme à la réglementation en vigueur.

3.1.3. Application de l'analyse critique de l'EDD

Une critique de l'étude de danger d'Algesco (GE Oil & Gas), réalisée SARL Eco-Consult en Avril 2008, a été effectuée.

Étape 1 : Identification des principales insuffisances de l'étude de danger d'Algesco GE Oil & Gas. Les insuffisances relatives à chaque chapitre de l'EDD ont été relevées dans le tableau 3-1 :

Tableau 3-1: Identification des insuffisances de l'EDD d'Algesco GE Oil & Gas.

Contenus	Oui	Non	Écarts
Résumé non technique		×	Absence du résumé non technique de l'étude de danger.
Description générale du projet	×		Absence de plan qui permet de localiser l'emplacement du projet
Description de l'environnement	×		<p>Absence de plan de masse qui illustre les industries voisines du projet :</p> <p>Les usines, la ligne ferroviaire Alger-Blida, l'imprimerie, l'aéroport militaire ...</p> <p>Absence du schéma et de donné concernant la rose des vents.</p> <p>Absence du tableau des vitesses du vent et celui des températures durant l'année.</p> <p>Les répartitions de la population dans le projet et dans la commune ne sont pas mentionnées.</p> <p>La section industrie devrait être plus détaillée vu que la commune de Gerouaw représente un pôle industriel.</p> <p>La section agriculture nécessite plus d'informations vu que le projet est implanté dans la Mitidja.</p> <p>L'aéroport militaire n'a pas été pris en compte dans cette étude.</p>
Description du projet et de ses installations	×		<p>Les installations présentes dans le centre de maintenance n'ont pas été décrites dans cette étude.</p> <p>Les produits chimiques utilisés dans les opérations de maintenance n'ont pas été mentionnés.</p> <p>Le procédé de maintenance a été expliqué d'une manière générale non détaillé, n'incluant aucun état exhaustif des équipements utilisés.</p> <p>La zone de stockage des gaz sous pression n'est pas décrite dans l'EDD.</p>
Identifications des facteurs de risque	×		<p>L'origine des risques majeurs identifiés n'est pas mentionnée.</p> <p>Les conditions d'occurrence des risques majeurs ne sont pas citées.</p>

Analyse du risque	×		<p>Aucun tableau résultat de l'APR n'a été déployé dans cette étude.</p> <p>Les scénarios proposés ne sont pas suffisant et manque de détail et de précision.</p> <p>Les scénarios ne sont pas appropriés à une telle installation. En effet leur identification a été faite d'une manière générale.</p> <p>Absence de cotation du risque (probabilité, gravité)</p> <p>L'APR n'a pas été suivit d'autre méthode comme : ADD, AMDEC, Nœud papillon, HAZOP...</p> <p>Aucune méthode quantitative n'a complété l'APR.</p> <p>Absence des critères d'évaluation.</p>
Évaluation des risques majeurs		×	Absence de résultat d'évaluation des risques.
Mesures de réduction des risques	×		<p>Absence de mesures de prévention des risques.</p> <p>Aucune barrière de sécurité n'a été proposée pour réduire le risque.</p>

Étape 2 : classification des écarts résultats relevés de l'EDD selon le type du sous-écart auxquels ils sont appropriés.

Nous avons classé les écarts identifiés par catégories dans le tableau 3-2 :

Tableau 3-2: Classement des insuffisances sous forme d'écart

Écart mis en œuvre (objectifs)	Écart contenu	Écart réalisation	Écart examen
<p>Absence de mesure de prévention des risques.</p> <p>Aucune barrière de sécurité n'a été proposée pour réduire le risque.</p> <p>Absence de résultat d'analyse des risques.</p>	<p>Absence de résumé non technique.</p> <p>Absence de schéma démonstratif des points faibles des installations à haut risque.</p> <p>Absence des critères d'évaluation.</p> <p>Absence de plan de masse et de localisation qui permet d'illustrer le</p>	<p>Les scénarios ne sont pas appropriés à une telle installation ; leur identification a été faite de manière générale.</p> <p>Absence de cotation du risque (probabilité, gravité).</p> <p>L'APR n'a pas été suivit d'autre méthode comme : ADD,</p>	<p>Absence de maîtrise des risques.</p> <p>Les scénarios proposés ne sont pas suffisant et manque de détail et de précision.</p> <p>Aucun tableau résultat de l'APR n'a été déployé dans cette étude.</p> <p>Aucune méthode quantitative n'a complété l'APR.</p>

	<p>l'emplacement du projet.</p> <p>Les produits chimiques utilisés dans les opérations de maintenance n'ont pas été mentionnés.</p> <p>Le procédé de maintenance a été expliqué d'une manière générale non détaillé, n'incluant aucun état exhaustive équipements utilisés.</p> <p>La zone de stockage des gaz sous pression n'est pas décrite dans l'EDD.</p>	<p>AMDEC, Nœud papillon, HAZOP...</p> <p>Aucun tableau résultat de l'APR n'a été déployé dans cette étude.</p> <p>Absence de l'analyse et l'évaluation des risques.</p>	<p>Absence de résultat d'analyse des risques.</p>
--	--	---	---

Étape 3 : Réduction/élimination des écarts

Les actions mise en place pour permettre une réduction des écarts sont les suivantes :

- Suivi d'une méthodologie de travail conforme à celle dictée dans la réglementation, pour faciliter l'expertise et le suivi des résultats ;
- Suivit et le contrôle de l'EDD lors la réalisation par les services compétents EHS d'Algesco GE ;
- Veille sur l'atteinte des objectifs fixés par la réglementation en matière des EDD ;
- Examen de la forme et du fond de l'EDD avant l'approbation ;
- Mise à jour de l'EDD tous les cinq ans ou après chaque modification dans le centre de maintenance.

Durant l'analyse de l'EDD d'Algesco GE Oil & Gas, nous avons identifié des insuffisances potentielles, sur le plan réglementaire et sur la démarche suivie, qui devraient être prises en considération afin que l'entreprise soit sécurisée de tous les risques majeurs qui peuvent toucher à ses ressources (humaines et matérielles).

Pour remédier aux écarts identifiés, il s'est avéré nécessaire de refaire la partie analyse et la partie maîtrise des risques de l'EDD d'Algesco GE.

3.2. Identification du système critique

Durant cette étape, nous allons procéder à un découpage fonctionnel des systèmes présents dans le centre de maintenance afin d'aller en profondeur et en détail dans l'étude préliminaire car cette étape permet de connaître tous les sous-systèmes qui entrent dans le fonctionnement du système. Ensuite nous allons déployer une APR globale pour tous les systèmes afin de déterminer lequel doit faire objet d'une étude détaillée avec des méthodes d'analyse des risques complémentaires.

3.2.1 Décomposition fonctionnelle des différents systèmes

La décomposition fonctionnelle est une recherche des sous-systèmes fonctionnels, dans le but de faire ressortir toutes les entités qui contribuent dans le fonctionnement du système.

Les détails de tous les éléments entrant et sortant du système et du sous-système, ainsi que les équipements relatifs à chaque sous-système sont donnés en annexe 1.

Le tableau de l'annexe 1 représente les différents procédés considérés comme système présent dans le centre de maintenance. Chaque système comporte plusieurs sous-systèmes fonctionnels.

3.2.2 Analyse préliminaire des risques (APR)

Les échelles de cotation en probabilité et en gravité que nous avons utilisées pour le déploiement de l'APR ont été validées avec l'équipe du département EHS de l'entreprise. Les tableaux sont représentés dans l'annexe 8.

Plusieurs grilles de criticité existent dans la littérature scientifique. Nous pouvons les recenser selon les différentes approches : qualitatives, semi quantitatives, quantitatives. Ainsi, l'APR se propose d'utiliser d'avantage l'approche qualitative.

Les tableaux présentent les échelles de cotation en probabilité et gravité que l'équipe de travail a choisie pour l'analyse des risques d'accident majeur. Ce sont, également les échelles utilisées par l'INRIS dans le cadre des études de danger [11].

3.2.2.1 Hiérarchisation des risques dans la matrice de criticité

Nous avons effectué l'analyse préliminaire des risques à l'état exploitation de toutes les installations, et ce, dans le but de définir les systèmes les plus critiques.

À partir du résultat obtenu dans les tableaux d'APR données dans les annexes 2 à 7, nous avons pu hiérarchiser les risques de chaque système dans une grille de trois niveaux distincts.

Les différentes grilles qui représentent les niveaux de tous les risques identifiés lors de l'analyse préliminaire du risque (APR) pour chaque système étudié sont données dans l'annexe 9:

3.2.2.2 Résultat de l'APR

Le résultat de cette analyse nous a permis de justifier le choix du four sous vide comme étant l'installation qui présente le plus de risque critique parmi celles présentées dans le centre de maintenance des turbines à gaz- Algesco Boufarik,

Les installations étudiées sont :

- Sablage (Machine de sablage automatique) ;
- Silos de stockage des produits chimiques ;
- Décapage chimique (Système stripping) ;
- Silos de stockage des gaz/ liquide ;
- Revêtement thermique (Machine coating) ;
- Traitement thermique (Four sous-vide).

Les pourcentages de chaque niveau de risque relatifs à toutes les installations étudiées dans l'APR sont donnés dans le tableau 3-9. Le résultat nous indique les installations qui présentent des risques critiques et cela même après la mise en place des mesures de prévention et de protection.

Tableau 3-3 : Répartition des niveaux de risque

	Risque totale	Risque Acceptable	Risque Critique	Risque inacceptable
Nombres des risques	69	46	23	0
Pourcentages des risques %	100	66,67	33,33	0

Le tableau 3-10 résume le pourcentage du niveau de risque selon chaque système étudié dans l'APR en fonction des niveaux de risque :

Tableau 3-4: Niveau du risque par rapport au système

Systèmes \ Risques	Risque acceptable %	Risque critique %	Risque inacceptable %
Traitement thermique (Four sous- vide).	23,91	52,17	0
Revêtement thermique (Machine caoting).	17,40	26,09	0
Décapage chimique (Système <i>stripping</i>).	10,87	8,70	0
Sablage (Machine de sablage automatique).	13,04	0	0
Silos de stockage des gaz/ liquide.	10,87	13,04	0
Silos de stockage des produits chimiques	23,91	0	0

D'après les résultats obtenus, nous constatons l'absence de risque inacceptable. Ce résultat explique que l'entreprise Algesco GE n'admet pas l'exploitation d'un système qui admet un risque jugé inacceptable. Nous allons donc nous baser sur les risques critiques dans notre étude puisque ceux-là doivent être sous le seuil d'acceptabilité.

Les risques critiques sont situés dans une zone vulnérable où un simple changement au niveau de la probabilité ou la gravité nous fait remonter dans la zone inacceptable. En effet cette catégorie de risque doit être sous contrôle du moment qu'elle ne soit pas dans la tranche acceptable, des mesures de sécurité doivent être mises en place pour la maîtrise de ce risque

La figure 3-3 donne la répartition des pourcentages qui illustre le résultat obtenue :

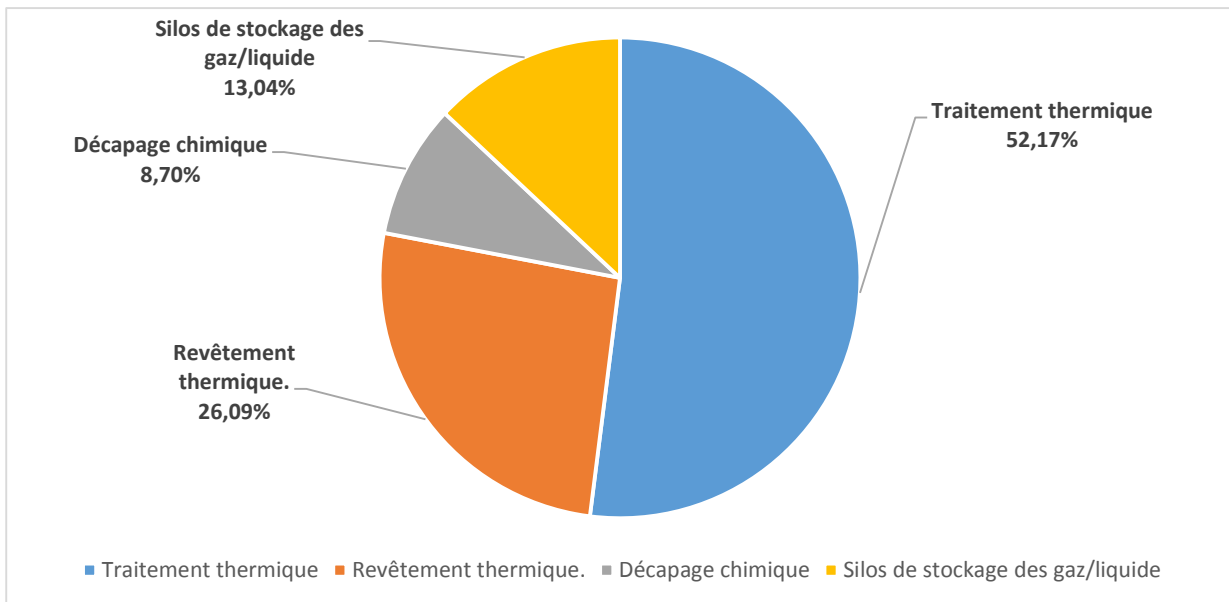


Figure 3-3: Répartition des procédés par rapport aux risques critiques.

- **Interprétation des résultats de l'APR**

Selon le résultat de la répartition des risques critiques présents dans chaque installation étudiée par l'APR. Nous remarquons que le traitement thermique (four sous-vide) représente plus de la moitié des risques critiques avec 52,17% et cela s'explique par rapport au combustible hydrogène utilisé ainsi que les températures très élevées atteintes par le four, le revêtement thermique (machine coating) représente 26,09% par rapport au fait que le combustible kérosène soit utilisé et la présence des flammes du revêtement, les silos de stockage des gaz sous pression représentent 13,04% des risques critiques qui pourraient être à l'origine d'une explosion, en dernier, le décapage chimique (système stripping) qui représente 8,70% des risques due à l'utilisation des très fortes acides.

Nous avons choisi de traiter l'installation qui présente le plus de risque critique dans le centre de maintenance (four sous-vide). Pour remédier à ces derniers nous avons décidé d'établir toute une étude complétée par d'autres méthodes dans le but d'analyser les risques critiques au niveau du four sous-vide.

3.3. Définition du système critique : Four sous-vide

Le four sous vide présent dans le centre de maintenance des turbines Algesco GE est issu d'un constructeur italien TAV Engineering, ce dernier permet un traitement thermique sous-vide efficace des pièces qui constituent une turbine à gaz, et ce, dans le but de changer les propriétés physique de la pièce d'une manière spécifique, ce traitement est réalisé dans une enceinte à basse pression chauffée par des résistances en graphite qui fonctionne avec de l'énergie électrique.

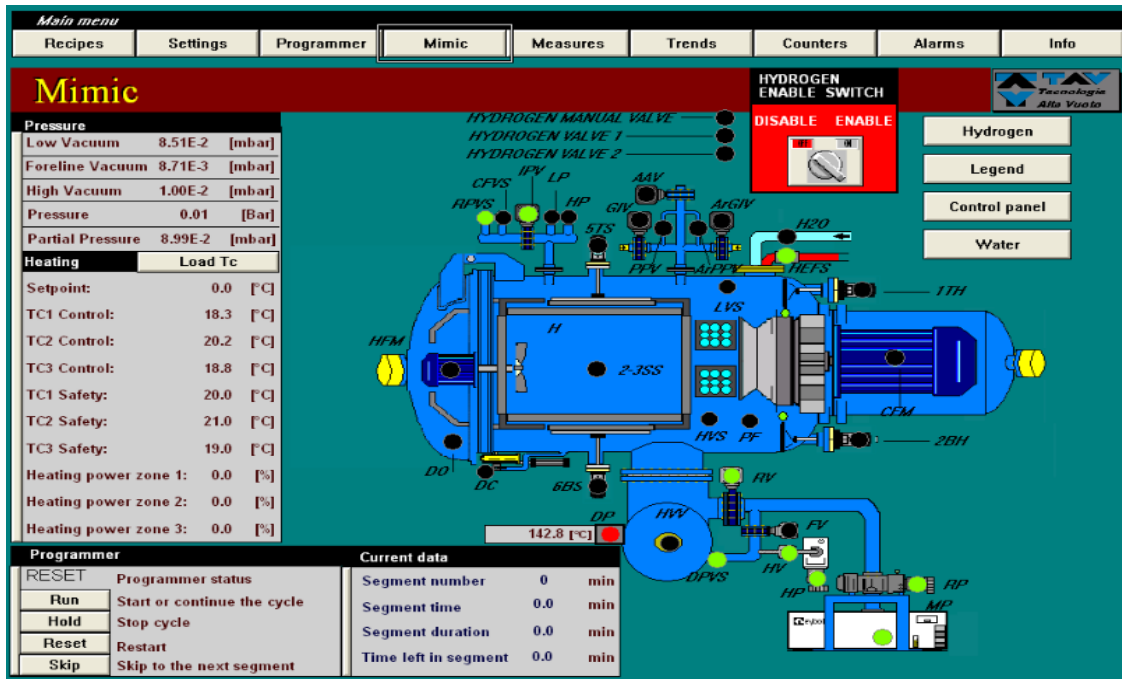


Figure 3-4 : Tableau de commande des composantes du four sous-vide.

Le four sous-vide est constitué d'une enceinte sous-vide qui sépare l'environnement extérieur de l'intérieur où se situe la zone chaude. Dans l'enceinte, l'air et les autres gaz produits par les pièces (vapeurs d'eau, CO, etc.) sont désorbés et évacués jusqu'à ce que le niveau de vide opérationnel soit atteint [12].

L'enceinte est constituée d'une structure cylindrique en acier au carbone, horizontale, à double parois refroidie par circulation d'eau. Des joints toriques d'étanchéité en élastomère spécial pour le vide et les hautes températures, assurent l'étanchéité. La paroi à l'intérieur du four est peinte avec une peinture endurante aux hautes températures qu'on utilise pour prévenir l'oxydation. Les matériaux, les soudures et la construction, répondent aux normes européennes.

La géométrie du four assure un accès aisé à la zone chaude et à l'inspection ou permet le fonctionnement avec différents composants à l'intérieur de la chambre de vide. L'enceinte est équipée d'un nombre de brides, étanches aux vides et refroidies pour la connexion des autres équipements (pompes, système de refroidissement, thermocouples, l'entrée/ la sortie gaz).

Le four sous-vide fonctionne grâce à un groupe de pompage muni de quatre pompes à vide, chacune d'elles augmente le vide dans l'enceinte. Le groupe de pompage comporte [12]:

- **Une pompe mécanique** : utilisée pour évacuer l'enceinte en commençant par la pression atmosphérique ;
- **Une pompe de Roots** : utilisée pour augmenter la vitesse de pompage de la pompe mécanique, ce qui permet également d'atteindre un meilleur niveau de vide final ;
- **Une pompe à diffusion** : permet au four d'atteindre son vide de fonctionnement et son vide limite. Pour son exploitation, la pompe est chauffée à 230°C. Son utilisation requiert d'atteindre un vide préalable à l'intérieur de l'enceinte. Ce n'est qu'après avoir rempli ces conditions de service que la pompe peut fonctionner. La pompe fonctionne à l'huile de silicone à haute température. Purger la pompe à diffusion alors qu'elle est encore chaude provoquerait son explosion ;
- **Une pompe de maintien** : utilisée pour maintenir la pompe à diffusion sous vide lorsqu'elle n'est pas utilisée pour faire le vide de l'enceinte.

Le circuit fermé de refroidissement du four sous-vide est représenté dans la figure 3-5 :

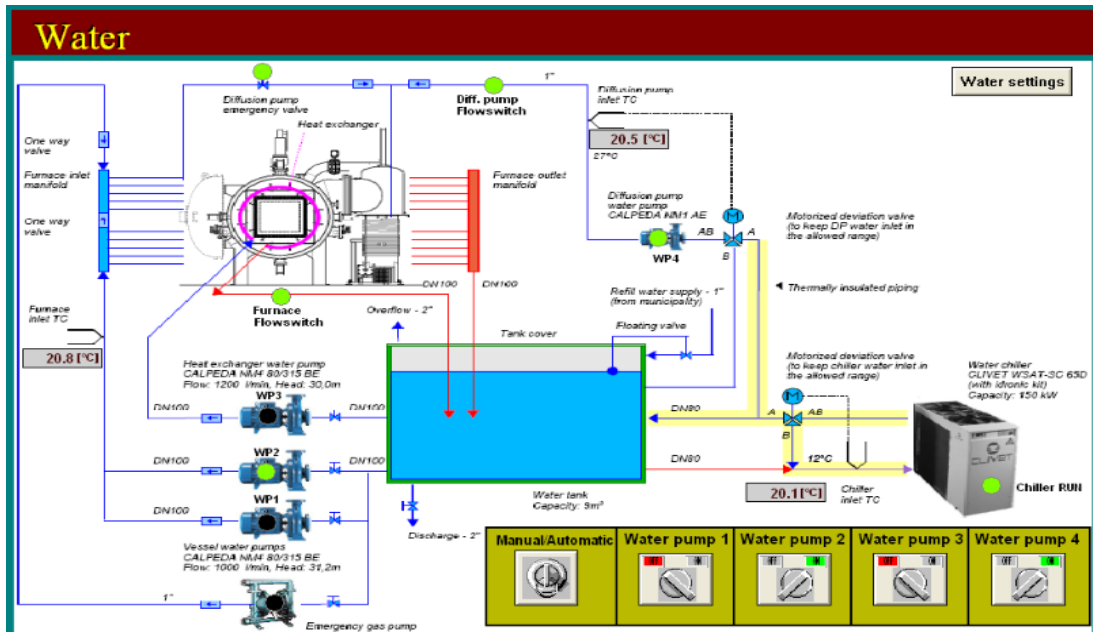


Figure 3-5: Système de refroidissement du four sous-vide.

- **Bac à eau**

Le système de refroidissement est équipé avec un bac à eau, qui aide à limiter les variations de température de l'eau de refroidissement. Le niveau de l'eau à l'intérieur du bac est toujours constant grâce à une vanne automatique.

- **Pompes à eau**

Le système de refroidissement est équipé de trois pompes à eau pour assurer une bonne circulation de l'eau dans le four et dans les refroidisseurs. Ce système de pompage a été pensé pour une distance entre le four et le système de refroidissement d'environ 10m. Des distances plus longues peuvent nécessiter de pompes avec plus de puissance.

En cas de coupure d'électricité une pompe pneumatique est mise en service pour assurer le refroidissement du four sous-vide.

- **Chiller de réfrigération**

Un refroidisseur d'eau offre un refroidissement correct de l'eau dans le circuit, pour enlever la puissance dissipée par l'enceinte pendant le chauffage et relâcher la charge pendant la phase de refroidissement.

Le four sous-vide assure le traitement thermique des pièces issu des turbines à gaz, ces dernières ont été confrontées à des contraintes thermiques lors de leur exploitation dans un terrain industriel. Par conséquent, cette situation de crainte pousse exploitant à faire passer la turbine dans

une phase de maintenance, Où elle sera soumise à un traitement thermique dans un four sous-vide permettant l'augmentation de la température dans une atmosphère de basse pression. Durant cette phase la pièce changera ses caractéristiques physiques de telle manière qu'elle sera apte à recevoir d'autres traitements (revêtement thermique, sablage, décapage chimique...).

3.4. Identification et estimation des facteurs de risque

L'APR ayant montré que l'installation présentant plus de risque critique étant le four sous-vide, l'appel à d'autres méthodes s'avère nécessaire pour compléter l'analyse.

3.4.1 Analyse des modes de défaillance leurs effets et leurs criticités (AMDEC)

Nous avons déployé une analyse des modes de défaillance leurs effets et leurs criticités au niveau des composants du four sous-vide dans le but de définir les modes de défaillance des équipements qui présentent des risques critiques.

Les échelles (probabilité, gravité) et la grille de criticité que nous avons utilisées lors du déploiement de l'AMDEC ont été validées avec l'équipe du département EHS. Ces tableaux sont donnés dans l'annexe 11.

3.4.1.1 Résultat de l'AMDEC

Dans notre cas, nous avons appliqué l'AMDEC pour les risques critiques identifiés au préalable dans l'APR pour le four sous-vide, et ce, dans le but de déterminer les modes de défaillance des équipements susceptibles d'être à l'origine de l'apparition de ces événements non souhaités.

Le tableau 3-11 nous donne le pourcentage de chaque niveau de risque présent dans le four sous-vide. Les résultats de l'AMDEC sont donnés dans l'annexe 10 :

Tableau 3-5: Pourcentage de chaque niveau de risque

	Nombres des risques	Pourcentages des risques %
Risque totale	12	100
Risque acceptable	5	41,67
Risque acceptable sous condition	7	58,33
Risque inacceptable	0	0

Le cercle de pourcentage, qui illustre le résultat obtenu, est représenté dans la figure 3-6 :

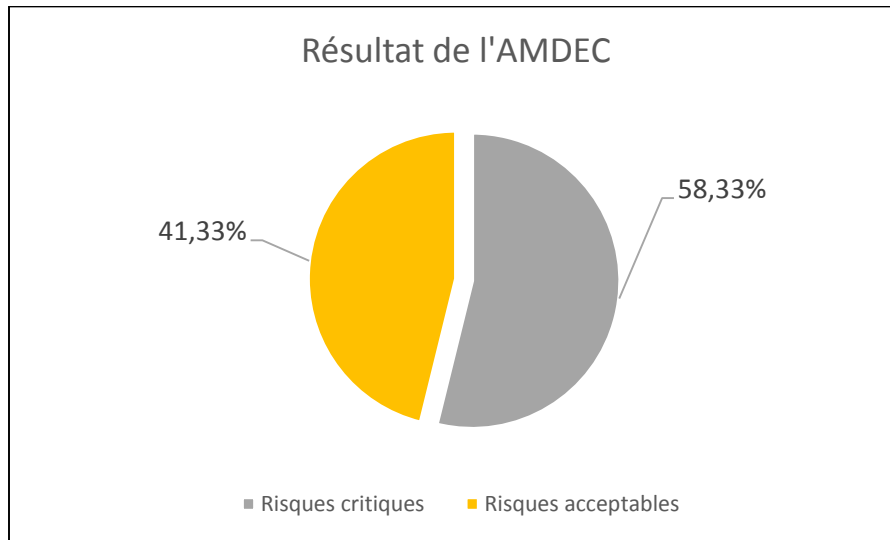


Figure 3-6: Résultat de l'AMDEC.

- **Interprétation des résultats de l'AMDEC**

D'une part, L'AMDEC compte plus de 50% des risques acceptable sous contrôle, c'est-à-dire qu'il est conseillé de mettre en place des mesures de contrôle pour éviter l'apparition de ces modes de défaillances durant le fonctionnement du four sous-vide. D'autre part, 41,33% des risques de cette installation sont classés dans la tranche acceptable. Cependant des actions de maintien devraient être programmées.

Les modes de défaillance définies par l'AMDEC sont :

- Ouverture intempestive de la soupape d'admission d'air ;
- Ouverture intempestive de la vanne manuelle d'échappement ;
- Fuite interne de l'huile de silicone dans la pompe de diffusion ;
- Fuite externe de l'huile de silicone dans la pompe de diffusion ;
- Défaillance en position ouverte des soupapes d'admission de gaz ;
- Arrêt intempestive du refroidisseur ;
- Arrêt intempestive de la pompe de diffusion.

Ces derniers sont utilisés dans la construction des AdD.

3.4.2 Arbre de défaillance (AdD)

Nous utilisons les modes de défaillance identifiées dans l'AMDEC pour l'élaboration de l'arbre de défaillance pour chaque événement non souhaité retenu avec une plus grande criticité.

Les évènements non souhaités auxquels nous élaborons un arbre de défaillance sont :

- Surpression ;
- Surchauffe ;
- Mélange O₂+H₂ ;
- Fuite de l'huile de silicone.

Les combinaisons de cause qui pourraient être à l'origine de chaque évènement redouté sont schématisées dans les Add représentées dans les figures 3-7 à 3-10 :

La probabilité de défaillance est calculée pour chaque évènement non souhaité dans le but de faire apparaître les évènements les plus probables.

Les bases de données OREDA sont exploitées pour les probabilités de défaillance des éléments de base de chaque arbre, ces probabilités sont utilisées pour le calcul de la probabilité de l'évènement non souhaité. Le tableau 3-12 contient des probabilités de défaillance de différents équipements [13]:

Tableau 3-6: Probabilités de défaillance des équipements

Equipements	Mode de défaillances	Probabilités de défaillance
Pompe	Fuite interne	71.5×10^{-5}
Pompe	Panne	4.01×10^{-3}
Thermocouple	Dysfonctionnement	9.2×10^{-5}
Régulateur Température	Arrêt/défaillance	54.7×10^{-7}
Canalisation	Fuite	6.8×10^{-5}
Canalisation	Rupture	1.0×10^{-5}
Réservoir	Corrosion	3.52×10^{-6}
Réservoir	Rupture	5×10^{-6}
Régulateur	Dysfonctionnement	1.0×10^{-1}
Soupape	Ouverture intempestive	1.0×10^{-2}
Soupape	Repture mécanique	1.0×10^{-2}
Système de commande	Défaillance	1.0×10^{-1}
Vanne manuelle	Blocage	8.0×10^{-8}
Vanne	Rupture/défaillance	62×10^{-2}
Soupape à eau	Arrêt	2.0×10^{-6}
Système de refroidissement	Disfonctionnement	1.0×10^{-1}
Electrovanne	Défaillance	1.0×10^{-2}

Les probabilités obtenues pour les autres causes sont rassemblées dans le tableau 3-13 [14]:

Tableau 3-7: Probabilités de défaillance d'autres causes.

Causes	Probabilités
Erreur humaine	1.0×10^{-2}
Erreur opératoire	1.0×10^{-3}
Erreur procédure	1.0×10^{-3}
Sabotage	1.6×10^{-6}
Choc	20.5×10^{-5}
Usure des matériaux	8.0×10^{-8}
Défaillance maintenance	13.5×10^{-5}
Altération de la soudure	6.28×10^{-5}

Nous allons calculer les probabilités d'occurrence des évènements non souhaités sélectionnés dans l'APR. Les AdD sont représentés dans les figures 3-7 à 3-10.

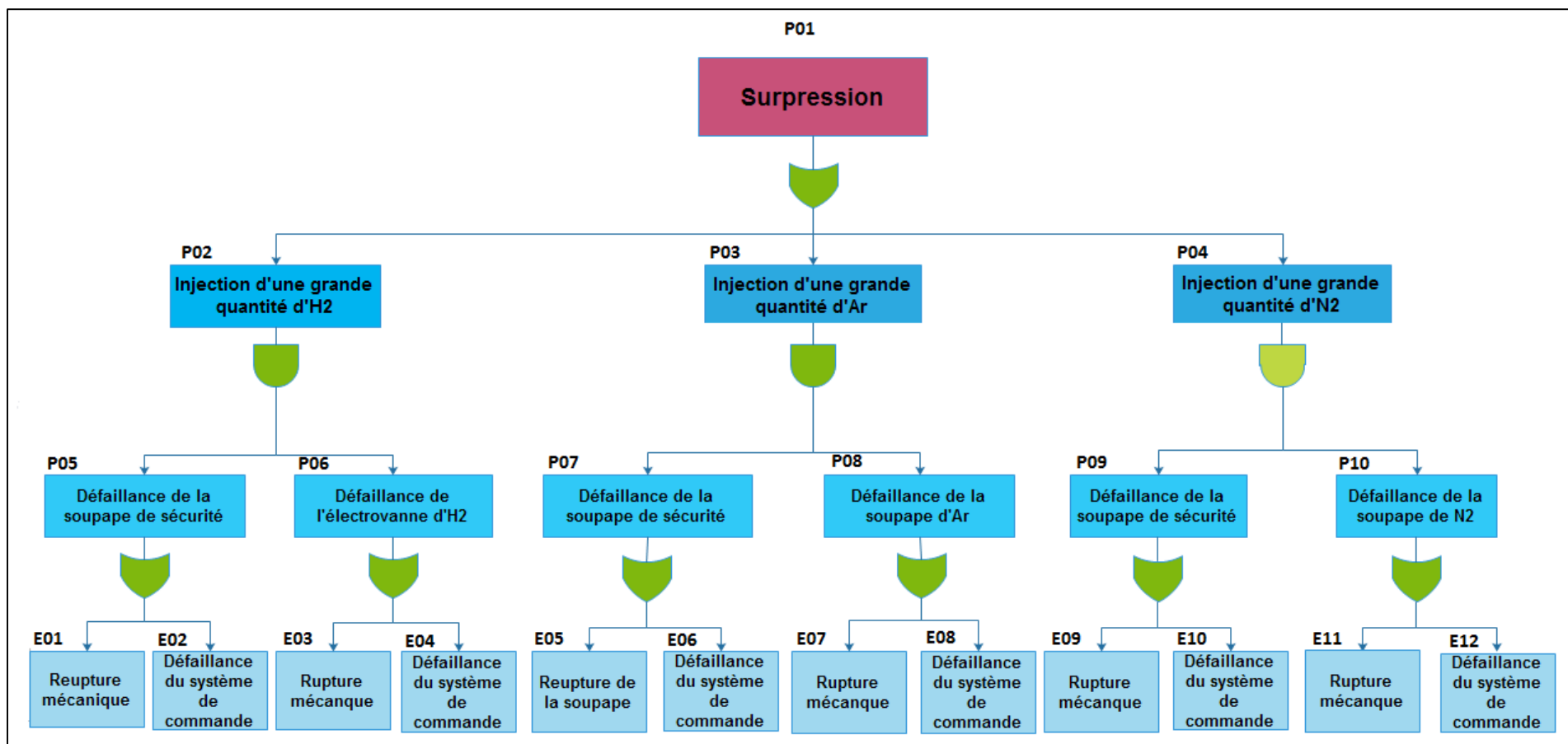


Figure 3-7 : Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Surpression ».

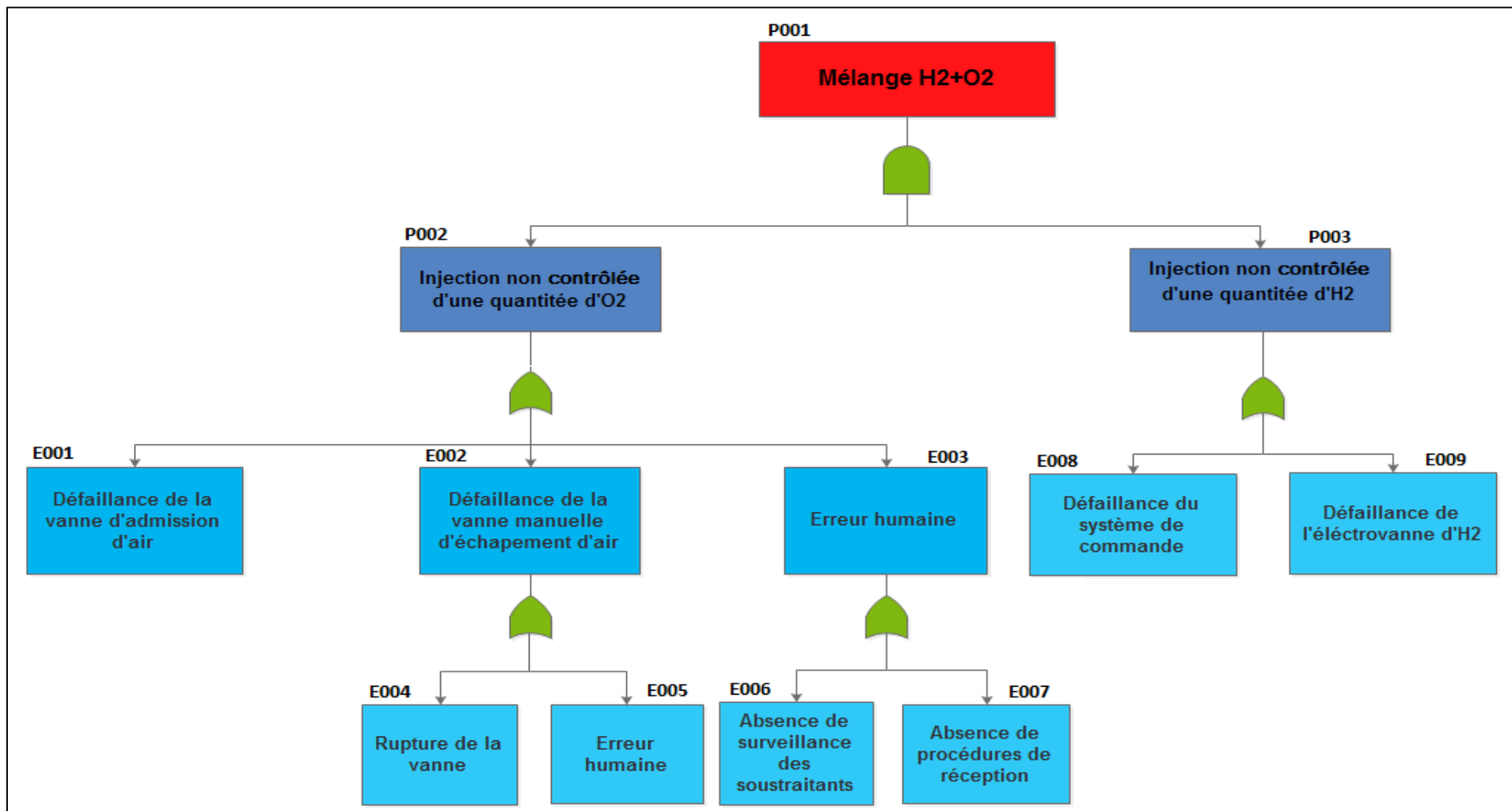


Figure 3-8: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Mélange O2 + H2 ».

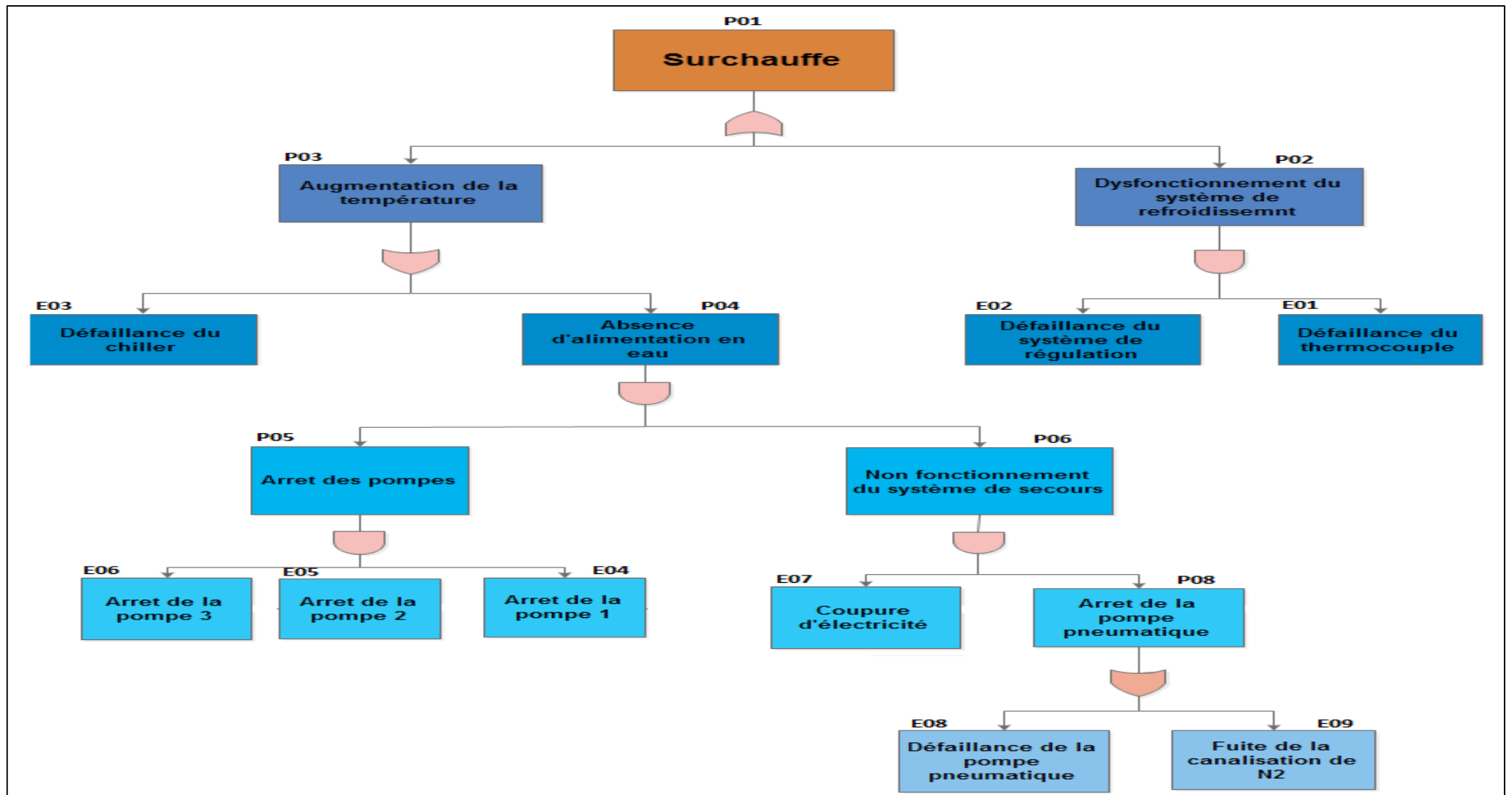


Figure 3-9: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Surchauffe ».

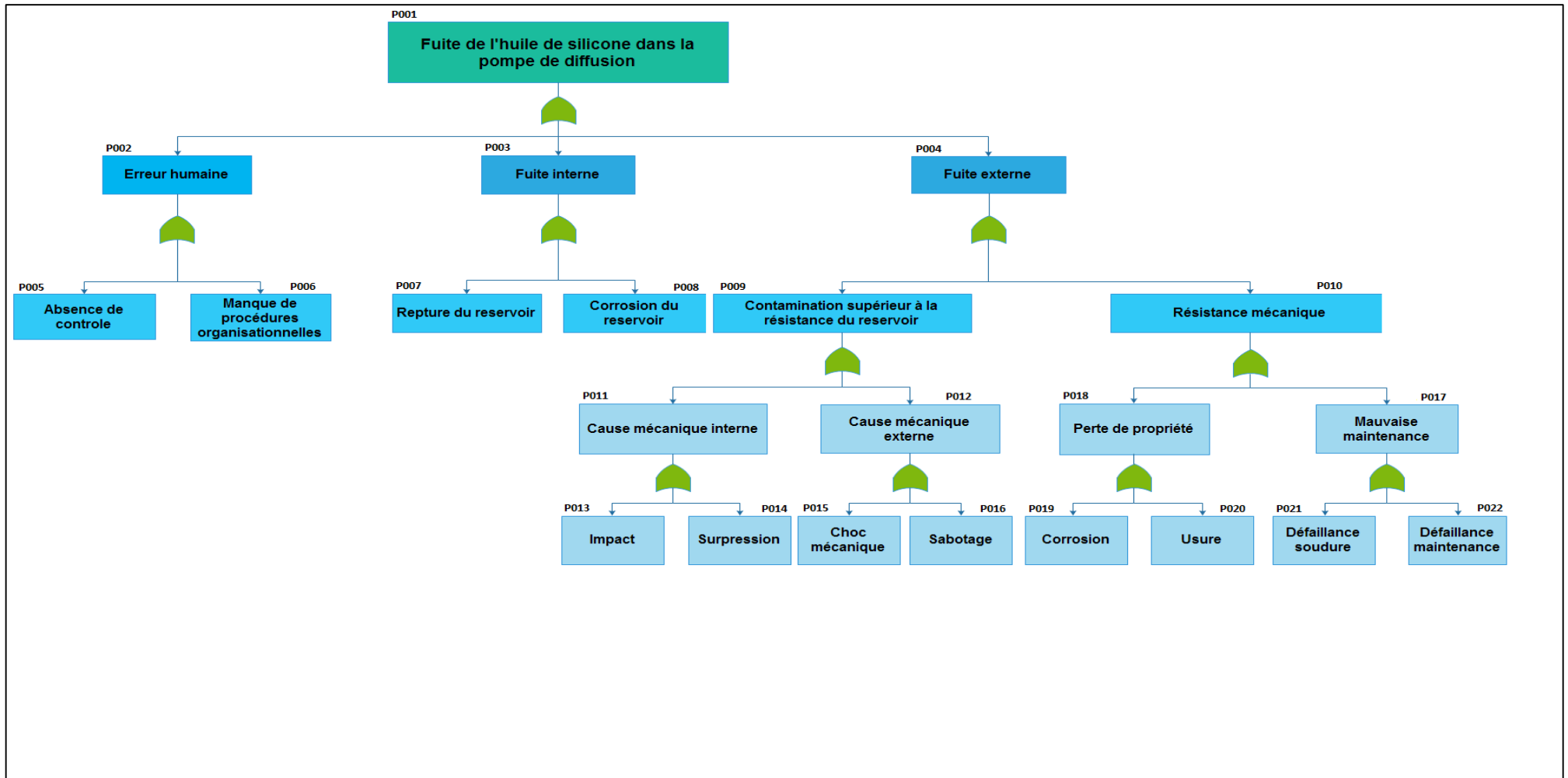


Figure 3-10: Arbre de défaillance d'évènement non souhaité « Fuite de l'huile de silicone ».

Les probabilités de défaillance des événements de base de l'AdD de la surpression sont données ci-dessous :

On pose A= Rupture mécanique

$$A=E01=E03=E09=E05=E07=E11=1.0 \times 10^{-2}$$

On pose B= Défaillance du système de commande

$$B=E02=E04=E06=E08=E10=E12= 1.0 \times 10^{-1}$$

✓ **Calcul de probabilité d'occurrence de la surpression**

On a: $P01=P02+P03+P04$; $P02=P05 \times P06$; $P03=P07 \times P08$; $P04=P09 \times P10$

Et: $P05=P06=P07=P08=P09=P10=A+B$

On obtient donc:

$$\begin{aligned} P01 &= (A+B) \times (A+B) + (A+B) \times (A+B) + (A+B) \times (A+B) \\ &= A+B+AB+ A+B+AB+ A+B+AB \end{aligned}$$

Donc: $P01 = A+B$;

Donc: $P01 = 0.1+0.01$

Donc : $P01 =0.11$

Les probabilités de défaillance des événements de base de l'AdD du mélange O₂+H₂ sont données dans le tableau 3-14 :

Tableau 3-8: Données de l'AdD du mélange O₂+H₂

Codes	Causes	Probabilités
E001	Défaillance de la vanne d'admission d'air	6.2×10^{-1}
E004	Rupture de la vanne	6.2×10^{-1}
E005	Erreur humaine	10^{-2}
E006	Absence de surveillance des sous-traitants	5×10^{-3}
E007	Absence de procédure de réception	5×10^{-3}
E008	Défaillance de l'électrovanne d'hydrogène	10^{-2}
E009	Défaillance du système de commande	10^{-1}

✓ **Calcul de probabilité d'occurrence du mélange O₂+H₂**

$E003=E007+E006$; $E002=E005+E004$; $P002=E001+E002+E003$; $P002=E001+E007+E006+E005+E004$; $P003=E008+E009$; $P001=P002 \times P003 = (E001+E007+E006+E005+E004) \times (E008+E009)$

On a : $E001=E004$

On Obtient : $P001= (2 E004+E005+E006+E007) \times (E008+E009)$; $P001 = 0.1386$

Les probabilités de défaillance des événements de base de l'AdD de la surchauffe sont données dans le tableau 3-15 :

Tableau 3-9: Données de l'AdD de la surchauffe

Codes	Causes	Probabilités
E01	Défaillance du thermocouple	9.2×10^{-5}
E02	Défaillance du régulateur	54.7×10^{-5}
E03	Défaillance du refroidisseur	1.0×10^{-1}
E04	Défaillance de la pompe 1	401×10^{-5}
E05	Défaillance de la pompe 2	401×10^{-5}
E06	Défaillance de la pompe 3	401×10^{-5}
E07	Coupure d'électricité	1.0×10^{-6}
E08	Défaillance pompe de secours	401×10^{-5}
E09	Fuite de la canalisation d'azote	6.8×10^{-5}

✓ **Calcul de probabilité d'occurrence de la surchauffe**

On a: $P01= P02+P03$; $P02= E01+E02$; $P03= E03+P04$; $P04=P05+P06$; $P05= E04 \times E05 \times E06$; $P06= E07 \times P08$; $P08=E08+E09$

Donc : $P01=E01+E02+E03+E04 \times E05 \times E06+E07 \times (E08+E09)$; $P01=0.1$

Les probabilités de défaillance des événements de base de l'AdD de l'huile de silicone sont données dans le tableau 3-16 :

Tableau 3-10 : Données de l'AdD de la fuite de l'huile de silicone

Codes	Causes	Probabilités
P005	Absence de contrôle	1.0×10^{-3}
P006	Erreur de procédure	1.0×10^{-3}
P007	Rupture du réservoir	5.0×10^{-6}
P008	Corrosion du réservoir	3.52×10^{-5}
P013	Impact	0
P014	Surpression	4.7×10^{-5}
P015	Choc mécanique	20.5×10^{-5}
P016	Sabotage	1.6×10^{-5}
P019	Corrosion	3.52×10^{-5}
P020	Usure	8.0×10^{-8}
P021	Altération de la soudure	5.2×10^{-5}
P022	Défaillance maintenance	33.5×10^{-5}

✓ **Calcul de probabilité d'occurrence de la fuite de l'huile de silicone**

$P001 = P002 + P003 + P004$; $P002 = P005 + P006$; $P003 = P007 + P008$; $P004 = P009 + P010$;
 $P009 = P011 + P012$; $P010 = P017 + P018$; $P011 = P013 + P014$; $P012 = P015 + P016$;
 $P018 = P019 + P020$; $P017 = P021 + P022$

Donc : $P001 = P005 + P006 + P007 + P008 + P013 + P014 + P015 + P016 + P019 + P020 + P021 + P022$

Donc : $P001 = 0.00273048 = 2.73 \times 10^{-3}$

- **Interprétation des résultats (AdD)**

D'après le résultat obtenu en terme de probabilités d'occurrence pour chaque événement non souhaité, nous concluons que l'évènement le plus probable est le mélange $H_2 + O_2$ puisqu'il correspond à la plus grande probabilité. La suppression et la surchauffe ont des probabilités très proches à celle du mélange par rapport à la probabilité de la fuite de l'huile qui est faible. C'est pour cette raison que nous nous intéressons plus au mélange $H_2 + O_2$, à la suppression, à la surchauffe dans la suite de l'étude.

3.4.3 Arbre d'évènement (AdE)

Un arbre d'évènement est élaboré pour les événements non souhaités les plus probables. Après le calcul des probabilités d'apparition des ENS par l'AdD. La méthode AdE est appliquée aux événements suivants (par ordre décroissant de leurs probabilités):

- Mélange O₂ + H₂ ;
- Surpression ;
- Surchauffe.

L'AdE permet de montrer la succession d'événements secondaires qui peuvent mener à un phénomène dangereux. Cette méthode permet de calculer la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux.

Les probabilités de défaillance des équipements de sécurité ont été déterminées à partir de la base de données OREDA leurs valeurs sont données dans les tableaux 3-17 :

Tableau 3-11: Probabilités de défaillance des équipements de sécurité

Codes	Équipements	Probabilités de défaillance
P001	Alarme	$1,45 \times 10^{-1}$
P002	Soupape de sécurité	0.01
P003	Vanne extérieur de sécurité	0.01
P004	Arrêt d'urgence	$7,9 \times 10^{-6}$
P005	Ouverture de la vanne d'échappement d'air	8.0×10^{-8}
P006	Système de refroidissement	1.0×10^{-1}

Les figures de 3-11 à 3-13 représentent l'AdE des ENS retenu pour cette méthode :

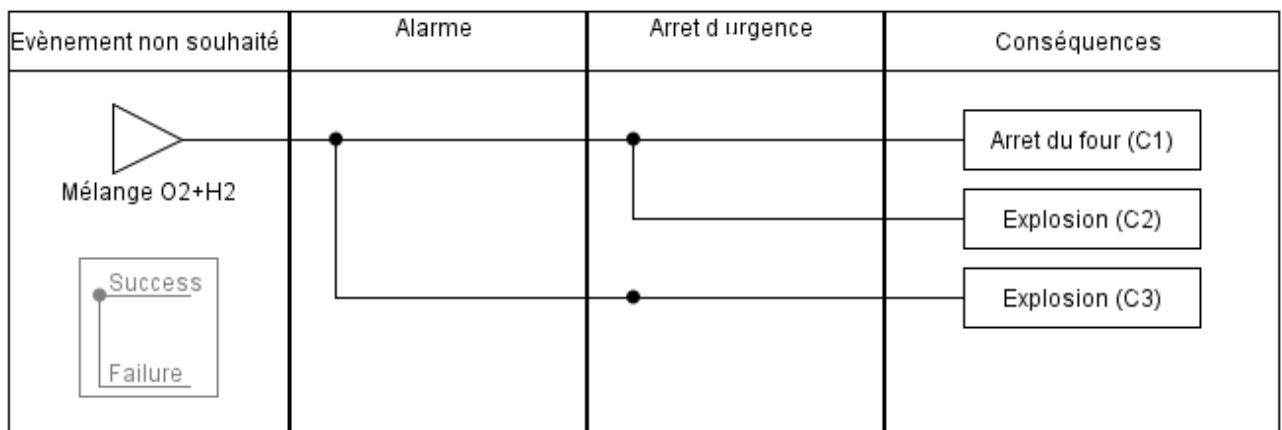


Figure 3-11: AdE du mélange O₂ + H₂.

Le calcul de la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux pour le mélange O₂ + H₂ :

$$P(C3) = P_{\text{Mélange}} \times P001 \times (1 - P004) = 0,02$$

$$P(C2) = P_{\text{Mélange}} \times (1 - P001) \times P004 = 8,4 \times 10^{-5}$$

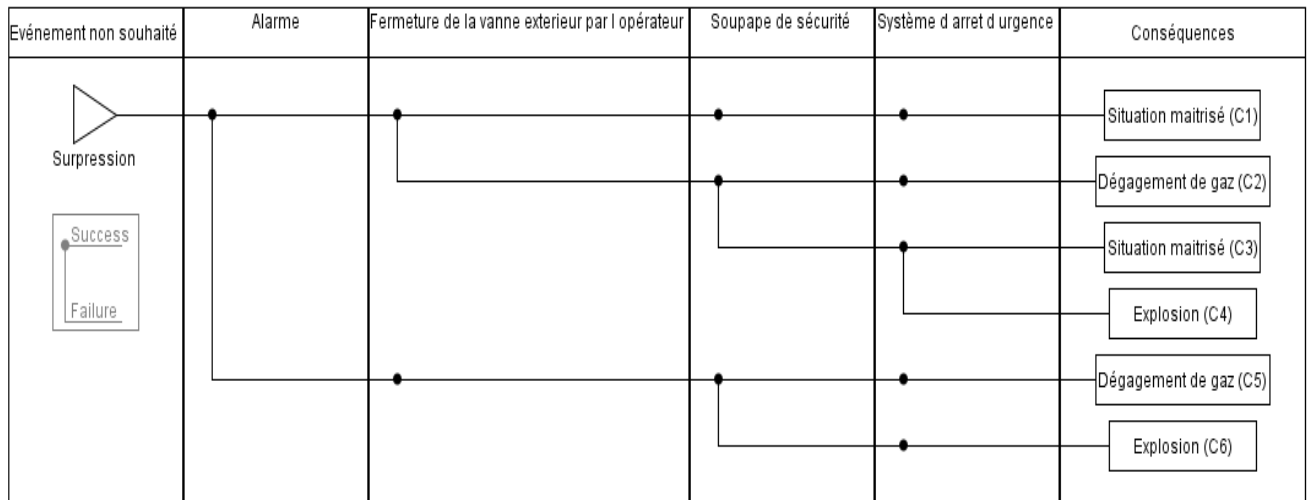


Figure 3-12: AdE de la surpression.

Le calcul de la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux pour la surchauffe :

$$P(C6) = P_{\text{Surpression}} \times P001 \times (1 - P003) \times P002 \times (1 - P004) = 1,56 \times 10^{-4}$$

$$P(C4) = P_{\text{Surpression}} \times (1 - P001) \times P003 \times P002 \times P004 = 7,43 \times 10^{-11}$$

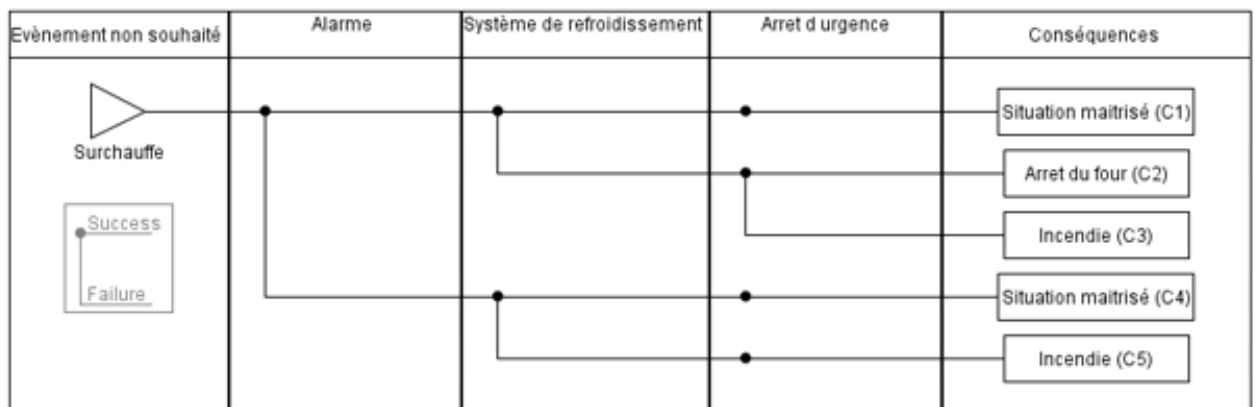


Figure 3-13: AdE de surchauffe.

Le calcul de la probabilité d'apparition des phénomènes dangereux pour la surchauffe :

$$P(C5) = P_{\text{Surchauffe}} \times P001 \times P006 \times (1 - P004) = 1,44 \times 10^{-3}$$

$$P(C3) = P_{\text{Surchauffe}} \times (1 - P001) \times P006 \times P004 = 6,7 \times 10^{-8}$$

Après calcul des probabilités d'apparition des phénomènes dangereux de chaque évènement non souhaité retenu pour la méthode ADE, Ensuite, nous avons obtenu le

phénomène d'explosion le plus probable est dû au mélange $O_2 + H_2$. C'est sur ce phénomène dangereux que sera basée la suite de l'étude.

3.4.4 Définition des scénarios plausible au niveau du four sous-vide : Nœud papillon

À l'aide de la méthode nœud papillon, nous schématisons les trois scénarios relatifs aux évènements non souhaités sur lesquels un arbre de défaillance et un arbre d'évènement sont établis. Il faut juste à prendre en compte les barrières de prévention (coté arbre de défaillance) et celle de protection (coté arbre d'évènement) dans le nœud papillon.

Nous élaborons le nœud papillon propre à GE. Ce dernier a un aspect qualitatif car pour ce type de méthode, nous recensons en côté gauche toutes les causes susceptibles de provoquer l'évènement non souhaité, et en coté droite toutes les conséquences qui peuvent découler après l'apparition de l'évènement. Cette méthode permet de mettre en avant toutes les barrières de sécurité (prévention et protection) déterminées par la matrice de défense (voir SOD *Heat Map*). Le seul point faible de cette méthode est qu'elle ne prenne pas en compte l'aspect quantitatif. Aussi l'ajout de l'aspect quantitatif à ce nœud papillon s'est avéré nécessaire.

En parallèle un nœud papillon est établi suivant l'enchaînement logique décrit dans la littérature qui permet de faire apparaitre le calcul des probabilités. Nous procédons donc de cette manière dans le but de compléter la méthode nœud papillon adaptée par l'entreprise GE.

Les figures 3-12 à 3-14 présentent la schématisation du scénario suivant la méthode Nœud Papillon de GE pour le mélange O_2+H_2 , la surpression et la surchauffe :

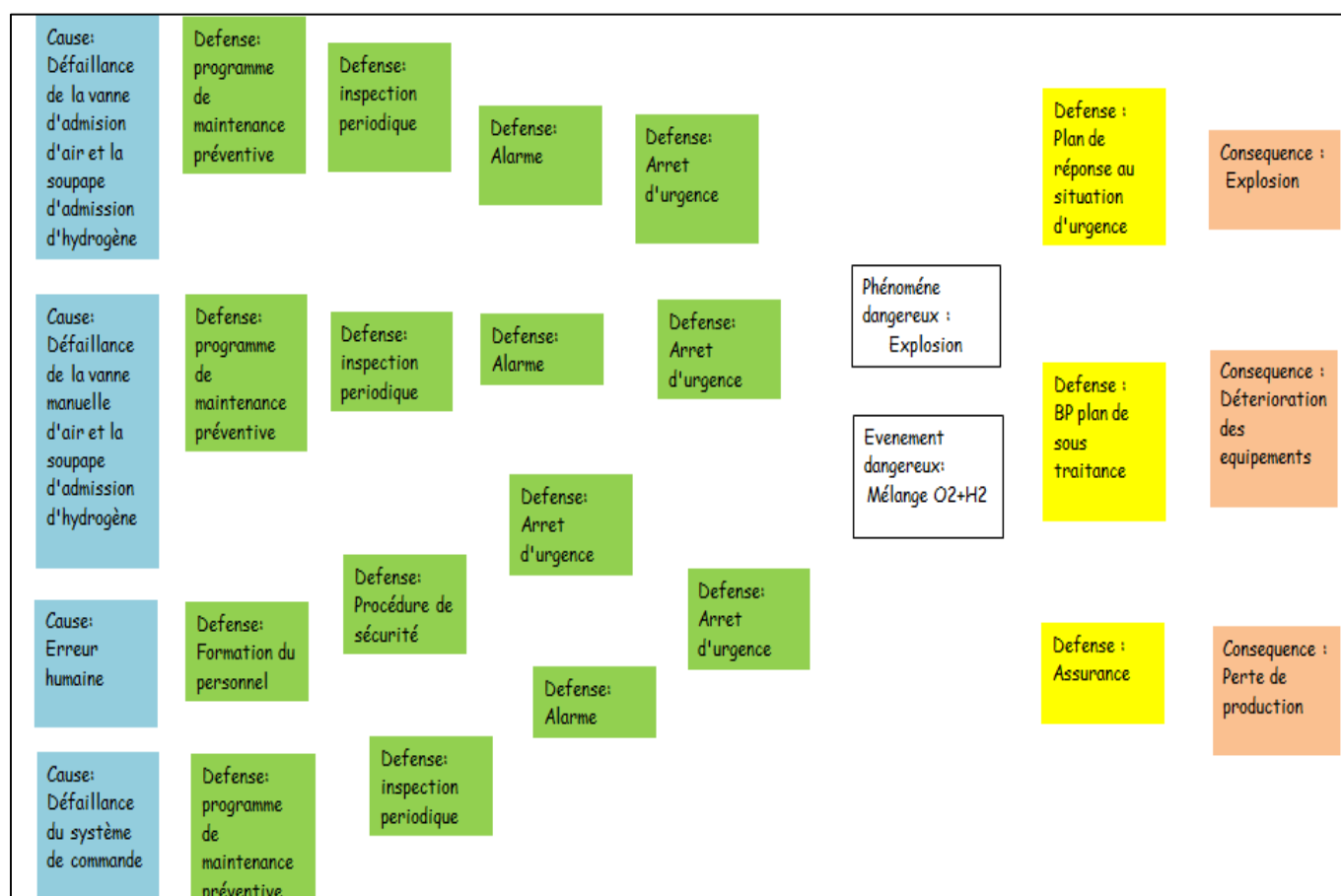


Figure 3-14: Nœud papillon pour l'évènement mélange $O_2 + H_2$.

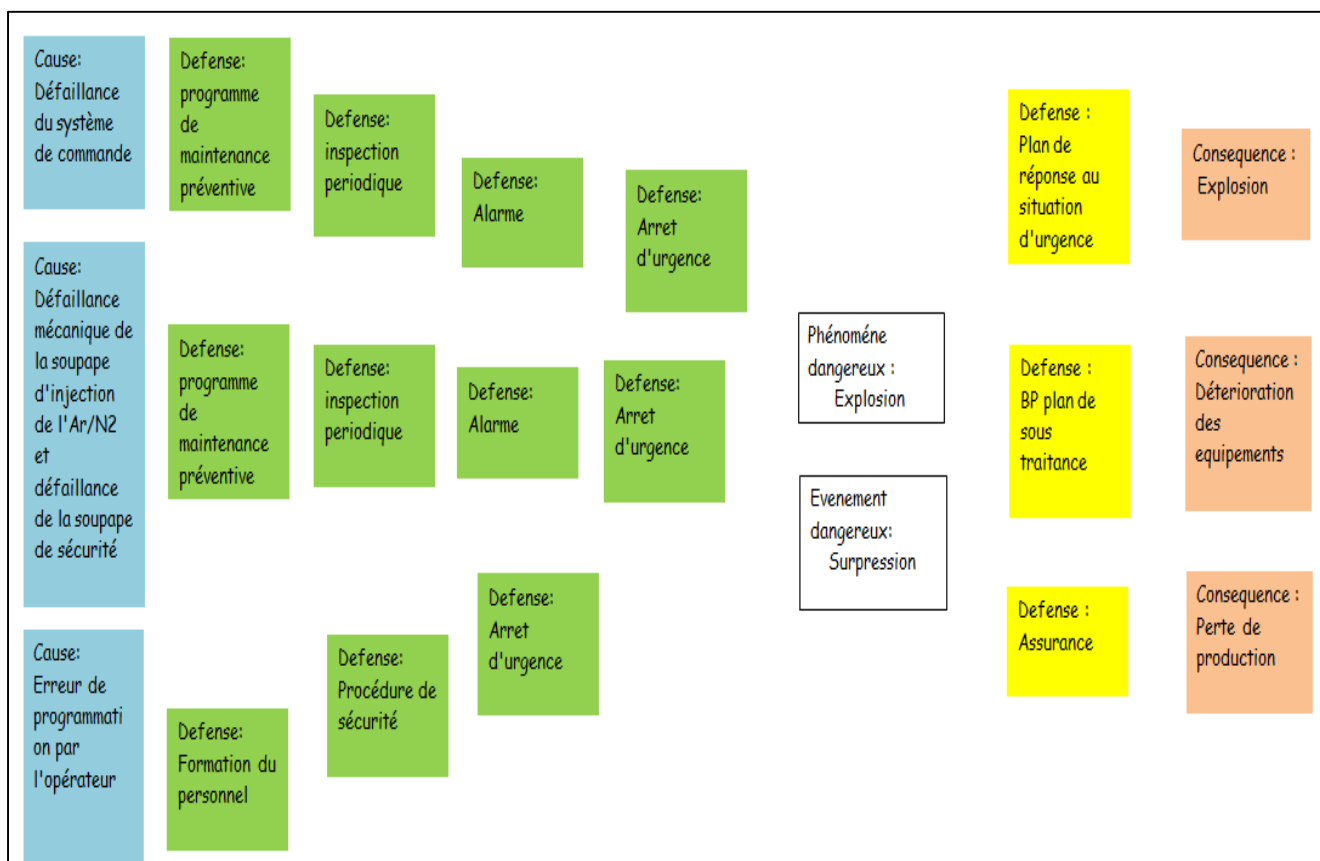


Figure 3-15: Nœud papillon pour l'évènement de surpression.

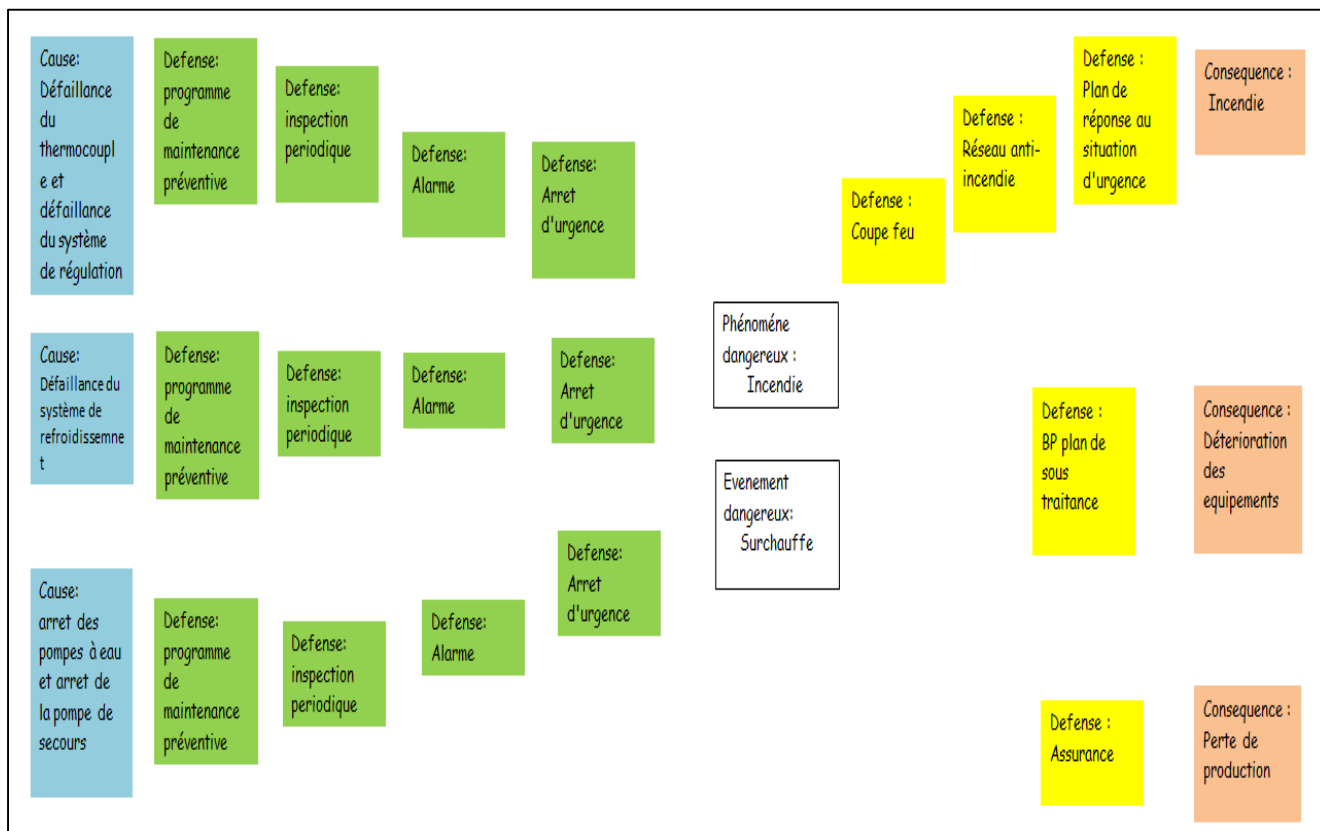


Figure 3-16 : Nœud papillon pour l'évènement de surchauffe.

Nous remarquons que les nœuds papillons suivant la méthode GE sont moins détaillés et ils donnent moins de précision sur l'enchaînement logique de l'apparition de l'ENS et des phénomènes dangereux. Pour cela, nous allons donc compléter cette méthode par un nœud papillon conventionnel afin de faire apparaître l'enchaînement logique des causes et des événements. La schématisation des scénarios dans les nœuds papillons est représentée dans les figures 3-17 à 3-19 :

1. Mélange de O₂ + H₂

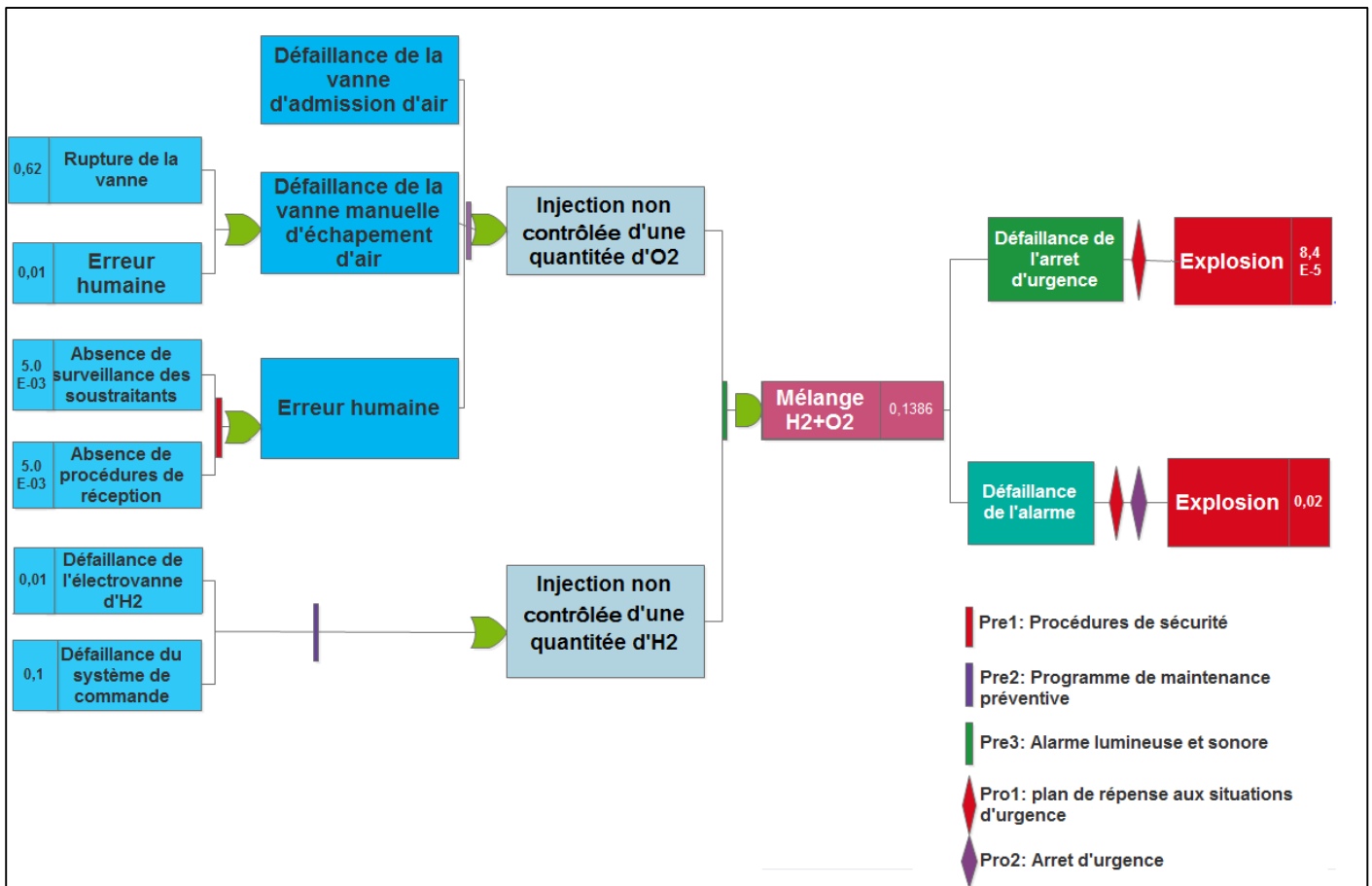


Figure 3-17 : Nœud papillon pour l'évènement de mélange de O₂+H₂.

2. Surpression

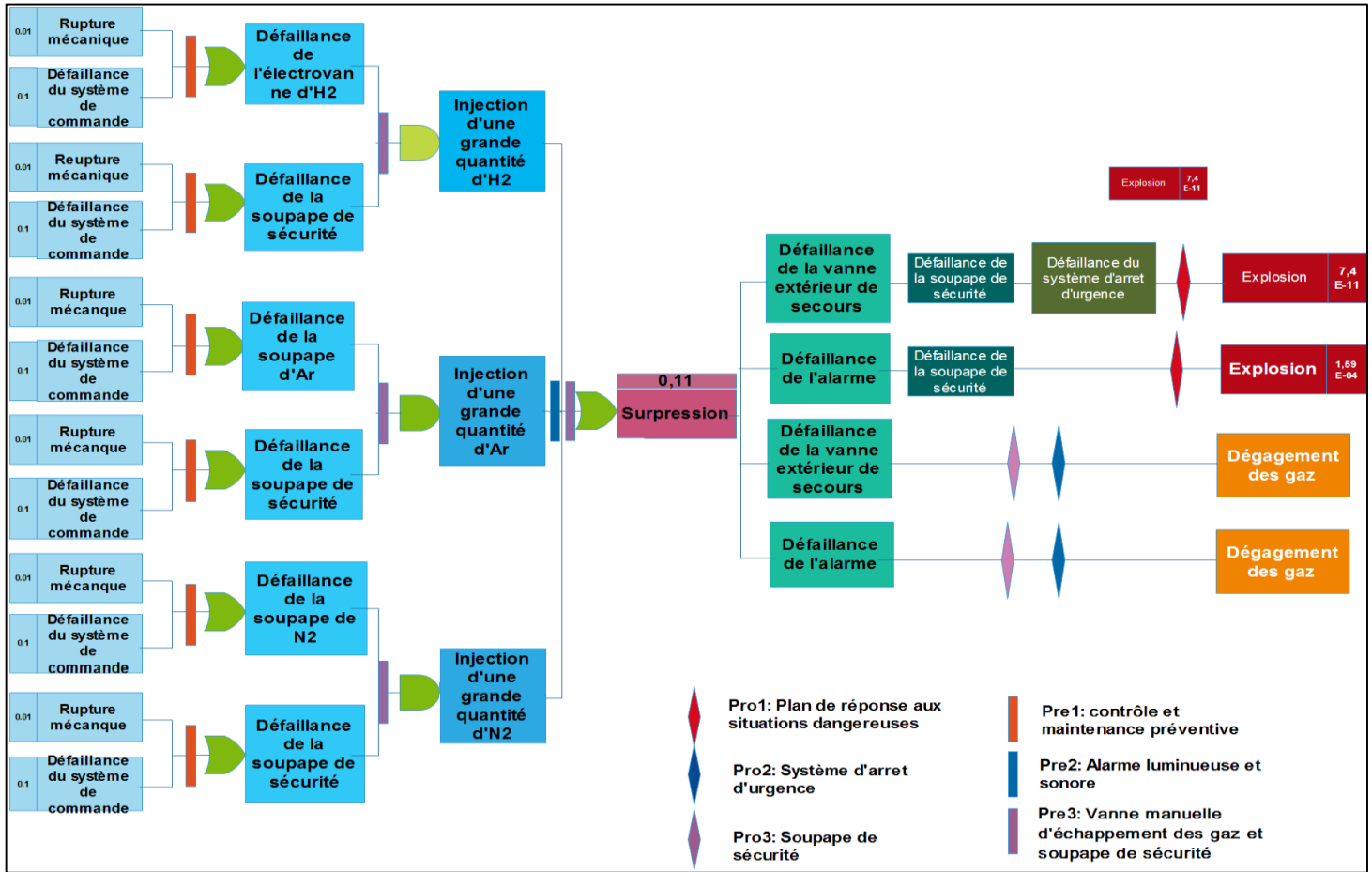


Figure 3-18 : Nœud papillon pour l'évènement de surpression.

3. Surchauffe

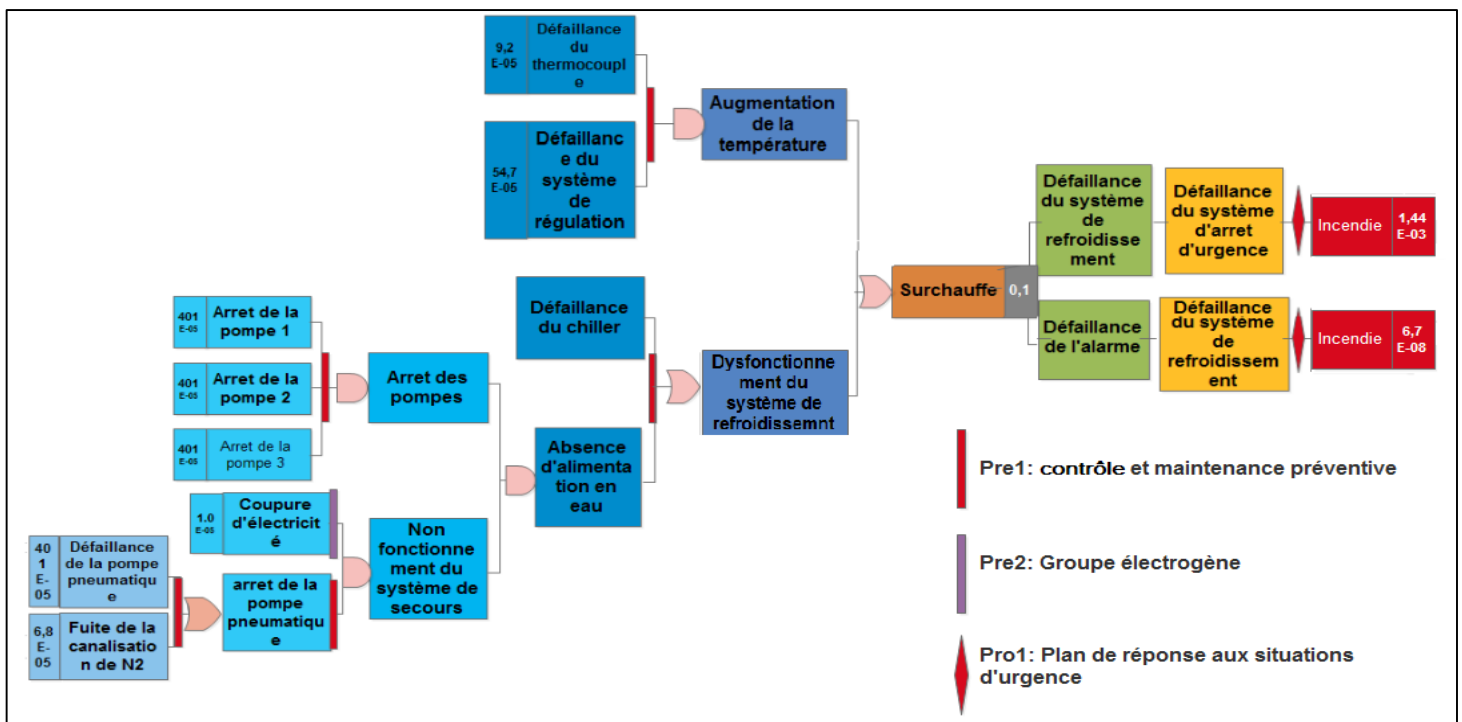


Figure 3-19 : Nœud papillon pour l'évènement de surchauffe.

Cette dernière méthode nous a permis de comprendre clairement l'enchaînement possible pour avoir un phénomène dangereux avec les mesures de sécurité (prévention et protection) existantes.

Les principaux résultats obtenus dans ce chapitre sont :

- La schématisation des scénarios par la logique arborescente ;
- L'évènement non souhaité le plus probable : mélange $O_2 + H_2$;
- Le phénomène dangereux le plus probable : Explosion ;

Ce résultat est insuffisant pour estimer notre risque car il nous fournit seulement les fréquences sans aucune information sur les gravités. Le prochain chapitre sera consacré à l'étude de la gravité du phénomène le plus probable : explosion.

Chapitre 4 : modélisation des effets et évaluation des risques

Les effets d'un phénomène dangereux se propagent sur le long de l'étendue en détruisant tout ce qui se trouve sur le chemin. Les conséquences de ces effets sont parfois destructives pour les structures et mortelles pour les personnes. Pour cela il est primordial de connaître les effets qui pourraient être émis par un phénomène dangereux généré par une installation afin de mettre en place des mesures adéquates pour s'en prévenir.

Dans le présent chapitre nous allons utiliser deux logiciels PHAST et MATLAB respectivement l'un pour modéliser les effets du phénomène dangereux retenu dans le chapitre précédent et l'autre pour déterminer un modèle mathématique. Ensuite nous allons évaluer les risques critiques déjà identifié avec une grille *Heat Map* propre à GE.

4.1 Sélection du phénomène dangereux : Explosion

Après le calcul des probabilités d'occurrences des événements non souhaités. Nous avons retenu le mélange explosif H_2+O_2 comme étant l'évènement le plus probable qui peut se produire dans le four sous-vide. Cette situation critique pourrait donner lieu à une conséquence majeure telle que l'explosion dans notre cas. Ceci nous a amené à effectuer une simulation des effets de surpression afin d'estimer l'étendue de cette explosion sur un périmètre bien défini.

4.1.1. Description du phénomène « Explosion »

Une explosion de gaz n'est schématiquement que la combustion d'un pré-mélange gazeux. La propagation de cette zone de réaction, plus communément appelée «flamme», va transformer l'énergie chimique du mélange en chaleur et en énergie mécanique (pression) [15].

Les explosions accidentelles de gaz à l'air libre, ou VCE (Vapor Cloud Explosion), constituent un des événements les plus redoutés, dès lors qu'est considérée la sécurité des activités associées aux gaz inflammables. Ce type d'accident comprend généralement la succession d'étapes données sur la figure 4-1:

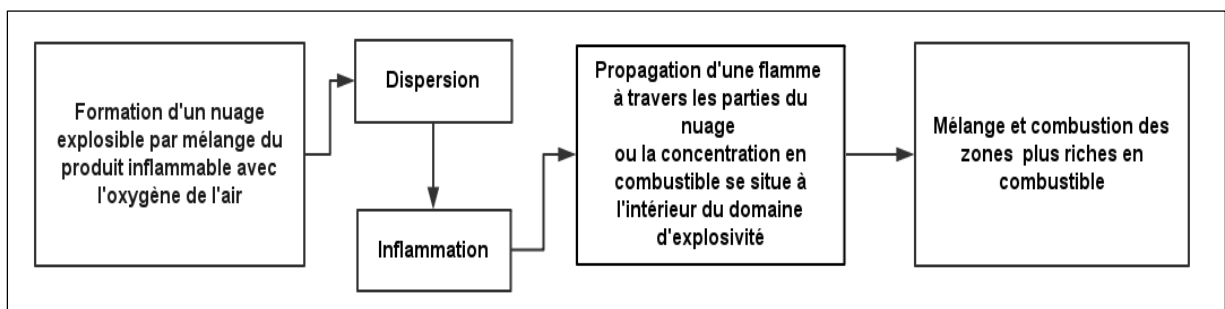


Figure 4-1 : Principales étapes dans le déroulement d'une explosion de gaz.

Les surpressions atteintes vont dépendre à la fois des caractéristiques du mélange, mais aussi de l'environnement physique dans lequel la flamme se propage. Le mécanisme est représenté par la figure 4-2. Cette dernière met en évidence les principaux paramètres qui vont influencer sur la violence de l'explosion :

- Les caractéristiques du mélange inflammable ;
- Les caractéristiques de la source d'allumage ;
- Les caractéristiques de la géométrie (encombrement et confinement).

Elle met aussi en évidence deux modes distincts (mais pas forcément exclusifs) de génération de pression. L'augmentation de pression par confinement des gaz se produit lorsque l'expansion des gaz brûlés est physiquement bloquée (murs, parois, etc.). Les gaz brûlés ont une température significativement plus élevée que le pré-mélange d'origine, et donc un volume spécifique plus important [15].

Dans le cas d'un volume entièrement confiné (supposé résistant), les gaz brûlés ne disposent pas du volume nécessaire à leur expansion ce qui augmente mécaniquement le niveau de surpression. Ce mode d'augmentation de pression ne nécessite pas de vitesse de flamme élevée.

La figure 4-2 illustre les étapes du mécanisme de l'explosion :

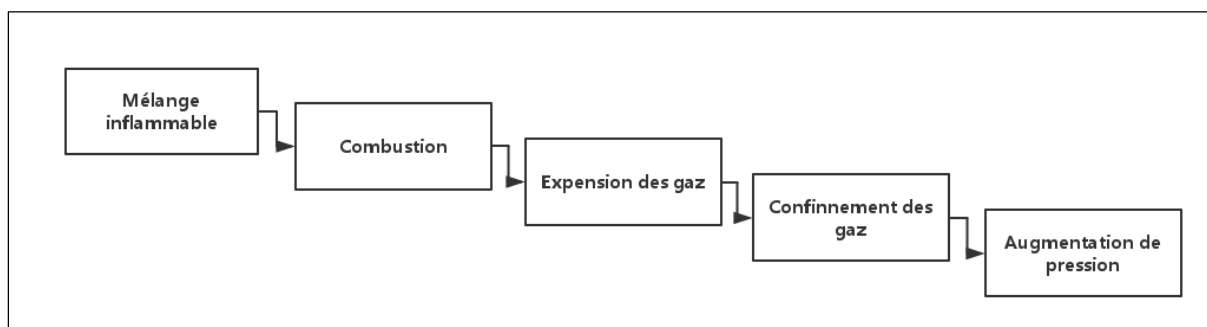


Figure 4-2 : Mécanisme de l'explosion.

4.1.1 Régimes d'explosion

On distingue deux régimes d'explosion [12] :

- La déflagration

On parle de déflagration lorsque le front de flamme se déplace plus lentement que l'onde de choc. La vitesse du front de flamme est subsonique c'est-à-dire inférieur à la vitesse du son, soit 340 m/s.

- La détonation

L'onde de choc et le front de flamme sont confondus, ce qui a pour conséquence :

- Une augmentation considérable de la pression (suivi d'une dépression) ;
- Un déplacement de volume d'air très important ;
- Un bruit très élevé.

La vitesse de détonation est supersonique, donc supérieur à 340 m/s.

Les vitesses de détonation sont plutôt de l'ordre de plusieurs km/s.

4.2 Modélisation des effets d'explosion

Les effets d'une explosion sont caractérisés principalement par une onde de pression de forte intensité mais de courte durée, qui se propage dans l'environnement et balaye tout sur son passage. L'onde peut avoir des effets directs sur les individus et indirects lors de l'effondrement des structures. Les effets d'une explosion sont désastreux, en particulier si celle-ci a lieu dans le cas d'un équipement dans un site industriel, ce qui conduit à l'amplification des phénomènes initiateurs par effet domino.

Dans le cadre du développement de la sécurité industrielle, il nous est très tôt apparu la nécessité de caractériser les effets des explosions malgré leur complexité apparente.

La modélisation des effets des surpressions d'une explosion, se fait par plusieurs méthodes de calcul. Dans notre cas, nous avons choisi d'appliquer le modèle TNT afin d'obtenir l'étendu des effets de surpressions aux alentours de l'explosion.

4.2.1 Description du Model TNT

Ce modèle d'origine militaire est le plus ancien au monde pour prévoir les conséquences de tout type d'explosion accidentelle. Il repose sur l'hypothèse selon laquelle, il doit être possible de reproduire le champ de surpression qui est engendré par une explosion donnée (de gaz, d'un explosif condensé, ...), en faisant exploser du TNT. Ainsi, l'équivalent TNT d'un mélange gazeux explosible, correspond à la masse de TNT qui en s'explosant engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un 1kg du mélange explosible considéré [17]. Cet équivalent TNT, noté par la suite M_{TNT} , est calculé au moyen de la relation ci-après :

$$M_{TNT} = a \times \frac{M_{H_2} \times Q_{H_2}}{Q_{TNT}}$$

Où :

E_{H_2} : L'énergie libérée après la combustion de l'hydrogène en kJ

M_{H_2} : La masse de l'hydrogène (kg)

Q_{H_2} : Le pouvoir calorifique de l'hydrogène (120500 kJ / kg)

Q_{TNT} : Le pouvoir calorifique du TNT (4690 kJ/Kg)

a : Le « rendement » de l'explosion de gaz.

Le rendement « a » possède différentes significations selon ce que représente exactement l'énergie E_{gaz} .

En effet, E_{gaz} peut représenter l'énergie de combustion de :

- La totalité de la masse de combustible rejetée accidentellement (sachant qu'une partie seulement de cette masse sera dans les limites d'explosibilité) ;
- Ou de la masse de combustible mélangée avec l'air en proportions explosibles.

Dans le premier cas, le rendement « a » est à considérer comme « global », dans le sens où il qualifie à la fois le rendement ou l'efficacité :

- Du rejet et de sa dispersion pour former un mélange explosible ;
- Et de la propagation des flammes (explosion proprement dite) pour engendrer des ondes de surpression d'amplitude plus ou moins importante ;

Dans le second cas, « a » représente un rendement qui qualifie la capacité des flammes à engendrer des surpressions. Il ne s'agit donc, dans ce cas, que d'un rendement « d'explosion ».

Ensuite, quel que soit le type de cas considéré, « a » est généralement déterminé à partir de l'analyse des accidents passés.

4.2.2 Application sur le logiciel PHAST

Dans notre cas, nous avons collecté les données utiles pour l'application du modèle TNT sur le logiciel PHAST. Ces données sont rassemblées dans le tableau 4-1:

Tableau 4-1: Paramètres d'entrés pour le logiciel PHAST.

Données sur le combustible	
Combustible	Hydrogène
Quantité du combustible	3 Kg
Condition climatologique	
Données climatiques	Weather F/D
Donnée sur la carte de localisation	
Distance maximale	70m
Distance minimale	1m
Le pas	5m
Le rendement	10%

Le rapport du logiciel PHAST nous a fourni le tableau 4-2 :

Tableau 4-2: Surpressions en fonction des distances

Surpression (bar)	1.00	0.79	0.28	0.15	0.10	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Distance (m)	1	5.93	10.86	15.79	20.71	25.64	30.57	35.50	40.43	45.36	50.29	55.21	60.14	65.07	70.00

La courbe représentative de ce nuage de point est présentée dans la figure 4-3 :

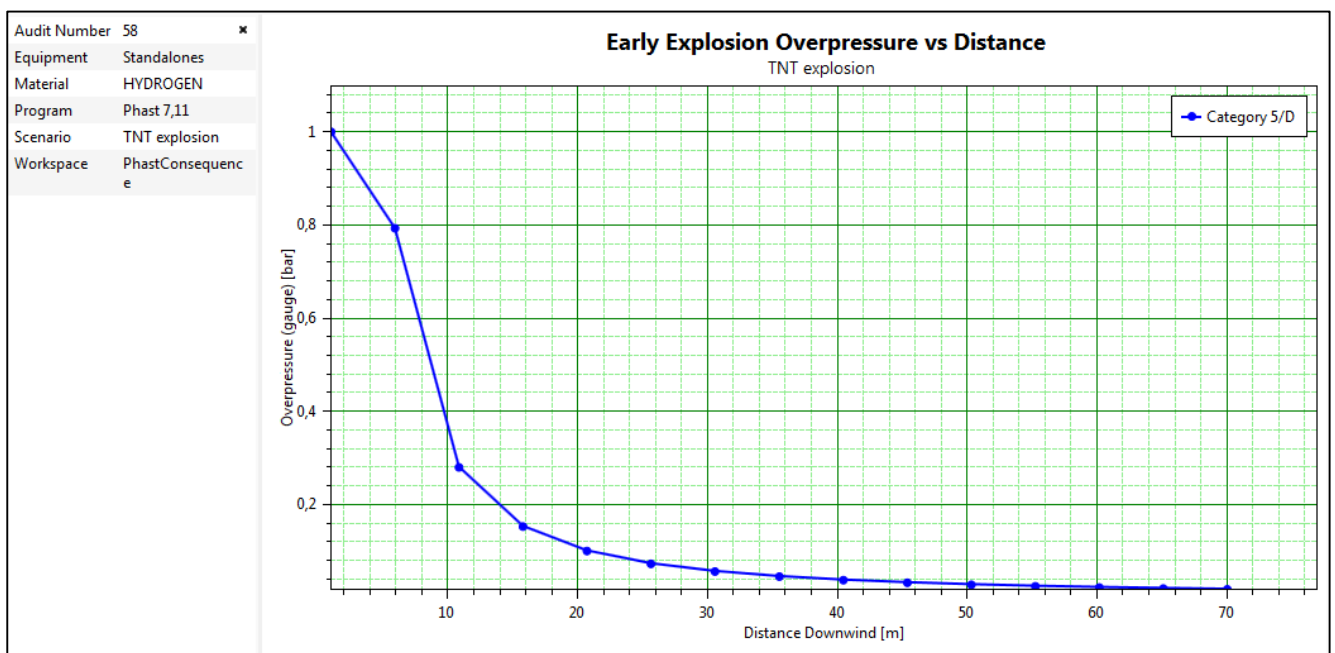


Figure 4-3: Courbe de variation de la surpression en fonction de la distance donnée par PHAST.

Les seuils critiques de surpressions données par le logiciel PHAST sont dans le tableau 4-3:

Tableau 4-3: Seuil de surpression donnée le logiciel PHAST.

Surpression (bar)	Distance (m)
0.02	65.45
0.14	16.95
0.21	13.11

La figure 4-4 illustre les rayons associés à des seuils critiques de surpression :

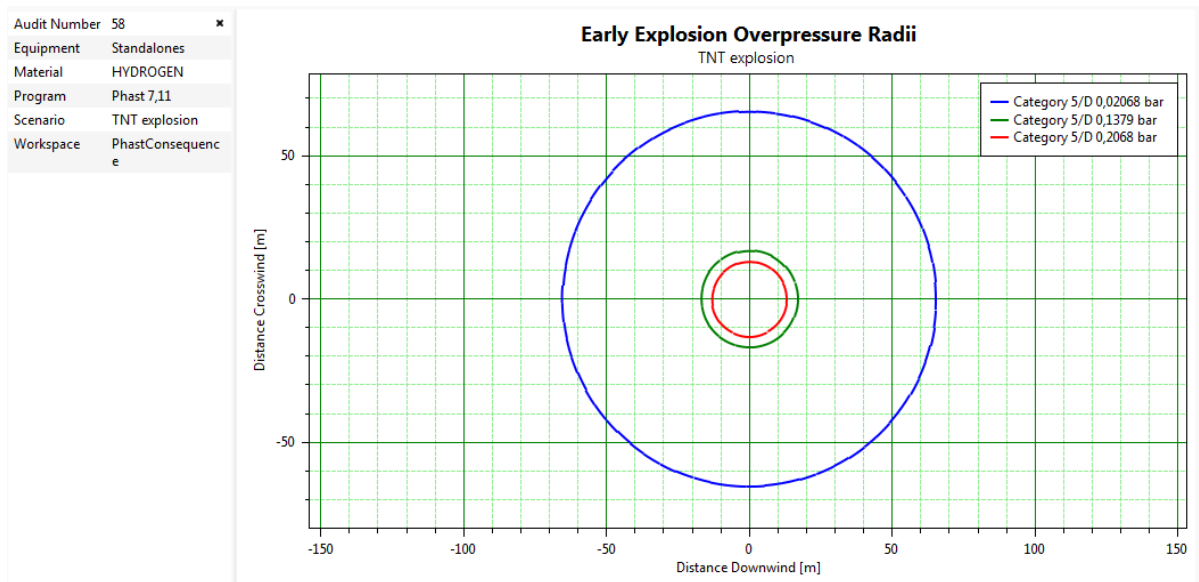


Figure 4-4 : Propagation du nuage radial et vertical selon PHAST.

Les périmètres correspondant à des seuils de surpression critiques sont représentés ci-dessous dans la carte de localisation géographique de la figure 4-5. L'épicentre de l'explosion dans notre cas, c'est le four sous-vide situé à l'entrée du premier hangar côté nord-ouest.



Figure 4-5 : Effets de surpression dans la zone (l'explosion du four sous-vide).

- **Interprétation des résultats du logiciel PHAST**

Le rayon rouge est caractérisé par une distance de 13,11m et une surpression de 0.21 bar. D'après les seuils retenus dans le cadre des études de danger, cette limite de surpression présente des dommages irréversibles et létaux aux personnes présentes dans le périmètre du

premier cercle. En plus, des effets sur l'homme, elle peut engendrer une destruction structurelle aux murs et aux installations avoisinantes situées à une distance inférieure ou égale à 13 mètre à partir de l'origine de l'explosion (four sous –vide).

Les travailleurs, les installations et les bureaux se trouvant dans ce périmètre ont été recensés et sont donnés dans ce périmètre ont été recensés et sont données dans le tableau 4-4 : Ces derniers seront directement exposés à cette surpression en cas d'explosion.

Les cibles présentes dans ce périmètre sont classées dans le tableau 4-4 :

Tableau 4-4: Installation, bureaux et personnes recensés dans le périmètre du premier cercle.

Installations	Bureaux	Employés
Four vertical Contrôle non destructif (NDT) 02 Cabine de Coating Générateur d'hydrogène Les armoires électriques Le laboratoire métallurgique Silos de kérosène Silos de stockage (Argon)	15 bureau (Open space Engineering) 4 bureau (EHS & maintenance)	25 ingénieurs 5 Opérateurs

Le rayon vert est caractérisé par une distance de 16.95m et une surpression de 0.14 bar. Cette limite de surpression, malgré qu'elle est inférieure à la première, elle reste dangereuse car elle est toujours supérieure au seuil de surpression susceptible de provoquer des dommages irréversibles, entraînant la mort des personnes et aussi la destruction des infrastructures.

Ce deuxième périmètre englobe :

- Le laboratoire brazing ;
- Le laboratoire d'aluminisation ;
- Les ateliers de montage des pièces ;
- Groupe électrogène ;
- Silos de stockage (Azote) ;
- 05 bureaux ;
- Le nombre de travailleurs présents dans ce périmètre est de : 10 personnes.

Le rayon Bleu est caractérisé par une distance de 65.45m et une surpression de 0.02 bar. À ce niveau-là, les dommages peuvent être moins graves sur les personnes (blessures). Ils sont insignifiants aussi sur les structures (mur fissuré, glace brisée).

Ce rayon permet d'atteindre :

- Une industrie voisine (imprimerie) ;
- La route secondaire allant de Boufarik à la commune de Gerouaw ;
- L'usine des chambres froides ;
- Le hangar de montage des rotors ;
- Le hangar de stockage des pièces de rechange ;
- La zone de stockage des gaz ;
- Le hangar de stockage des produits chimiques dangereux ;
- Les ateliers de soudages, meulages ;
- Le sablage ;
- Le poste de garde ;
- La cantine ;
- L'administration ;
- Le nombre de personne présent à l'intérieur de ce périmètre est estimé à : 200 personnes ;

4.3 Modélisation mathématique

L'Estimation de la loi de variation de la surpression en fonction de la distance avec le logiciel MATLAB.

Nous avons estimé l'allure du nuage de points (surpression, distance) donné dans le rapport de la simulation précédente. La figure suivante représente la tendance du graphe obtenue par le logiciel MATLAB :

Cette courbe nous a permis de déterminer un modèle mathématique adéquat qui donne la surpression en fonction de la distance :

Le but de ce modèle mathématique est d'estimer la surpression à n'importe quelle distance à partir de l'origine de l'explosion (four sous-vide). La fonction permet donc d'obtenir la surpression avec plus d'exactitude et de pertinence. En cas d'extension ou d'implantation d'une nouvelle installation vulnérable dans le centre de maintenance, nous devons alors définir la surpression à cet endroit (distance) bien déterminé pour pouvoir juger si le risque à cette emplacement donné est acceptable ou non.

À l'aide du logiciel Matlab, et en introduisant la nouvelle variable $x = 1/(3 + d^2)$,

Le modèle mathématique retenu est le suivant : $f(x) = ax^2 + bx + c$.

C'est un modèle quadratique en la variable x.

Les coefficients a, b et c d'ajustement ont été obtenus à l'aide de la commande Matlab polyfit, permettant une optimisation au sens des moindres carrés. La courbe obtenue est donnée sur la figure 4-6 :

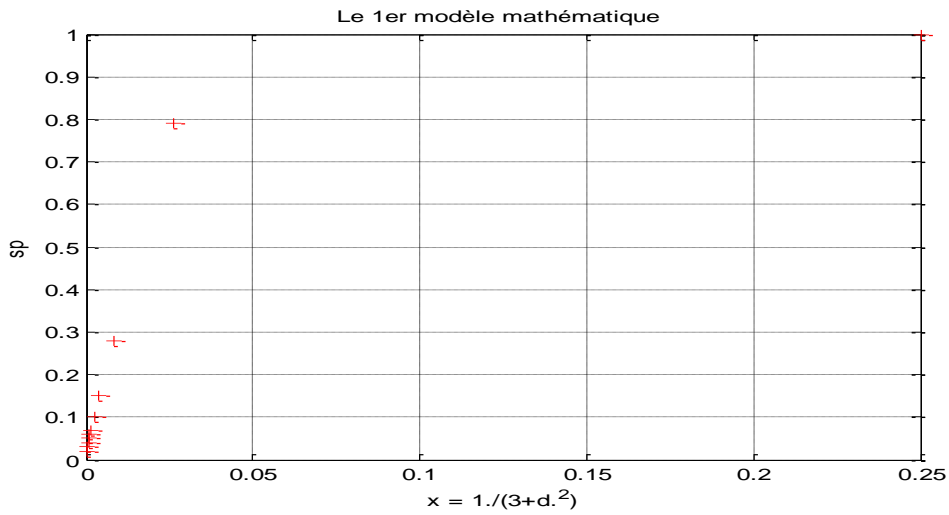


Figure 4-6: Courbe de nuage de points donnée par le logiciel MATLAB.

Le 2ème modèle mathématique à l'aide de la commande polyfit a donné la courbe de la figure 4-7:

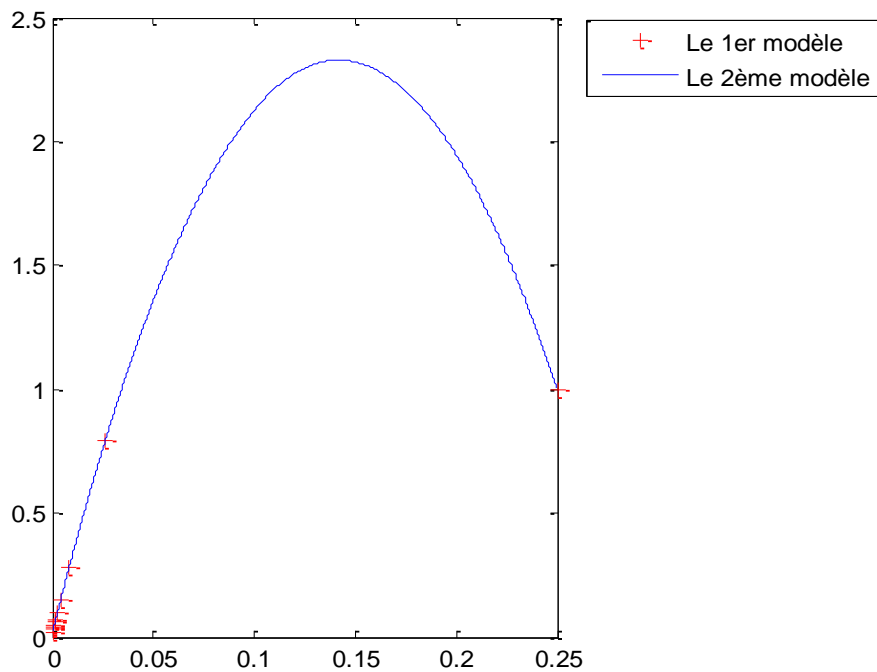


Figure 4-7 : Courbe du modèle mathématique donnée par le logiciel MATLAB.

Les erreurs des deux modèles mathématiques calculées avec le logiciel MATLAB apparaissent dans le tableau 4-5 :

Tableau 4-5: Erreurs des deux modèles mathématiques

Erreurs sur le 1 ^{er} Modèle	Erreurs sur le 2 ^{ème} Modèle	Comparaison des erreurs des deux modèles erreur_1 - erreur_2
0.7500	0.0000	0.7500
0.7638	-0.0018	0.7656
0.2717	0.0003	0.2714
0.1460	0.0042	0.1418
0.0977	0.0066	0.0911
0.0685	0.0023	0.0662
0.0589	0.0067	0.0523
0.0492	0.0056	0.0437
0.0394	0.0014	0.0380
0.0295	-0.0045	0.0341
0.0296	-0.0016	0.0312
0.0297	0.0006	0.0291
0.0197	-0.0078	0.0275
0.0198	-0.0065	0.0262
0.0198	-0.0054	0.0252

En considérant les écarts entre les erreurs des deux modèle mathématiques comme négligeables. Nous obtenons le modèle mathématique suivant :

$$f(d) = a \left(\frac{1}{3+d^2}\right)^2 + b \left(\frac{1}{3+d^2}\right) + c$$

Avec: a = -144.2872, b = 32.4965 et c = 0.0188

Cette fonction permet d'estimer la gravité des effets à travers la surpression à un emplacement donné avec plus de pertinence et d'exactitude.

Ce modèle sera utilisé dans le chapitre suivant pour la détermination de la surpression à l'endroit dans lequel nous allons placer la mesure de protection.

4.4 Évaluation des risques : Méthode Heat Map

Heat Map est une méthode d'évaluation du risque propre à l'entreprise General Electric (GE). Cette méthode a été développée dans le but d'avoir une vision globale des risques avec des cotations fixés par le référentiel de GE [16].

La méthode *Heat Map* repose sur trois aspects :

- Risque résiduel ;
- Installations à haut risque ;
- Management du changement.

4.2.1. Déroulement de la méthode

L'enchaînement des étapes suivantes illustre la démarche suivie pour l'application de cette méthode:

Étape 1 : Identifier tous les risques liés à une seule installation industrielle, et qui pourraient être susceptibles de générer des phénomènes dangereux.

Étape 2 : Attribuer à chaque risque une fréquence d'occurrence équivalente au nombre de personnes exposés au risque ou à la fréquence d'activité de l'équipement responsable de la survenue de l'évènement non souhaité (par exemple soupape - surpression). Ensuite donner une cotation de gravité correspondant à la gravité des conséquences susceptibles de se produire suite à l'apparition de ce risque.

Étape 3 : Classer les risques identifiés dans la grille *Heat Map*. L'intersection entre la plus haute fréquence correspondant au risque le plus probable et la plus haute gravité du risque le plus dangereux nous donne l'emplacement de l'installation dans la grille.

Étape 4 : recenser toutes les défenses existantes pour prévenir et protéger l'installation en question. Ensuite les classer dans la matrice de défense selon le type de défense.

La matrice de défense SOD est représentée dans la figure 4-8 :

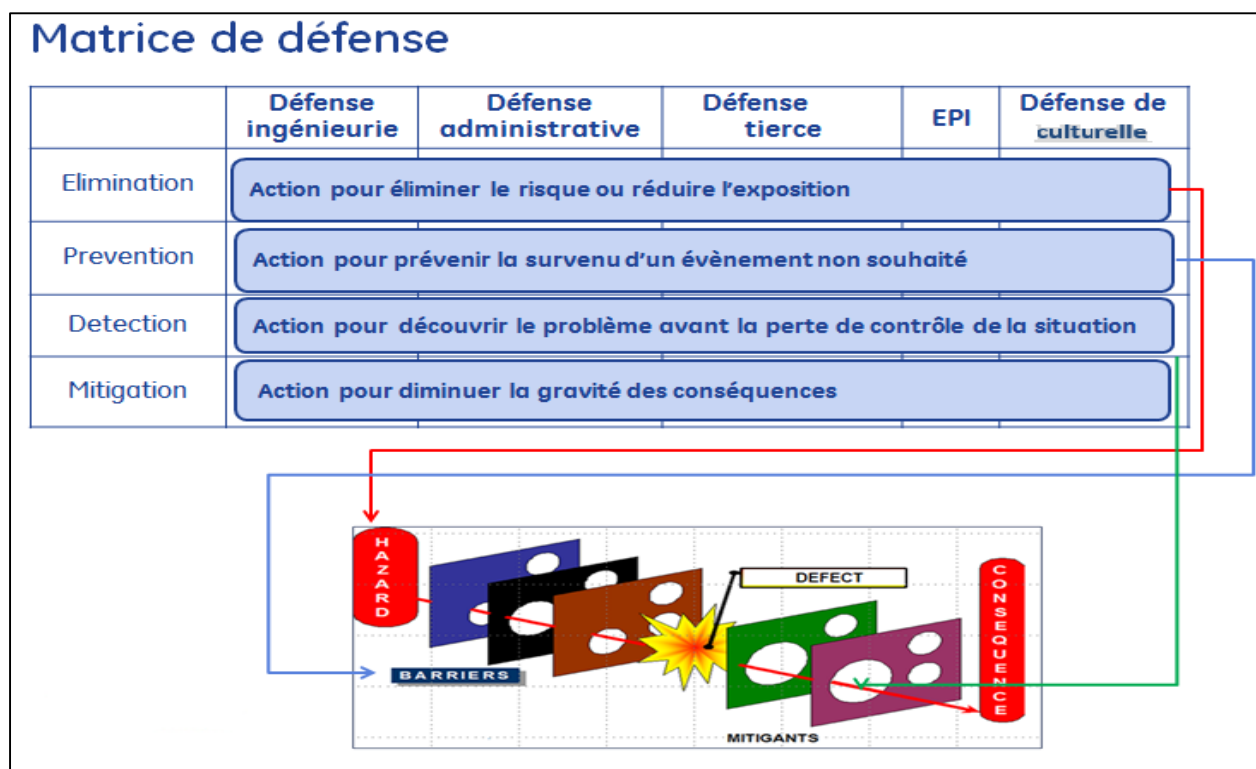


Figure 4-8 : Rôle des mesures de défense.

Nous identifions sur une matrice de défense (SOD) les défenses existantes pour éviter chaque risque classé dans la grille *Heat Map*. Ces défenses ont pour rôle de réduire la probabilité et la gravité des risques susceptibles de se produire au niveau du four sous-vide.

Les matrices de défense SOD sont représentées dans les tableaux 4-6 à 4-8 :

Tableau 4-6 : Matrice de défense/l'évènement surpression

	Défense ingénierie	Défense administrative	Défense tierces	Équipement Professionnel Individuel	Défense culturelle
Prévention		*Maintenance préventive *Procédure de sécurité *Inspection périodique	*Maintenance préventive TAV Engineering		*Formation du personnel
Détection	*Alarme				
Mitigation	*Arrêt d'urgence *Soupape de sécurité *Vanne d'arrêt manuelle	*Plan de continuité du business (BCP) *Plan de réponse aux situations d'urgence	*Assurance		

Tableau 4-7: Matrice de défense / l'évènement mélange O2+H2

	Défense ingénierie	Défense administrative	Défense tierces	EPI	Défense culturelle
Prévention		*Maintenance préventive *Procédure de sécurité *Inspection périodique	*Maintenance préventive TAV Engineering		*Formation du personnel
Détection	*Alarme				
Mitigation	*Arrêt d'urgence	*Plan de continuité du business (BCP) *Plan de réponse aux situations d'urgence	*Assurance		

Tableau 4-8 : Matrice de défense / l'évènement surchauffe

	Défense ingénierie	Défense administrative	Défense tierces	Équipement Professionnel Individuel	Défense culturelle
Prévention		*Maintenance préventive *Procédure de sécurité *Inspection périodique	*Maintenance préventive TAV Engineering		*Formation du personnel
Détection	*Alarme *Thermocouple de contrôle				
Mitigation	*Arrêt d'urgence *Système de refroidissement *Réseau anti incendie	*Plan de continuité du business (BCP) *Plan de réponse aux situations d'urgence	*Assurance		

4.2.2. Grille *Heat Map*

Les échelles de cotation utilisées pour la méthode *Heat Map* sont définies selon les standards de l'entreprise General Electric. Ces dernières sont données dans l'annexe 12.

Classement des risques critiques identifiés par l'APR dans la grille *Heat Map* est représenté dans la figure 4-9 :

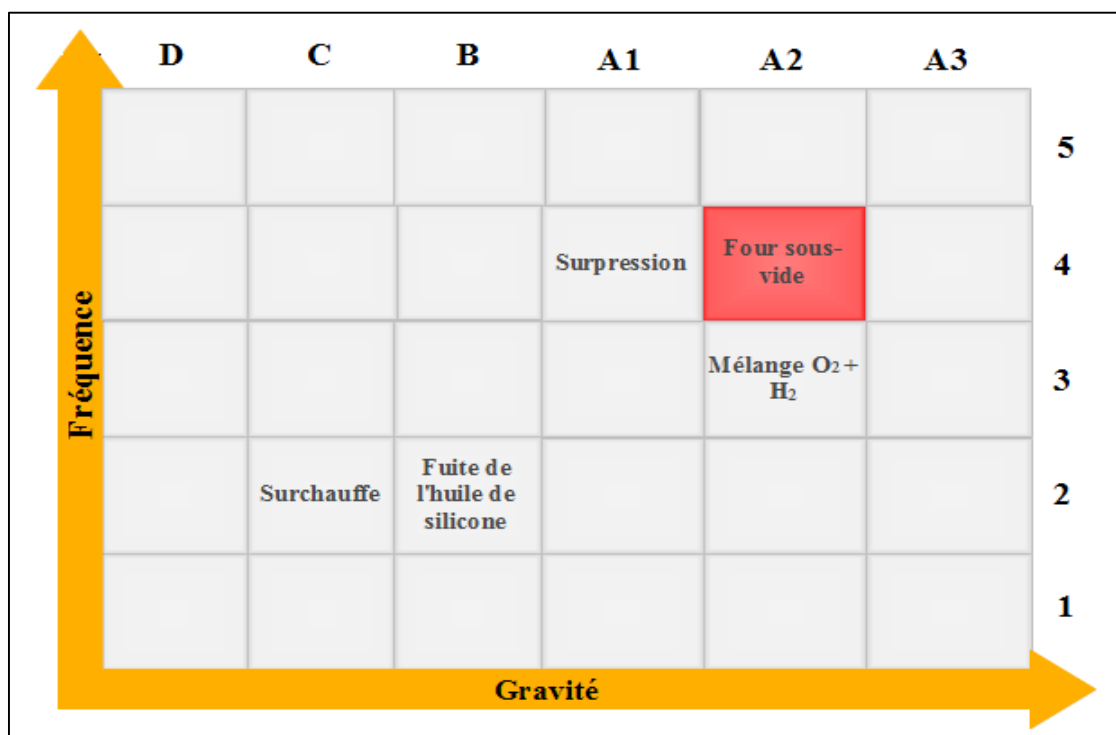


Figure 4-9: Grille des risques *Heat Map*.

Nous avons évalué les risques jugés critiques par les méthodes d'analyse précédentes. Le but de cette étape est d'avoir l'emplacement du four sous vide dans la grille *Heat Map*. Cette évaluation a été faite en collaboration avec le responsable de l'exploitation du four et le responsable EHS de l'entreprise Algesco GE.

Nous avons souhaité, à travers cette évaluation, avoir une cotation des risques présents dans le four sous- vide selon les échelles de cotation GE.

- Interprétation des résultat de l'évaluation des risques *Heat Map*

Dans le *Heat Map* les risques critiques sont ceux qui trouvent leurs places dans le carré haut à droite de la grille, la surpression et le mélange explosif O₂+H₂ sont inclus dans ce carré et ceux à cause des conséquences qui peuvent résulter de leur survenue (explosion), par conséquent les activités sur le four sous vide représentent un risque critique qui justifie son emplacement dans cette zone. Ces risques sont considérés inacceptables par l'entreprise, des mesures de protection supplémentaire s'imposent afin de réduire leur probabilité d'occurrence.

Ce chapitre nous a permis d'avoir une estimation de la gravité des effets d'un phénomène dangereux susceptible de survenir dans le four sous-vide. En plus du résultat de la modélisation des effets, nous avons pu évalué les risques avec des échelles qui répondent aux standards de l'entreprise dans laquelle le travail a été effectué.

Le dernier chapitre abordera les mesures de sécurité (prévention et protection) permettant de réduire la probabilité et la gravité du phénomène dangereux.

Chapitre 5 : réduction du risque

Ce chapitre traite l'étape la plus essentielle de la démarche de maîtrise des risques, puisque cela concernera les solutions proposées pour la réduction des risques majeurs qui puissent toucher l'intégrité de l'installation. Les mesures proposées dans le présent chapitre sont d'origine technique, ingénierie et organisationnelle.

5.1 Mesure technique de prévention : Système instrumenté de sécurité SIS

Pour proposer un SIS, nous devons passer par trois étapes :

- Calculer le SIL requis du système ;
- Proposer l'architecture du SIS ;
- Confirmer que notre SIS correspond au SIL requis du système. Méthode d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité: graphe de risque.

Cette allocation est conduite selon certaines méthodes permettant de définir le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis pour une fonction de sécurité. C'est le SIL qui doit être atteint par un SIS afin de réaliser la réduction nécessaire du niveau de risque. Nous allons, d'une part, expliquer la méthode graphe de risque, telle que présentée dans les normes CEI 61508, et de déterminer, d'autre part, le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) correspondant à un phénomène dangereux spécifié (scénario d'accident) lors de la phase d'analyse des risques. Elle est plus ou moins adaptée en fonction du niveau de détail des analyses de risques réalisées (type et détail des informations disponibles). La CEI 61508, dans sa partie 5, décrit trois méthodes :

- Graphe de risque ;
- LOPA ;
- Matrice de gravité.

Dans notre cas, nous avons choisi d'appliquer la méthode graphe de risque étalonnée afin de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité de notre système.

5.1.1 Calcul d'allocation du niveau d'intégrité de sécurité du SIL : graphe de risque

Le graphe de risque est une méthode semi-quantitative permettant de déterminer le niveau d'intégrité de sécurité d'un système relatif à la sécurité à partir des facteurs de risque connus associés à son système de commande [17].

Un certain nombre de paramètres de simplification sont introduits qui permettent de décrire la nature de la situation dangereuse lorsque les systèmes relatifs à la sécurité sont défaillants ou non disponibles. Un paramètre est choisi parmi chacun des quatre groupes, et les paramètres sélectionnés sont alors associés pour décider du niveau d'intégrité de sécurité alloué aux systèmes relatifs à la sécurité.

Ces Paramètres :

- ✓ Permettent de faire une gradation significative des risques ;
- ✓ Contiennent les facteurs clés d'appréciation du risque.

La démarche est fondée sur l'équation caractérisant le risque (R) sans considérer les moyens instrumentés de sécurité :

$$R = f \times C \dots \dots \dots (1)$$

Où f et C sont respectivement la fréquence et la conséquence de l'évènement dangereux en l'absence de SIS.

Dans le cas présent, la fréquence de l'évènement dangereux « f » est supposée être le résultat de trois facteurs exerçant une influence [17]:

- Fréquence et durée d'exposition dans une zone dangereuse (F) ;
- La possibilité d'éviter l'évènement dangereux (P) ;
- La probabilité que l'évènement dangereux se produise en l'absence de systèmes relatifs à la sécurité (mais en présence de dispositifs externes de réduction de risque). C'est ce que l'on appelle la probabilité d'occurrence non souhaitée (W).

Le tableau étalonné donne les cas possibles à chaque paramètre du graphe de risque avec une cotation quantitative permettant de rendre le choix de chaque paramètre plus pertinent et exacte en se basant sur le résultat obtenu dans d'autre étude d'analyse (ADD, ADE) :

Tableau 5-1: Description qualitative et quantitative des paramètres

Paramètre	Description qualitative	Description quantitative
Conséquence (C)	Mineur (C _A)	[10 ⁻² , 10 ⁻¹]
	Marginale (C _B)	[10 ⁻² , 10 ⁻¹]
	Critique (C _C)	[10 ⁻¹ , 1]
	Catastrophique (C _D)	>1
Occupation (F)	Rare (F _A)	<10%
	Fréquente (F _B)	>=10%
Possibilité d'évitement (P)	Possible (P _A)	90% probabilité d'évitement du danger
	Impossible (P _B)	<=90% probabilité d'évitement du danger
Taux de demande (W)	Très faible (W ₁)	< 1 dans 30ans =< 0.03/an
	Faible (W ₂)	1 dans [3,30] ans = [0.03, 0.3] par an
	Élevé (W ₃)	1 dans [0.3, 3] ans = [0.3, 3] par an

La figure 5-1 offre l'exemple de la mise en œuvre d'un graphe de risque à partir du tableau 5-1. En utilisant les paramètres C, F et P, on parvient à l'une des huit sorties. Chacune de ces sorties est mise en correspondance avec l'une des trois échelles (W1, W2 et W3). Chaque échelon (a, b, 1, 2, 3 et 4) indique la réduction de risque minimale à laquelle doit satisfaire le système relatif à la sécurité. Le résultat est obtenu en suivant les paramètres choisis sous forme de chemin dans le schéma du graphe de risque.

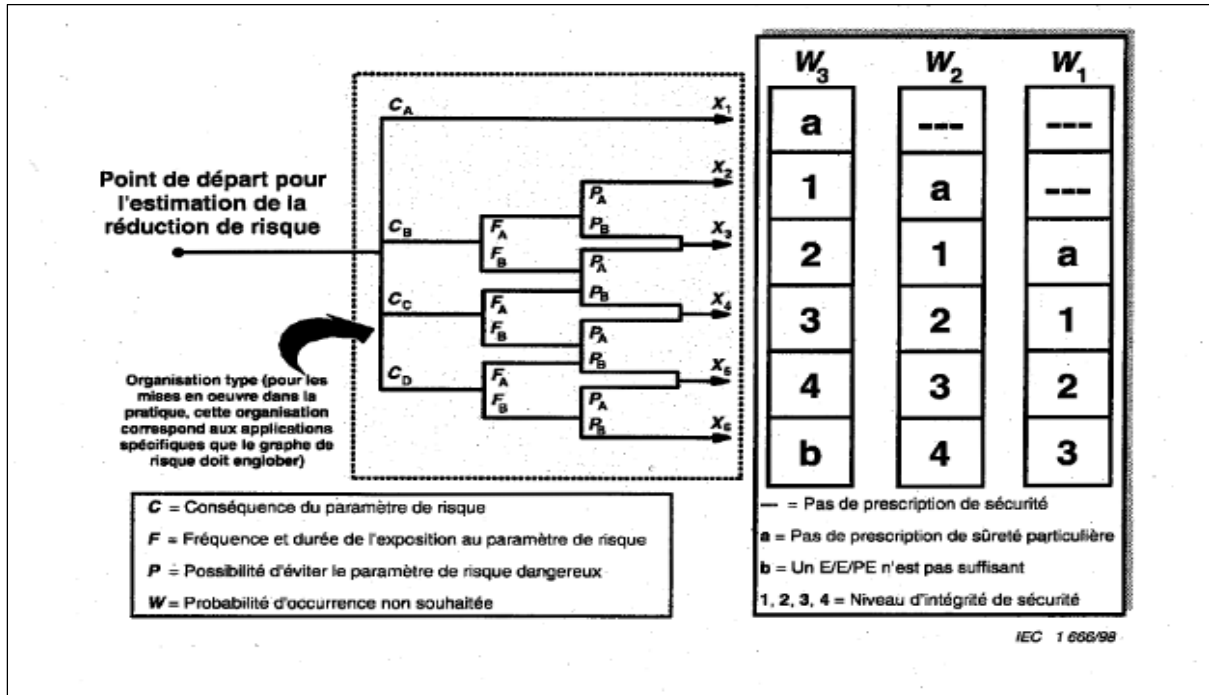


Figure 5-1 : Schéma général du graphe de risque.

- Déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) du système (le four sous vide)

Nous avons utilisé la méthode quantitative du graphe de risque afin de déterminer l'intégrité de sécurité de notre système. Pour cela il a fallu choisir des paramètres relatifs au cas d'explosion du mélange H2+O2.

- Justification du choix des paramètres

Conséquence : Nous avons choisi le cas de conséquence « Critique » car durant notre analyse des effets dans le chapitre précédent, nous avons souligné que l'explosion aura comme résultat des dommages graves sur les structures et les employés. Pour cela, nous avons considéré les conséquences comme critique.

Occupation : Puisque un grand nombre d'employés sont exposés au risque d'explosion donc nous avons choisi le cas « Fréquent ».

Possibilité d'évitement : Les mesures de sécurité existantes permettent d'éviter le danger à moins de 90%, c'est pour cela que nous avons choisi le cas « Impossible ».

Taux de demande : Ce paramètre représente la fréquence d'apparition du phénomène dangereux. Dans notre cas nous avons l'explosion H2+O2 à une probabilité de 0.02, ce résultat correspond au premier cas « Très faible ».

Ci-dessous un tableau récapitulatif de tous les paramètres choisis pour la méthode graphe de risque étalonnée :

Tableau 5-2: Paramètres choisis pour la méthode graphe de risque étalonnée

Paramètres	Choix
Conséquence	Critique
Occupation	Fréquent
Possibilité d'évitement	Impossible
Taux de demande	Très faible

L'enchaînement de ces paramètres nous donne le chemin qui mène vers le résultat niveau d'intégrité de sécurité (SIL)

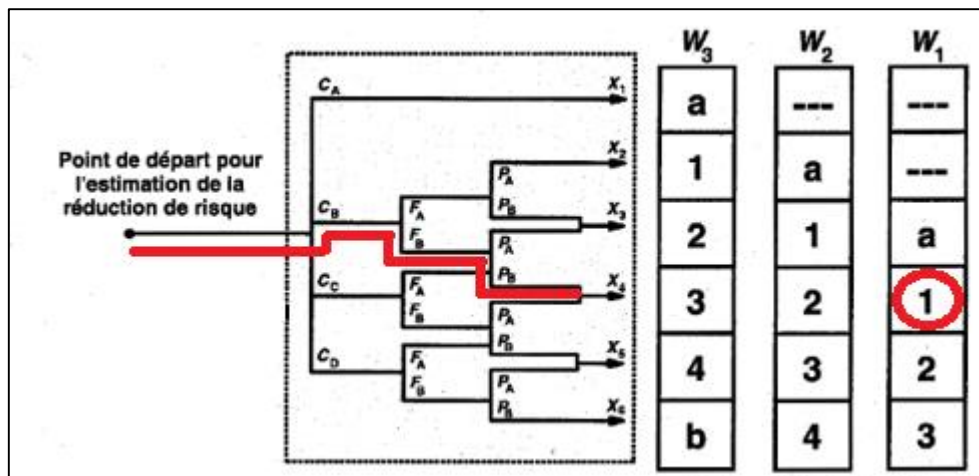


Figure 5-2 : Résultat de l'application la méthode graphe de risque.

5.1.1.1 Résultat de la méthode graphe de risque étalonnée

Nous avons obtenu un SIL 1 requis. Nous proposons donc un SIS qui répond aux prescriptions du SIL 1.

Le niveau d'intégrité de sécurité est défini comme la probabilité pour qu'un système relatif à la sécurité exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises (SIF) dans toutes les conditions spécifiées et dans une période de temps spécifiée.

D'après la norme CEI 61508, le SIL est un niveau discret parmi quatre possibles permettant de spécifier les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux systèmes E/E/PE relatifs à la sécurité. Le niveau 4 d'intégrité de sécurité possède le plus haut degré d'intégrité; le niveau 1 possède le plus bas [18].

Les niveaux de SIL sont représentés dans le tableau 5-3 :

Tableau 5-3: Les différents niveaux SIL définis par la norme CEI 61508

Niveau d'intégrité de sécurité	Mode de fonctionnement à faible sollicitation
4	$[10^{-4}, 10^{-5}]$
3	$[10^{-3}, 10^{-4}]$
2	$[10^{-2}, 10^{-3}]$
1	$[10^{-1}, 10^{-2}]$

5.1.2 Proposition d'un système instrumenté de sécurité (SIS)

Les SIS sont classés en quatre niveaux SIL qui se caractérisent par des indicateurs discrets positionnés sur une échelle de un à quatre niveaux. Les SIL sont employés pour spécifier les exigences de sécurité des fonctions de sécurité réalisées par des systèmes E/E/EP relatifs à la sécurité selon la norme CEI 61508.

- Définition d'un SIS

La norme CEI 61508 définit les systèmes relatifs aux applications de sécurité par : Un système E/E/EP (électrique/électronique/électronique programmable) relatif aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité [18]. Les composantes d'un SIS sont représenté dans la figure 5-3 :

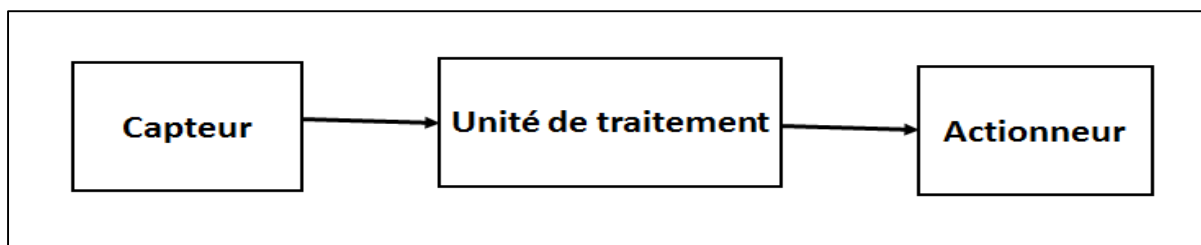


Figure 5-3 : Composants d'un SIS.

Une fonction instrumentés de sécurité (SIF) est une fonction à réaliser par un SIS prévue pour assurer ou maintenir un état de sécurité de l'équipement à protéger par rapport à un événement dangereux spécifique.

Une fonction instrumentée de sécurité (SIF) est utilisée pour décrire les fonctions de sécurité implémentées par un système instrumenté de sécurité. Une fonction instrumentée de sécurité peut être considérée comme une barrière de protection fonctionnelle lorsque le système instrumenté de sécurité est considéré comme un système réalisant cette barrière de sécurité [20].

Un SIS peut implémenter une ou plusieurs SIF. Pour une situation donnée, plusieurs fonctions de sécurité peuvent conduire à la réduction de la fréquence d'occurrence du danger.

L'architecture fonctionnelle d'un SIS est un ensemble de SIF qui comprend trois fonctionnalités de base, la détection (ou la mesure), le traitement (ou la décision) et l'actionnement [18].

- **Architecture du Système Instrumenté de Sécurité proposé pour le four sous-vide**

Nous avons proposé un SIS pour éviter le risque causé par la défaillance de l'électrovanne d'hydrogène. Les composantes caractérisant notre SIS sont définis comme suit :

Capteur de débit mètre : Le capteur placé sur la canalisation d'hydrogène indique le débit pendant l'écoulement (Electrovanne ouverte), le signal sera traiter au niveau de l'unité logique (PLC).

Programme logique de contrôle (PLC) : Affiche le débit sur le tableau de commande et envoi le signal pour la fermeture de l'électrovanne après un temps bien déterminé, si cette dernière n'est pas fermée le capteur nous indique un écoulement de l'hydrogène (débit). A ce moment-là le PLC envoi alors un signal au contacteur pour fermer la génération de l'hydrogène (Arrêt du générateur d'hydrogène).

Contacteur : Le contacteur placé dans l'armoire électrique a pour rôle d'actionner l'arrêt du générateur d'hydrogène pour arrêter l'écoulement de l'hydrogène à l'intérieur de l'enceinte du four. La figure 5-4 représente le l'emplacement des composantes du SIS dans le système :

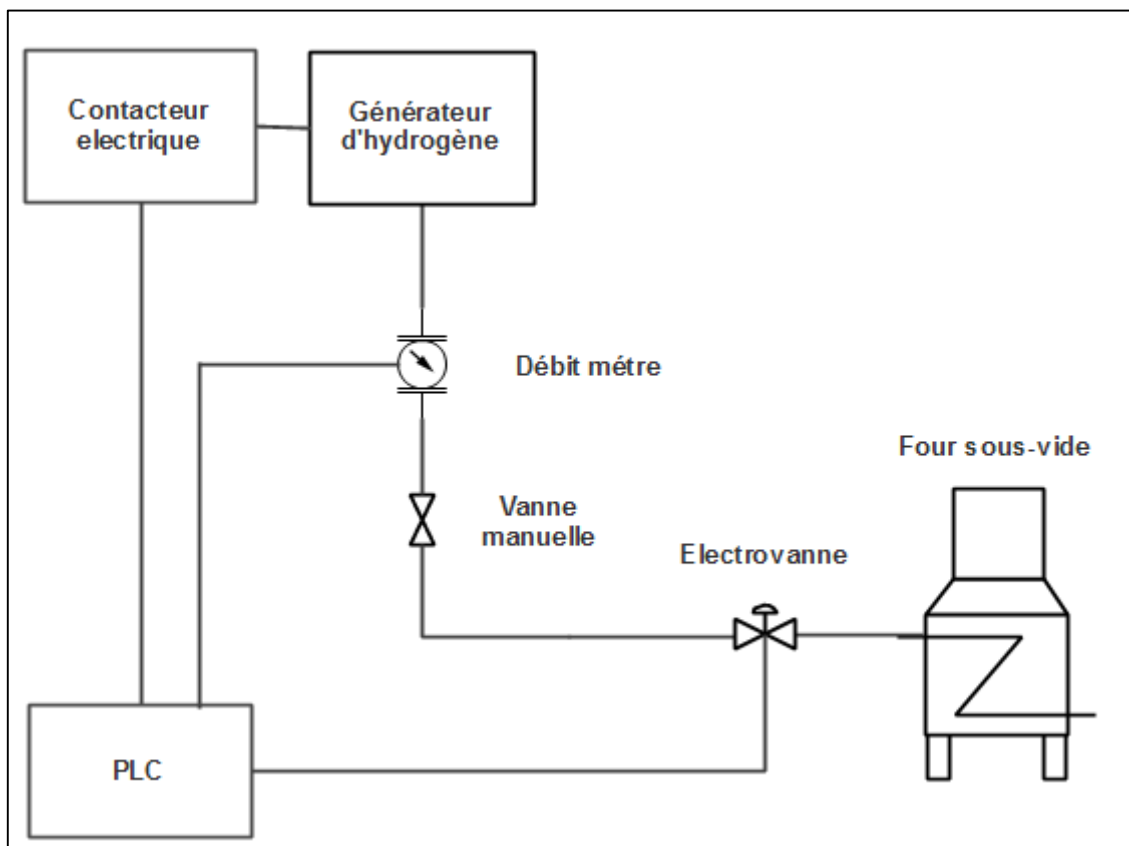


Figure 5-4 : Schéma du SIS proposé.

- **Mise en fonctionnement du SIS :**

Lorsque l'électrovanne s'ouvre, le débitmètre indique sur le tableau de commande un écoulement d'hydrogène à l'intérieur du four sous-vide. Après 3 secondes l'unité logique (PLC) envoie un signal pour la fermeture de l'électrovanne d'hydrogène, si cette dernière ne se ferme pas le débitmètre indiquera un écoulement. À cet instant, l'unité logique envoie un autre signal au contacteur qui va agir à son tour comme actionneur pour fermer et isoler le générateur d'hydrogène. Comme ça y aura aucun écoulement du gaz dangereux à l'intérieur du four.

5.1.3 Calcul du niveau d'intégrité de sécurité du SIS proposée avec le logiciel GRIF

- **Définition du logiciel GRIF « SIL »**

Le logiciel GRIF est conçu pour différentes fonctions. L'un d'elle est de faire le calcul des PFD et des niveaux d'intégrités de sécurité (SIL). Il s'intéresse aussi au traitement des fonctions instrumentées de sécurité sur les installations à procès continu (fonctionnement des sécurités en mode "sollicitation rare") [19]. Les calculs réalisés sont des calculs de sécurité. L'événement redouté est la défaillance dangereuse non-détectée de la fonction de sécurité du SIS.

Nous devons donnée au logiciel l'architecture du SIS auquel nous voulons calculer le SIL, ensuite nous choisissons les types de composantes qui constitue notre SIS. Cela pour avoir un résultat (calcul SIL, PFDavg) cohérent avec ce que nous voulons proposer.

Ce logiciel permet de nous confirmer si l'architecture du SIS que nous avons proposée répond aux exigences de sécurité de notre système.

- **L'architecture du système instrumenté de sécurité SIS donnée par logiciel GRIF**

Après avoir choisi le type de composantes de notre SIS. Le logiciel GRIF nous affiche l'architecture du SIS. Cette dernière est représentée dans la figure 5-5 :

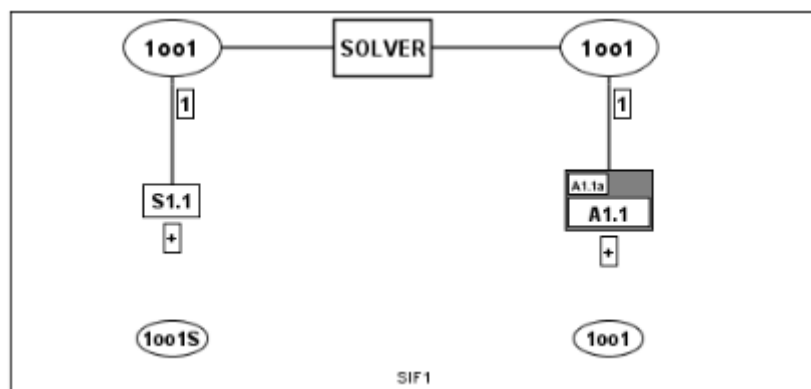


Figure 5-5 : Architecture du SIS proposé.

- **Résultat du logiciel GRIF**

Après compilation des paramètres d'entrés, le rapport du logiciel GRIF nous a fourni le résultat suivant :

Le tableau 5-4 nous donne les résultats obtenu pour chaque composantes lors du Calcul du SIL total de notre SIS :

Tableau 5-4: Résultat donnée par le logiciel GRIF

	PFD avg	SIL calculé	Contribution %
Partie capteur	1.46 E-2	1	32.37 %
Partie solveur	1.38 E-3	2	3.06 %
Partie actionneur	2.92 E-2	1	64.57 %
SIF	4.46 E-2	1	100 %

Nous allons présenter dans la figure 5-6 la contribution de chaque partie sous forme de cercle de pourcentage :

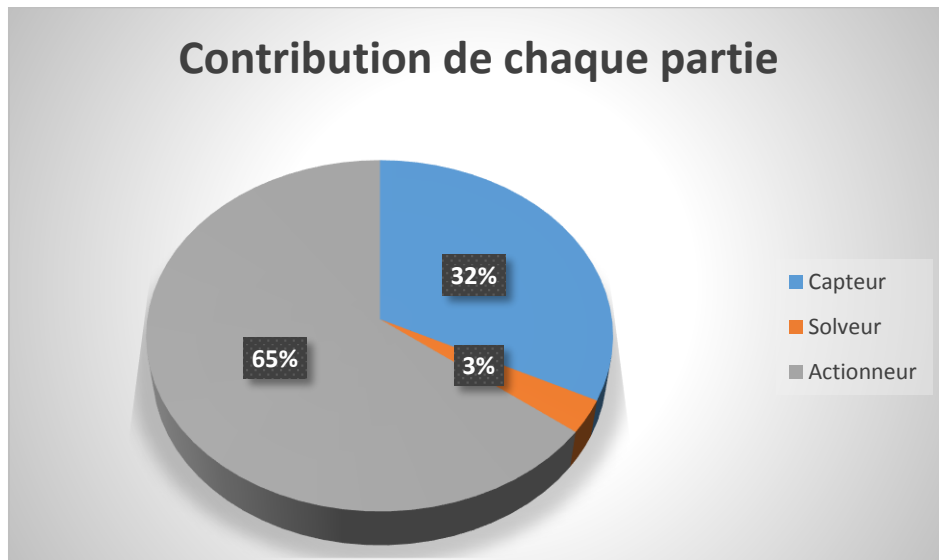


Figure 5-6 : Cercle de pourcentage pour la contribution de chaque partie

Le logiciel GRIF nous a calculé la valeur du niveau d'intégrité de sécurité de notre système instrumenté de sécurité. Le rapport est donné par la figure 5-7 :

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		1		Valeur RRF requis 10	
Valeur max SIL atteignable due aux contraintes architecturales - IEC 61511 (E...					
Capteurs	2	HFT	0		
Actionneurs	2	HFT	0		
Calculs					
Durée d'exploitation (années)		30		PFD Avg 4.4616E-2	
SIL calculé		1		RRF calculé 22	
Résultats					
Valeur SIL réalisé		1			
Conclusion du SIL pour la SIF		Conforme			

Figure 5-7: Rapport donné par le logiciel GRIF après calcul du SIL

La figure 5-8 nous affiche les courbes de chaque composante constituant notre SIS. Ces derniers indiquent les PFDavg maximum des composantes ainsi que celle du système instrumenté de sécurité SIS :

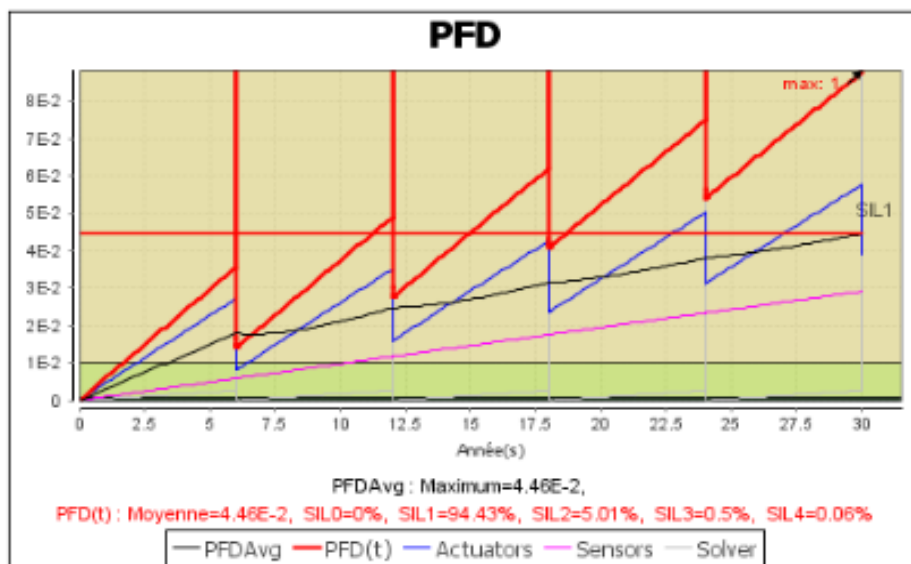


Figure 5-8 : Courbe des PFDavg maximum.

Comme il est si bien indiqué dans le rapport, notre niveau d'intégrité de sécurité (SIL=1) correspond au niveau d'intégrité de sécurité du système (SIL requis =1) qui a été calculé par la méthode graphe de risque étalonné.

5.1.1. Impact du SIS dans la réduction du risque de mélange O₂+H₂

Nous avons refait l'Add du mélange dans le but de faire apparaître l'impact du SIS dans la probabilité d'apparition de ce ENS. Pour cela nous avons remplacé la défaillance du système de commande par la défaillance du SIS et aussi remplacer le connecteur logique ou par et. Ensuite refaire le calcul :

$$E010 : \text{Probabilité de défaillance du SIS} = 4.46 \times 10^{-2}$$

$$P001 = (2 E004 + E005 + E006 + E007) \times (E010 \times E009) ; P001 = 5,62 \times 10^{-4}$$

Nous remarquons alors que le SIS permet de réduire le risque de mélange explosif dans le four sous-vide puisque la probabilité d'apparition diminue en ajoutant le SIS.

5.1.4 Estimation des coûts du SIS

La prise en charge de toutes modifications au niveau du four sous-vide se fait par l'intervention du constructeur italien TAV Engineer. Pour cela nous avons validé la faisabilité de cette architecture SIS avec le constructeur du four sous-vide.

Le devis des coûts qui pourraient être déployés pour la mise en place de cet instrument de sécurité. Le prix donné par le constructeur TAV Engineer pour l'achat et l'installation des composantes du SIS proposé dans le four sous-vide est estimé à : 2350 €

Nous concluons donc que notre système instrumenté de sécurité (SIS) correspond au SIL requis de notre système puisque la valeur de PFD_{avg} est incluse dans l'intervalle du SIL=1.

$$PFD_{avg} = 4.46 E-2 = [10^{-1}, 10^{-2}]$$

Le SIS proposé est une mesure de prévention permettant de réduire la probabilité d'apparition du risque causé par la défaillance de l'électrovanne de l'hydrogène du four sous-vide.

5.2 Mesure de protection : Mur anti déflagration

Dans cette partie, nous allons procéder au dimensionnement d'un mur résistant aux effets de surpression de 1bar. Ce mur est proposé comme mesure de protection contre les conséquences d'une explosion, car il a pour objet de protéger les bureaux exposés directement au four sous-vide (distance ne dépasse pas 1m50).

Pour cela nous nous sommes basés sur des méthodes de calcul de la résistance des structures afin de pouvoir déterminer les dimensions d'un mur capable de résister à une onde de choc.

5.2.1 Méthode de calcul de la résistance des structures aux explosions

Le comportement des structures soumises à une onde de pression n'est pas seulement fonction de l'intensité (surpression maximale) de l'onde reçue, mais également de sa durée et sa forme [20].

Les méthodes employées pour déterminer la résistance des structures aux actions accidentelles sont de trois types :

- Méthodes empiriques qui sont les plus fréquemment utilisées pour l'évaluation des effets. On rencontre principalement des tableaux de dommages en fonction du niveau de pression (qualifiés par la suite de méthodes forfaitaires) ;
- Méthode analytiques qui utilisent principalement une analogie masse ressort pour calculer un niveau de contrainte dans la structure qui est ensuite comparé à la contrainte à la rupture afin de déterminer si la structure reste intègre. Dans le domaine des risques accidentels l'approche en « pression-temps » est la plus pertinente. Cette méthode donne le choix entre le calcul statique élastique linéaire équivalent et le calcul dynamique non linéaire ;
- Les méthodes numériques qui permettent de coupler un code donnant le champs de pression appliqué à la structure à un code éléments finis permettant d'avoir la répartition de contraintes dans la structure.

5.2.1.1 Méthode choisie pour la proposition le mur anti déflagration (Méthode analytique)

La méthode employée pour déterminer la résistance des structures aux actions accidentelles utilise une analogie masse ressort. Elle consiste à représenter le système réel par une masse associée à un ressort, dont le comportement lorsqu'il est soumis à une sollicitation $P(t)$ est représenté par l'équation suivante [20]:

$$M \cdot d^2 x / dt^2 - R(t) = F(t)$$

Où M et R sont la masse équivalente et la force de rappel équivalente et ($R(t)=Kx$ pour un ressort élastique).

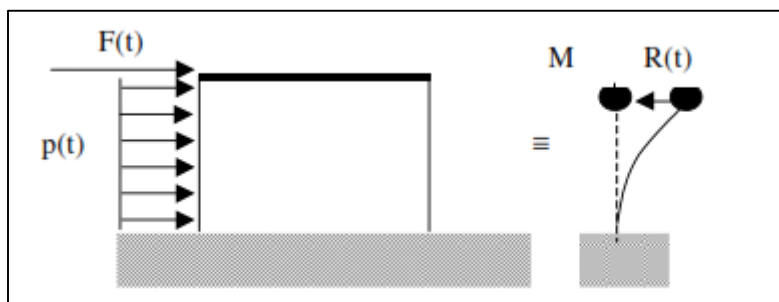


Figure 5-9 : Représentation du comportement d'un système physique par un modèle masse- ressort.

Dans le cadre de cette étude, et en première approche, nous avons choisi d'utiliser une méthode analytique basée sur des calculs statiques élastiques linéaires équivalents.

Cette méthode permet de s'affranchir de l'aspect dynamique du chargement et du comportement de la structure. Le développement d'une analyse dynamique simple montre qu'une pression dynamique peut être équivalente à une pression statique à un facteur DLF (Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique) près.

En fait, il s'agit de déterminer une pression statique équivalente par la relation suivante :

$$P_{se} = DLF \times P_{max} \dots \dots \dots (2)$$

Avec : P_{se} : pression statique équivalente

P_{max} : pression maximale exercée sur la structure par l'onde de souffle.

Le coefficient DLF dépend du rapport entre la durée de la surpression et la période propre de l'élément de structure étudiée (t_L / T) et aussi de la forme de la courbe P(t).

La démarche de ce type d'analyse met en œuvre les étapes suivantes :

1. Détermination de la pression maximale et la durée du chargement (P et t) ;
2. Détermination de la période propre de l'élément étudié (T) ;
3. Déduction, en fonction du rapport (t_L / T), du DLF à partir de la figure 5-10 :

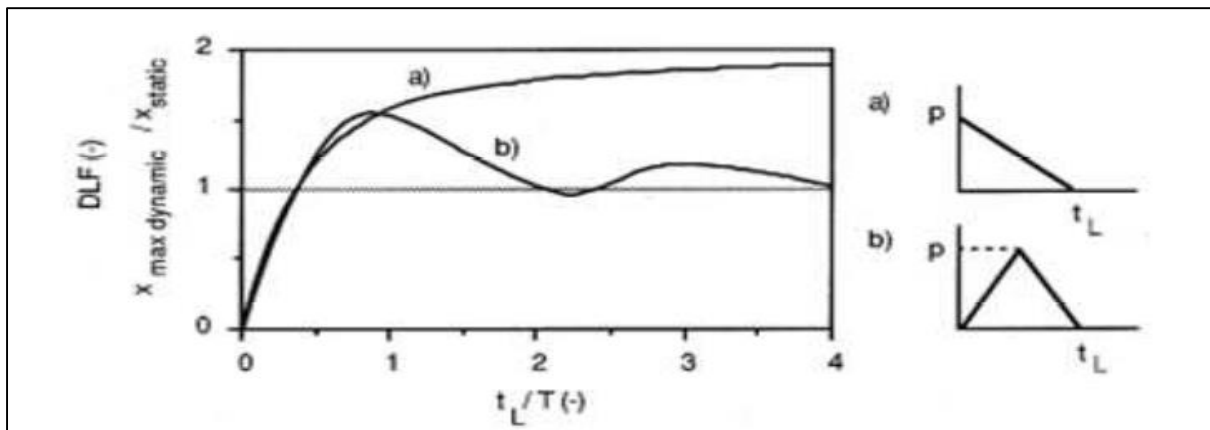


Figure 5-10 : Facteur d'amplification dynamique.

4. calcul de la pression statique équivalente ;
5. utilisation des règles classiques en génie civil pour calculer les structures.

5.2.2 Dimensionnement du mur

Nous allons utiliser les lois du génie civil pour calculer l'épaisseur du mur qui permet de résister à des effets inférieur ou égale à un bar en utilisant deux types différent de béton et de ferrailles, nous allons donc obtenir des épaisseurs différentes [21]:

- Détermination de l'épaisseur minimale du mur

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

M_{Ed} : Moment maximal de calcul.

P: Pression généré par la surpression.

H: Hauteur du mur.

$$M_{Ed} = \frac{P \times H^2}{8} \dots \dots \dots (3)$$

M_{RD} : Moment résistant du mur.

$$M_{Rd} = A_s \times f_{ds} \left[d - \frac{\frac{A_s \times f_{ds}}{0,85 \times f'_{dc}}}{2} \right] \dots \dots \dots (4)$$

A_s : Section d'armature.

f_{ds} : Contrainte dynamique de plastification des acier.

f'_{dc} : Contrainte dynamique limite en compression du béton.

$$f_{ds} = 1,2 f_y + \frac{(1,05 f_u - 1,2 f_y)}{4} \dots \dots \dots (5)$$

f_y : Contrainte limite élastique des aciers.

f_u : Contrainte ultime des aciers.

$$f'_{dc} = 1,25 f_c \dots \dots \dots (6)$$

On suppose (3) = (4) $\Leftrightarrow M_{Ed} = M_{Rd}$

$$\frac{P \times H^2}{8} = A_s \times f_{ds} \left[d - \frac{\frac{A_s \times f_{ds}}{0,85 \times f'_{dc}}}{2} \right] \dots \dots \dots (7)$$

D'où : $d = \frac{P \times H^2}{8} \frac{1}{A_s f_{ds}} + \frac{\frac{A_s \times f_{ds}}{0,85 \times f'_{dc}}}{2}$

$$d = 0,9 \times e \dots \dots \dots (8)$$

On remplace (8) dans (7) \Rightarrow

$$e_{min} = \frac{1}{0,9} \left[\frac{P \times H^2}{8} \frac{1}{A_s f_{ds}} + \frac{\frac{A_s \times f_{ds}}{0,85 \times f'_{dc}}}{2} \right] \dots \dots \dots (9)$$

Application numérique :

Nous n'avons pas les données pour calculer la durée de chargement et la période de l'élément finie, donc nous avons pris la valeur maximale (DLF=1,8) pour plus de protection.

D'après le modèle mathématique obtenu par le logiciel PHAST (équation 10) nous allons calculer la surpression à l'endroit de l'emplacement du mur anti-déflagration par rapport au four sous-vide.

$$Sp(d) = -144.2872 \left(\frac{1}{3+d^2}\right)^2 + 32.4965 \left(\frac{1}{3+d^2}\right) + 0.0188 \dots \dots \dots (10)$$

La distance entre le four et le mur est : $d=1,43$ m

$$(10) \Rightarrow Sp(1,43) = 0.7910.$$

Le mur anti déflagration résistera à une surpression de $Sp = 0.8$ bar.

$$(2) \Rightarrow P_{stat} = P_{dyn.} \times DLF = 0.8 \times 1,8 = 1,44 \text{ bar}$$

Nous allons calculer l'épaisseur minimale du mur anti déflagration en utilisant deux types de béton et de ferrailage :

Les données sont : la hauteur $H=4\text{m}$ et largeur $L=8\text{m}50$ du mur.

1^{er} cas

Acier Fe E40 : $f_y = 400$ MPa, $f_u = 500$ MPa.

Béton C25 : $f_c = 25$ MPa.

Ferrailage 12Ø12 : $A_s = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{ml}$.

$$(5) \Rightarrow f_{ds} = 1,2 (400) + \frac{1,05 \cdot (500) - 1,2(400)}{4}$$

$$f_{ds} = 491,25 \text{ MPa}$$

$$(6) \Rightarrow f'_{dc} = 1,25 \times f_c = 1,25 \times 25$$

$$f'_{dc} = 31,25 \text{ MPa}$$

$$\text{On remplace dans (9)} \Rightarrow e_{\min} = \frac{1}{0,9} \left[\frac{0,144 (4)^2}{8 \times 1,35 \times 10^{-3} \times 491,25} + \frac{\frac{1,35 \times 10^{-3} \times 491,25}{0,85(31,25)}}{2} \right]$$

On obtient : $e_{\min} = 0,497 \text{ m}$

2^{ème} cas

Acier Fe E50: $F_y=500$ MPa ; $F_u=550$ MPa

Béton C30 : $f_c=30$ MPa

Ferrailage 12 Ø 16 : $A_s=2,41 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$(5) \Rightarrow f_{ds} = 1,2(500) + \frac{1,05(550) - 1,2(500)}{4}$$

$$f_{ds} = 594,375 \text{ MPa}$$

$$(6) \Rightarrow f'_{ds} = 1,25 \times f_c = 1,25 \times 30$$

$$f'_{ds} = 37,5 \text{ MPa}$$

$$\text{On remplace dans (9)} \Rightarrow e_{\min} = \frac{1}{0,9} \left[\frac{0,144(4)^2}{8 \times 2,41 \times 10^{-3} \times 594,375} + \frac{\frac{2,41 \times 10^{-3} \times 594,375}{0,85 \times 37,5}}{2} \right]$$

On obtient : $e_{\min} = 0,248 \text{ m}$

Le calcul de la condition de non-fragilité du mur :

$$\frac{As}{b d} \geq 0,23 \frac{f_{ij}}{f_e} \dots \dots \dots (11)$$

Appliquer les calculs pour le 1^{er} Cas :

$$e=0,497\text{m} \Rightarrow d=0,446\text{m}$$

Contrainte de traction : $f_{ij} = 0,06 f_{cj}$

$$\frac{As}{b d} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot (0,446)} = 0,003$$

$$0,23 \frac{f_{ij}}{f_e} = \frac{1,5}{400} = 0,00086$$

(11) $\Rightarrow 0,003 \geq 0,00086$ Vérifiée

2^{ème} Cas

$$e=0,248\text{m} \Rightarrow d=0,2234\text{m}$$

Contrainte de traction : $f_{ij} = 0,06 f_{cj} \Rightarrow f_{ij} = 0,06 \times 30 = 1,8 \text{ MPa}$

$$\frac{As}{b d} = \frac{2,41 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot (0,2234)} = 0,001$$

$$0,23 \frac{f_{ij}}{f_e} = \frac{1,8}{500} = 0,000828$$

(11) $\Rightarrow 0,001 \geq 0,000828$ Vérifiée

Nous avons vérifié la condition de fragilité pour les deux cas précédents afin de s'assurer que l'épaisseur choisit répond à la non fragilité des résistances du mur.

5.2.3 Estimation des coûts

À titre indicatif, Nous avons considéré sur la base de 70000 DA le prix du Béton Armé fournie complet (fourniture/pose y compris toutes sujétions).

$$V = L \times H \times e = 4 \times 8,50 \times 0,248 = 8,432 \text{ m}^3$$

La construction du mur anti déflagration nécessite l'achat de l'équivalent de 9 m³ De béton afin d'avoir les résistances voulu avec les dimensions calculés.

$$\text{Prix} = 9 \times 70000 = 63 \text{ million DA}$$

L'entreprise doit donc déboursier 63 million de dinars pour la construction du mur anti déflagration qui pourrait réduire les coûts indirects d'un tel accident de dix fois moins puisque cela protège la ressource humaine de l'entreprise.

Pour le dimensionnement du mur anti déflagration, nous allons prendre le deuxième type de béton et ferraille car l'épaisseur est plus petite et la résistance est la même, donc pour protéger les bureaux exposé au risque d'explosion du four sous-vide, nous allons proposer la réalisation un mur résistant qui a pour dimension :

- H = 400 cm
- L = 850 cm
- E = 24,8 cm

Remarque : le calcul a été fait pour deux types de béton et de ferrailage et cela dans le but d'avoir une épaisseur optimale et applicable à notre cas (Atelier). Nous avons donc opté pour le deuxième cas car l'épaisseur est plus inférieure que le premier avec les mêmes résistances.

Reste à déterminer la forme légèrement en voute (forme courbé curviligne) pour une meilleure réponse aux effets de surpression.

La figure 5-11 représente la conception du mur avec les dimensions réelles faites par le logiciel Solid Works :

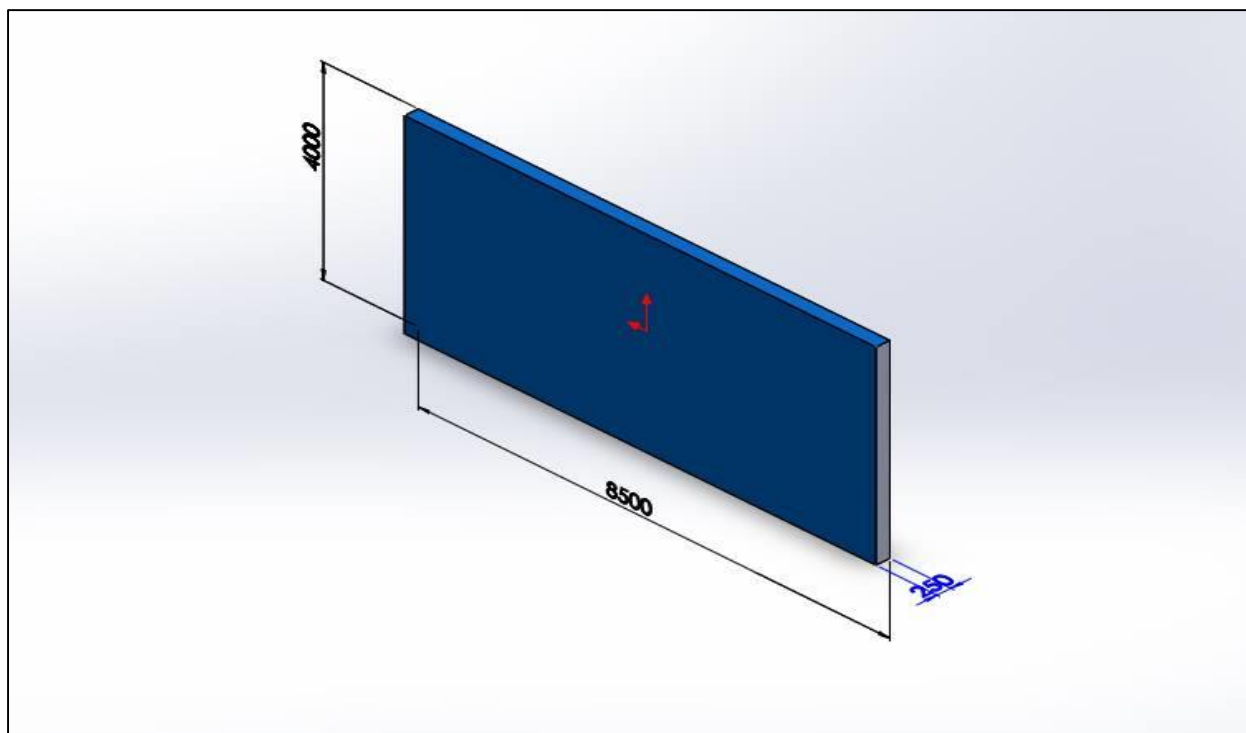


Figure 5-11 : Dimension du Mur anti déflagration avec le logiciel Solid Works.

La figure 5-12 montre l'emplacement du mur anti-déflagration par rapport aux bureaux des ingénieurs :

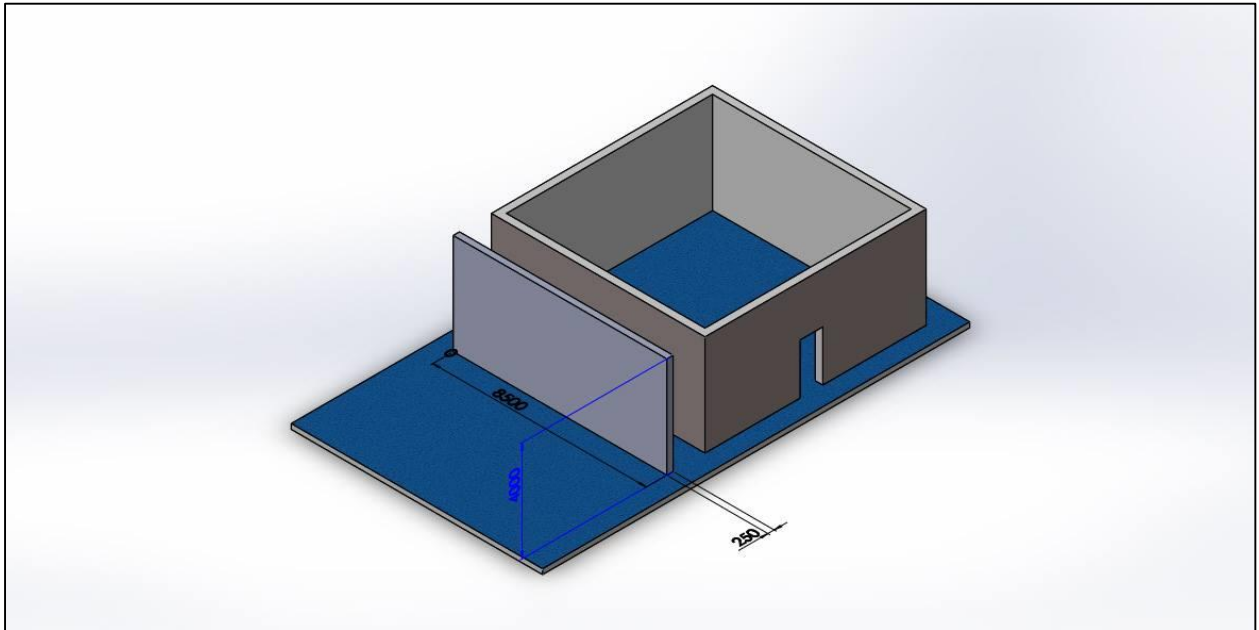


Figure 5-12 : Emplacement du mur par rapport aux bureaux des ingénieurs.

Ce mur a pour rôle de protéger les cibles humaines (employer) contre les effets de l'explosion du four ou même des effets de surpression due à l'explosion d'autres installations voisines. Cette mesure d'ordre architectural ne peut que réduire la gravité d'un phénomène dangereux puisque selon les résultats du chapitre 4 nous avons relevé que les effets de surpression de l'explosion sont plus importants à proximité du four sous vide (bureaux des ingénieurs).

5.3 Mesure d'origine organisationnelle : Modification du plan de maintenance

Nous avons modifiés le plan de maintenance préventive d'Algesco GE Oil & Gas. EN se basant sur l'AMDEC faite précédemment nous avons pu compléter l'ancien programme de maintenance (Voir l'annexe 13) par le contrôle des équipements critiques qui n'ont pas été pris en considération. Nous avons ajoutés les vérifications suivantes :

- La chambre de chauffe
 - ✓ Les brides

- L'enfournage
 - ✓ Les électrovannes

- Les pompes à vides
 - ✓ Soupape de pré-diffusion
 - ✓ Le réservoir

- Le système pneumatique et gaz
 - ✓ Pompe pneumatique à eau

- Équipement de sécurité
 - ✓ Soupape de sécurité

Dans le nouveau plan de maintenance, Nous sommes passés de 63 à 73 programmes de maintenance des équipements. Cette modification a été approuvée par le service maintenance de l'entreprise.

Cette solution de maîtrise (plan de maintenance préventive) influence le maintien de la performance des barrières techniques de sécurité (stabilisation des niveaux de confiance dans le temps).

Les mesures proposées dans ce chapitre ont pour rôles de réduire le risque d'apparition des phénomènes dangereux dans cette installation qui présente le plus de risques (four sous-vide). À travers les solutions proposées, nous pourrons maîtriser les risques majeurs qui peuvent coûter cher à Algesco GE Oil & Gas.

Conclusion

L'objectif de ce travail est la maîtrise des risques majeurs au niveau du centre de maintenance de la turbo machinerie (GE Oil & Gas). Pour atteindre cet objectif, nous avons tracé une méthodologie avec des outils adaptés en alignant notre démarche sur le processus de maîtrise des risques de la norme ISO 31000.

La méthodologie de critique de l'EDD effectuée par le bureau d'étude nous a montré la nécessité du déploiement d'une APR pour tous les systèmes présents dans le centre de maintenance. Cette méthode a montré que le four sous vide est l'une des installations qui présentent le plus de risques critiques avec un pourcentage de 52,17%. Aussi, nous avons appliqué la méthode AMDEC pour ces risques. Celle-ci nous a permis de déterminer les modes de défaillances des équipements susceptibles de causer des risques critiques et nous a également servi comme outil pour l'élaboration d'une AdD pour chaque évènement non souhaité. Les ENS sur lesquels nous nous sommes basés dans étude sont :

- Surpression ;
- Mélange O₂+H₂ ;
- Surchauffe ;
- Fuite d'huile de silicone.

Le calcul des probabilités d'apparition pour chaque ENS a montré que le résultat obtenu pour la fuite d'huile de silicone est très faible ($2,73 \times 10^{-3}$). Les autres probabilités étant de 0,13 pour le mélange explosif, de 0,11 pour la surpression et de 0,1 pour la surchauffe. L'AdE appliqué pour ces derniers a conduit à la plus grande probabilité d'apparition pour l'explosion due mélanges explosifs O₂+H₂ soit 0,02.

La combinaison les deux arbres AdD et AdE a abouti à un nœud papillon permettant de schématiser le scénario de chaque ENS.

La modélisation des effets du phénomène le plus probable et le plus dangereux à l'aide du logiciel PHAST a conduit à la détermination de la zone critique qui entoure le danger. Elle a également permis de connaître les cibles visées afin de situer l'endroit vulnérable qui nécessite une mise en place de barrière de protection. Quant à la formule mathématique obtenue par le logiciel MATLAB, elle permet de définir la suppression à un emplacement donnée dans le centre de maintenance

Selon la méthode d'évaluation *Heat Map*, le four sous-vide présente des risques jugés inacceptables. Aussi des mesures sécuritaires s'avèrent nécessaires pour réduire la probabilité et la gravité du risque. Trois barrières ont été proposées.

Un Système Instrumenté de sécurité SIS pour réduire la probabilité du risque de défaillance de l'électrovanne de l'hydrogène. Pour cela, il a fallu :

- Calculer l'allocation du SIL requis à l'aide de la méthode Graphe de risque soit SIL=1.
- Proposer une architecture du SIS
- Confirmer le SIL de l'architecture proposée avec le logiciel GRIF.

Le dimensionnement d'un mur anti déflagration en béton armé de 25 cm d'épaisseur afin de protéger les ingénieurs qui travaillent à proximité du four sous-vide contre le risque d'explosion en réduisant la gravité des effets.

Un plan de maintenance préventive dans le but de prendre en compte les équipements qui pourraient être responsables à la survenue des risques critiques définis précédemment.

Et enfin, nous proposons comme perspectives, d'une part, l'application de ces solutions pour une industrie ayant une installation similaire. Et d'autre part, une étude de maîtrise de risques au niveau de l'installation du revêtement thermique dans l'optique d'améliorer la sécurité des personnes et des installations.

Références bibliographiques

[1] B.BARTHÉLEMY, P.COURRÈGES, Février 2004, Gestion des risques, Méthode d'optimisation globale, Edition d'organisation.

[2] Journal officiel de la république Algérienne N°84, 17 Dhou El Kaada 1425 correspondant au 29 décembre 2004, Loi n°04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable, Edition original, p.14.

[3] International Organization for Standardization (ISO), 25 Juillet 2009, ISO 31000 : Management du risque-Principes et lignes directrices, Edition original.

[4] DEBRAY.B, CHAUMETTE.S, DESCOURIERE.S, TROMMETER.V, INRIS-DRA-2006-P46055-CL47569, Ω7 : Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle.

[5] MAZOUNI.M.H, 13 novembre 2008, Doctorat de l'institut National Polytechnique de Lorraine, Pour une meilleure approche du management des risques: de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision, p.47.

[6] MORTUREUX.Y, Technique de l'ingénieur, 10 octobre 2002, Sécurité et gestion des risques- méthode d'analyse des risques- Maîtriser les concepts et méthodes nécessaire à la sécurité et à la gestion des risque- Analyse Préliminaire des risques.

[7] Ridoux.M, Technique de l'ingénieur, 10 octobre 2002, Sécurité et gestion des risques- méthode d'analyse des risques- Maîtriser les concepts et méthodes nécessaire à la sécurité et à la gestion des risque- Analyse des Modes de Défaillance leurs Effets et leurs criticités.

[8] GENERAL ELECTRIC, 2016, Bowtie Training: scenario based risk management.

[9] Journal officiel de la république Algérienne N°37, Dimanche 8 Joumada El Oula 1427 Correspondant au 4 juin, Décret exécutif n° 06-198 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement, Edition original, p.8.

[10] SAADLI.S, 18 Décembre 2015, Doctorat de l'université El Hadj Lakhdar-BATNA- institut d'hygiène et de sécurité Industrielle, Développement et validation d'une approche globale, dynamique et participative d'évaluation environnementale stratégique, p.44.

[11] MERAD.M.M, 16 mars 2004, INRIS-DRA 38- appui technique aux comités nationaux d'harmonisation des pratiques des études de dangers et des expertises- analyse de l'état de l'art sur les grilles de criticité.

[12] TAV Engineering, 2008, Manuelle d'utilisation et d'entretien- Four Horizontal en haut vide avec convection et refroidissement par gaz pressurisé par flux bi-axial symétrique multidirectionnel-Modèle TPHF 120/120/120 HP Fast Jet S/N 411.

[13] Companies: ENI S.p.A/AGIP Exploration & Production- BP Exploration Operating Company-ExxonMobil International- Norsk Hydro ASA- Phipps Petroleum Company

Norway- Statoil ASA-Shell Exploration & Production- Total Final Elf, 2002, OREDA, Offshore Reliability Data Handbook, 4^{ème} Edition.

[14] DIANOUS.V, BOUISSOU.C, ADJADJ.A, INRIS-DRA-PREV-2005-460366-Op j- Intégration de la dimension probabiliste dans l'analyse des risques - Parti- 2: Données quantifiées.

[15] MOUILLEAU.Y, LECHAUDEL.J.F, INRIS-juillet 1999, Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre.

[16] GIORDANO.V, GENERAL ELECTRIC, Hazard Heat Map & Strength of defenses.

[17] CEI/IEC 61 508-5:1998, Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/ électronique programmables relatifs à la sécurité- Partie 5: Exemples de méthodes de détermination des niveaux d'intégrité de sécurité, Premier Edition.

[18] CEI/IEC 61 508-1:1998, Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/ électronique programmables relatifs à la sécurité- Partie 1 : Prescription générale, Premier Edition.

[19] TOTAL, 31 janvier 2011, Manuelle d'utilisation : Logiciel GRIF - MODUL SIL.

[20] DEBRAY.B, DUPLANTIER.S, PROUST.C, MAVROT.G, MERCIER.F, RICHOMME.S, REIMERINGER, INRIS-DRA-2007-N°46055/77288, la résistance des structures aux actions accidentelles.

[21] LEROUX.B, HEBRARD.J, WILLOT.A, 20 octobre 2014, Annexe 22- N° DRA-14-128309-09517A- Modélisation de l'explosion dans le post gaz CPCU.

Annexes

Annexe 1 : Décomposition fonctionnelle

Système				Sous-système				
S-N°	Nom	Entrés	Sorties	SS-N°	Nom	Entrés	Sorties	Équipement
1	Traitement thermique	Pièces rigides (n'admet aucun traitement)	Pièces aptes à recevoir d'autres traitements	1	Résistances en graphite	Énergie électrique	Énergie thermique	Résistances en graphite Enceinte Thermocouples
				2	Pompes sous-vide	L'air (Intérieur du four)	L'air (Extérieur du four)	Pompe Mécanique Pompe de roots Pompe de diffusion Pompe de maintien Canalisation Soupapes DéTECTEUR de fuite Soupape d'admission d'air Vanne manuelle d'échappement
				3	Refroidisseur des pièces	Argon Azote	\	Canalisation Soupape
				4	Refroidisseur du four	L'eau	L'eau	Canalisations Chille Pompes Thermocouple safet
2	Revêtement thermique	Les Pièces Sans revêtement thermique	Pièces avec revêtement thermique	1	HVOF	Kérosène Oxygène Poudre Air Comprimé	Une flamme pour revêtement La poudre bruler	Canalisations Robot

Annexes

				2	APS plasma	Argon Hydrogène Azote Air Comprimé	Une flamme pour revêtement	Electrode Nozzel Robot Canalisations
				3	Arc Aluminium	Bobine d' aluminium Air Comprimé	Aluminium fondu	Appareil Smart Arc Robot
				4	Refroidisseur	L'eau	L'eau	Chiller Canalisation
				5	Extracteur des poussières	Poussières	Poussières	Extracteur Bac de dépôt des poussières
3	Décapage chimique	Les pièces avec l'ancien revêtement (les aubes HP).	Les pièces sans revêtement (les aubes HP).	1	Robot	Carrier Les aubes	Carrier Les aubes	Élingue de levage Carrier Les aubes Écran de commande automatique
				2	Bassins de traitement	Pièces avec l'ancien revêtement	Pièces sans revêtement thermique	Bassin d'acide Bassin rinçage Bassin de neutralisation Bassin Rinçage ultrason Bassin séchage Décteur de niveau et de température, Pompe

								de filtration et d'agitation Pompes de dosage Canalisations
				3	Scrubber	Vapeurs Acides	Liquide pollué	Tour d'absorption Bac NaOH Pompe ph métrique Électrovanne
4	Sablage	Pièces avec revêtement thermique (liners)	Pièces sans revêtement thermique (liner) Préparation de la surface des pièces pour le revêtement	1	Table tournante	Pièce avec revêtement thermique (liners)	pièces sans revêtement thermique (liners)	Fixateur de la pièce Moteur réducteur Transmission par courroie
				2	Buse de projection	Oxyde d'aluminium	Oxyde d'aluminium	Moteur réducteur de la buse trémie
				3	Tamiseur	Toutes les particules	Chaque étage fait ressortir des dimensions différentes	Tamis Collecteur de poussières
				4	Collecteur de l'oxyde d'aluminium	Oxyde d'aluminium	Oxyde d'aluminium	Cyclone Canalisations Générateur de sable Réservoir de l'air comprimé

								Electrovanne
5	Stockage des gaz \ liquides.	Argon Azote Oxygène	Argon Azote Oxygène	1	Bac de stockage d'Argon\Azote liquéfié.	Argon\Azote liquide	Argon\Azote liquide	Bac de stockage Soupapes vannes Pompe Canalisation
				2	Réchauffeur du fluide	Argon\ Azote liquide	Argon\ Azote gaz	Réchauffeur du fluide
				3	Bac de stockage d'Argon\Azote en gaz	Argon\ Azote gaz	Argon\ Azote gaz	Bac de stockage Soupapes vannes Canalisation
				4	Bac de stockage d'Oxygène liquéfié	Oxygène liquide	Oxygène liquide	Bac de stockage Soupapes vannes Pompe Canalisation
				5	Réservoir de l'eau	Eau	Eau	Réservoirs Pompes à eau Pompe pneumatique Canalisations Chiller
6	Stockage des produits chimiques	Produits chimiques	Produits chimiques	1	Bac déchets acides	Résidu du décapage chimique	Résidu du décapage chimique	Bac de stockage Pompes Vannes Canalisations
				2	Bac acide chlorohydrrique	Acide chlorohydrrique 30%	Acide chlorohydrrique 30%	Bac de stockage Pompes

Annexes

					30%			Vannes Canalisations
				3	Bac acide phosphorique 75%	Acide phosphorique -que 75%	Acide phosphorique 75%	Bac de stockage Pompes Vannes Canalisations
				4	Bac acide Hydro-fluosilicique 33-42%	Acide fluosilicique 33-42%	Acide fluosilicique 33-42%	Bac de stockage Pompes Vannes Canalisations
				5	Bac soude caustique 50%	Soude caustique 50%	Soude caustique 50%	Bac de stockage Pompes Vannes Canalisations
				6	Réservoir d'eau	Eau	Eau	Électrovanne pompe Réservoir

Annexe 2 : APR Four sous vide

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Recommandation	N° des risques
1	Les éléments chauffant	Augmentation brutale de la température	Surchauffe	Défaillance des thermocouples de sécurité Défaillance du système de régulation de température	*Dégradation des composants *Perte des pièces en traitement	3	3	33	* Programme de maintenance préventive *Contrôle périodique du système de régulation de la température	1	* Alarme lumineuse de signalisation d'urgence * Système de refroidissement	2	12		R11
			Carbonisation des barres en graphite	Mauvais contact électrique	*Détérioration des composants fragiles (brides)	3	3	33	*Maintenance préventive *Contrôle périodique	1	* Signale d'alerte dans l'écran de commande	2	12		R12

Annexes

			Incendie	Dysfonctionnement du système de refroidissement du four	*Destruction du four *Brulure humaine *Destruction structurelle *Machine adjacentes	2	4	24	* Contrôle et maintenance périodique du système de refroidissement *Vérification de la sureté de fonctionnement du Chiller et du réseau des pompes à eau	1	* Système anti incendie interne *déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13	Arrêt d'urgence à distance de toutes les installations adjacentes	R13
2	Mélange O2 + H2 et une source de chaleur	Perte de confinement	Explosion	Dysfonctionnement intempestive de la soupape d'admission d'air et la soupape d'hydrogène	* Destruction du four *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machine adjacentes	2	4	24	*Inspection et maintenance périodique de la pompe mécanique *Fermeture automatique de la soupape d'hydrogène lors de l'arrêt de la pompe	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R21
				Dysfonctionnement intempestive de la vanne manuelle d'échappement et la soupape d'hydrogène	*Destruction du four *Atteinte des personnes *Destruction structurelle *Machine adjacentes	2	4	24	*Inspection et maintenance périodique de la pompe roots *Fermeture automatique de la soupape d'hydrogène lors de l'arrêt de la pompe	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R22

Annexes

			Entrée inattendue de l'oxygène dans l'enceinte due à l'erreur humaine	*Destruction du four *Atteinte des personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	*Inspection et maintenance périodique de la pompe roots *Fermeture automatique de la soupape d'hydrogène lors de l'arrêt de la pompe	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R23
		Mauvaise création du vide dans l'enceinte	Dysfonctionnement de la pompe de maintien	*Déséquilibre thermique *Détérioration des pièces	3	2	32	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe de maintien	1	*Arrêt d'urgence du four *Allumage du signal orange dans l'écran de commande	1	11		R24
			Dysfonctionnement de la pompe de diffusion	*Déséquilibre thermique *Détérioration des pièces	3	2	22	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe de diffusion et de la soupape de diffusion	1	*Arrêt d'urgence du four *Allumage du signal orange dans l'écran de commande	1	11		R25
Pompe de diffusion	Augmentation de la température dans la pompe	Explosion	Erreur humaine qui a fait que l'opérateur purge la pompe à diffusion chaude	*Destruction du four *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	* Respect des règles de sécurité et formation de l'opérateur	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R26

Annexes

	L'huile de silicone	fuite du réservoir à huile	Explosion	*Fissure ou perforation du réservoir *Dysfonctionnement de la pompe de diffusion	*Destruction du four *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	*Maintenance préventive et contrôle préventive des pompes à diffusion	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R27
	Soupape de sécurité	Haute pression	Explosion	Défaillance mécanique	*Destruction du four *Effet dominos *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	*Maintenance préventive *Vérification de sûreté de fonctionnement de la vanne	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R28
	Soupape de pré-vidé de diffusion	Absence du haut vide	Arrêt de la pompe de diffusion	Dysfonctionnement de la soupape	*Mauvais traitement thermique et détérioration des pièces	3	2	42	*Contrôle périodique *Maintenance préventive des soupapes	2	*Détection au niveau du tableau de commande *Arrêt d'urgence du four	1	21		R29
3	Brides	Corrosion	Fuite d'argon	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	Asphyxie	3	2	32	*Contrôle visuelle\ Contrôle avec système de détection de fuite	1	*Changement des brides	1	11	*Traitement anti corrosion des brides	R31

Annexes

			Fuite d'azote	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	Brulure	3	2	32	*Contrôle visuelle/ Contrôle avec système de détection de fuite	1	*Changement des brides	1	11	*Traitement anti corrosion des brides	R32
	Gas	Haute pression	Explosion	Défaillance des Soupapes de sécurité	*Destruction du four *Effet dominos et destruction des bacs de stockages	3	4	34	*Programme de maintenance préventive et contrôle périodique de la sûreté de fonctionnement de la vanne de sécurité	2	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	23		R33
	Canalisations	Corrosion	Fuite de gaz	*Fissure *Perte de rigidité *Vieillessement du métal	*Asphyxie/ Brulure	3	2	32	Contrôle visuelle/ Contrôle avec système de détection de fuite	1	*Changement des canalisations	1	11	*Traitement anti corrosion des canalisations	R34
		Fuite	Mauvaise alimentation de gaz Chute de pression du gaz	*Fissure/perforation de la canalisation	*Asphyxie, pollution	3	2	22	*Contrôle visuelle/Contrôle avec système de détection de fuite	1	*Changement des canalisations	1	11		R35

Annexes

	Soupape d'admission de gaz	haute pression	Explosion	Défaillance mécanique de la soupape d'admission et la soupape de sécurité	*Destruction du four *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	* Respect des règles de sécurité et formation de l'opérateur	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R36
	soupape de pression partielle d'hydrogène	Haute pression	Explosion	Défaillance de la soupape d'hydrogène	*Destruction du four *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	* Respect des règles de sécurité et formation de l'opérateur	1	*déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R37
4	Pompe	Arrêt de la pompe pneumatique	Incendie	Coupure d'électricité	*Destruction des équipements *Brulure *Destruction structurelle *Machines adjacentes	2	4	24	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe de sécurité	1	*Système anti incendie interne *déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13	*Mettre en place une deuxième pompe de sécurité	R41

Annexes

		Perte de pression	Mauvais pompage	Défaillance de la pompe à eau	*Mauvais refroidissement du four *Détérioration des équipements	2	2	23	*Contrôle et maintenance préventive des pompes à eau	1	*Détection au niveau de l'écran de commande *Fonctionnement de la pompe de secours	1	11		R42
	Refroidissement de l'eau	Haute température	Incendie	Dysfonctionnement du Chiller	*Destruction des équipements *Brulure *Destruction structurelle *Machine adjacentes	3	4	24	*Maintenance préventive et contrôle de sûreté de fonctionnement du refroidisseur d'eau	2	*Système anti incendie interne *déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	23	*Arrêt d'urgence à distance de toutes les installations adjacentes	R43
	Thermocouple safety	Arrêt ou dysfonctionnement	Augmentation de la température	Défaillance du thermocouple	*Détérioration des équipements	3	3	33	*Contrôle et maintenance périodique du thermocouple safety	2	*Thermostat de sécurité	1	21		R44

Annexe 3 : APR Machine Coating

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition	N° des risques
1	Robot (bras mécanique)	Flamme	Incendie	*Défaillance du système directionnel du robot	*Destruction de la cabine du revêtement	2	4	24	*Contrôle et maintenance préventive du robot *Contrôle du système de commande *Système d'arrêt automatique d'urgence du robot	1	*Système anti incendie interne *Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13	*Désactivation des inter locks	R11
	Kérosène	Défaillance du robot (incendie)	Explosion	*Mélange des vapeurs du kérosène avec l'air	*Destruction de la cabine du revêtement thermique * Machines adjacentes *Atteinte aux personnes	2	4	24	*Contrôle et maintenance préventive du robot* vérification des conduites et canalisations du kérosène	1	* Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R12
	Canalisation	Fuite à l'intérieur de la cabine	incendie/explosion	*Haute température *Grande flamme	*Destruction de la cabine du revêtement thermique * Machines adjacentes	2	4	24	*Contrôle visuelle des canalisations	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations urgences	3	13	*Désactivation des inter locks	R13

Annexes

				*Atteinte aux personnes									
	Fuite à l'extérieur de la cabine	Déversement du kérosène/oxygène	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	* Pollution	2	2	22	*Contrôle visuelle des canalisations	1	* Dépollution du sol	1	11	R14
	Corrosion à l'intérieur de la cabine	incendie/explosion	*Haute température *Grande flamme	*Destruction de la cabine du revêtement thermique * Machines adjacentes *Atteinte aux personnes *Destruction structurelle *Machine adjascentes	2	4	24	* Traitement anti-corrosion *Choix du métal de longue durée de vie	1	*Déclanchement du plan de réponse aux situations urgences	3	13	*Désactivation des inter locks R15
	Corrosion à l'extérieur de la cabine	Fuite du kérosène/oxygène	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	* Pollution	2	2	22	* Traitement anti-corrosion *Choix du métal de longue durée de vie	1	*Dépollution du sol	1	11	R16

Annexes

2	Robot (bras mécanique)	Flamme	Incendie	*Défaillance du système directionnel du robot	*Destruction de la cabine du revêtement	2	4	24	*Contrôle et maintenance préventive du robot *Contrôle du système de commande *Système d'arrêt automatique d'urgence du robot	1	*Système anti incendie interne *Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13	*Désactivation des inter locks	R21
	Canalisation	Fuite	Déversement de l'hydrogène/argon/azote	*Fissure dans la canalisation	*Pollution	3	2	32	*Contrôle visuelle des canalisations	2	*Dépollution du sol *Changement des conduites	1	21		R22
		Corrosion	Fuite	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	*Détérioration de la conduite *Pollution	3	2	32	* Traitement anti-corrosion *Choix du métal de longue durée de vie	1	/	2	12		R23
3	Robot (bras mécanique)	Flamme	Incendie	*Défaillance du système directionnel du robot	*Destruction de la cabine du revêtement	2	4	24	*Contrôle et maintenance préventive du robot *Contrôle du système de commande *Système d'arrêt automatique d'urgence du robot	1	*Système anti incendie interne *Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13	*Désactivation des inter locks	R31

Annexes

	Appareil Smart Arc	haute température	Surchauffe	*Absence de l'air comprimé	*Détérioration de l'appareil	2	3	23	*Contrôle de l'alimentation en air comprimé	1	* Arrêt d'urgence du procès	2	12	*Mettre en place un thermocouple détecteur	R32
4	canalisation	Corrosion	Détérioration de la conduite	*Perte de rigidité *Vieillessement du métal	*Mauvaise alimentation *fuite	3	2	32	* Traitement anti-corrosion *Choix du métal de longue durée de vie	2	/	2	22		R41
	refroidissement de l'eau	haute température	Arrêt du système de refroidissement	* Dysfonctionnement du shiller	*Mauvais refroidissement des pièces	3	2	32	*Contrôle et maintenance préventive du shiller	2	/	2	22		R42
5	Extracteur	*Combustion incomplète des poudres	*Inhalation des poussières	* Défaillance de l'extracteur	*Dispersion des poussières cancérogènes	3	3	33	* Contrôle et maintenance périodique de l'extracteur	2	/	2	22		R51

Annexe 4 : APR Silos de stockage des gaz/liquide

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition	N° des risques
1	Bac de stockage Azote/Argon liquéfiés (solution mère)	Haute pression	Explosion/Déflagration	Défaillance de la soupape de sécurité	*Effet dominant * Destruction du bac *Atteinte aux personnes	2	4	24	* Contrôle et maintenance préventive de la soupape de sécurité	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R11
		Perte de confinement	fuite	Fissure du bac	*Asphyxie * Brulure *Pollution	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Dépollution du Sol	2	12		R12
2	Réchauffeur du liquide	Baisse de température	Condensation du liquide dans le réchauffeur	Défaillance du réchauffeur	*Evacuation du liquide dans les réservoirs de gaz	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive du réchauffeur	1	*Vidange du liquide du bac de gaz	2	12		R21
3	Stockage d'Argon/Azote en gaz	Haute pression	Explosion	Défaillance de la soupape de sécurité	*Effet dominant * Destruction du bac *Atteinte aux personnes	2	4	24	* Contrôle et maintenance préventive de la soupape de sécurité	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R31
		Perte de confinement	fuite	Fissure du bac	*Asphyxie * Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	* Dépollution du Sol	2	12		R32

Annexes

4	Stockage de l'oxygène liquéfié	Haute pression	Explosion	Défaillance de la soupape de sécurité	*Effet dominant * Destruction du bac *Atteinte aux personnes	2	4	24	* Contrôle et maintenance préventive de la soupape de sécurité	1	*Déclenchement du plan de réponse aux situations d'urgence	3	13		R14
		Perte de confinement	fuite	Fissure du bac	*Asphyxie * Brulure *Pollution	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Dépollution du Sol	2	12		R42
5	Réservoir d'eau	Perte de confinement	fuite	Fissure du Réservoir	*Déversement et perte de charge	2	2	22	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	/	2	12		R51

Annexe 5 : APR Système décapage chimique

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition	N° des risques
1	Carrier	Dysfonctionnement de l'élingue de levage	Chute du carrier	*Perte de caractéristique mécanique *Usure de l'élingue	*détérioration du bassin et des pièces	2	2	2 2	*Contrôle et maintenance de l'équipement de levage	1	*L'existence d'un double bac de rétention	2	12		R11
		Arrêt du robot	Blocage du carrier à l'intérieur de l'un des bassins	* Défaillance du système automatique de levage du robot	* détérioration des pièces	2	2	2 2	*Contrôle et maintenance du système automatique du robot	1	/	1	11		R12
2	Acide (HFS+H3PO4)	Fuite	* Déversement	*Perforation ou fissure du bassin	*Pollution *Brulure *Inhalation des vapeurs acides	2	4	2 4	*Mise en place des détecteur de niveau *Mise en place d'un bac de rétention	1	*Dépollution du sol *Remplissage du bac de rétention par billet du trop-plein *Déclenchement des pompes pour évacuation vers la réserve des déchets	3	13		R21

Annexes

	Soude NaOH	Fuite	* Déverssement	* Perforation ou fissure du bassin	* Pollution * Brulure	2	3	2 3	* Mise en place des détecteurs de niveau * Mise en place d'un bac de rétention	1	* Déclenchement des pompes pour évacuation vers la réserve des déchets * Remplissage du bac de rétention par billet du trop plein * Dépollution du sol	2	12		R22
	Générateur d'ondes	Arrêt du générateur	* Mauvais traitement ultrason	* défaillance du générateur	* les pièces ne sont pas purifiées des particules acides microscopiques	2	2	2 2	* Contrôle et maintenance préventive du générateur d'onde	1	/	2	12	* Test des pièces après décapage	R23
3	Pompe pH métrique	Arrêt de la pompe pH métrique	* Absence de neutralisation de l'eau acidifiée	* Défaillance de la pompe pH métrique	* Mauvais résultat du traitement des vapeurs acides	2	3	2 3	* Contrôle et maintenance préventive de la pompe pH métrique	1	/	3	13	* Mettre en place un deuxième pH mètre de secours	R31
	Electrovanne	Ouverture de l'électrovanne de remplissage d'eau	Remplissage excessive	* Défaillance de l'électrovanne	* Déverssement de l'eau dans la salle de stockage	3	2	3 2	* contrôle et maintenance préventive de l'électrovanne	2	/	2	22		R32

Annexe 6 : APR Silos de produits chimiques

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition	N° des risques
1	Bacs de déchet décapage chimique (cobalt, chrome, nickel, aluminium)	Acide	Fuite des déchets	Corrosion	*Pollution *Brulure *Détérioration des équipements adjacents	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R11
		Rupture de la jauge	Fuite des déchets	Corrosion de la jauge	*Pollution *Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R12
2	Bac acide chlorhydrique 30%	Acide	Fuite des acides	Corrosion	*Pollution *Brulure *Détérioration des équipements adjacents	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R21
		Rupture de la jauge	Fuite des acides	Corrosion de la jauge	*Pollution *Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R22
3	Bac acide phosphorique 75%	Acide	Fuite des acides	Corrosion	*Pollution *Brulure *Détérioration des équipements adjacents	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R31

Annexes

		Rupture de la jauge	Fuite des acides	Corrosion de la jauge	*Pollution *Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R32
4	Bac acide fluosilicique 33-42%	Acide	Fuite des acides	Corrosion	*Pollution *Brulure *Détérioration des équipements adjacents	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R41
		Rupture de la jauge	Fuite des acides	Corrosion de la jauge	*Pollution *Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R42
5	Bac soude caustique 50%	Soude	Fuite de la soude	Corrosion	*Pollution *Brulure *Détérioration des équipements adjacents	2	3	23	*Contrôle et maintenance préventive de la pompe	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R51
		Rupture de la jauge	Fuite de la soude	Corrosion de la jauge	*Pollution *Brulure	2	3	23	*Contrôle visuelle *Mise en place d'un détecteur de fuite	1	*Traitement anti corrosion *Dépollution du sol	2	12		R52
6	Réservoir d'eau	Ouverture de l'électrovanne de remplissage d'eau	remplissage excessif	*Défaillance de l'électrovanne	*Déversement de l'eau dans la salle de stockage	3	2	3 2	*contrôle et maintenance préventive de l'électrovanne	2	/	2	22		R61

Annexe 7 : APR Sablage

SS	ED	SD	ENS	Causes	Conséquences	P	G	C	Mesure de prévention	P'	Mesure de protection	G'	C'	Proposition	N° des risques
1	Support de fixation	Usure	Détachement de la pièce	Perte de rigidité du fixateur	*Destruction de la pièce *Détérioration des équipements présents dans la cabine de sablage	2	3	23	* Contrôle et maintenance préventive du fixateur	1	*Arrêt automatique de la table tournante	2	12		R11
	Moteur réducteur	Electricité	Endommagement du moteur	Sur tension	* Sablage non uniforme dans toutes la surface de la pièce en absence de rotation *Détérioration de la pièce	2	2	22	*Contrôle et maintenance préventive du moteur	1	/	2	12		R12
	transmission de mouvement par courroie	Frottement	Rupture de la courroie	Usure	* Sablage non uniforme dans toutes la surface de la pièce en absence de rotation *Détérioration	2	2	22	*Contrôle et maintenance préventive du système de transmission	1	* Changement des courroies	1	11		R13

Annexes

					on de la pièce									
2	Buse de projection (Angle 45°)	Haute pression	explosion de la Buse	obstruction des orifices	*destruction de la buse *détérioration des équipements *Sablage anarchique	2	3	23	*Contrôle périodique de la buse	1	*Changement périodique de la buse	2	12	R21
3	Tamiseur	Défaillance du tamiseur	Mélange des particules	Fissure des tamis	*Détérioration de la pièce * Mauvaise qualité de l'oxyde d'aluminium récolté pour le sablage	2	3	23	*Contrôle et maintenance périodique des tamis	1	* changement du tamis	1	11	R31
4	Collecteur de l'oxyde d'aluminium	Corrosion, usure	Fuite	perforation du cyclone	* Déversement de l'oxyde de l'aluminium *Pollution	3	2	32	* Contrôle visuelle *Traitement anti-corrosion	2	/	2	22	R41

Annexe 8 : Échelle de cotation APR

- Échelle de probabilité

Niveau de probabilité	Traduction qualitative
1	Événement improbable dans la vie d'une installation. Ne s'est jamais produit de façon rapprochée sur le site mais très rarement sur d'autres sites.
2	Événement peu probable dans la vie d'une installation. Ne s'est jamais produit de façon rapprochée sur le site mais quelques fois sur d'autres sites.
3	Évènement probable dans la vie d'une installation. Ne s'est jamais produit de façon rapprochée sur le site mais a été observé de façon récurrente sur d'autres sites
4	Événement très probable dans la vie d'une installation S'est déjà produit sur le site ou de nombreuses fois sur d'autres sites

- Échelle de gravité

Niveau de gravité	Cibles humaines	Cibles matérielles	Cibles environnementales
1	Pas d'effets significatifs sur le personnel du site	Pas d'effets significatifs sur les équipements du site	Pas d'atteintes significatives à l'environnement
2	Aucun effet critique au niveau des zones occupées ou postes de travail du site. Des effets peuvent être observés de façon très localisée.	Atteintes à des équipements dangereux du site sans synergie d'accidents ou à des équipements de sécurité non critiques	Atteintes limitées au site et nécessitant des travaux de dépollution minimes
3	Effets critiques (létaux ou irréversibles) limités à un poste de travail sur site	Atteinte d'un équipement dangereux ou d'un équipement de sécurité critique sur le site sans aggravation générale des conséquences	Atteintes sérieuses à l'environnement nécessitant des travaux lourds de dépollution
4	Effets critiques (létaux ou irréversibles) sur au moins une personne à l'extérieur du site ou au niveau des zones occupées du site	Atteinte d'un bien, équipement dangereux ou d'un équipement de sécurité critique sur le site conduisant à une aggravation générale des conséquences	Atteintes critiques à des zones vulnérables avec répercussions à l'échelle locale

Annexe 9 : Grilles de criticités APR

« Traitement thermique (Four sous-vide) »

Gravité	Probabilité			
	1	2	3	4
4				
3	R13; R21; R22; R23; R26; R27; R28 ; R36; R37; R41.	R33; R43.		
2	R11; R12			
1	R24; R28; R31; R32; R34; R35; R42.	R29; R44.		

« Revêtement thermique (Machine de coating) »

Gravité	Probabilité			
	1	2	3	4
4				
3	R11;R12;R13; R15;R21;R31			
2	R23;R32	R41; R42; R51		
1	R14;R15	R22		

« Décapage chimique (Système de stripping) »

Gravité	Probabilité			
	1	2	3	4
4				
3	R21 ; R31			
2	R11 ; R22 ; R23	R32		
1	R12			

« Sablage (Machine de sablage automatique) »

	Probabilité			
Gravité	1	2	3	4
4				
3				
2	R11;R12 ; R21 ;	R41		
1	R13 ; R31			

« Silos de stockage des gaz/liquides »

	Probabilité			
Gravité	1	2	3	4
4				
3	R11; R31;R14			
2	R12; R21; R32 R42 ; R51			
1				

« Silos de stockage des produits chimiques »

	Probabilité			
Gravité	1	2	3	4
4				
3				
2	R11; R12; R21; R22; R 31; R32; R41; R42;R51; R52	R61		
1				

Annexe 10 : AMDEC four sous-vide

Système : Four sous-vide													
SS	Composant	Fonction	Mode de défaillances	Causes	Effets	P	G	D	C	Mesure de prévention en place	P'	C'	N° des risques
Pompage	soupape d'admission d'air	Permet l'admission d'air à l'intérieur de l'enceinte pour diminuer le vide	ouverture intempestive	Défaut de commande	perte de confinement/perturbe le vide avec une augmentation de la pression	4	2	1	42	/	4	42	R1
	vanne manuelle d'échappement	Permet l'admission d'air à l'intérieur de l'enceinte pour diminuer le vide	ouverture intempestive	Erosion, usure	perte de confinement/perturbe le vide avec une augmentation de la pression	4	2	1	42	/	4	42	R2
			Fuite	Défaut de joint	Perte de confinement	4	2	3	42	/	4	42	R3
	Pompe diffusion	permettre a l'enceinte d'atteindre un haut vide, cette pompe fonctionne à l'huile de silicone	fuite interne de l'huile de silicone	corrosion ou fissure du réservoir de l'huile	Explosion de la pompe de diffusion/ destruction du four	4	1	4	41	Maintenance et contrôle périodique	5	51	R4
			fuite externe de l'huile de silicone	Erreur humaine due au purgement de l'huile chaude	Explosion de la pompe de diffusion/ destruction du four	4	1	3	41	Mettre en place un double réservoir	5	51	R5
Alimentation en gaz	Soupape d'admission du gaz	s'ouvre pour refroidir les pièces avec des gaz	ne se ferme pas	dysfonctionnement de la soupape / Défaillance de la commande automatique	Admission d'une grande quantité du gaz qui pourrait provoquer une surpression	4	2	3	42	fonctionnement de la soupape de sécurité	5	52	R6

Annexes

			Défaillance en position ouverte	Blocage mécanique	Admission d'une grande quantité du gaz qui pourrait provoquer une surpression	4	2	3	42	fonctionnement de la soupape de sécurité	5	52	R7
	soupape de sécurité	s'ouvre en cas de surpression de l'enceinte par les gaz	ne s'ouvre pas	défaillance mécanique de la soupape	Explosion du four sous-vide en cas de surpression	4	1	3	41	/	4	41	R8
Refroidissement	Chiller	refroidi l'eau pour le cycle du refroidissement du four	Arrêt intempestive	défaillance mécanique du chiller	surchauffe du four /Augmentation de la température des parois du four	3	2	4	32	Maintenance et contrôle périodique	4	42	R9
			ne démarre pas	défaillance mécanique du chiller	surchauffe du four /Augmentation de la température des parois du four	3	2	4	32	Maintenance et contrôle périodique	4	42	R10
	pompe pneumatique à eau	fonctionne en cas de coupure d'électricité	Arrêt intempestive	défaillance mécanique de la pompe	surchauffe du four /Augmentation de la température des parois du four	4	2	4	42	/	4	42	R11
			ne démarre pas	défaillance mécanique de la pompe / blocage de la soupape d'admission de l'azote	surchauffe du four /Augmentation de la température des parois du four	4	2	3	42	/	4	22	R12

Annexe 11 : Échelle de cotation AMDEC

- Échelle de probabilité

Probabilité	
Classe des gravités des conséquences	Conséquences sur les personnes ou l'environnement
1- Catastrophique	Mise en jeu de la sécurité sans système de sauvegarde. Cela peut donner lieu à un incident
2- Critique	Mise en jeu de la sécurité (l'accident est rattrapé par l'intervention d'un système de sauvegarde).
3- Majeure	Interruption de la mission (gêne sur l'utilisateur).
4- Mineure	Sans influence sur la mission (aucune gêne sur intervenants, panne possible sur l'un des éléments redondants,...)

- Échelle de gravité

Gravité	
Classe de fréquence d'occurrence	Définition
1- Fréquence	Susceptible de se produire fréquemment. La situation dangereuse (SD) est continuellement présente
2- Probable	Peut survenir à plusieurs reprises. Nous pouvons nous attendre à ce que la SD survienne souvent.
3- Occasionnelle	Susceptible de survenir à plusieurs reprises. Nous pouvons nous attendre à ce que la SD survienne à plusieurs reprises.
4- Rare	Susceptible de se produire à un moment donné du cycle de vie du système. Nous pouvons raisonnablement nous attendre à ce que la SD se produise.
5- Improbable	Peu susceptible de se produire mais possible. Nous pouvons supposer que la SD peut exceptionnellement se produire.
6- Invraisemblable	Extrêmement improbable. Nous pouvons supposer que la SD ne se produira pas.

- **Échelle de détection**

Détection	
Échelle	Traduction quantitative
4	Non détection
3	Visuelle
2	Détection manuelle : appareil de mesure ponctuelle.
1	Détection automatique : détecteurs fixes automatisés, interlocks

- **Grille de criticité**

Probabilité	Gravité			
	1	2	3	4
1	11	12	13	14
2	21	22	23	24
3	31	32	33	34
4	41	42	43	44
5	51	52	53	54
6	61	62	63	64

Annexe 12 : Échelle de cotation *Heat Map*

- Échelle des fréquences d'occurrences *Heat Map*

Niveau de fréquence	Justification
Fréquence élevée 5	L'équipement fonctionne ou devrait fonctionner au moins sur une base mensuelle (mensuelle, hebdomadaire ou quotidienne) ou implique 11 employés ou plus.
Fréquence moyenne 3 & 4	L'équipement fonctionne ou devrait fonctionner trois fois ou plus au cours de l'année, mais moins fréquemment que mensuellement ou implique 6 à 10 employés
Fréquence basse 1 & 2	L'équipement devrait fonctionner une ou deux fois au cours de l'année ou implique 5 employés ou moins.

- Échelle des gravités *Heat Map*

Niveau de gravité		Justification
D	1	<ul style="list-style-type: none"> - Premiers secours. - Dommages matériels mineurs suite à un feu de stade initial. - Arrêt de production pour une courte durée sans perte économique pour les entreprises. - Un déversement sans pollution.
C	2	<ul style="list-style-type: none"> - Blessure. - Incident qui se traduit par l'arrêt de production de 2 à 7 jours, les dommages et les coûts liés à cet arrêt sont estimés à 250000 \$, - Un incendie/ explosion, déversement / rejet nécessitant une assistance d'intervention d'urgence sur place.
B	3	<ul style="list-style-type: none"> - Blessure nécessitant le transfert à l'hôpital - L'arrêt de production est plus de 7 jours et les dommages ou les coûts liés à cet arrêt sont inférieur à 1 million \$, - Un incendie, explosion ou déversement /rejet nécessitant une assistance hors site.
A	4	<ul style="list-style-type: none"> - Fatalité ou une invalidité totale permanente. - Arrêt de production de plus de 1 mois et les coûts liés à cet arrêt sont supérieurs à 1 million \$. - Incident qui résulte de l'impact de la communauté ou de l'environnement au-delà de la clôture en ligne, qui déclenche une interruption de service public et / ou des mesures de protection de la communauté de précaution telles que l'évacuation ou à l'abri sur place.
	5	
	6	

Annexe 13 : Plan de maintenance préventive Algesco

ALGESCO G.E INTERNATIONAL SONATRACH SONELGAZ		Plan de maintenance des FOURS SOUS-VIDE SN°411					
Principale / 7		OPERATIONS PREVENTIVES					
Sous ensemble / 7							
Sous ensemble / 3		<u>S</u> urveillance et intervention niveau 1			<u>R</u> emplacement et intervention niveau 2 à 3		
Points à vérifier/ 65		Fréquence	Code	COMMENTAIRES	Fréquence	Code	COMMENTAIRES
1/ système de refroidissement.							
1-1Le groupe d'eau glacé							
Le panneauage		6mois	S1	Vérifier l'état et la fixation des parties constituant la structure, particulièrement celles en acier.	1ans	R1	Traiter avec de la peinture les parties oxydées particulièrement la base métallique.
1-2La partie hydraulique							
Le circuit hydraulique		6mois	S2	Contrôler visuellement le circuit hydraulique s'il ne présente pas de points de fuites.			

Annexes

	Valeurs, lectures, paramètres de surveillance	6 mois	S3	Des lectures de surveillance doivent être prélevées, une fiche qui contiens tous les champs nécessaires doit être remplie soit par un sous-traitant soit par un technicien interne (voir procédure).			
	La batterie de décharge (condenseur)	6 mois	S4	Vérifier que la surface soit toujours exempte de toute saleté ou poussière.	1 ans	R4	Eliminer toutes les impuretés sur la surface en aluminium de la batterie. Voir procédure.
		6 mois	S5	Vérifier que les ailettes en aluminium n'ont pas été endommagées ou pliées.			
		les ventilateurs	6 mois	S6	Vérifier le bon fonctionnement et le sens de rotation des ventilateurs.		
	Le gaz frigorifique.	1 ans	S7	Faire vérifier, par un personnel spécialisé, la pression du gaz frigorifique.			
	L'échangeur à eau	2 ans	S8	Vérifier, par un personnel spécialisé, l'efficacité de l'échangeur thermique.	4 ans	R8	Procéder au lavage à l'aide de produits chimiques appropriés.
	1-3 L'armoire électrique						
	la porte	6 mois	S9	Vérifier le joint d'étanchéité de la porte de l'armoire électrique.	5 ans	R9	Remplacer le joint de la porte.
	les connexions	6 mois	S10	Contrôler le serrage des connexions électriques de puissance.			
	La mise à la terre	6 mois	S11	Contrôler la connexion et l'efficacité de la mise à la terre.			
	Mesures	6 mois	S12	Mesurer et enregistrer la consommation électrique de : 1- Compresseurs. 2- Les ventilateur. 3- La pompe à eau.			
	1-4 Le circuit d'eau						

Annexes

	Le bac à eau	Tous les 15jr	S13	Contrôler le niveau et la qualité d'eau dans le bac a eau.	1 ans	R13	Vider et nettoyer le bac à eau. Changer le flotteur si nécessaire.
		Tous les 15jr	S14	Contrôler le petit réservoir et le niveau de l'additif antibactérien.			
	Vanne et flotteur	1 mois	S15	Contrôler la vanne d'arrêt et le flotteur.			
	La pompe de circulation.	3 mois	S16	Inspection sensorielle et visuelle. bruit anormal, vibrations ou fuites éventuelles.	5 ans	R16	Démonter et contrôler les étages de la pompe.
	Les indicateurs d'écoulement	6 mois	S17	Contrôler le fonctionnement des indicateurs d'écoulement au niveau des collecteurs d'arrivée et de départ.			
	Les conduites	6 mois	S18	Contrôler les conduites et les raccords, particulièrement celles des brides. Voir procédure.			
2 L'enceinte							
2-1 La chambre de chauffe							
	Les écrous en CFC.	15 jours	S21	Contrôler à main le bon serrage des écrous des éléments chauffants.			
	Les supports	15 jours	S22	Contrôler la position des supports des lamenteaux chauffants.			
	Les éléments chauffants	15 jours	S23	Contrôler les éléments chauffants.			
	Le cœur	15 jours	S24	Contrôler la stabilité de cœur de four.			
	Les trous d'interconnexion	15 jours	S25	Contrôler les écrous et les trous d'interconnexion électrique.			
	Les brides	2mois	S26	Contrôle du serrage des brides			

2-2 L'enfourneuse						
Le jointe de vide de la ports	1 mois	S27	nettoyer et graisser les joints de vide de la porte, couvercle et base.	12 mois	R24	Changer le joint de vide.
Les thermocouples	1 mois	S28	Contrôler l'état, la position, les connecteurs des thermocouples. Nettoyer la surface des contacts et assurer un bon contact. Contrôler la bonne réponse et l'enclenchement ex : indication supérieures à 0.			
Les verrouillages de sécurité	1 mois	S29	Contrôler le fonctionnement de verrouillage sur : 1-Rupteur de pression/ de débit d'eau. 2-Surtempérature de four. 3-Rupteur de pression pneumatique. 4-Rupteur de pression de remplissage			
La puissance de chauffe	1 mois	S30	Noter la puissance de chauffe lorsqu'on chauffe a 100%. Voir procédure.			
Le taux de fuite	1 mois	S31	Contrôler et enregistrer le taux de fuite de four en suivant de préférence un cycle de refroidissement à vide, comparer le chiffre par rapport aux enregistrements de l'historique. Voir procédure.			
La jauge de vide	3 mois	S32	Contrôler l'indication correcte de la pression atmosphérique et du vide.	6 mois	R29	Nettoyer la tête de la jauge de vide, pour ce faire, lire attentivement la procédure.

Annexes

	Les vérins	3 mois	S33	Contrôler les fuites sur les raccordes et les joints de tiges. Graisser légèrement les tiges avec de la graisse de vide.			
	Le moteur de la turbine	6 mois	S34	Contrôler le serrage des connexions électriques.			
	Les soupapes	6 mois	S35	Graisser légèrement les tiges avec du la graisse de vide.			
	Les électrovannes		S36	Contrôle du réglage de l'électrovannes d'hydrogène			
3 Les pompes à vide							
3-1 Pompe à vides mécaniques LEYBOLD SOGEVAC SV 630B							
	Le niveau et l'état d'huile.	avant chaque démarrage	S37	contrôler le niveau et l'état d'huile.	5000 Hrs	R33	Changer l'huile, (pompe à l'arrêt et chaude)
	Nombre d'heures de fonctionnement.		S38	enregistrer le Nombre d'heures de fonctionnement.			
	Tamis d'aspiration.	1 mois	S39	Nettoyer le tamis d'aspiration et le filtre à air.			
	Les courroies.	6 mois	S40	Vérifier les courroies, programmer immédiatement la tâche 36A en cas de fissures.	5 ans	R36	Changer les courroies
	Valve à flotteur.	Au changement des cartouches d'échappement	S42	Contrôler la valve à flotteur.			
	Le radiateur.	1 ans	S43	Nettoyer le radiateur.			
	Filtres à Hhuile.		S44		1000H de service	R40	Changement d'huile, filtre à Hhuile et filtre à air.

Annexes

	Clapet anti-retour.	1 ans	S45	Contrôle de clapet anti-retour.			
	Clapets d'échappement. Générateur du vide.		S46		lors d'intervention spécifique sur la pompe	Remplacer les clapets d'échappement. Démonter et remonter le générateur du vide, le remplacer si nécessaire.	
	3-2 Pompe de maintien LEYBOLD TRIVAC						
	Le niveau et l'état d'huile	avant chaque démarrage	S47	Contrôler l'état et le niveau d'huile.	1 an	R43	Changer l'huile, (pompe à l'arrêt et chaude)
	3-3 Pompe à diffusion VARIAN NHS 35						
	Le niveau et l'état d'huile	avant chaque utilisation	S48	A froid, contrôler l'état et le niveau d'huile.	2 ans	R44	Changer l'huile, lire attentivement la procédure.
	Les réchauffeurs.	3 mois	S49	Contrôler que Les réchauffeur sont bien vissés a la plaque chauffant.			
	Puissance des réchauffeurs et l'équilibre de charge.	3 mois	S50	Contrôler la puissance totale d'entrée des réchauffeurs et l'équilibre de charge.			
	Soupape de prés diffusion	2 mois	S51	Contrôle de la soupape de prés diffusion et graisser légèrement les tiges avec de la graisse de vide.			
	Le débit de l'eau	3 mois	S52	Contrôler que le débit d'eau de refroidissement est ≥ 4 gpm(US).			
	Le réservoir	15jour	S53	Contrôler les fuites du réservoir d'huile et de silicone.			

3-4 Pompe mécanique BOC EDWARDS / ROTS EH	Le niveau et l'état d'huile	avant chaque démarrage	S54	vérifier le niveau et l'état d'huile.	1 ans	R48	Changer l'huile, (pompe à l'arrêt et chaude)
	Le roulement arrière.	2 mois	S55	Graisser le roulement arrière.	6 ans	R49	Révision général de la pompe.
	Les raccords. Le branchement électrique	6 mois	S56	Inspectes les connexions et le branchement électrique de la pompe.			
4 Le système pneumatique et gas	Les baromètres.	3 mois	S57	Contrôler la bonne indication des baromètres du régulateur et du réservoir jaune.			
	Pompe pneumatique a eau	2mois	S58	Tester le fonctionnement de la pompe à eau			
	Les tuyaux d'alimentation. Les raccords	3 mois	S59	Contrôler les fuites sur les connexions.			
5 Le système hydraulique	L'huile	1 mois	S60	Contrôler le niveau d'huile, réajuster si nécessaire.	2 ans	R53	Changer l'huile.
	Le baromètre	1 mois	S61	Contrôler l'état et le bonne indication du baromètre.			
	Les flexibles	1 mois	S62	Contrôler l'état des flexibles et les fuites.			
6 l' armoire et la partie électrique							

Annexes

	Les arrêts d'urgence.	1 mois	S63	Contrôler l'état et vérifier le bon fonctionnement des arrêts d'urgence.		
	Les connexions électriques.	6 mois	S64	Inspecter les connexions électriques.		
	La signalisation.	6 mois	S65	Vérifier la bonne signalisation des toutes les lampes de signalisation.		
	Les filtres.	6 mois	S66	Nettoyer les filtres de l'armoire et de climatiseur.		
	Les transformateurs de la chauffe	6 mois	S67	Contrôler l'état des câbles primaires et secondaires d'alimentation des transformateurs (la détérioration) et resserrer les connexions.		
	Le climatiseur.	6 mois	S68	Vérifier le fonctionnement et la bonne ventilation.		
	Le contacteur de chauffe.	6 mois	S69	Contrôler l'état de contacteur de chauffe et resserrer les connexions électriques.		
	Mise à la terre et le circuit de protection de cœur	1 ans	S70	Contrôler l'efficacité de la mise à la terre.		
	UPC du PC	2 ans	S71	Contrôler l'efficacité de l' UPC du PC.		
7 Equipement de sécurité						
	Soupape de sécurité	6mois	S72	Contrôle de la soupape de sécurité.		
7 Certification du four			S65		1 an	R65 Appeler le constructeur et suivre les procédures de certification.