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

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

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

Thème

Evaluation des risques d'incendie et d'explosion FERA Cas d'étude complexe SORFERT

Présenté et soutenu publiquement par :

ZEGHDOUD Raouane & ADAIDI Nour El Houda

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme.BELKHODJA Leila	MCB	IMSI	**Président**
Mr. GUETARNI Islam Hadj Mohamed	MCB	IMSI	**Encadrant**
Mme.NEHAL Naima	MCB	IMSI	**Examinateur**
Mr. RADJAH Noureddine	Ing.	SORFERT	**Représentant Partenaire Socio-économique**

Année 2024/2025

Application de la méthode FERA pour l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion dans un complexe industriel

RESUME :

Ce projet de fin d'études porte sur l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion au sein du complexe industriel SORFERT situé dans la zone d'Arzew. L'objectif principal est d'appliquer la méthode Fire and Explosion Risk Assessment (FERA) afin d'identifier, modéliser et analyser les scénarios accidentels critiques susceptibles d'affecter les installations. L'étude s'appuie sur l'analyse de deux zones sensibles : le pipeline d'alimentation PRS et la chambre de combustion de la chaudière. Des hypothèses ont été formulées concernant les conditions météorologiques, les diamétres de fuite et les directions dominantes du vent. Les scénarios étudiés incluent notamment le jet fire, le flash fire et l'explosion. Grâce à la simulation à l'aide du logiciel PHAST, les effets thermiques et les surpressions ont été quantifiés afin d'évaluer l'impact sur les équipements et les personnes. Cette démarche a permis de classer les risques selon leur criticité et de proposer des mesures de mitigation techniques et organisationnelles, renforçant ainsi la sécurité globale du site.

Mots clés : FERA, incendie, explosion, SORFERT, scénarios accidentels, simulation PHAST, sécurité des procédés,HAZOP,management de la sécurité des procédés

Implementation of the FERA Method for Fire and Explosion Risk Assessment in an Industrial Complex

ABSTRACT:

This final year project focuses on the assessment of fire and explosion risks within the SORFERT industrial complex located in the Arzew area. The main objective is to apply the Fire and Explosion Risk Assessment (FERA) methodology to identify, model, and analyze critical accidental scenarios that could impact the facility. The study targets two sensitive areas: the PRS supply pipeline and the combustion chamber of the boiler. Hypotheses were established regarding weather conditions, leak sizes, and dominant wind directions. The analyzed scenarios include jet fire, flash fire, and explosion. Using PHAST simulation software, thermal radiation and overpressure effects were quantified to evaluate their impact on equipment and personnel. This approach allowed for risk classification based on severity and the formulation of both technical and organizational mitigation measures, thereby enhancing the overall safety of the site.

Keywords: FERA, fire, explosion, SORFERT, accidental scenarios, PHAST simulation, process safety,HAZOP,process safety management

تطبيق منهجية FERA لتقييم مخاطر الحرائق والانفجارات في مركب صناعي

الملخص:
يركّز مشروع التخرّج هذا على تقييم مخاطر الحرائق والانفجارات داخل المركّب الصناعي "سورفيرت" الواقع بمنطقة أرزيو. يتمثّل الهدف الرئيسي في تطبيق منهجية FERA (تقييم مخاطر الحريق والانفجار) من أجل تحديد المناطق الحساسة، نمذجة السيناريوهات الحادثة، وتحليل آثارها المحتملة على المنشأة.

تركّزت الدراسة على منطقتين حرجتين: أنبوب التغذية (PRS) وغرفة الاحتراق التابعة للغلاية. وقد تم اعتماد فرضيات مرتبطة بالظروف المناخية، أحجام التسرب، واتجاهات الرياح السائدة. وشملت السيناريوهات المدروسة: الحريق النفاث(Jet Fire) ، الاحتراق الفجائي(Flash Fire) ، والانفجار.

باستخدام برنامج المحاكاةPHAST ، تم حساب التأثيرات الحرارية والضغط الزائد لتقييم مدى خطورتها على الأفراد والمعدات. مكّنت هذه المنهجية من تصنيف المخاطر حسب درجة الخطورة، واقتراح إجراءات تقنية وتنظيمية للتخفيف منها، بما يعزّز السلامة العامة للموقع.

الكلمات المفتاحية: تقييمFERA ، الحريق، الانفجار، سورفيرت، السيناريوهات الحادثة، محاكاةPHAST ، السلامة الإنتاجية، تسيير السلامة الانتاجية.

REMERCIMENTS

Alhamdulillah, tout d'abord, nous remercions Allah ﷻ de nous avoir donné la force, la patience et la capacité d'achever ce travail dans les meilleures conditions. Sans Sa guidance et Sa miséricorde, rien de tout cela n'aurait été possible.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, **M. GUETARNI Islam Hadj Mohamed**, pour son accompagnement constant, sa bienveillance, sa disponibilité, ainsi que la richesse de ses conseils tout au long de ce projet. Son encadrement a été un véritable pilier dans l'aboutissement de notre travail.

Nous adressons également nos plus sincères remerciements aux membres du jury, **Mme.BELKHODJA Leila** et **Mme. NEHAL Naima** pour avoir accepté notre invitation à évaluer ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement les enseignants de notre institut IMSI, pour la formation de qualité dont nous avons bénéficié, et pour les valeurs qu'ils nous ont transmises durant notre parcours universitaire.

Nos remerciements vont aussi à **M. RADJAH Noureddine** et **M. GHALEM Mensour**, ingénieurs au sein de l'entreprise d'accueil, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité, et leur encadrement technique tout au long de notre stage. Leur soutien a grandement contribué à la réalisation pratique de ce travail.

Un remerciement du cœur à nous-mêmes, pour la belle équipe que nous avons formée. Merci à toi, mon binôme, pour ton engagement, ta patience, ta confiance et tous les efforts partagés. Cette aventure n'aurait pas été la même sans cette belle harmonie qui nous a unies du début à la fin.

Enfin, nous adressons notre amour et notre reconnaissance à nos familles, pour leur soutien inconditionnel, leurs prières, leur patience et leur présence rassurante à chaque étape. Leur amour a été notre force silencieuse.

À nos amis, et à toutes les personnes qui nous ont encouragées, aidées ou simplement crues en nous, nous disons du fond du cœur : **MERCI.**

ADAIDI Nour El Houda & ZEGHDOUD Raouane

DEDICACE

إلى والديَّ العزيزين،
الذين كانا دومًا السند والأمان، واللذين علّماني أن الإيمان بالنفس هو أول خطوة نحو النجاح. شكرًا على حبكما غير المشروط، وعلى صبركما الذي لا يُقدَّر بثمن.

إلى أخواتي الغاليات آية، هاجر وسماح

شكرًا على وجودكن الدائم، وعلى دفء كلماتكن، وعلى تلك اللحظات الصغيرة التي كانت كفيلة بأن تمنحني القوة من جديد

الى رفيقتي وشريكتي نور الهدى

التي شاركتني هذا المشوار بكل تفاصيله، بحلوه ومرّه، وكان وجودها مصدر قوة وطمأنينة حتى اكتمال هذا العمل.

الى استاذي قيطارني محمد اسلام

لدعمه وايمانه وثقته بعملنا ومجهوداتنا

لكلّ من كان الضوء في فترة التدريب، السيد راجح نور الدين، السيد غالم منصور، والسيدة عرابي نجية لصدق توجيههم، وبصمتهم الطيّبة .

إلى عائلتي الكبيرة،
شكرًا لكل لحظة حب، ولكل دعاء خفيّ، ولكل دعم شعرت به دون أن يُقال.

إلى أصدقائي الحقيقيين اكرام، بشرى، اسيا ،خلود، نور الهدى ،أسماء، غزلان، آية ومروة
من كانوا إلى جانبي عندما احتجت إليهم، ومن آمنوا بي في وقت كنت أشكّ في نفسي.

إلى كل من مرّ في طريقي وترك في قلبي أثرًا جميلًا،
لكم جميعًا، أهدي هذا العمل بكل فخر وامتنان.

روان

DEDICACE

الحمد لله حمداً كثيراً طيّبا مباركاً فيه على معيّته وتوفيقه.

أهدي عملي هذا لنفسي ولكلّ من ترك أثراً طيّبا فيها خلال رحلتي لإتمامه.

لكلّ ما أملك أمّي وأبي، قوّتي سندي ومن علّمني أن الإخلاص يُزهر كل طريق.

لأُختيّ أمينة ووسام، نجومي وملجئي امتناني لهم دائمٌ على دعمهم المطلق..

لرفيقة المشوار، الروح المرحة وشريكة الأوقات الصعبة روان التي لولاها لما وصل عملنا هذا للتّمام.

لأستاذي قيطارني إسلام لإيمانه بكفاءتنا وثقته ودعمه.

لكلّ أفراد عائلتي الصغيرة والكبيرة على دعمهم المستمر.

لكلّ من كان الضوء في فترة التدريب، السيد راجح نور الدين، السيد غالم منصور، والسيدة عرابي نجية لصدق توجيههم، وبصمتهم الطيّبة.

لصديقات العمر ورفيقات الجامعة، جميلاتي أسماء، آية، غزلان ومروة اللاّتي قاسمنني لحظاتها طيلة السنوات الخمس.

لكلّ من كان جزءًا من هذه المرحلة، كلّ من آمن بي، شجّعني ودعمني بكلمة أو بدعاء.

ولمن خُبّئت له كلماتٍ كثيرة تحت عباراتٍ عامّة...

نور الهدى

SOMMAIRE

REMERCIMENTS i
DEDICACE ii
DEDICACE iii
SOMMAIRE iv
LISTE DES FIGURES viii
LISTE DES TABLEAUX ix
LISTE DES ABREVIATIONS x
INTRODUCTION GENERALE 1
CHAPITRE I : Notions fondamentales des risques industriels et cadre réglementaire 3
I.1 Introduction 4
I.2 Généralité 4
I.2.1 Notion danger (définition) : 4
I.2.2 Dommage : 4
..... 5
I.2.3 Situation dangereuse, événement dangereux et phénomène dangereux : 5
I.2.4 Notion risque (définition) : 5
I.2.5 Etude de danger : 6
I.2.6 Point d'éclair ou point de flash : 6
I.2.7 Point d'inflammation : 6
I.2.8 Point d'auto-inflammation : 6
I.2.9 Limite inférieure d'Inflammabilité ou LII : 7
I.2.10 Limite Supérieure d'Inflammabilité ou LSI : 7
I.2.11 Limite inférieure d'explosivité ou LIE : 7
I.2.12 Limite supérieure d'explosivité ou LES : 7
I.2.13 Incendie : 7
I.2.14 Conditions de la combustion : 8
I.2.15 Explosion : 8
I.2.16 Conditions d'explosion hexagone : 8
I.2.17 Atmosphère explosive ATEX : 9
I.2.18 Conditions minimales de formation d'une Atex : 9
I.2.19 Définition des zones Atex : 9
I.2.20 Jet enflammé : 10
I.2.21 UVCE / flash fire : 10
I.2.22 Effet domino : 11
I.2.23 Boule de feu (fire ball) : 11

I.3 Réglementation : 12
I.4 Retour d'expérience : 14
I.5 Conclusion : 16
CHAPITRE II : Méthodes d'analyse des risques et présentation de la démarche FERA 17
II.1 Introduction 18
II.2 Sécurité des procédés et sécurité personnelle : 18
II.2.1 Sécurité des procédés : 18
II.2.2 Sécurité personnelle : 18
II.3 Process safety management (PSM): 19
II.3.1 Objectif du PSM : 19
II.3.2 Principaux éléments d'un système PSM : 19
II.3.3 Gestion de la sécurité des procédés (PSM) : Proactif vs Réactif [21] 20
II.4 Analyse des risques de procédé : 20
II.5 Description des méthodes d'analyse prévisionnelle des risques : 21
II.5.1Méthodes qualitatives/quantitatives : 21
II.5.2 Méthodes statiques/dynamiques : 21
II.5.3 Méthodes inductives/déductives : 21
II.6 Méthode d'analyse des risques : 22
II.6.1 Méthode APR (HAZID) : 22
Définition : 22
Objectif : 22
Méthodologie : 22
Domaine d'application : 22
II.6.2 Méthode de HAZOP : 23
Définition : 23
Principe : 23
Domaine d'application : 23
Déroulement : 23
II.6.3 Méthodologie QRA : 24
Définition : 24
Objectifs : 24
Méthodologie : 24
Domaine d'application : 25
II.6.4 Méthodologie FERA 25
Définition FERA : 25
L'objectif : 25
Méthodologie d'une étude FERA : 26
II.7 Conclusion 30
CHAPITRE III : Présentation du complexe SORFERT et identification des zones critiques . 31

III.1 Introduction 32
III.2 Présentation du complexe : 32
III.3 Complexe SORFERT SPA : 33
III.4 Installations du Complexe : 34
III.4.1 Matières premières et les produits finis : 34
III.4.2 Produits finis du Complexe des Fertilisants de SORFERT : 34
III.4.3 Principales zones du complexe : 34
..... 35
III.4.4 Description du train d'ammoniac : 35
III.4.5 Description du train d'urée : 36
III.4.6 Description des utilités : 37
1. Les chaudières autonomes : 37
2. La production d'énergie électrique : 37
3. Système d'azote : 37
4. Circuit de refroidissement de l'eau de mer : 38
5. Circuit de refroidissement en boucle fermée : 38
6. Unité de dessalement : 38
7. Unité de déminéralisation : 38
8. Réseau d'eau anti-incendie : 39
9. Prise d'eau de mer : 39
III.4.5 Stockage et chargement : 39
III.4.6 Laboratoire : 39
III.5 Présentation de la chaudière : 40
III.5.1 Description technique : 40
1. Définition : 40
2. Rôle : 41
III.5.2 Mode de fonctionnement : 41
III.5.3 Pipeline d'alimentation (PRS pipeline) : 42
III.5.4 Chambre de combustion : 42
III.6 Conclusion 44
CHAPITRE IV : Application de l'étude FERA 45
IV.1 Introduction 46
IV.2 Analyse HAZOP 46
La sélection des nœuds : 46
..... 46
IV.2.1 Matrice de cotation des risques : 47
IV.2.2 Tableaux HAZOP : 48
IV.2.3 Synthèse de l'analyse HAZOP : 51
IV.3 Hypothèses de l'étude FERA : 52

IV.3.1 Hypothèses de l'étude FFRA : 52
Hypothèses sur les conditions météorologiques : 52
Orientation du vent– Direction dominante : 53
Hypothèses sur les fuites : 53
IV.4 Modélisation des scénarios catastrophiques sur la chaudière : 54
IV.5 Interprétation et Synthèse général : 67
IV.5.1 conduite PRS (pressure reducing station) : 67
Interprétation générale : 68
IV.5.2 Chambre de combustion : 68
Interprétation générale : 68
IV.5.3 Synthèse : 68
IV.6 Les recommandations : 69
IV.6.1 principes généraux de sécurité : 69
IV.6.2 Implantation et distances de sécurité : 70
1. Critères d'espacement 70
2. Disposition des bâtiments 70
IV.6.3 Systèmes de détection et de contrôles : 70
IV.6.4 Moyens fixes de lutte contre l'incendie : 70
1. Systèmes de déluge : 70
2. Rideaux d'eau : 71
IV.6.5 Protection contre les incendies (jet fire et flash fire) : 71
IV.6.6 Réduction des risques d'explosion : 71
IV.6.7 Mesures de mitigation des conséquences : 71
IV.6.8 Gestion des urgences : 72
IV.6.9 Conception et implantation : 72
IV.5 Conclusion 72
CONCLUSION GENERALE 73
BIBLIOGRAPHIE 74
Annexes 76
1) Annex A : Seuil de référence pour les effets 77

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Processus d'apparition d'un dommage 5
Figure 2:Origine du risque (ENSPM Formation Industrie - IFP Training) 6
Figure 3:Triangle de feu 8
Figure 4: Tétraèdre de feu 8
Figure 5:Hexagone d'explosion 8
Figure 6 :Signalisation de zone ATEX 9
Figure 7:Zone ATEX 10
Figure 8: jet fire 10
Figure 9: Flash fire 11
Figure 10:Retour d'expérience 15
Figure 11 : Accident d'explosion au port de Beyrouth 16
Figure 12: Accident d'explosion de GNL SKIKDA 16
Figure 13: 14 éléments de PSM 20
Figure 14: organigramme de l'étude FERA 29
Figure 15:Complexe SORFERT SPA 32
Figure 16:Situation géographique du complexe SORFERT SPA 33
Figure 17: Principales zones du complexe 35
Figure 18:Plan de processus d'ammoniac 36
Figure 19:Chaudière 4 au niveau de SORFERT SPA 40
Figure 20:P&ID de la chambre de combustion 43
Figure 21:: Extrait du P&ID – Pipeline PRS avec vannes et équipements identifiés dans le HAZOP 46
Figure 22:Map SORFERT avec les directions du vent 53
Figure 23:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 15mm, PRS pipeline) 55
Figure 24: Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 15mm, PRS pipeline) 55
Figure 25:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 100mm, PRS pipeline) 56
Figure 26: Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 100mm, PRS pipeline) 56
Figure 27:Effets de flash fire (fuite de 100mm, PRS pipeline) 57
Figure 28:Effets d'explosion - vent nord-est (fuite de 100mm, PRS pipeline) 58
Figure 29: Effets d'explosion - vent sud-ouest (fuite de 100mm, PRS pipeline) 58
Figure 30:Effets de jet fire - vent nord-est (Rupture de la ligne, PRS pipeline) 59
Figure 31:Effets de jet fire - vent sud-ouest (Rupture de la ligne, PRS pipeline) 59
Figure 32:Effets de flash fire (rupture de la ligne, PRS pipeline) 60
Figure 33::Effets d'éxplosion - vent nord-est (Rupture de la ligne, PRS pipeline) 61
Figure 34::Effets d'éxplosion - vent sud-ouest (Rupture de la ligne, PRS pipeline) 61
Figure 35:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 150mm, chambre de combustion) 62
Figure 36 :Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 150mm, chambre de combustion) 62
Figure 37:Effets d'explosion - vent nord-est (fuite de 150mm, chambre de combustion) 63
Figure 38:Effets d'explosion - vent sud-ouest (fuite de 150mm, chambre de combustion) 63
Figure 39:Effets de flash fire(catastrophique rupture, chambre de combustion) 64
Figure 40:Effets d'explosion - vent nord-est (catastrophique rupture, chambre de combustion) 65
Figure 41 :Effets d'explosion - vent sud-ouest (catastrophique rupture, chambre de combustion 65
Figure 42:Effets de fire ball- vent nord-est (catastrophique rupture, chambre de combustion) 66
Figure 43:Effets d'explosion - vent sud-ouest (catastrophique rupture, chambre de combustion) 66
Figure 44: équipements à proximité de la chaudière 67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Définitions de terme de danger selon différentes normes 4
Tableau 2:Définitions de terme de risque 5
Tableau 3: Réglementation et norme domaine HSE 12
Tableau 4: Différence entre sécurité des procédés et de la santé 18
Tableau 5:Gestion de la sécurité des procédés 20
Tableau 6:Méthode d'analyse HAZOP 24
Tableau 7:Réglementation de l'étude FERA 28
Tableau 8:Fiche technique du complexe 33
Tableau 9:Constituants de la chaudière 41
Tableau 10:Paramètres de PRS pipeline 42
Tableau 11:Paramètres de la chambre de combustion 43
Tableau 12:Matrice de risques selon la procédure Sorfert ARZEW 47
Tableau 13:Les différents types de fuite 53
Tableau 14:Les différents types de fuite 54
Tableau 15:Resultats de Jet fire, fuite de 15 mm dans le PRS pipeline 54
Tableau 16: Resultats de Jet fire, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline 56
Tableau 17:Resultats de flash fire, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline 57
Tableau 18:Resultats d'explosion, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline 57
Tableau 19 : Résultats jet fire,(rupture de la ligne dans le PRS pipeline) 59
Tableau 20:Résultats flash fire,(rupture de la ligne dans le PRS pipeline) 60
Tableau 21:Resultats d'explosion(rupture de la ligne dans le PRS pipeline) 60
Tableau 22:Résultats jet fire(fuite de 150mm dans la chambre de combustion) 62
Tableau 23:Résultats explosion(fuite de 150mm dans la chambre de combustion) 63
Tableau 24:Résultats flash fire(catastrophique rupture la chambre de combustion) 64
Tableau 25:Résultats explosion(catastrophique rupture la chambre de combustion) 65
Tableau 26:Résultats fire Ball(catastrophique rupture la chambre de combustion) 66
Tableau 27: Seuil thermique effets dominos (sur les équipements ou structures) 77
Tableau 28: Seuil thermique des effets sur l'homme 77
Tableau 29:Seuil de surpression des effets sur les structures 77
Tableau 30:Seuil de surpression des effets sur l'homme 77
Tableau 31:Gravité (Severity) – Définition par domaine : 78
Tableau 32:Probabilité (Likelihood) 78

LISTE DES ABREVIATIONS

- **ADE** : Analyse des Défaillances Élémentaires
- **ADD** : Analyse des Défaillances Dynamiques
- **ALARP** : Aussi bas que raisonnablement possible *(*As Low As Reasonably Practicable*)*
- **AMS** : Système de gestion d'actifs *(*Asset Management System*)*
- **API** : Institut Américain du Pétrole *(*American Petroleum Institute*)*
- **APR** : Appareil de Protection Respiratoire +3*(*Air Purifying Respirator*)*
- **ARH** : Autorité de Régulation des Hydrocarbures
- **ATEX** : Atmosphères Explosibles *(*Atmosphères Explosibles*)*
- **AZF** : Azote Fertilisant
- **BDV** : Soupape de décharge de sécurité *(*Blow Down Valve*)*
- **BFW** : Eau d'alimentation de chaudière *(*Boiler Feed Water*)*
- **BP** : Basse Pression
- **BTP** : Bâtiment et Travaux Publics
- **CCPS** : Centre pour la Sécurité des Procédés Chimiques *(*Center for Chemical Process Safety)
- **CE** : Conformité Européenne *(*European Conformity*)*
- **CMS** : Système de surveillance centralisé
- **CPF** : Centre de Production des Fluides
- **CSO** : Vanne scellée en position ouverte *(*Car Sealed Open*)*
- **DCS** : Système de contrôle distribué *(*Distributed Control System*)*
- **DRPCE** : Direction de la Réglementation et de la Prévention des Catastrophes Environnementales
- **EPI** : Équipement de Protection Individuelle
- **ERC** : Soupape de décharge d'urgence *(*Emergency Relief Control*)*
- **ESD** : Arrêt d'urgence *(*Emergency Shutdown*)*
- **ESDV** : Vanne d'arrêt d'urgence *(*Emergency Shut Down Valve*)*
- **F&G** : Détection feu et gaz *(*Fire and Gas*)*
- **FERA** : Évaluation des Risques d'Incendie et d'Explosion *(*Fire and Explosion Risk Assessment)

- **FV** : Vanne de régulation de débit *(*Flow Valve*)*
- **GN** : Gaz Naturel
- **H** : Haute (High)
- **HAZID** : Identification des dangers *(*Hazard Identification*)*
- **HAZOP** : Étude des dangers et de l'opérabilité *(*Hazard and Operability Study*)*
- **HC** : Hydrocarbures
- **HP** : Haute Pression
- **HTS** : Séparation à Haute Température *(*High Temperature Separation*)*
- **IANOR** : Institut Algérien de Normalisation
- **ICPE** : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
- **IEC** : Commission Électrotechnique Internationale *(*International Electrotechnical Commission)
- **INRS** : Institut National de Recherche et de Sécurité
- **ISO** : Organisation Internationale de Normalisation (International Organization for Standardization)
- **KW** : Kilowatt
- **L :** faible (Low)
- **LDHP** : Bâtiment Haute Pression
- **LFL** : Limite Inférieure d'Inflammabilité *(*Lower Flammability Limit*)*
- **LIE** : Limite Inférieure d'Explosivité *(*Lower Explosive Limit*)*
- **LII** : Limite Inférieure d'Inflammabilité
- **LOTO** : Verrouillage et Étiquetage *(*Lock Out Tag Out*)*
- **LSE** : Limite Supérieure d'Explosivité (Upper Explosive Limit*)*
- **LSI** : Limite Supérieure d'Inflammabilité
- **LTD** : Société à Responsabilité Limitée (Limited)
- **LTS** : Séparation à Basse Température (Low Temperature Separation)
- **LT** : Transmetteur de niveau (Level Transmitter)
- **M :** Moyenne (Medium)
- **MDEA** : Méthyldiéthanolamine (Methyldiethanolamine)
- **MIC** : Réservoir d'Isocyanate de Méthyle (Methyl Isocyanate)
- **MM** : Millimètre

- **MP** : Moyenne Pression
- **MW** : Mégawatt (Megawatt)
- **NA** : Nomes Algériennes
- **NE** : Nord-Est *(*North-East)
- **NFPA** : Association nationale de protection contre l'incendie (National Fire Protection Association)
- **Nm³** : Normo mètre cube (Normal cubic meter)
- **OIT** : Organisation Internationale du Travail (International Labour Organization)
- **OSHA** : Administration de la Sécurité et de la Santé au Travail (Occupational Safety and Health Administration)
- **PCV** : Soupape de Contrôle de Pression (Pressure Control Valve)
- **P&ID** : Schéma Tuyauterie et Instrumentation (Piping and Instrumentation Diagram)
- **PFD** : Schéma de Procédé (Process Flow Diagram)
- **PHA** : Analyse des Risques de Procédé (Process Hazard Analysis)
- **PHAST** : Logiciel de simulation des risques (Process Hazard Analysis Software Tool)
- **PI** : Indicateur de Pression (Pressure Indicator)
- **PSM** : Management de Sécurité de Procédés (Process Safety Management)
- **PSV** : Soupape de Sécurité de Pression (Pressure Safety Valve)
- **PV** : Vanne de Pression (Pressure Valve)
- **QRA** : Analyse Quantitative des Risques (Quantitative Risk Assessment)
- **REX** : Retour d'Expérience
- **RO** : Osmose Inverse (Reverse Osmosis)
- **RR** : Classement des Risques (Risk Ranking)
- **SDV** : Vanne d'Arrêt de Sécurité (Shut Down Valve)
- **SEVESO** : Directive européenne sur les sites à risques majeurs (Seveso Directive)
- **SGS** : Système de Gestion de la Sécurité
- **SORFERT** : Société Algérienne de Production d'Ammoniac et d'Urée
- **SSI** : Système de Sécurité Incendie
- **SST** : Santé et Sécurité au Travail
- **SW** : Sud-Ouest (South-West)
- **UHDE** : Entreprise d'ingénierie industrielle allemande

- **UVCE** : Explosion de Nuage de Vapeur Inflammable (Unconfined Vapor Cloud Explosion)
- **VCE** : Explosion de Nuage de Vapeur (Vapor Cloud Explosion)
- **XV** : Vanne Motorisée (Motorized Valve)

INTRODUCTION GENERALE

L'ammoniac (NH_3) occupe une place centrale dans l'industrie chimique mondiale en raison de ses nombreuses applications, notamment dans la fabrication d'engrais azotés, de produits pharmaceutiques. Sa production industrielle repose sur des procédés énergivores et complexes, impliquant des matières premières inflammables, des températures élevées et des pressions importantes. En Algérie, le complexe **SORFERT** implanté dans la zone industrielle d'Arzew figure parmi les principaux producteurs d'ammoniac, avec des installations à la pointe de la technologie mais exposées à des risques technologiques majeurs.

Malgré l'évolution des standards en matière Safety Process Management, des scénarios d'incendie et d'explosion continuent de survenir dans les installations industrielles, souvent avec des conséquences graves sur les personnes, les biens et l'environnement. Les chaudières, en tant qu'équipements à risques, représentent un point critique de sécurité dans plusieurs industries avec impact important sur les installations avoisinantes.

Cependant, les approches d'analyse de risques, telles que les études de danger ou les QRA (Quantitative Risk Assessment), demeurent parfois insuffisantes sur tous vis à vis la protection des installation si elles ne sont pas complétées par des méthodologies rigoureuses d'identification des défaillances (HAZOP) et de modélisation des phénomènes dangereux (PHAST).

Dans un contexte marqué par des enjeux de défaillance des équipements accrus et de variabilité climatique, comment évaluer de manière fiable les risques d'incendie et d'explosion associés aux chaudières afin de proposer des mesures de prévention, d'atténuation et d'intervention efficaces?

L'objectif principal de cette étude est de renforcer l'analyse de risques existante en s'appuyant sur la méthode FERA (Fire and Explosion Risk Assessment)**.** Cette approche permet de modéliser les scénarios accidentels les plus redoutés, d'en évaluer les impacts potentiels sur les équipements, l'environnement et les personnes, et de proposer des mesures de prévention ou de protection adaptées, tant sur le plan technique qu'organisationnel.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties : une partie théorique et une partie pratique :

La partie théorique comprend deux chapitres. Le chapitre I pose les fondements essentiels à l'évaluation des risques : il définit les notions de danger, de risque, de phénomènes dangereux (incendie, explosion, ATEX), présente le cadre réglementaire national et international, et insiste particulièrement sur l'importance du retour d'expérience dans la prévention des événements majeurs.

Le chapitre II, dans une logique de continuité, introduit les approches modernes de gestion des risques par les procédés, notamment à travers le Process Safety Management (PSM). Ce chapitre

compare différentes méthodes d'analyse des risques (HAZID, HAZOP, QRA), avant de présenter en détail la méthode FERA, son cadre d'application, ses étapes et ses avantages.

La partie pratique débute avec le chapitre III, consacré à la présentation du complexe SORFERT : ses installations principales, ses utilités, et en particulier les équipements ciblés par l'étude.

Enfin, le chapitre IV présente la mise en œuvre de l'étude FERA : formulation des hypothèses, identification et modélisation des scénarios accidentels, simulation des effets via PHAST, interprétation des résultats et formulation de recommandations techniques et organisationnelles.

Ce travail s'inscrit pleinement dans une logique de prévention des accidents majeurs et de maîtrise durable des risques technologiques dans l'industrie chimique moderne.

CHAPITRE I : Notions fondamentales des risques industriels et cadre réglementaire

I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de définir un cadre conceptuel pour les notions de danger, risque et scénarios accidentels. Il détaille aussi les bases réglementaires régissant la gestion des risques, et souligne l'importance du retour d'expérience comme outil d'amélioration continue dans le domaine de la sécurité industrielle.

I.2 Généralité

I.2.1 Notion danger (définition) :

Tableau 1: Définitions de terme de danger selon différentes normes

La source	La définition
INRS[1]	Propriété intrinsèque d'un produit, équipement ou situation susceptible de causer un dommage à l'intégrité mentale ou physique du salarié
ISO 31000[2]	Potentiel de nuisances ou de préjudices en termes de dommages aux personnes, aux biens et/ou à l'environnement. Peut-être une substance, un objet, un phénomène ou un processus
ISO 31010[3]	Source potentielle de dommage, de préjudice ou d'effet nocif pour les personnes, les biens ou l'environnement

I.2.2 Dommage :

Blessure physique ou atteinte à la santé

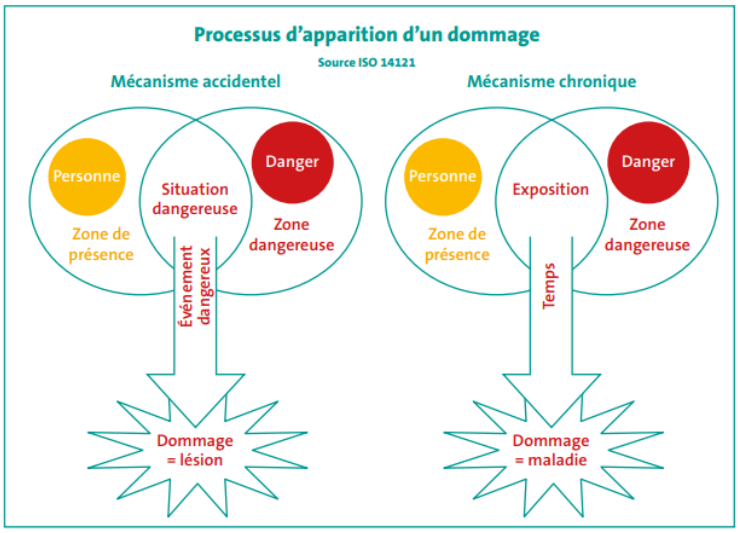


Figure 1: Processus d'apparition d'un dommage

I.2.3 Situation dangereuse, événement dangereux et phénomène dangereux :

Une **situation dangereuse** correspond à un état ou un contexte dans lequel un danger est présent, pouvant conduire à un accident si aucune mesure de prévention n'est mise en place. [4] Lorsqu'un élément déclencheur survient, on parle d'**événement dangereux**, c'est-à-dire l'occurrence d'un incident susceptible de provoquer des dommages.[1]

Cet événement peut alors engendrer un **phénomène dangereux**, qui se manifeste par des effets nuisibles menaçant la sécurité des personnes, des installations et de l'environnement. [5]

I.2.4 Notion risque (définition) :

Tableau 2:Définitions de terme de risque

La source	La définition
ISO 31000[6]	Effet de l'incertitude sur les objectifs.
ISO 14971[7]	Combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et de sa gravité
Villemeur [8]	Une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences

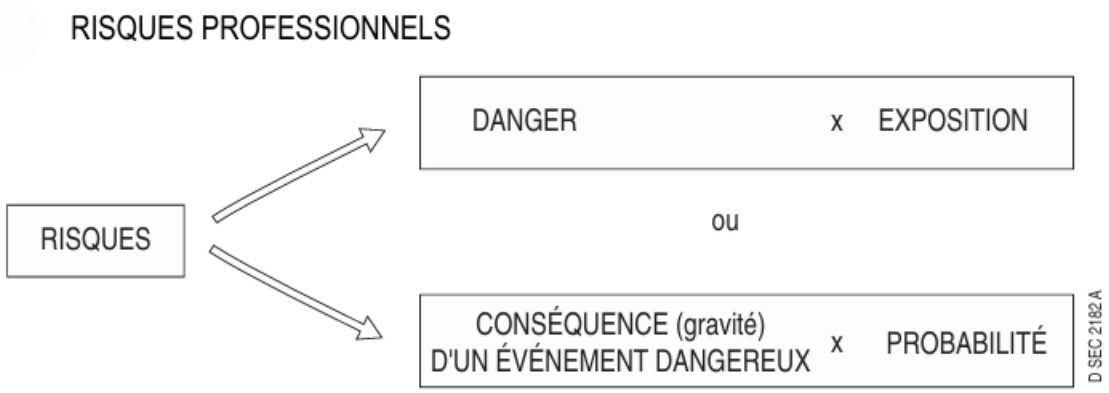


Figure 2:Origine du risque (ENSPM Formation Industrie - IFP Training)

I.2.5 Etude de danger :

L'étude de dangers est une analyse méthodique des risques liés à une installation, intégrant l'identification des phénomènes dangereux, l'évaluation de leurs impacts et probabilités. Elle prend en compte la dynamique des incidents ainsi que les mesures de prévention et d'intervention. Son objectif est de réduire les risques et assurer la sécurité.

I.2.6 Point d'éclair ou point de flash :

La température de point d'éclair est la température minimale à laquelle un combustible liquide émet assez de vapeurs pour permettre une courte inflammation en présence d'une flamme. Les vapeurs s'enflamment et s'éteignent aussitôt[9]

I.2.7 Point d'inflammation :

C'est la température à laquelle les vapeurs sont émises en quantité suffisante pour alimenter la combustion. Il y a non seulement allumage, mais continuation de la combustion.

Le point d'inflammation se situe, de quelques degrés à quelques dizaines de degrés, au-dessus du point d'éclair[9].

I.2.8 Point d'auto-inflammation :

Une élévation de température peut amener le mélange combustible à sa température d'auto-

Inflammation Le produit s'enflamme alors spontanément en présence d'air, sans présence de flamme ni d'étincelle. L'inflammation survient simultanément en tous les points du mélange gazeux.

Cette élévation de température peut être due :

- À des appareils chauds : fours, échangeurs, tuyauteries, ...

- À des points chauds (sciage mécanique, ou tout simplement du matériel électrique).

- À des échauffements anormaux dus à des frottements ou grippage d'organes de machines :

Paliers, garnitures, roulement détérioré, température extérieure d'un boîtier électrique

- À des gaz chauds de combustion[9]

I.2.9 Limite inférieure d'Inflammabilité ou LII :

Concentration minimale en gaz ou vapeur combustible dans l'air à partir de laquelle le mélange peut s'enflammer. En dessous, le mélange est trop pauvre pour brûler.

I.2.10 Limite Supérieure d'Inflammabilité ou LSI :

Concentration maximale en gaz ou vapeur combustible dans l'air au-delà de laquelle le mélange ne peut plus s'enflammer car il est trop riche en combustible.

I.2.11 Limite inférieure d'explosivité ou LIE :

Concentration minimale d'un gaz ou d'une poussière combustible dans l'air pour former un mélange capable d'exploser en présence d'une source d'inflammation spécifiée (méthane : 5% en volume, poussière de blé : 50 g/m3) ; en dessous de la LIE, le mélange est dit "trop pauvre" pour exploser[9].

I.2.12 Limite supérieure d'explosivité ou LES :

Concentration maximale d'un gaz dans l'air pour former un mélange capable d'exploser en présence d'une source d'inflammation spécifiée (méthane : 15% en volume) ; au-dessus de la LSE, le mélange est dit "trop riche" pour exploser[9].

I.2.13 Incendie :

Est une combustion qui se développe sans contrôle ni dans le temps ni dans l'espace., échappant au contrôle de l'homme [9].

I.2.14 Conditions de la combustion :



Figure 3:Triangle de feu



Figure 4: Tétraèdre de feu

I.2.15 Explosion :

Une explosion est une libération soudaine et rapide d'énergie qui produit des pressions potentiellement destructives (dommageables). Lorsqu'un combustible gazeux remplit un espace, il doit se mélanger à une certaine concentration air-combustible pour créer une atmosphère explosive (ATEX).[9]

I.2.16 Conditions d'explosion hexagone :

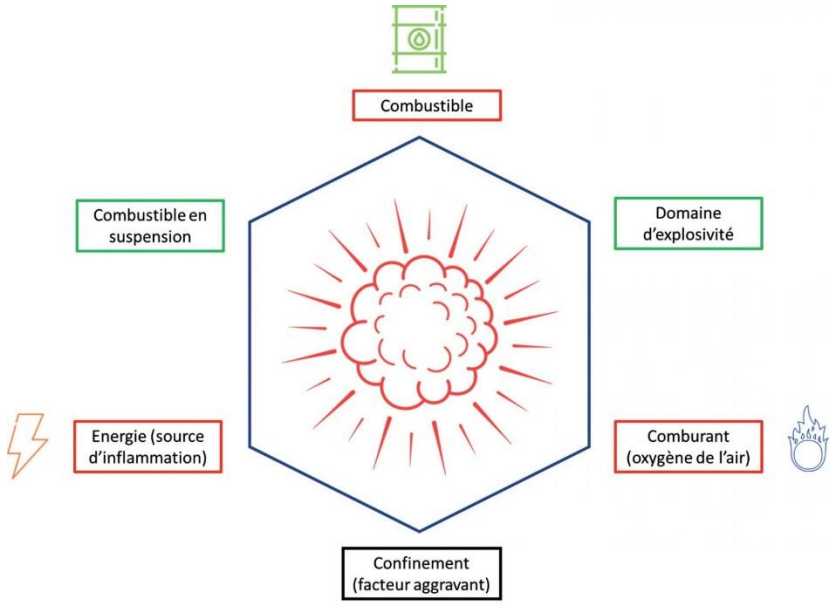


Figure 5:Hexagone d'explosion

I.2.17 Atmosphère explosive ATEX :

Une atmosphère explosive (ATEX) est un mélange avec l'air, dans les conditions atmosphériques, de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs ou poussières dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange non brûlé[9]

I.2.18 Conditions minimales de formation d'une Atex :

• Atex formée par un gaz : la concentration du gaz dans l'air doit être comprise entre la limite inférieure et la limite supérieure d'explosivité[9].

• Atex formée par des vapeurs émises par un liquide : le liquide doit être à une température supérieure à son point d'éclair.[9]



Figure 6 :Signalisation de zone ATEX

I.2.19 Définition des zones Atex :

Zone 0 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillard est présente en permanence, pendant de longues périodes ou fréquemment.

Zone 1 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillard est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal.

Zone 2 : Emplacement où une atmosphère explosive consistant en un mélange avec l'air de substances inflammables sous forme de gaz, de vapeurs ou de brouillard n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal ou n'est que de courte durée, s'il advient qu'elle se présente néanmoins.[9]



Figure 7:Zone ATEX

I.2.20 Jet enflammé :

On appelle jet enflammé (jet-fire, feux torche)
toute flamme de diffusion turbulente établie, résultant de la combustion d'un composé relâché continûment dans une direction privilégiée avec une vitesse initiale significative[9]

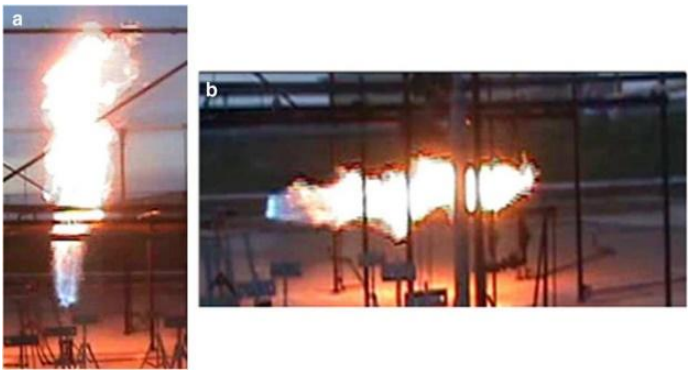


Figure 8: jet fire

I.2.21 UVCE / flash fire :

Un UVCE (unconfined vapour cloud explosion) est un phénomène d'explosion d'un nuage de gaz/vapeurs non confiné. Il s'agit d'un phénomène qui suppose l'inflammation accidentelle d'un nuage ou panache de gaz/vapeurs combustibles mélangés avec l'oxygène de l'air. Suite à l'inflammation, une flamme se propage dans le nuage ou panache et engendre une combustion des vapeurs et une onde de surpression aérienne, qui sont susceptibles de produire respectivement des effets de rayonnement thermique et des effets mécaniques[9].



Figure 9: Flash fire

I.2.22 Effet domino :

Un effet domino peut être défini comme l'action d'un premier phénomène dangereux capable de générer un second accident sur une installation voisine ou un établissement voisin, dont les effets seraient plus « graves » que ceux de l'accident premier[10].

L'analyse des effets dominos peut donc porter :

- Entre unités.
- Entre établissements.

Les effets des phénomènes dangereux à prendre en compte dans le cadre de l'analyse des effets dominos sont principalement :

- Les effets thermiques;
- Les effets mécaniques d'une onde de surpression ;
- Les effets mécaniques de projectiles issus d'une explosion ;
- Les effets toxiques.

I.2.23 Boule de feu (fire ball) :

Une boule de feu est une déflagration rapide d'un nuage inflammable libéré soudainement, qui s'enflamme immédiatement après sa formation, produisant une boule de feu sphérique intense et de courte durée.

I.3 Réglementation :

La prévention des risques d'incendie et d'explosion est encadrée par des réglementations et normes nationales et internationales. Ces textes fixent les règles essentielles pour assurer la sécurité des personnes, des installations et de l'environnement.

Tableau 3: Réglementation et norme domaine HSE

Aspect	Réglementation / Norme	Description / Exigences principales
Réglementation algérienne générale	Loi n° 19-04 (2019) sur la prévention des risques d'incendie et de panique [11]	Étude de risques obligatoire, plan de prévention incendie et panique, organisation des secours, conformité aux règles HSE.
	Loi n° 03-10 (2003) relative à la protection de l'environnement [11]	Protection de la biodiversité, air, eau, sols, principes de développement durable, prévention, pollueur-payeur.
	Décret exécutif n° 07-145 (2007) relatif aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)[11]	Réglemente les installations industrielles à risques, impose études d'impact, autorisations, contrôles et mesures préventives.
	Règlement de sécurité des ERP (25 juin 1980) [11]	Exigences pour évacuation, limitation propagation feu, équipements de sécurité, facilitation intervention pompiers.
	Code du travail algérien (articles R.4227-42 à R.4227-54) [11]	Mise à jour du document de protection contre explosion, coordination des mesures de sécurité au travail.
Hydrocarbures – Réglementation spécifique	Décret exécutif n° 21-319 (2021) relatif au régime d'autorisation d'exploitation des installations et ouvrages d'hydrocarbures[12]	Imposition d'études d'impact sur l'environnement et d'études de dangers : contenu détaillé, périodicité d'actualisation (tous les 5 ans ou après accident/modification), procédures d'approbation, enquête publique,

		exigences sur la gestion des risques, sécurité, environnement, organisation des secours, contrôle et suivi par commissions spécialisées. Liste exhaustive des installations soumises (raffinage, transport, stockage, etc.).
Risques d'explosion (ATEX)	Directive ATEX 2014/34/UE [13]	Réglemente la fabrication et mise sur le marché des équipements pour atmosphères explosives, marquage CE obligatoire.
	Directive ATEX 1999/92/CE [14]	Prescriptions minimales pour la protection des travailleurs exposés aux risques d'explosion : évaluation, zonage, formation.
	Norme EN 1127-1 [15]	Principes de prévention des explosions, classification des zones, modes de protection (sécurité intrinsèque, antidéflagrante).
Normes algériennes (IANOR)	Normes algériennes (NA) relatives à la sécurité incendie, prévention des risques, qualité des matériaux [16]	Intègrent souvent les normes ISO et européennes, couvrent sécurité incendie, prévention explosions, gestion HSE.
Normes internationales HSE	ISO 14001 (management environnemental) [16]	Système de management environnemental pour améliorer la performance environnementale.
	ISO 7240 (systèmes de détection et alarme incendie) [17]	Exigences pour conception, installation, maintenance des systèmes de détection et alarme incendie.
	NFPA 704 (identification des risques chimiques) [18]	Système de signalisation des risques liés aux substances chimiques (inflammabilité, toxicité, réactivité).

	Directive SEVESO III (2012/18/UE) [5]	Prévention des accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, obligations de sécurité, gestion des risques industriels.
	Normes OIT sur sécurité et santé au travail [19]	Protection des travailleurs, prévention des risques professionnels liés au feu, explosion et autres dangers.

I.4 Retour d'expérience :

Le retour d'expérience (REX) constitue un pilier fondamental de la gestion des risques industriels. Il s'agit d'un processus structuré de collecte, d'analyse et de capitalisation des événements passés – notamment des incidents et des accidents dans le but de prévenir leur récurrence et d'améliorer durablement la sécurité des installations, des personnels et de l'environnement.

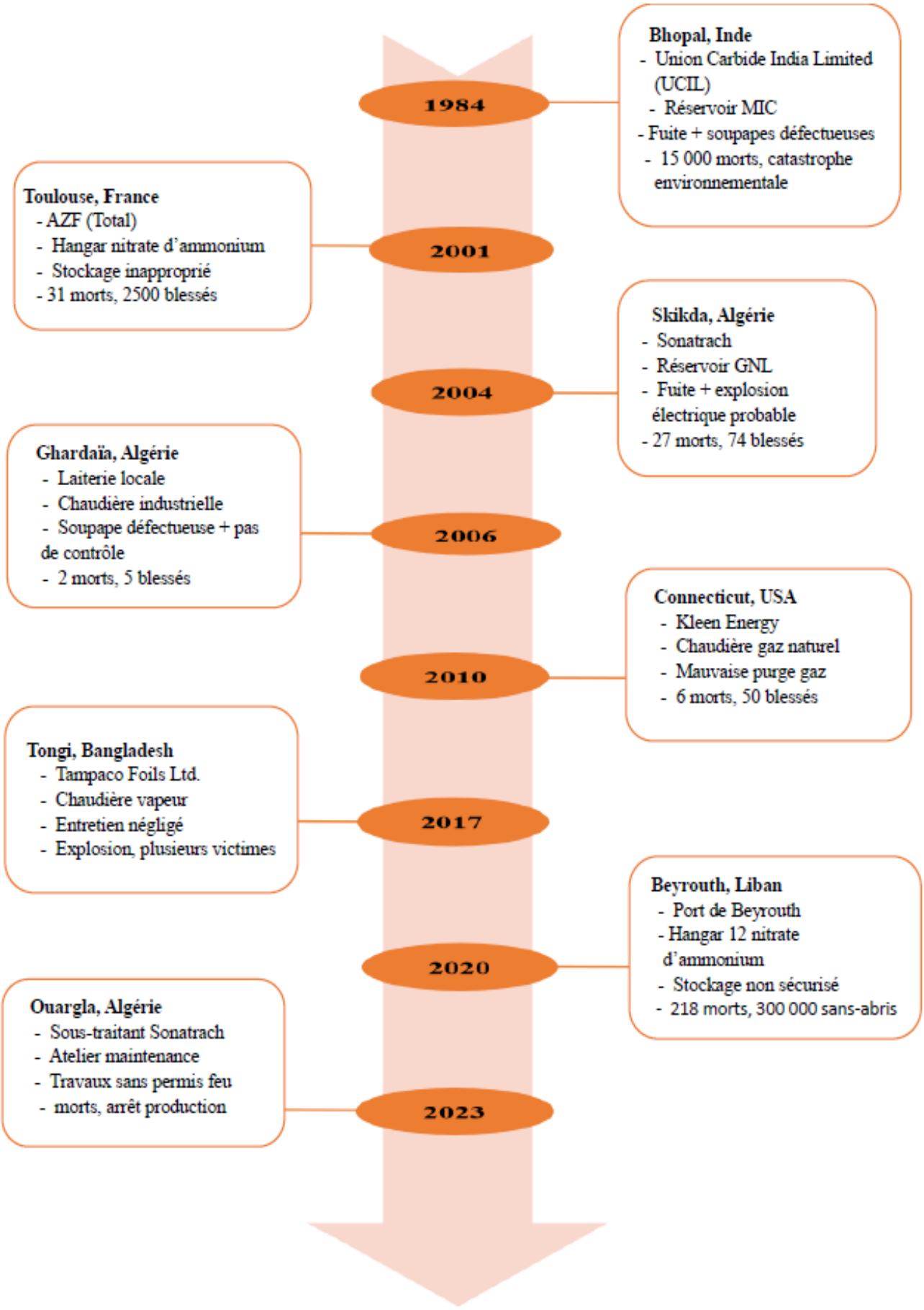


Figure 10:Retour d'expérience



Figure 12: Accident d'explosion de GNL SKIKDA



Figure 11 : Accident d'explosion au port de Beyrouth

I.5 Conclusion :

Par conséquent, les aspects traités dans ce chapitre établissent les fondements théoriques requis pour l'évaluation des risques. Il est indispensable de comprendre les principes de base, les exigences légales et l'importance du retour d'expérience avant d'engager toute approche structurée de prévention.

CHAPITRE II : Méthodes d'analyse des risques et présentation de la démarche FERA

II.1 Introduction

Ce chapitre, l'objet d'une présentation général sur la sécurité des procédés, qui vise à prévenir les accidents majeurs comme les incendies et explosions, contrairement à la sécurité personnelle qui cible les accidents individuels. Notre analyse s'appuie sur de nombreux retours d'expérience montrant la gravité de ces événements dans l'industrie des procédés.

Pour maîtriser ces risques, plusieurs méthodes d'évaluation existent : HAZID, HAZOP, QRA, chacune permettant d'identifier et de hiérarchiser les dangers. Notre étude porte plus particulièrement sur la méthode FERA (Fire & Explosion Risk Assessment), spécialement conçue pour évaluer et réduire les risques d'incendie et d'explosion dans les installations industrielles manipulant des substances dangereuses. Ce chapitre présente donc l'importance de l'analyse des risques de procédés et détaille la démarche FERA, qui constitue le cœur de ce travail.

II.2 Sécurité des procédés et sécurité personnelle :

II.2.1 Sécurité des procédés :

concerne la conception, l'ingénierie et l'exploitation sûres des unités et équipements de procédé pour éviter des événements catastrophiques (fuites, incendies, explosions)[21].

II.2.2 Sécurité personnelle :

vise à prévenir les blessures individuelles dues à des accidents du travail (glissades, chutes, coupures, etc.)[21].

Les incidents de sécurité des procédés peuvent avoir des conséquences majeures : nombreux blessés/morts, dégâts matériels et environnementaux importants, pertes économiques et atteinte à la réputation.

Tableau 4: Différence entre sécurité des procédés et de la santé

Critères	Santé et sécurité au travail (SST)	Sécurité des procédés (Process Safety)
Approche	Individuelle et contrôlée	Coopérative et systémique
Cible	L'individu	Le système global de production
Type de contrôle	Contrôle direct de l'individu	Peu de contrôle individuel
Impact	Spécifique, localisé	Large, potentiellement catastrophique

Exemples d'incidents	-Chutes/glissades -Déversements -Électrocution -Asphyxie -Déficience auditive - Petites blessures	-Explosion -Incendie - Libération de produits chimiques - Libération d'énergie dangereuse
Garanties mises en place	- Permis de travail dangereux - Équipements de protection individuelle (EPI) - Formation	-Conception plus sûre - Soupapes de sécurité -Ventilation -Espace confiné -Verrouillage (LOTO) - Alarmes
Mode d'action	Prévention par les règles, la discipline et la formation	Prévention par conception, ingénierie, analyse des risques

II.3 Process safety management (PSM):

Le PSM est l'application de principes et de systèmes de gestion pour identifier, comprendre et maîtriser les dangers liés aux procédés afin de protéger les employés, les biens et l'environnement[21].

II.3.1 Objectif du PSM :

L'objectif de PSM est de prévenir les incidents majeurs qui ne sont pas couverts par la sécurité au travail traditionnelle, car ils résultent souvent de causes systémiques et non d'erreurs individuelles[21].

II.3.2 Principaux éléments d'un système PSM :

Différents référentiels existent (OSHA, CCPS, API, etc.), mais les éléments clés incluent généralement[21] :

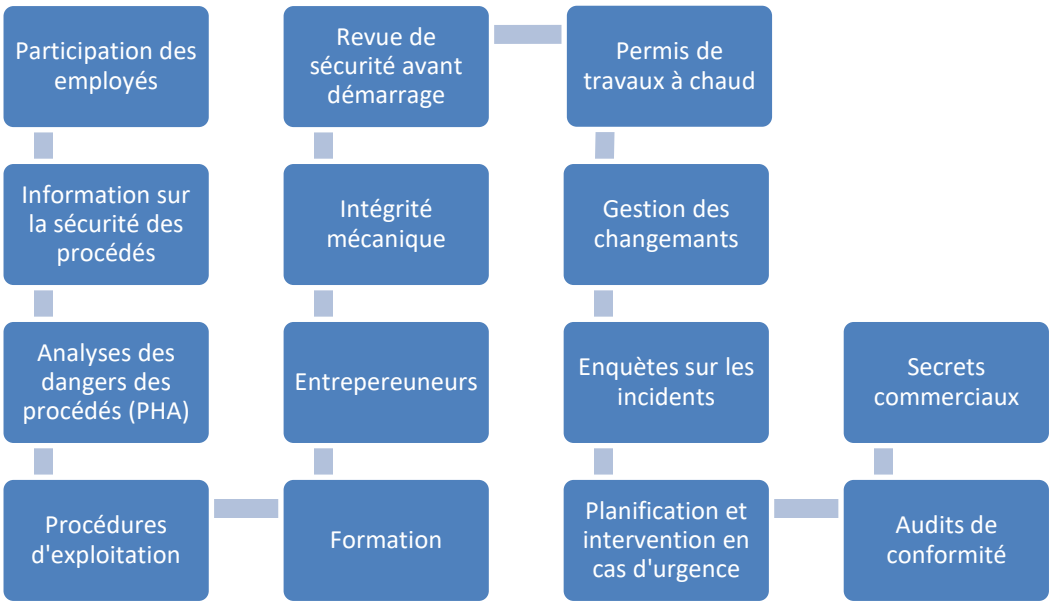


Figure 13: 14 éléments de PSM

II.3.3 Gestion de la sécurité des procédés (PSM) : Proactif vs Réactif [21]

Tableau 5:Gestion de la sécurité des procédés

Approche proactive (prévention)	Approche réactive(protection)
Mettre en œuvre des contre-mesures avant **un incident**	Réagir **après** qu'un incident s'est produit
Analyse des dangers et évaluation des risques	Enquête sur incidents et détermination des causes profondes
Conception intrinsèquement plus sûre	Ajout de couches de protection après un incident

II.4 Analyse des risques de procédé :

Le risque est défini comme : Risque = Conséquence × Fréquence et donc leur analyse passe par :

- Identification des dangers (ex. : HAZOP, RISK ASSESSEMENT…)
- Analyse des conséquences et de la fréquence
- Mise en place de barrières de protection (prévention, mitigation, préparation)[21].

II.5 Description des méthodes d'analyse prévisionnelle des risques :

Les méthodes d'analyse prévisionnelle se répartissent en 3 étapes couramment rencontrées, qui se distinguent par les méthodes de raisonnement

II.5.1Méthodes qualitatives/quantitatives :

Les études quantitatives et qualitatives sont des méthodes complémentaires, utilisées dans les sondages pour obtenir des résultats à la fois détaillés et à large portée.

• Une étude quantitative empirique qui sert à collecter des données chiffrées structurées et s'appuie sur des statistiques que peuvent utiliser pour mesurer des variables

• Une étude qualitative aide à comprendre les raisons des résultats. Elle privilégie les émotions, les motivations et les comportements humains plutôt que les statistiques et les données structurées, en se basant sur des informations textuelles.

- Méthodes qualitatives : APR, HAZOP.

- Méthodes quantitatives : ADE.

II.5.2 Méthodes statiques/dynamiques :

Les méthodes statiques analysent un système à différents moments de son cycle de vie, pour divers états possibles. Elles permettent une analyse structurelle du système, sans tenir compte des évolutions au fil du temps, et s'appuient sur un modèle mathématique booléen du système. Les méthodes dynamiques intègrent les aspects comportementaux et temporels.

- Méthodes statiques : AMDEC, ADD, ADE.

- Méthodes dynamiques : chaîne de Markov, réseau Bayésien dynamique.

II.5.3 Méthodes inductives/déductives :

Les méthodes inductives décrivent un lien de causalité partiel de la cause à l'effet. Elle identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui peuvent entraîner la réalisation d'un événement unique indésirable : la défaillance. Pour les méthodes déductives, la démarche est inversée puisque l'on part de l'événement indésirable, la défaillance, et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles.,

- Méthodes inductives : AMDEC, chaîne de Markov, ADE.

- Méthodes déductives : ADD.

II.6 Méthode d'analyse des risques :

II.6.1 Méthode APR (HAZID) :

Définition :

Méthode qualitative et proactive visant à identifier les risques majeurs dès les phases initiales d'un projet. Elle permet d'évaluer la cohérence entre objectifs, moyens et délais, et de proposer des solutions pour les écarts critiques[22].

Objectif :

- Identifier les dangers potentiels (incendie, explosion, toxicité).
- Hiérarchiser les risques via une matrice de criticité.
- Guider les décisions de conception ou de modification[22].

Méthodologie :

Étapes clés :

- Définition du périmètre : Délimiter les installations/équipements analysés.
- Identification des dangers :
  - Checklists, retours d'expérience, brainstorming.
  - Exemples : Fuites, erreurs humaines, défaillances techniques.
- Analyse des causes/conséquences : Utilisation de grilles d'évaluation (ex : Gravité Probabilité).
- Priorisation : Matrice 3×3 ou 4×4 pour classer les risques (Acceptable / Tolérable / Inacceptable)[22].

Domaine d'application :

- Conception de projets (avant HAZOP/FERA).
- Modifications mineures (évite des analyses complexes).
- Secteurs : BTP, énergie, chimie[22].

II.6.2 Méthode de HAZOP :

Définition :

C’est une application d’un examen critique formel et systématique aux intentions du procédé et de l’ingénierie d’une installation neuve ou existante afin d’évaluer le potentiel de danger lié à la mauvaise utilisation, ou au mauvais fonctionnement, d’éléments d’équipement et leurs effets sur l’installation dans son ensemble[23].

Principe :

L'HAZOP se concentre sur le fonctionnement du processus. Cette méthode consiste en la génération systématique de dérives potentielles des paramètres clés de chaque partie du système étudié. Pour chaque dérive, le groupe de travail recherche les causes et les conséquences possibles ainsi que les moyens de prévention et de limitation des effets. Bien qu'initialement qualifiée de méthodologie qualitative, l'HAZOP peut également être utilisée pour estimer la criticité des risques en utilisant une technique semi-quantitative[23].

Domaine d’application :

La méthode HAZOP consiste à examiner de manière systématique les écarts des paramètres d'une installation afin d'identifier leurs causes et leurs conséquences. Elle est particulièrement pertinente pour l'analyse des systèmes thermo-hydrauliques, où des paramètres tels que le débit, la température, la pression, le niveau et la concentration sont essentiels pour la sécurité de l'installation[23].

Cette approche exige notamment l'étude approfondie des schémas et plans de circulation des fluides, ainsi que des schémas P&ID [23].

Déroulement :

- L'utilisation du tableau de synthèse n'est qu'un outil parmi d'autres dans l'analyse des risques.

- L'analyse des risques implique l'identification de toutes les situations de danger potentiel.

- Les produits, les installations et les équipements sont passés en revue pour identifier toutes les situations de danger possibles.

- La démarche est rigoureuse, avec l'utilisation du tableau qui répertorie les causes, les conséquences et les barrières de sécurité existantes pour chaque situation de danger identifiée.

- En fonction des résultats du tableau, des propositions d'amélioration sont formulées pour renforcer les barrières de sécurité existantes.

- La définition de la situation de danger peut être difficile, mais elle est essentielle pour l'analyse des risques.

- Les colonnes supplémentaires peuvent être ajoutées pour inclure les résultats de l'estimation des risques réalisée en groupe de travail.

Tableau 6:Méthode d'analyse HAZOP

Paramètre	Déviation	Causes	Conséquences	Before risk reduction			Barrières de sécurité	Recommandations
				S	L	RR		

II.6.3 Méthodologie QRA :

Définition :

La QRA est une méthode d'analyse systématique et quantitative des risques associés à des activités dangereuses, permettant d'évaluer de façon rationnelle leur importance pour soutenir la prise de décision. Elle combine des données scientifiques et des modèles pour prédire les risques d'accidents majeurs et orienter les mesures de réduction[24].

Objectifs :

1) Identifier et quantifier les risques majeurs (incendie, explosion, rejets toxiques, etc.)
2) Évaluer l'impact sur les travailleurs, la population et les installations
3) Hiérarchiser les scénarios dangereux et proposer des mesures pour réduire le risque à un niveau acceptable (ALARP)[24].

Méthodologie :

- Identification des dangers et scénarios (accidents potentiels et leurs causes)
- Détermination des fréquences (analyse statistique, arbres de défaillance, données historiques)
- Évaluation des conséquences (modélisation des effets sur les personnes et l'environnement)
- Calcul du risque (combinaison fréquence × conséquence)
- Comparaison aux critères d'acceptabilité et recommandations pour la réduction du risque

- Rapport et communication des résultats aux parties prenantes[24].

Domaine d'application :

- La QRA est utilisée dans les industries à risques majeurs : Pétrochimie, chimie, gaz, nucléaire, offshore
- Conception, exploitation ou modification d'installations
- Justification des mesures de sécurité et conformité réglementaire[24]

Ces différentes méthodes d'analyse des risques, qu'elles soient qualitatives (comme le HAZOP ou l'APR) ou quantitatives (comme le QRA), permettent d'identifier et d'évaluer les dangers présents dans une installation industrielle.

Toutefois, lorsqu'il s'agit spécifiquement des risques d'incendie et d'explosion, qui représentent une catégorie particulière de risques majeurs, il devient nécessaire de recourir à une méthode plus ciblée et adaptée.

C'est dans cette optique que s'inscrit l'étude FERA, qui constitue l'outil de référence pour l'étude approfondie de ce type de risques.

II.6.4 Méthodologie FERA

Définition FERA :

L'étude FERA est une analyse qualitative et quantitative structurée visant à identifier, évaluer et quantifier les risques d'incendie et d'explosion liés à une installation industrielle manipulant des substances inflammables ou explosives.

L'objectif :

Elle vise à :

1. Identifier les scénarios accidentels crédibles (fuites, ruptures, etc.)
2. Quantifier la fréquence d'occurrence de ces scénarios
3. Modéliser les conséquences (effets thermiques, surpressions, effets dominos)
4. Évaluer l'impact sur les équipements et les bâtiments voisins

L'étude FERA permet ainsi de guider les décisions de conception, d'exploitation et de protection des installations en proposant des mesures techniques et organisationnelles en conformité avec la réglementation et les standards internationaux afin de réduire les risques.

Méthodologie d'une étude FERA :

1. Définition du périmètre et collecte des données :

   a. Définir l'étendue de l'étude : préciser les installations, équipements, unités ou zones à analyser (ex : chaudière, unités process, bâtiments, stockages).

   b. Collecter les données techniques : PFD, P&ID, inventaires, caractéristiques des produits (composition, pression, température, phase), paramètres d'exploitation, plans d'implantation, conditions météorologiques.

2. Identification des dangers et des scénarios accidentels

   a. Identifier les dangers majeurs : tout événement susceptible de générer un feu ou une explosion (perte de confinement, défaillance mécanique, réaction incontrôlée, montée en pression, présence d'atmosphère explosive, etc.).

   b. Développer les scénarios d'accident :

      - Prendre en compte différents modes de défaillance (rupture, brèche, défaillance de soupape, erreur humaine, etc.).
      - Considérer la localisation, la taille, la nature du phénomène (incendie, explosion, feu de torche, boule de feu, etc.).
      - S'appuyer sur les études HAZOP et l'historique des incidents pour ne pas omettre de scénarios pertinents.

3. Quantification des fréquences d'occurrence

   a. Comptage des équipements et sources potentielles : recenser les éléments susceptibles d'être à l'origine d'un scénario (vannes, tuyauteries, brides, réservoirs, etc.).
   b. Estimation des fréquences : utiliser des bases de données reconnues pour attribuer une fréquence à chaque type d'événement ou de défaillance.
   c. Arbre des événements : modéliser la séquence menant du scénario initial au phénomène dangereux.

d. Probabilité d'inflammation et de détection/isolation : appliquer des modèles statistiques pour estimer la probabilité que le scénario aboutisse effectivement à un feu ou une explosion.

4. Modélisation des conséquences physiques

Utilisation de logiciels spécialisés : PHAST, pour simuler la dispersion de produits, le développement d'un feu ou d'une explosion.

Paramètres de simulation :

- Conditions initiales (débit, pression, température, inventaire).
- Conditions environnementales (vent, stabilité atmosphérique, humidité).
- Modèles adaptés au phénomène étudié (dispersion, rayonnement thermique, surpression, etc.).
- Évaluation des distances d'effets : déterminer l'étendue des conséquences (ex : seuils thermiques, surpressions, zones de létalité ou de dommages aux équipements/bâtiments).

5. Évaluation de l'impact sur les récepteurs

Identification des cibles sensibles : unités process, bâtiments, équipements critiques, voies d'évacuation, points de rassemblement.

Comparaison aux seuils de vulnérabilité :

- Thermique (ex : 8 kW/m² dégâts aux équipements non protégés)
- Surpression (ex : 160 mbar dégâts aux structure (effet domino).

Analyse des effets dominos : étudier la possibilité que les conséquences d'un scénario initial déclenchent d'autres événements majeurs sur le site.

6. Analyse du risque et recommandations

a. Calcul du risque : croiser la fréquence d'occurrence et la gravité des conséquences pour chaque scénario et chaque récepteur.

b. Classement des risques : selon les critères d'acceptabilité (ex : matrice de criticité, seuils réglementaires ALARP, etc.).

c. Propositions de mesures de réduction : Techniques : protection passive/active, renforcement des équipements, détection feu/gaz, systèmes d'arrêt d'urgence, etc.

d. Organisationnelles : plans d'évacuation, formation, procédures d'urgence.

e. Hiérarchisation des actions : prioriser les mesures selon le niveau de risque résiduel et leur faisabilité technique/économique.

7. Rapport et communication

a. Documenter l'ensemble de la démarche : hypothèses, scénarios, résultats, cartes d'effets, tableaux de risques, recommandations.

Transmettre les résultats aux parties prenantes : management, équipes HSE, ingénierie, autorités réglementaires

Tableau 7:Réglementation de l'étude FERA

Aspect	Réglementation / Norme	Description / Exigences principales
Étude FERA (Fire and Explosion Risk Assessment)	**Décret exécutif n° 24-278 (2024)** définissant les conditions et modalités de pré-qualification des bureaux spécialisés en hydrocarbures[25]	- Obligation de recourir à des bureaux spécialisés pré-qualifiés pour la réalisation des études FERA. - Compétences exigées en sécurité des procédés, management du risque, méthodes d'analyse HAZOP/HAZID, modélisation des conséquences, maîtrise des normes ATEX, IEC 61508/61511. - Minimum 10 études réalisées, dont 5 dans les hydrocarbures, avec références et attestations. - Utilisation de logiciels reconnus (PHAST, EFFECTS…). - Respect des exigences de contenu, traçabilité, confidentialité et compétences du personnel. - Contrôle et suivi assurés par l'ARH (Autorité de Régulation des Hydrocarbures).

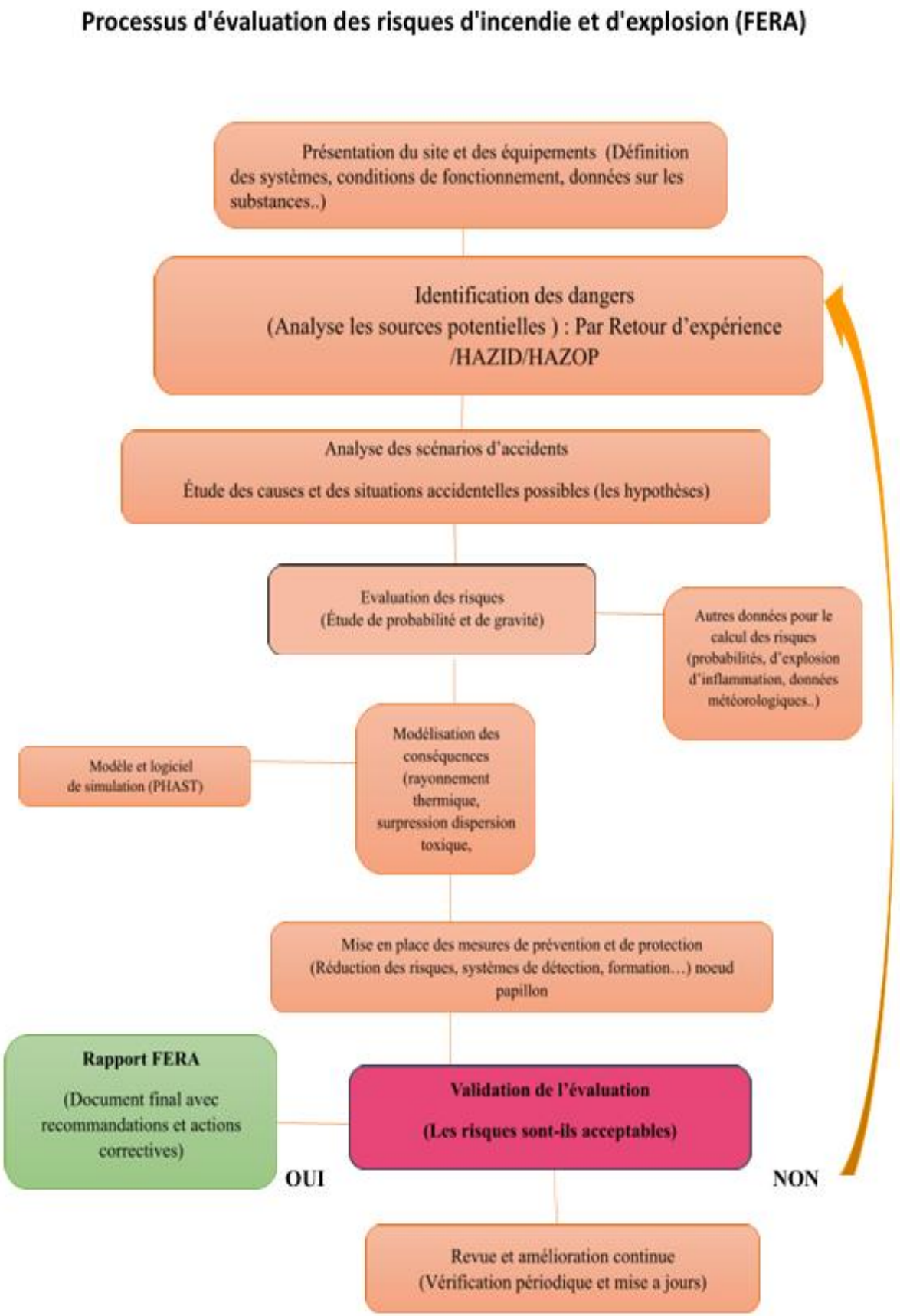


Figure 14: organigramme de l'étude FERA

II.7 Conclusion

En intégrant des méthodes structurées telles que le FERA dans leur système de gestion, les entreprises renforcent la maîtrise des risques liés aux incendies et explosions et s'assurent du respect des exigences réglementaires. Cette démarche, fondée sur l'analyse rigoureuse, la formation et l'implication de tous, contribue à instaurer une culture de sécurité durable et à limiter les conséquences potentielles des incidents majeurs, assurant ainsi la pérennité et la performance des installations industrielles.

CHAPITRE III : Présentation du complexe SORFERT et identification des zones critiques

III.1 Introduction

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de notre cas d'étude sur le complexe industriel SORFERT situé dans la zone industrielle d'Arzew.

Il présente la situation géographique du site, sa configuration générale, ainsi que les principales unités de production d'ammoniac et d'urée. Les installations de support (utilités), les matières premières, les produits finis et les zones de stockage y sont également décrits

L'ensemble de ces informations constitue une base fondamentale pour l'élaboration d'une démarche FERA rigoureuse et adaptée, visant à prévenir les risques d'explosion et d'incendie et à garantir la sécurité des personnes, des installations et de l'environnement

III.2 Présentation du complexe :

Le complexe industriel d'ammoniac SORFERT est, parmi les plus importantes réalisations industrielles de la chaine de transformation des hydrocarbures, cette usine fait partie un partenariat entre :

L'entreprise égyptienne ORASCOM construction et industries et ; entreprise algérienne SONATRACH établie le 10 juin 2007, sous la loi 51/49 exploitée par la société SONATRACH en Algérie. Il a été conçu pour assurer le transport, d'ammoniac sous forme liquide et de l'urée granulée.[26]



Figure 15:Complexe SORFERT SPA

III.3 Complexe SORFERT SPA :

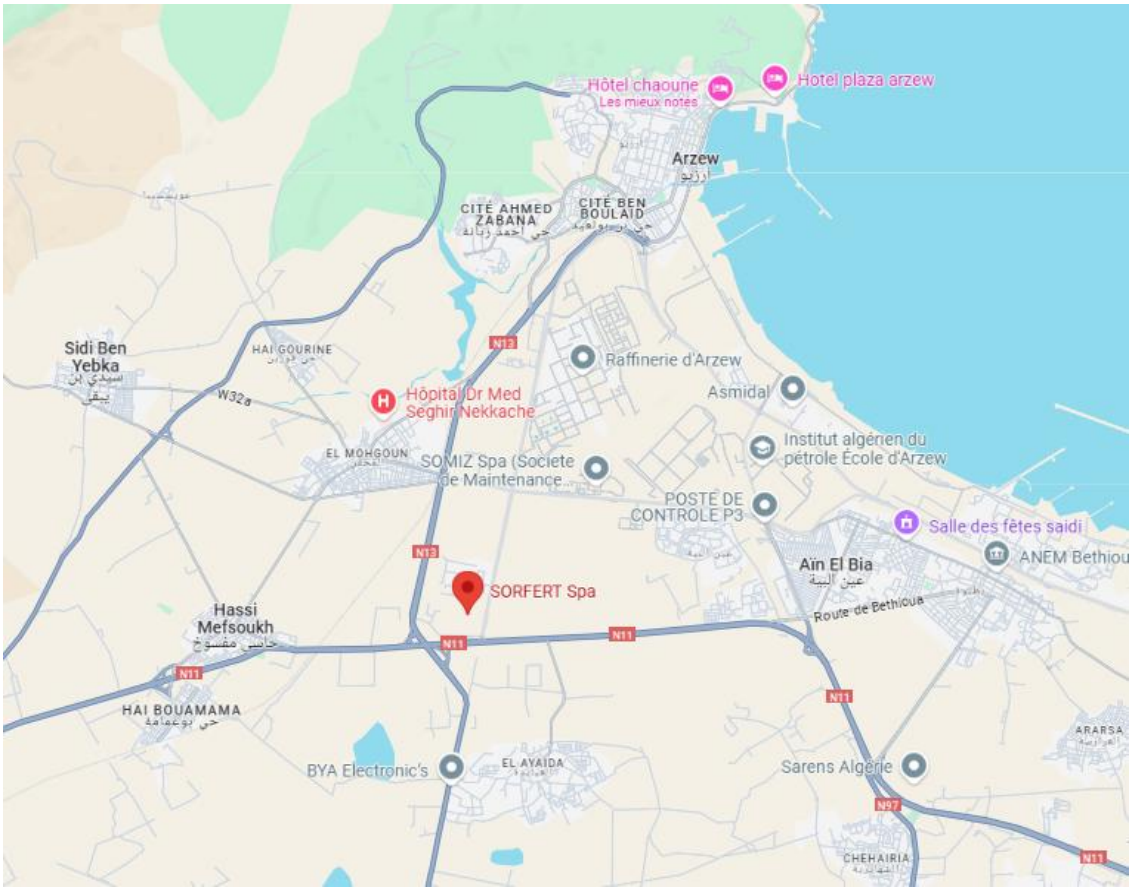


Figure 16:Situation géographique du complexe SORFERT SPA

Le complexe SORFERT est situé dans la zone industrielle Arzew à l'Ouest de Bethioua, à 6 Km de la ville d'Arzew, 40 Km à ; Oran, il couvre une superficie de 37 hectares et se compose notamment de plusieurs zones.

Tableau 8:Fiche technique du complexe

Élément	Détails
Localisation	Zone industrielle d'Arzew
Superficie	37 hectares
Partenaires	ORASCOM Construction et Industrie 51% SONATRACH 49%
Date de création	10 juin 2007
Date de début de production	Décembre 2011
Alimentation en gaz naturel	RTO (Région Transport Ouest)
Procédé	Thyssen Krupp UHDE

Capacité de production	Ammoniac : 2200 Tonnes/jour Urée : 3450 Tonnes/jour
Température de chargement du produit	-33 °C

III.4 Installations du Complexe :

Les installations de SORFERT se composent de :

- Deux unités de production d'ammoniac de capacité de 2 200 tonnes/jour pour chacune.
- Une unité de production de 3 450 tonnes/jour d'urée en granulés.
- Une usine de dessalement d'eau de mer.
- Des installations électriques.
- Un réservoir d'eau d'une capacité de 6000m3
- Un bac de stockage d'urée.
- Deux réservoirs de stockages d'ammoniac d'une capacité de 30 000 tonnes à proximité du port.

Un corridor technique comprenant :

- Une conduite d'amenée d'eau de mer,
- Un pipeline de transfert de l'ammoniac,
- Une conduite de retour d'eau de mer,
- Une ligne en fibre optique pour le transport de l'information,
- Des câbles pour le transport de l'énergie électrique.

III.4.1 Matières premières et les produits finis :

Les matières premières nécessaires au complexe des fertilisants de SORFERT sont :

- Le Gaz Naturel provenant du RTO.

- L'Azote (Nitrogène) de l'Air atmosphérique.

-Le Dioxyde de Carbone (CO2) de l'Unité d'extraction du CO2.

-La Vapeur d'Eau générée par la récupération de chaleur et produite aux niveaux des Chaudières Autonomes.

III.4.2 Produits finis du Complexe des Fertilisants de SORFERT :

-L'Ammoniac (NH3) stockée à l'état liquide au site et au port.

-L'Urée (CO(NH2)2) granulée stockée au site et expédiée par camion au port[26].

III.4.3 Principales zones du complexe :

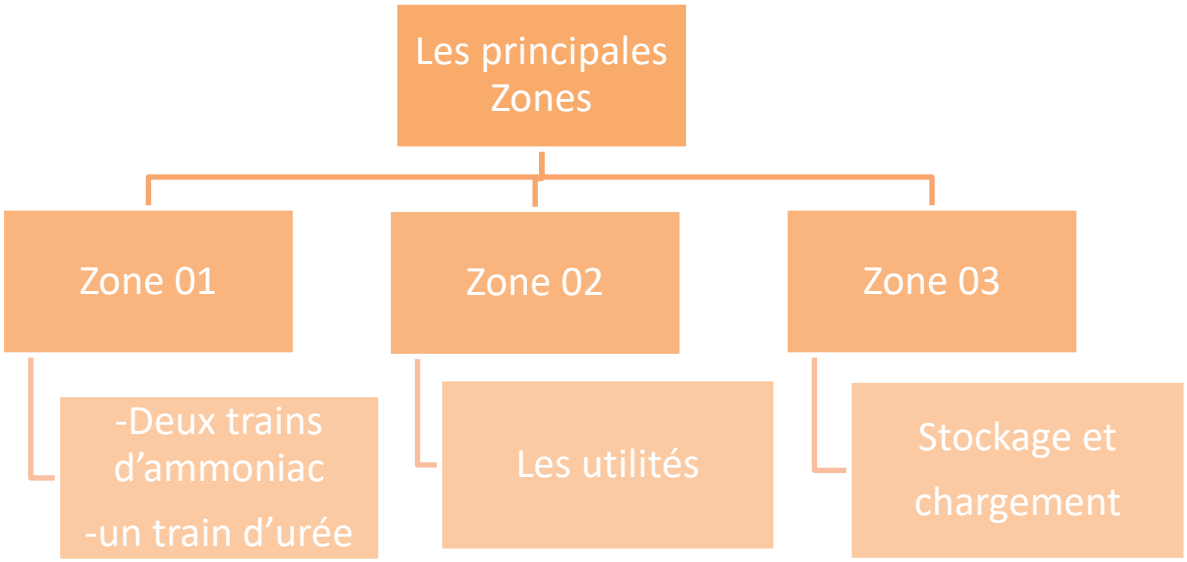


Figure 17: Principales zones du complexe

III.4.4 Description du train d'ammoniac :

SORFERT possédé deux trains d'ammoniac identique, produisent de l'ammoniac selon le procédé « UHDE ».

- La molécule d'ammoniac est produite à partir de l'azote et l'hydrogène, qui proviennent de l'air et du gaz naturel. Passant par plusieurs étapes.

  • Le gaz naturel est traité par une élimination du mercure, hélium et le soufre, puis entre dans un four de reforming primaire après avoir été mélangé avec la vapeur d'eau, en formant un gaz qui contient une teneur en hydrogène de 68% et le reste constitué de la vapeur d'eau, de CO2, CO, CH4 et N2, un reforming secondaire qui est nécessaire pour la transformation du méthane provenant du reforming primaire, le monoxyde de carbone est transformé en dioxyde de carbone qui sera absorbée par le solvant , puis le gaz sera dirigé vers le méthanateur où tous les oxydes de carbone sont transformé en méthane, le gaz méthanisé est comprimé et refroidi puis envoyé vers le système de synthèse où le gaz de synthèse est produit dans un réacteur de synthèse puis dirigé vers le stockage[26].

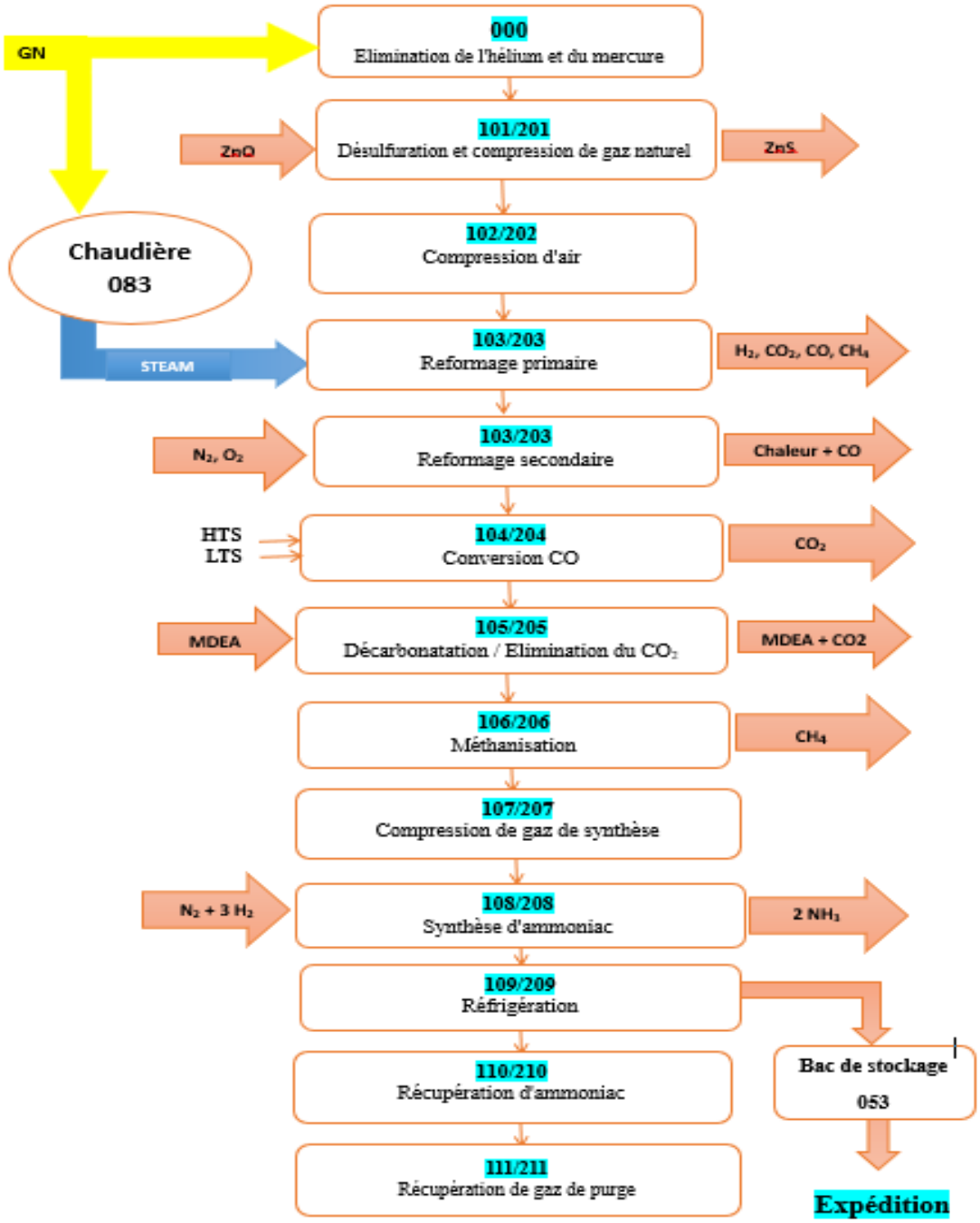


Figure 18:Plan de processus d'ammoniac

III.4.5 Description du train d'urée :

Les réactifs (NH3etCO2), purifiés pour éliminer l'oxyde de carbone (CO) et l'humidité, sont comprimés séparément, puis introduits dans le réacteur, La formation du carbamate y est très rapide, le réacteur fonctionne adiabatiquement et on doit exercer un contrôle sévère de la température à cause de la corrosion importante par les solutions de carbamate d'ammoniaque au-dessus de 200°C.

L'effluent du réacteur, constituant en urée, carbamate d'ammoniaque et des réactifs non convertis, est soumis par modification des conditions opératoires à une décomposition qui transforme une partie de carbamate d'ammoniaque en gaz carbonique et ammoniaque, l'ensemble de cette opération est répété afin de décomposer la totalité de carbamate, on obtient alors une solution d'urée qui par un traitement de finition est amenée à la pureté finale que l'on désire.

L'urée ainsi obtenu est granulée au sein d'une section de granulation puis dirigée vers un hangar d'urée en vrac et après transportée par des camions vers le port d'Arzew.

III.4.6 Description des utilités :

Les utilités sont des services de support au procédé. Elles sont créées pour produire et manipuler les produits finis du complexe, comme elles sont nécessaires pour supporter l'outil de production.

Les utilités se composent des unités suivantes :

1. Les chaudières autonomes :

Les générateurs de vapeurs de l'unité produisent de vapeur haute pression surchauffée à 116 bars. Afin de couvrir les besoins en vapeur des unités de production en fonctionnement normal ainsi au démarrage, les quatre chaudières autonomes sont installées pour générer de la vapeur HP alimentant les turbines à vapeur entrainant les générateurs et sont raccordées au circuit de vapeur MP. Alimentation de chaudière est fournie par les pompes eau d'alimentation à partir des évaporateurs à thermo compression d'Unité de déminéralisation.

2. La production d'énergie électrique :

Le site est alimenté principalement par une unité de production d'électricité se trouvant sur le site et comprenant 2 turboalternateurs d'une capacité de 2 x 45 MW.

Dans les conditions normales, les turbines des générateurs produisent de l'énergie électrique et de la vapeur MP via l'extraction des turbines.

L'alimentation électrique peut être produite en quantité suffisante pour faire marcher l'usine indépendamment du réseau extérieur.

3. Système d'azote :

L'azote est nécessaire au fonctionnement de train d'ammoniac. Il est fourni à l'état Liquide (de l'extérieur) et stocké dans la cuve de stockage d'azote liquide à une pression de fonctionnement de 18 bars. Pour maintenir la pression du réservoir, un vaporisateur est installé.

4. Circuit de refroidissement de l'eau de mer :

Le circuit de refroidissement à l'eau de mer sera utilisé pour le refroidissement direct des condenseurs de turbines, du condenseur d'Ammoniac et du refroidissement de retour du circuit fermé d'eau de refroidissement.
L'Unité de refroidissement se compose principalement des tours de refroidissement, des pompes de circulation eau de mer et des échangeurs de chaleur à laques.
L'eau de mer est alimentée comme eau d'appoint pour les tours de refroidissement dans le périmètre des installations.
Afin d'éviter l'entartrage et la prolifération biologique dans les conduites d'alimentation en eau de mer, l'eau est traitée avec du bioxyde de chlore et des produits chimiques stabilisants.

5. Circuit de refroidissement en boucle fermée :

Deux circuits indépendants de refroidissement en boucle fermée alimentent en eau de Refroidissement la totalité du complexe SORFERT.
A l'exception des condenseurs à l'eau de mer, tous les échangeurs de chaleur dans l'Unité de traitement et l'Unité de services font partie du circuit d'eau de refroidissement en boucle fermée. Pour le remplissage des circuits fermés, de l'eau polishée est utilisée.
Refroidissement du circuit d'eau de refroidissement en boucle fermée est réalisé au moyen d'eau de mer dans plusieurs échangeurs de chaleur à plaques identiques les pompes doseuses fournissent les inhibiteurs requis pour les deux boucles.

6. Unité de dessalement :

Comprend deux unités :
-L'unité de dessalement par osmose inverse (RO) produira de l'eau dessalée à partir de l'eau de mer durant l'opération de démarrage quand l'unité de dessalement par évaporation n'est pas en service.
- L'unité de dessalement thermo compression produira de l'eau dessalée à partir de l'eau de mer pour assurer le fonctionnement des unités d'Ammoniac et d'Urée.

7. Unité de déminéralisation :

L'unité est conçue pour fournir de l'eau polishée en quantité nécessaire pour l'exploitation de l'unité d'Ammoniac, d'Urée y compris les Unités Hors site.
L'unité se compose d'une unité de déminéralisation d'eau, l'unité de polissage et l'unité de régénération et neutralisation commune pour les deux.

L'eau déminéralisée est produite à partir de condensat de procédé prétraité et d'eau de mer dessalée à partir de la technique résine échangeuse d'ions (anioniques et cationiques) à lit mixte fournit de l'eau entièrement déminéralisée, cette eau est utiliser pour la génération de vapeur HP dans les chaudières autonomes.

8. Réseau d'eau anti-incendie :

Un réseau d'eau anti-incendie est prévu pour alimenter en eau les systèmes pour la distribution et la protection des installations. Ce réseau comporte le réseau de conduites d'incendie, les boucles d'incendie, les moniteurs et les systèmes d'aspiration.

9. Prise d'eau de mer :

L'admission d'eau de mer fournira les différents utilisateurs du complexe des fertilisants SORFERT par de l'eau de mer fraiche pour les besoins suivants :

• Etre utiliser comme eau d'appoint pour le système de refroidissement d'eau de mer afin de compenser les pertes par évaporation du système de refroidissement d'eau de mer.

• Approvisionner l'unité de dessalement par l'eau de mer fraiche.

• L'admission d'eau de mer inclue aussi les lignes de transfert vers le site de Production.

III.4.5 Stockage et chargement :

La zone de stockage et chargement se compose de deux unités :

- Stockage sur site :

Le stockage sur site se constitué d'un réservoir d'ammoniaque liquide d'une capacité de 15 000m3et d'un hangar d'engrais d'une capacité de 100 000 m3.

-Stockage au port :

Le stockage au port est constitué de deux réservoir d'ammoniaque liquide d'une capacité de 30 000 m3 pour chacun et une station de pompage d'ammoniaque liquide d'une capacité de 1000 m3/h et un quai d'expédition avec deux bras de chargement.

III.4.6 Laboratoire :

Le laboratoire joue un rôle important dans l'industrie chimique et pétrochimique. Il permet le suivie et le contrôle continu de la qualité des produits finis et intermédiaires et l'analyse des rejets.

III.5 Présentation de la chaudière :

La chaudière 083U400 est un générateur de vapeur haute pression (116 bars abs, 510°C) intégré au circuit énergétique critique du complexe. Conçue pour une production nominale de 166 t/h, elle alimente principalement :

- Les turbines électriques 085MT01/02
- Le circuit de désaération de l'eau d'alimentation
- Les échangeurs de chauffage du gaz naturel



Figure 19:Chaudière 4 au niveau de SORFERT SPA

III.5.1 Description technique :

1. Définition :

Une chaudière ou générateur de vapeur est un équipement servant à la transformation de l'eau liquide en vapeur, selon la température et la pression définie par la destination de cette vapeur.

2. Rôle :

Conversion de l'eau déminéralisée en vapeur surchauffée pour :

- Entraînement des turbines via détente HP → MP (59 bars) → BP (5.5 bars).
- Élimination des gaz dissous (O_2, CO_2) dans le désaérateur 083D001.

Tableau 9:Constituants de la chaudière

Composant	Description	Caractéristiques	Fonction
Tambour	Enveloppe métallique résistante à la pression, contenant les tubes de chauffe	Diamètre 1500 mm, pression 151.5 barg	Séparation eau-vapeur, régulation pression
Brûleurs	Dispositifs injectant et mélangeant le combustible avec l'air pour la combustion	4 brûleurs à faible NOx, débit max 2828 kg/h	Combustion optimisée du gaz naturel
Échangeurs	Tubes de fumée et tubes d'eau assurant l'échange thermique entre gaz chauds et eau	Surchauffeurs internes, économiseur	Transfert thermique gaz → eau
Système d'alimentation	Pompe et circuits assurant l'apport continu d'eau à la chaudière	4 pompes 083P001A-D, débit 100% chacune	Alimentation en eau déminéralisée
Sécurité **Évacuation des gaz**	• Capteurs de pression, température, soupapes de sécurité (PSV), dispositifs d'arrêt d'urgence • Système d'évacuation des gaz de combustion : cheminée et échangeurs pour l'évacuation des fumées	3 transmetteurs de niveau (LT 083011 A/B/C), soupapes PT 083010 A/B/C	Surveillance pression/niveau en temps réel

III.5.2 Mode de fonctionnement :

- Combustion :

Gaz naturel filtré (083F001A/B) → Préchauffé à 110°C (083E009) → Brûlé avec air forcé (ventilateurs 083K101/201/301).

- Production de vapeur :

Eau déminéralisée (unité 090) → Désaérateur 083D001 (130°C) → Chauffage dans tubes → Vapeur surchauffée collectée.

III.5.3 Pipeline d'alimentation (PRS pipeline) :

Un pipeline d'alimentation est une canalisation industrielle constituée de tubes et d'accessoires (robinets, vannes, etc.), conçue pour transporter sous pression, sur de longues distances, des fluides tels que, le gaz, nécessaires à l'alimentation de la chaudière. Ces pipelines sont dimensionnés pour garantir un débit constant et sécurisé, et sont équipés de postes de contrôle, de pompes ou de compresseurs selon le fluide transporté.

Tableau 10:Paramètres de PRS pipeline

Paramètre	Valeur
Longueur de la conduite	3 m
Diamètre nominal	152,4 mm (6")
Position de la fuite	80 cm au-dessus du niveau du sol
Débit de gaz naturel	45 000 Nm³/h
Température du gaz	92,1 °C
Pression de service	6,24 bars

III.5.4 Chambre de combustion :

La chambre de combustion est une enceinte conçue pour résister à de fortes pressions et températures, dans laquelle lieu la combustion contrôlée du combustible (gaz, fioul, etc.) avec un comburant (généralement l'air). Son rôle est de permettre le mélange efficace des réactifs, d'optimiser la réaction chimique de combustion, et de canaliser les gaz chauds produits vers l'échangeur de chaleur ou les tubes de la chaudière. Elle doit garantir la sécurité, l'efficacité énergétique et la durabilité de l'installation.

Tableau 11:Paramètres de la chambre de combustion

Paramètre	Valeur
Volume total de la chambre	311 m³
Température de fonctionnement	425 °C
Pression interne estimée	~1,2 bar (légèrement positif)
Type de combustion	Continuer – brûleur automatique
Combustible utilisé	Gaz naturel (GN)
Système d'alimentation	Pipeline PRS
Éléments associés	Brides, vannes, brûleurs, détecteurs

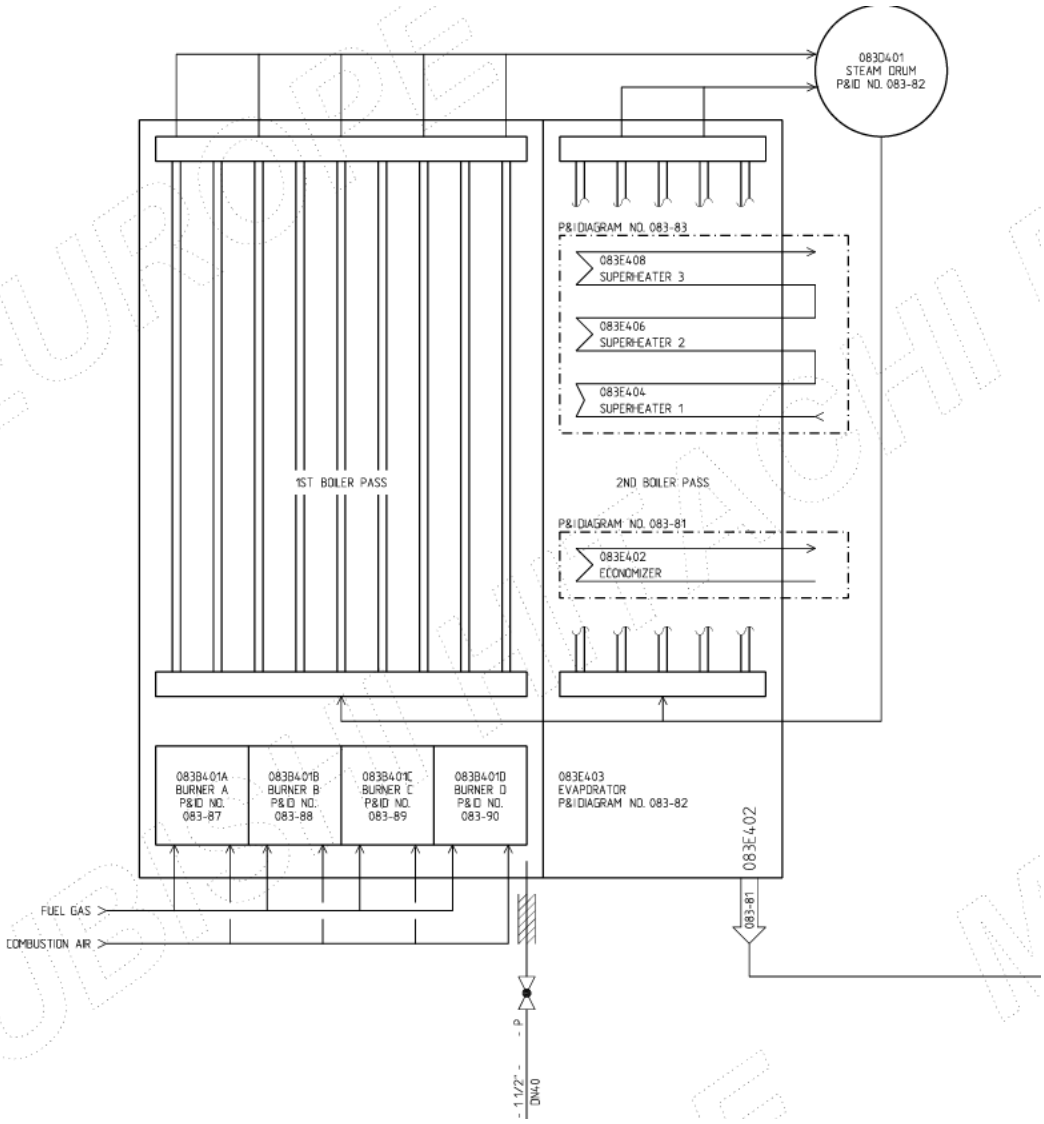


Figure 20:P&ID de la chambre de combustion

III.6 Conclusion

Ce chapitre montre que la présentation détaillée du complexe SORFERT est essentielle pour comprendre ses enjeux industriels et préparer une analyse efficace des risques. La connaissance de l'organisation, des installations et des procédés permet d'identifier les points sensibles à surveiller et de poser les bases d'une bonne démarche de gestion des risques et de l'étude, afin d'assurer la sécurité des personnes, des biens et de l'environnement

CHAPITRE IV : Application de l'étude FERA

IV.1 Introduction

Ce quatrième chapitre représente la phase finale de l'évaluation des risques liés à la chaudière. Une analyse HAZOP a été menée sur un seul nœud critique de l'installation : le pipeline PRS d'alimentation en gaz naturel.

Suite à cette étude qualitative, deux sections ont été retenues pour une modélisation quantitative des conséquences : le pipeline PRS et la chambre de combustion. L'évaluation repose sur la méthode FERA, appliquée via le logiciel PHAST 8.71, pour simuler les scénarios possibles.

IV.2 Analyse HAZOP

La sélection des nœuds :

Le nœud sélectionné correspond au pipeline d'alimentation en gaz naturel en sortie du poste PRS

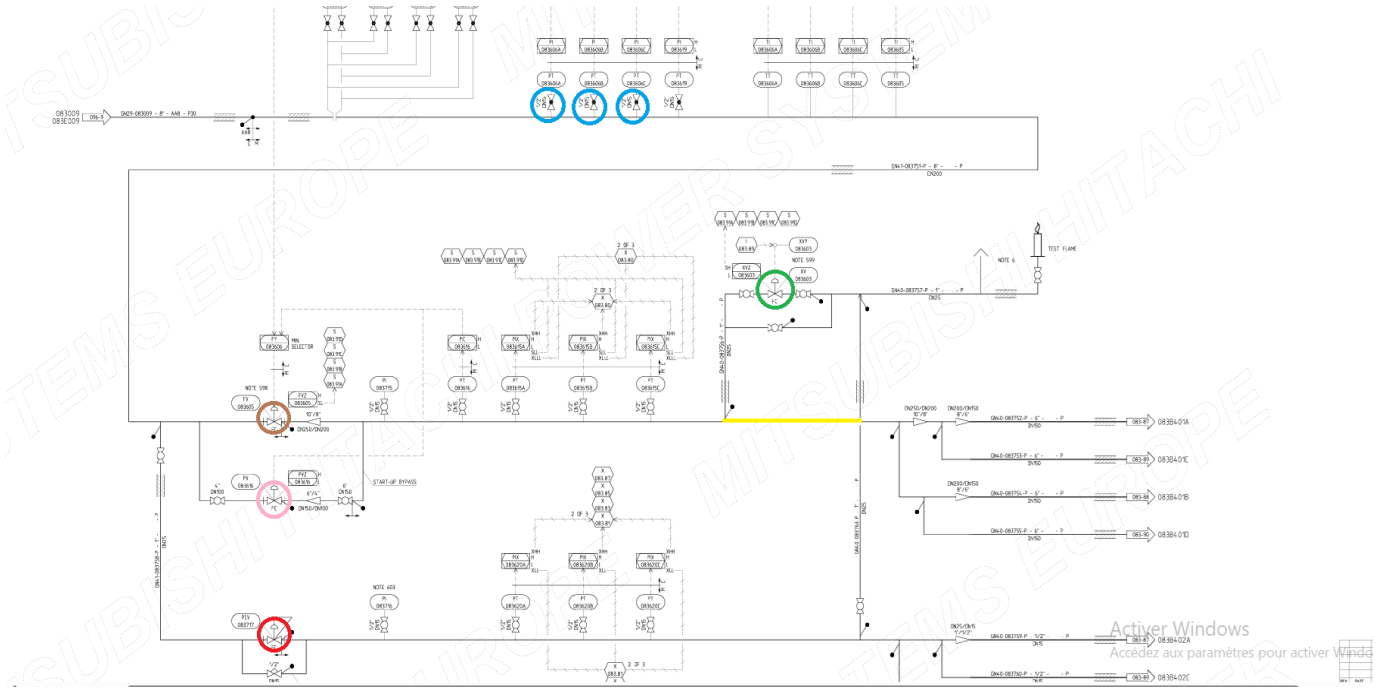


Figure 21:: Extrait du P&ID – Pipeline PRS avec vannes et équipements

IV.2.1 Matrice de cotation des risques :

L'analyse HAZOP du pipeline PRS repose sur la méthode de cotation du risque adoptée par l'entreprise Sorfert, conformément à sa procédure d'identification et d'évaluation des dangers (procédure interne HSE).

La matrice de risque combine deux critères :

- La gravité (G) : mesure des conséquences potentielles (humaines, matérielles, environnementales)
- La probabilité (P) : fréquence d'occurrence estimée de la déviation

Le niveau de risque (NR) est obtenu par croisement de ces deux paramètres **NR = G x P**

Tableau 12:Matrice de risques selon la procédure Sorfert ARZEW

Gravité	Catastrophique	5	M	H	H	H	H
	Sévère	4	M	M	H	H	H
	Critique	3	M	M	M	M	H
	Marginale	2	L	M	M	M	M
	Négligeable	1	L	L	L	M	M
			1	2	3	4	5
			Très improbable	Rare	Occasionnelle	Probable	Fréquente
			Probabilité				

Classification du risque	Description
L	Le risque est faible et ne nécessite pas d'action immédiate.
M	Le risque est modéré. Des mesures de prévention ou d'atténuation doivent être mises en place pour réduire le risque. Une surveillance régulière est nécessaire.
H	Le risque est élevé et inacceptable en l'état. Il nécessite une action immédiate pour le réduire ou éliminer.

IV.2.2 Tableaux HAZOP :

Les numéros de vannes et d'équipements mentionnés dans le tableau suivant correspondent aux éléments repérés dans la figure 1 : Extrait du P&ID.

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Débit

Déviation : 1. Débit faible

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Erreur de paramétrage du système du contrôle	1. Démarrage impossible de chaudière	2	2	M	1. Alarmes PI (pressure indicator) 083606A/B/C (basse pression)	1. Maintenance préventive des vannes et inspections
2. Mauvais fonctionnement des vannes XV083603	1. Extinction de la flamme du brûleur de démarrage, et accumulation de gaz non brûlé dans la chambre de combustion, risque d'explosion	4	2	M	1. Détecteurs de flamme	2. Vérification périodique des alarmes et détecteurs
					2. Fermeture automatique des vannes concernées	3. Installer une vanne manuelle en amont et en aval et un by-pass avec CSO (Car Sealed Open)
3. Colmatage des filtres	1. Combustion insuffisante, possible explosion dans la chambre de combustion, risque de fatalité	5	3	H	1. Soupape de sécurité	4. Maintenance et inspection périodique des filtres
						5 Etude . FERA

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Débit

Déviation : 2. Débit élevé

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Vannes PV (pressure valve)083616, vanne FV (flow valve) 083605 en position trop ouverte	1. Augmentation de la pression dans les lignes vers les brûleurs	4	3	H	1. Alarmes de pression	6. Surveillance accrue des vannes et régulateurs
					2. Arrêt automatique de la chaudière en cas d'haute alarme	7. Tests périodiques des systèmes d'arrêt d'urgence
2. Défaillance de PCV (pressure control valve) 083717	1. Instabilité de la flamme qui peut engendrer une explosion, risque de fatalité	5	2	H	1. Contrôle automatique du débit par PCV083717, PV083616, FV083605	8. Mettre à jour l'étude ATEX des zones dangereuses
						9. Etude FERA

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Débit

Déviation : 3. Débit inversé

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Défaillance du clapet anti-retour	1. Contamination du circuit	3	1	M	1. Clapet anti-retour	10. Etudier la liaison de l'évent avec la torche
					2. Évent	
2. Pression différentielle inversée	1. Risque de retour de flamme (de brûleur)	4	2	M	1. Alarme de sens de flux	11. Ajouter détecteur de flux

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Pression

Déviation : 4. Pression faible

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Voir « débit faible »	1. Voir « débit faible »					

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Pression

Déviation : 5. Pression élevée

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Vanne bloquée ou fermée en direction du brûleur	1. Dommages aux tuyaux et équipements (filtres, réchauffeurs, etc.), explosion possible	4	4	H	1. Conception du système pour pression maximale attendue 2. Alarmes de pression	12. S'assurer que la pression de conception n'est pas dépassée

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Température

Déviation : 6. Température faible

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Défaillance du système amont (alimentation gaz)	1. Non pertinent	2	1	L	1. Contrôle de la température sur site	13. Vérification du fonctionnement du système amont

Nœud : Pipeline d'alimentation en gaz (pipeline PRS gaz)

Paramètre : Température

Déviation : 7. Température élevée

Cause	Conséquences	Niveau de risque			Mesures de sécurité existantes	Recommandations
		G	P	R		
1. Défaillance du système amont (absence de gaz)	1. Dommages sur la tuyauterie si la température de conception est dépassée	2	2	M	1. Contrôle de la température sur site	14. S'assurer que la température de conception n'est pas dépassée au point terminal

IV.2.3 Synthèse de l'analyse HAZOP :

L'analyse HAZOP du pipeline d'alimentation en gaz naturel a permis d'identifier plusieurs déviations critiques, en particulier celles liées à la perte de confinement, aux variations de débit et aux anomalies de pression.

Certaines de ces situations peuvent engendrer des scénarios dangereux tels que des fuites de gaz inflammable, pouvant conduire à des incendies (Jet Fire, Fireball) ou à des explosions (UVCE) si le nuage est confiné ou atteint une source d'ignition.

Bien que des mesures de sécurité soient en place (vannes, détecteurs, alarmes, soupapes), l'étude HAZOP a mis en évidence la nécessité d'évaluer quantitativement les conséquences des scénarios identifiés, afin d'orienter efficacement les décisions de prévention et de protection.

C'est dans cette optique que s'inscrit l'étude FERA (Fire and Explosion Risk Analysis). Elle consiste à modéliser les effets physiques des événements redoutés à l'aide du logiciel PHAST 8.71, en se basant sur des hypothèses réalistes et représentatives des conditions d'exploitation.

IV.3 Hypothèses de l'étude FERA :

IV.3.1 Hypothèses de l'étude FFRA :

L'étude FERA (Fire and Explosion Risk Analysis), réalisée à l'aide du logiciel PHAST 8.71, repose sur une série d'hypothèses techniques et environnementales permettant de modéliser des scénarios réalistes et représentatifs des conditions d'exploitation de la chaudière n°4.

Hypothèses sur les conditions météorologiques :

Les conditions climatiques influencent de manière significative la dispersion des gaz, le comportement thermique des flammes et l'étendue des zones impactées. Trois cas atmosphériques ont été retenus pour simuler différents régimes de vent et de stabilité :

Cas météo	Vitesse du vent	Stabilité atmosphérique	Description
Cas 1	5 m/s	Classe D	Conditions neutres (journée standard)
Cas 2	10 m/s	Classe D	Vent fort, dispersion rapide
Cas 3	3 m/s	Classe F	Nuit calme, dispersion défavorable (cas critique)

- Autres paramètres utilisés :
- Température ambiante : **25 °C**
- Humidité relative moyenne : **50 %**
- Pression atmosphérique : **1 atm**
- Rugosité du sol : **0,03 m** *(terrain industriel dégagé)*

Ces hypothèses sont conformes aux recommandations du logiciel PHAST.

Orientation du vent– Direction dominante :

Les directions dominantes du vent ont été extraites des données météorologiques du site industriel de Sorfert. Deux orientations principales ont été identifiées comme représentatives des régimes de vent locaux :

1. 45° → Nord-Est (NE)
2. 225° → Sud-Ouest (SW)

Ces directions ont été intégrées dans les paramètres de simulation sous PHAST 8.71, afin d'évaluer les effets de dispersion dans les deux sens principaux d'écoulement de nuage de gaz.

Hypothèses sur les fuites :



Figure 22:Map SORFERT avec les directions du vent

Les scenarios de perte de confinement ont été simulés en tenant compte des configurations plausibles sur les deux sections critiques de l'installation.

a. Fuites pipeline PRS

Tableau 13:Les différents types de fuite

Type de défaillance	Diamètre simulé	Justification
Petite fuite	15 mm	Corrosion, microfissure ou vanne mal fermée
Fuite majeure	100 mm	Rupture partielle due à un choc mécanique
Rupture totale	152,4 mm	Sectionnement complet de la conduite

- Orientation de fuite: horizontale
- Hauteur de sortie : **0,8 m au-dessus du sol**
- Durée de rejet simulée : **10 minutes** (système de blocage télécommandé)

b. Fuites chambre de combustion

Tableau 14:Les différents types de fuite

Type de défaillance	Diamètre simulé	Justification
Fuite	150 mm	Dégradation importante ou choc structurel
Scénario extrême (Fireball)	—	Accumulation de GN dans la chambre suivie d'ignition rapide

- Fuites orientées vers l'extérieur
- Présence possible d'une flamme pilote (source d'ignition permanente)

Ces hypothèses visent à représenter les cas fréquents, sévères et extrêmes, afin de couvrir une plage complète de scénarios dans la modélisation FERA.

IV.4 Modélisation des scénarios catastrophiques sur la chaudière :

Les hypothèses définies précédemment ont été intégrées dans le logiciel PHAST 8.71 afin de simuler les conséquences physiques des scénarios de perte de confinement identifiés.

Chaque simulation vise à visualiser et quantifier les effets thermiques, les zones d'inflammabilité et les surpressions générées par une explosion.

- PRS Pipeline – fuite 15 mm : Jet fire

Tableau 15:Resultats de Jet fire, fuite de 15 mm dans le PRS pipeline

Météo	**Longueur de flamme [m]**	**2,5 kW/m² [m]**	**8 kW/m² [m]**	**32 kW/m² [m]**	**44 kW/m² [m]**
5/D	12,47	12,85	–	–	–
3/F	12,47	12,85	–	–	–
10D	12,47	12,85	–	–	–



Figure 23:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 15mm, PRS pipeline)



Figure 24: Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 15mm, PRS pipeline)

Ce scénario montre une fuite mineure avec des effets thermiques localisés (< 13 m) et aucun risque d'explosion significatif.

La protection des équipements de proximité (vannes, joints, gaines) permet ici de limiter l'escalade des événements et donc préserver la sécurité du personnel en maintenant l'incident sous contrôle.

- PRS pipeline - fuite 100 mm : jet fire

Tableau 16: Resultats de Jet fire, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline

Météo	Longueur de flamme [m]	2,5 kW/m² [m]	8 kW/m² [m]	32 kW/m² [m]	44 kW/m² [m]
5/D	32,99	57,17	45,11	35,36	32,43
3/F	31,98	57,57	44,70	34,04	32,38
10D	35,61	56,04	46,00	38,50	36,17

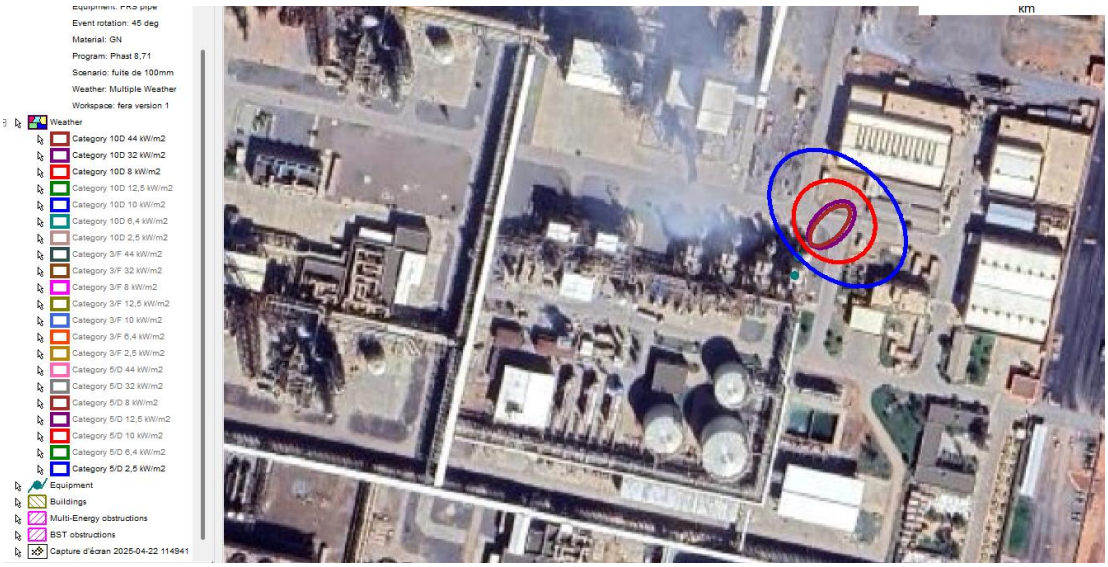


Figure 25:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 100mm, PRS pipeline)



Figure 26: Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 100mm, PRS pipeline)

- PRS pipeline - fuite 100 mm: flash fire

Tableau 17:Resultats de flash fire, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline

Météo	Distance à LFL [m]	Distance à LFL Fraction [m]	Max Flash Fire Distance [m]
5/D	–	47,63	52,79
3/F	16,89	46,77	50,81
10D	–	46,10	52,48



Figure 27:Effets de flash fire (fuite de 100mm, PRS pipeline)

- PRS pipeline - fuite 100 mm : explosion

Tableau 18:Resultats d'explosion, fuite de 100 mm dans le PRS pipeline

Météo	0.025 bar [m]	0.05 bar [m]	0.3 bar [m]	0.16 bar [m]
5/D	94,10	73,59	56,02	59,13
3/F	98,43	75,91	56,61	60,03
10D	91,16	72,02	55,62	58,52

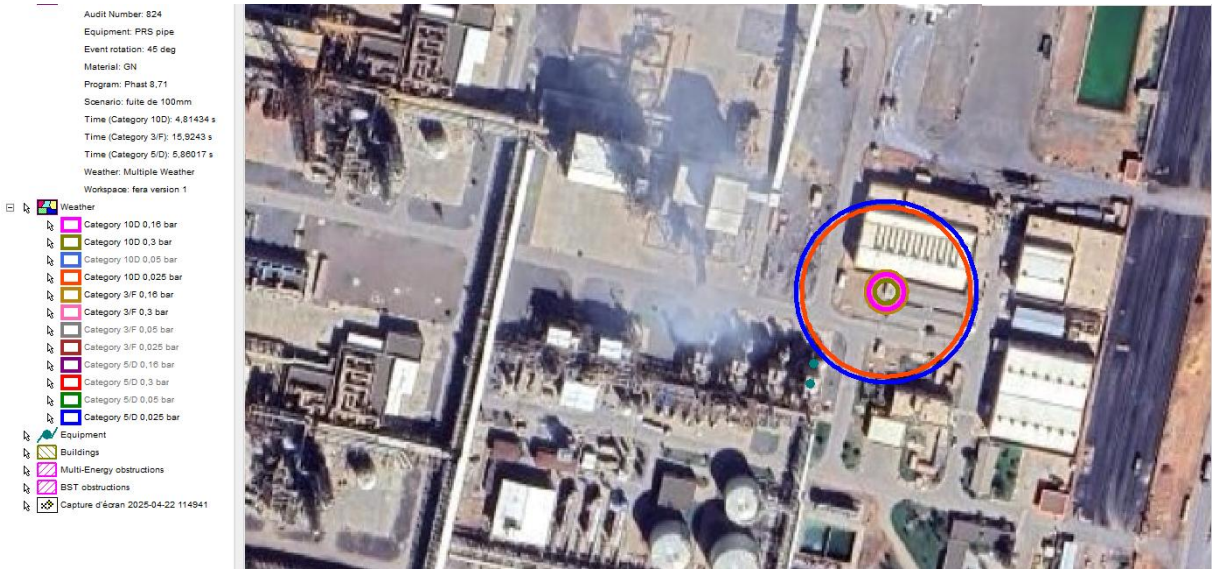


Figure 28:Effets d'explosion - vent nord-est (fuite de 100mm, PRS pipeline)



Figure 29: Effets d'explosion - vent sud-ouest (fuite de 100mm, PRS pipeline)

Les effets sont plus marqués, avec des rayonnements allant jusqu'à 57 m et un potentiel de surpression modéré.

La sécurisation des équipements d'alimentation, via des dispositifs de coupure rapide et de surveillance, est essentielle pour empêcher la propagation vers d'autres unités et éviter l'exposition du personnel.

- PRS pipeline -rupture de la ligne : jet fire

Tableau 19 : Résultats jet fire,(rupture de la ligne dans le PRS pipeline)

Météo	Longueur de flamme [m]	2,5 kW/m² [m]	8 kW/m² [m]	32 kW/m² [m]	44 kW/m² [m]
5/D	42,43	77,60	60,44	47,73	44,59
3/F	41,30	78,22	60,12	46,48	43,11
10D	45,32	76,14	61,12	50,59	48,52

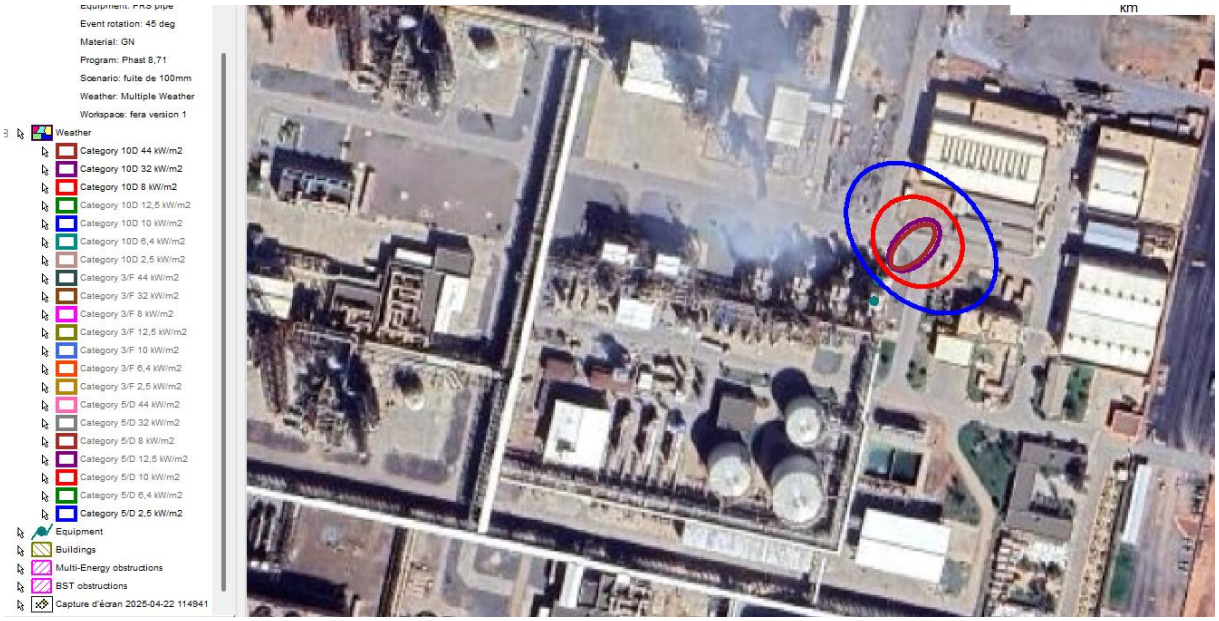


Figure 30:Effets de jet fire - vent nord-est (Rupture de la ligne, PRS pipeline)



Figure 31:Effets de jet fire - vent sud-ouest (Rupture de la ligne, PRS pipeline)

- PRS pipeline -rupture de la ligne : flash fire

Tableau 20:Résultats flash fire,(rupture de la ligne dans le PRS pipeline)

Météo	Distance à LFL [m]	Distance à LFL Fraction [m]	Max Flash Fire Distance [m]
5/D	29,73	76,88	80,59
3/F	32,75	73,42	77,62
10D	28,89	81,73	86,82



Figure 32:Effets de flash fire (rupture de la ligne, PRS pipeline)

- PRS pipeline -rupture de la ligne : explosion

Tableau 21:Resultats d'explosion(rupture de la ligne dans le PRS pipeline)

Météo	0.025 bar [m]	0.05 bar [m]	0.3 bar [m]	0.16 bar [m]
5/D	144,17	114,32	88,75	93,29
3/F	141,44	108,21	79,75	84,79
10D	142,01	113,17	88,46	92,84

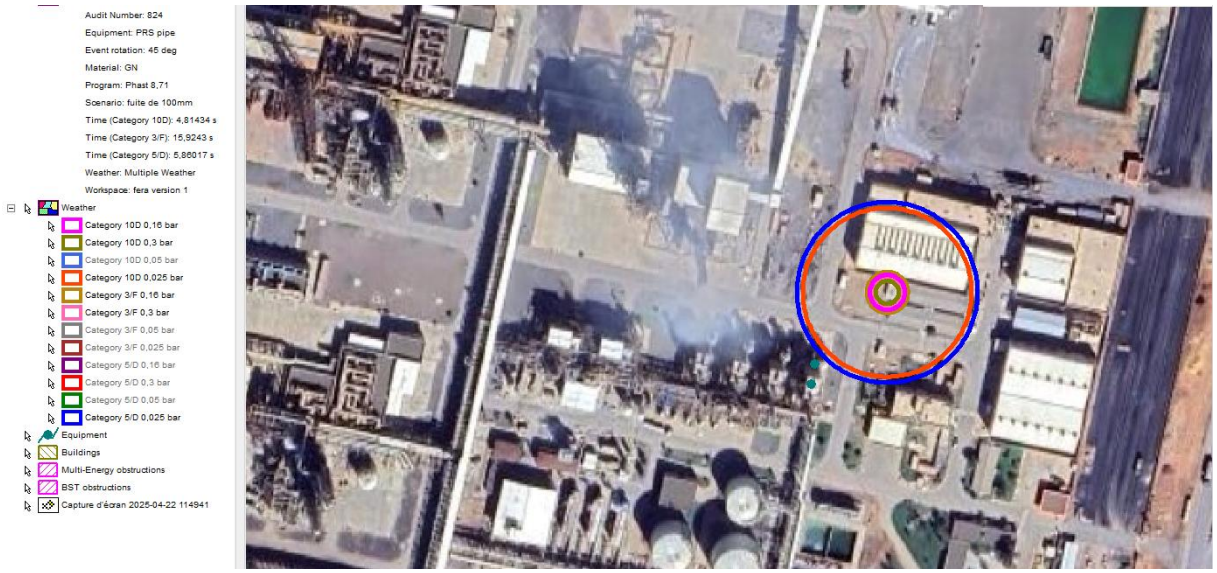


Figure 33::Effets d'éxplosion - vent nord-est (Rupture de la ligne, PRS pipeline)

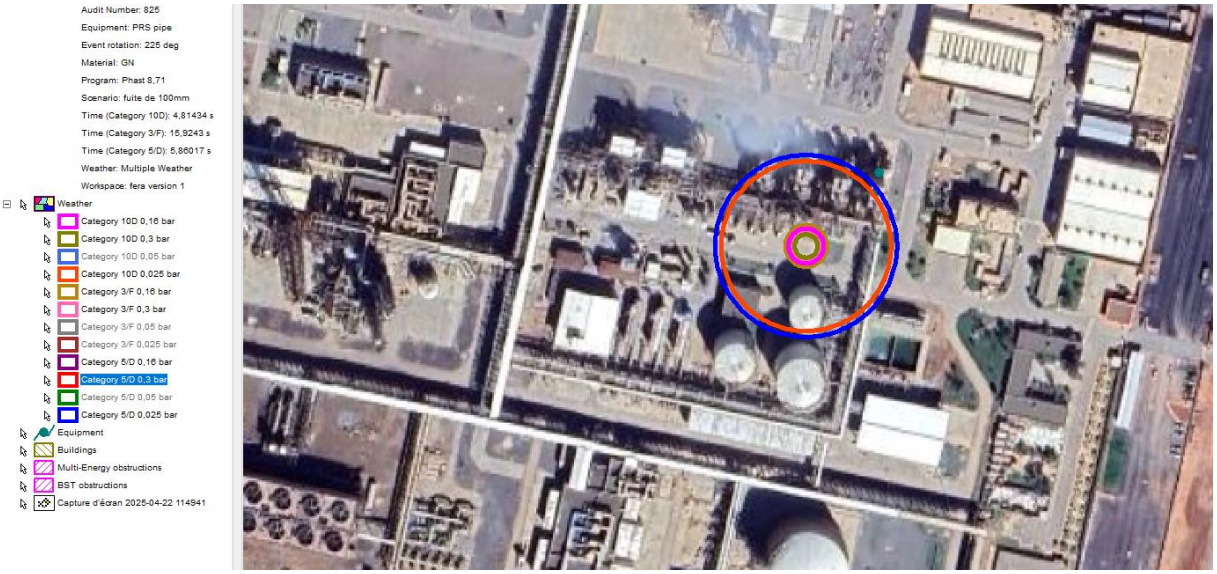


Figure 34::Effets d'éxplosion - vent sud-ouest (Rupture de la ligne, PRS pipeline)

C’est un scénario critique où la rupture complète engendre des effets thermiques et de surpression majeurs (> 140 m).

La résistance mécanique des équipements, le cloisonnement, et la réduction de l’inventaire gaz sont les seuls moyens efficaces pour empêcher l’escalade vers un accident humain. En assurant la sécurité des installations, on garantit un périmètre protégé pour les opérateurs.

- Chambre de combustion – fuite de 150 mm : jet fire

Tableau 22:Résultats jet fire(fuite de 150mm dans la chambre de combustion)

Météo	Longueur de flamme [m]	2,5 kW/m² [m]	8 kW/m² [m]	32 kW/m² [m]	44 kW/m² [m]
5/D	19,49	30,92	24,77	18,84	16,26
3/F	19,15	31,26	24,73	18,55	16,07
10D	20,34	29,95	24,75	19,48	–



Figure 35:Effets de jet fire - vent nord-est (fuite de 150mm, chambre de combustion)



Figure 36 :Effets de jet fire - vent sud-ouest (fuite de 150mm, chambre de combustion)

- Chambre de combustion – fuite de 150 mm : explosion

Tableau 23:Résultats explosion(fuite de 150mm dans la chambre de combustion)

Météo	0.025 bar [m]	0.05 bar [m]	0.3 bar [m]	0.16 bar [m]
5/D	31,43	21,46	12,92	14,44
3/F	32,96	22,28	13,13	14,75
10D	30,06	20,73	12,74	14,15



Figure 37:Effets d'explosion - vent nord-est (fuite de 150mm, chambre de combustion)



Figure 38:Effets d'explosion - vent sud-ouest (fuite de 150mm, chambre de combustion)

Ce scénario présente une fuite importante mais maîtrisable avec des distances d'effet contenues.

Le renforcement du confinement de la chambre, l'étanchéité, et les systèmes d'arrêt d'urgence permettent de maintenir les effets dans la zone de process, assurant l'intégrité des installations et la sécurité du personnel affecté.

- Chambre de combustion – Rupture catastrophique : flash fire

Tableau 24:Résultats flash fire(catastrophique rupture la chambre de combustion)

Météo	Distance à LFL [m]	Distance à LFL Fraction [m]	Max Flash Fire Distance [m]
5/D	8,75	12,06	12,59
3/F	8,73	11,13	11,43
10D	9,08	17,14	18,46



Figure 39:Effets de flash fire(catastrophique rupture, chambre de combustion)

- Chambre de combustion – Rupture catastrophique : explosion

Tableau 25:Résultats explosion(catastrophique rupture la chambre de combustion)

Météo	0.025 bar [m]	0.05 bar [m]	0.3 bar [m]	0.16 bar [m]
5/D	144,19	81,78	28,31	37,79
3/F	146,37	82,95	28,61	38,24
10D	141,35	80,26	27,92	37,20



Figure 40:Effets d'explosion - vent nord-est (catastrophique rupture, chambre de combustion)



Figure 41 :Effets d'explosion - vent sud-ouest (catastrophique rupture, chambre de combustion

- Chambre de combustion – Rupture catastrophique : fireball

Tableau 26:Résultats fire Ball(catastrophique rupture la chambre de combustion)

Météo	Diamètre boule de feu [m]	2,5 kW/m² [m]	8 kW/m² [m]	32 kW/m² [m]	44 kW/m² [m]
5/D	33,32	100,00	56,41	25,93	20,77
3/F	33,32	100,00	56,41	25,93	20,77
10D	33,32	100,00	56,41	25,93	20,77



Figure 42:Effets de fire ball- vent nord-est (catastrophique rupture, chambre de combustion)



Figure 43:Effets d'explosion - vent sud-ouest (catastrophique rupture, chambre de combustion)

Ce scénario expose les effets les plus étendus de l'étude, avec boule de feu et surpression très dangereuses.

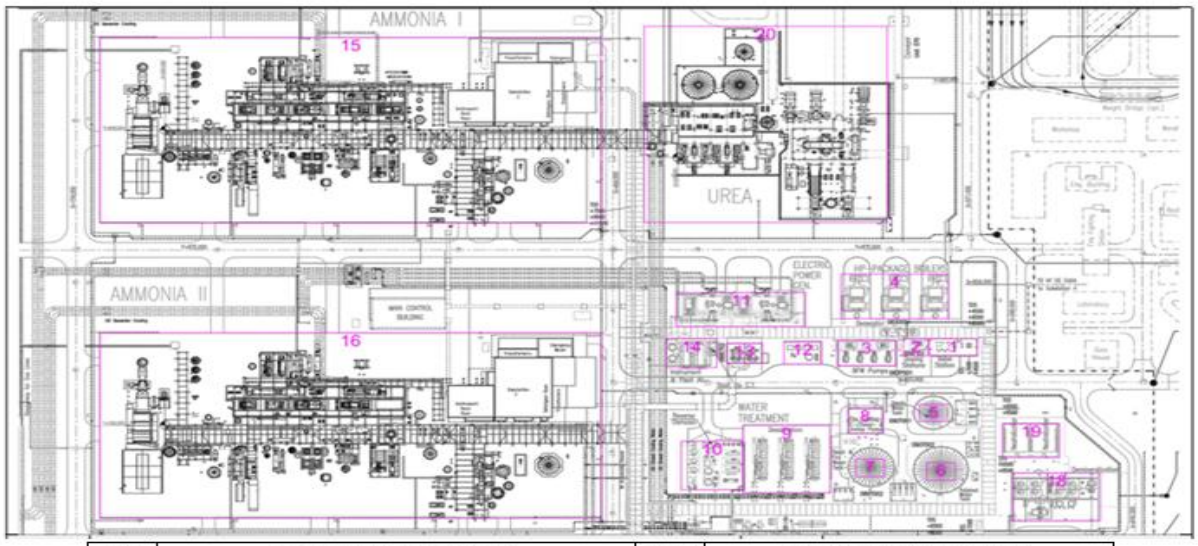
La seule manière de préserver la sécurité du personnel est de renforcer la conception mécanique de la chambre, prévoir des barrières physiques, et mettre en place un système d'arrêt à distance. La sécurité des équipements est ici une barrière vitale pour éviter une perte de vies humaines.

IV.5 Interprétation et Synthèse général :

IV.5.1 conduite PRS (pressure reducing station) :

Les scénarios simulés (fuite 15 mm, fuite 100 mm et rupture totale) ont généré les résultats suivants :

- **Jet Fire :** flamme jusqu'à 45 m ; rayonnement thermique de 12,5 kW/m² atteignant ~57 m, et 32 kW/m² jusqu'à ~50 m.
- **Flash Fire :** distance maximale d'inflammation du nuage gazeux de 86,8 m.
- **Explosion :** surpression de 0,3 bar à 88 m et 0,05 bar jusqu'à 144 m.



ID	Description (FR)	ID	Description (FR)
1	Station de vannes	11	Groupe électrogène
2	Stations de dosage	12	Station N_2
3	Pompes BFW	13	Transformateurs
4	Chaudières existantes	14	Air de l'usine
5	Réservoir d'eau déminéralisée	15	Ammoniac 1
6	Réservoir d'eau polie	16	Ammoniac 2
7	Réservoir d'eau incendie	17	Stockage NH_3
8	Pompes eau incendie	18	Unité de déminéralisation
9	Unité de dessalement	19	Unité de neutralisation
10	Osmose inverse	20	Unité d'urée

Figure 44: équipements à proximité de la chaudière

Interprétation générale :

Ces effets impactent directement des équipements industriels situés autour de PRS, notamment :

- La station de vannes, les stations de dosage, et les pompes BFW, situées dans un rayon < 40 m : elles sont exposées aux effets thermiques intenses du jet fire.
- Le groupe électrogène, sensible aux surpressions > 0,1 bar, pourrait subir des dommages internes si la détonation touche les parois légères.
- Les transformateurs, bien qu'un peu plus éloignés, peuvent être exposés au rayonnement thermique si l'incendie se propage via les conduites GN secondaires.

IV.5.2 Chambre de combustion :

En cas de fuite (150 mm) ou de rupture catastrophique, les résultats sont les suivants :

- **Jet Fire** : flamme ~20 m ; 12,5 kW/m² à ~24 m ; 32 kW/m² à ~18 m.
- **Fireball :** diamètre ~33 m ; rayonnement thermique de 12,5 kW/m² jusqu'à 44 m ; 32 kW/m² à 26 m.
- **Explosion :** surpression de 0,3 bar jusqu'à 28 m ; 0,05 bar jusqu'à 82 m.
- **Flash Fire:** distance d'inflammation jusqu'à 18,4 m.

Interprétation générale :

Les effets générés par ces scénarios affectent plusieurs équipements situés à proximité immédiate :

- La station N_2, directement adjacente à la chambre, entre 10 et 15 m : elle est concernée par la zone d'impact du fireball ainsi que par les surpressions supérieures à 0,2 bar.
- Les trois chaudières voisines, installées dans un rayon de 25 à 40 m, sont exposées à la chaleur rayonnée et pourraient être endommagées par effet domino si les capteurs ou conduites y sont affectés.
- Les réseaux d'instrumentation, les conduites GN et les organes de régulation sont tous placés dans un périmètre critique de 20 à 30 m, soit bien à l'intérieur des zones d'effet thermique et mécanique.

IV.5.3 Synthèse :

Les résultats issus de la modélisation PHAST confirment de manière rigoureuse les hypothèses avancées dans le cadre de l'étude FERA, tant sur le plan des quantités libérées que sur celui des conséquences physiques observables (effets thermiques et mécaniques).

- Premièrement, les distances de dispersion atteignant la LFL (jusqu'à 81,7 m) révèlent un risque réel de formation de nuages inflammables s'étendant vers des zones équipées. Dans le cas d'un allumage différé, la transformation en flash fire ou explosion de type VCE (Vapour Cloud

Explosion) peut affecter sévèrement l'environnement industriel. Ce risque est amplifié par la présence d'équipements inflammables, tels que le groupe électrogène, les stations de dosage ou les transformateurs.

- Deuxièmement, les effets thermiques modélisés (jet fire et fireball) dépassent largement les seuils critiques pour les matériaux et les structures, atteignant 12,5 kW/m² voire 32 kW/m² sur des distances allant jusqu'à 50 mètres. Cela démontre la possibilité d'un effet domino, notamment vers les chaudières voisines ou la station N_2, et impose des protections supplémentaires.
- Enfin, les surpressions supérieures à 0,3 bar, pouvant atteindre jusqu'à 88 m (PRS), sont susceptibles de compromettre l'intégrité des équipements sensibles (clapets, coffrets électriques, câblage) et de provoquer des ruptures secondaires en chaîne.

La combinaison de ces résultats souligne l'importance de prendre en compte l'effet directionnel du vent, modélisé ici à 45° et 225°, pour mieux anticiper la portée latérale des flammes. Cette orientation confirme que plusieurs zones périphériques, jusqu'à l'air de l'usine ou les réservoirs d'eau (polie/déminéralisée), pourraient être touchées dans certains scénarios.

IV.6 Les recommandations :

Dans le cadre de l'étude FERA, des recommandations ont été établies pour réduire les risques d'incendie, d'explosion et de réactions dangereuses sur le site. Elles visent à prévenir les scénarios accidentels identifiés et à limiter leurs conséquences sur les installations, l'environnement et les personnes.

Ces recommandations concernent notamment la sécurisation des équipements critiques, l'amélioration des systèmes de détection et de protection, et la mise en place de mesures préventives et correctives adaptées.

IV.6.1 principes généraux de sécurité :

L'application stricte des règles de sécurité dès la phase de conception vise à :

- Limiter l'exposition des personnes et surtout des équipements aux dangers potentiels.
- Réduire l'occurrence des situations dangereuses.
- Contenir et limiter les conséquences des incidents.
- Garantir des moyens d'évacuation efficaces.
- Offrir un environnement de travail sûr au personnel.

IV.6.2 Implantation et distances de sécurité :

1. Critères d'espacement

Les distances minimales entre unités et équipements sont déterminées à partir des simulations PHAST 8.71, en tenant compte :

- Des niveaux de rayonnement thermique.
- Du contour de la Limite Inférieure d'Explosivité (LIE) ou ½ LIE selon les cas.
- Des effets d'explosion.

2. Disposition des bâtiments

- Les bâtiments administratifs, de maintenance et d'habitation sont situés hors des zones procédés, séparés par une clôture et un accès réglementé.
- Seule la salle de contrôle, la sous-station électrique sont à l'intérieur de la zone procédés.
- La salle de contrôle est conçue « blast-proof » (résistance à 300 mbar de surpression, sans fenêtres sur les façades exposées).
- Il recommandé de changer l'emplacement de laboratoire et le département d'intervention HSE hors de zone de procédés.

IV.6.3 Systèmes de détection et de contrôles :

- CMS (Control and Monitoring System / DCS) : Supervision en temps réel.
- SGS (Safeguarding System): Assure les fonctions PSD (Process Shutdown) et ESD (Emergency Shutdown).
- F&G (Fire & Gas System) : Détection automatique de feu et de gaz.
- AMS (Asset Management System) : Gestion de la maintenance préventive.

IV.6.4 Moyens fixes de lutte contre l'incendie :

1. Systèmes de déluge :

- Déluge par pulvérisateurs, et couronnes de refroidissement pour les bacs de stockage.
- Vannes automatiques de déluge pouvant être ouvertes sur détection feu/gaz, localement ou à distance.

- Implantation des vannes à distance sécurisée (> 15 m) pour permettre une intervention manuelle en toute sécurité.

2. Rideaux d'eau :

- Installation de rideaux d'eau autour des fours et équipements critiques (débit min. 50 L/min/m linéaire).
- Objectif : éviter qu'un nuage de gaz inflammable ne s'enflamme au contact de surfaces chaudes ou de flammes.

IV.6.5 Protection contre les incendies (jet fire et flash fire) :

- Rideaux d'eau automatisés autour de la chambre de combustion et du PRS pipeline, activés par détecteurs de flammes/thermiques couplés au système F&G.
- Détection et isolation rapide : Détecteurs de gaz (méthane, CO, H_2) le long du PRS pipeline et à l'entrée/sortie de la chambre de combustion. Vannes ESD actionnables à distance pour isoler le fluide en moins de 30 secondes.

IV.6.6 Réduction des risques d'explosion :

- Renforcement des structures : Chambre de combustion et supports du pipeline conçus en « blast-resistant » (300 mbar), sans fenêtres sur les façades exposées. Utilisation de matériaux anti-déflagrants pour joints et raccords.
- Distances de sécurité : Éloignement des équipements sensibles selon les distances issues de PHAST (contour ½ LIE pour éviter les flash fires, rayonnement thermique < 5 kW/m² pour les zones occupées).

IV.6.7 Mesures de mitigation des conséquences :

- Systèmes de déluge ciblés : Pulvérisateurs automatiques activés par détection de température anormale (> 200°C) ou signal du système F&G.
- Barrières physiques : Clôtures pare-feu autour de la chaudière, écrans thermiques entre la chambre de combustion et les réservoirs (ammoniac, etc.).

IV.6.8 Gestion des urgences :

- Évacuation et confinement : Voies d'évacuation dédiées hors direction des vents dominants, système d'alerte sonore/lumineuse ATEX.
- Formations obligatoires : Exercices biannuels sur les scénarios « jet fire » et « explosion », procédures spécifiques pour l'arrêt d'urgence (ESD) et l'isolation du PRS pipeline.

IV.6.9 Conception et implantation :

- Ségrégation des zones : Implanter la chaudière en aval des vents dominants par rapport aux bâtiments occupés.
- Distance minimale : > 50 m entre le PRS pipeline et les sources d'inflammation (four, groupe électrogène).
- Maintenance préventive : Surveillance ultrasonique des soudures du pipeline, inspections thermographiques trimestrielles de la chambre de combustion

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une démarche structurée d'analyse des risques, débutant par une étude HAZOP ciblée sur la conduite PRS et la chambre de combustion, afin d'identifier des scénarios accidentels à fort potentiel. Ces scénarios ont servi de base à l'étude FERA, visant à modéliser les conséquences de phénomènes tels que le jet fire, la fireball, le flash fire et l'explosion.

L'analyse FERA a été réalisée sur la base d'hypothèses définies concernant les scénarios de fuite et les conditions météorologiques. La modélisation des effets a été effectuée à l'aide du logiciel PHAST, permettant d'évaluer les conséquences sur les installations voisines.

Les résultats ont mis en évidence des effets thermiques et mécaniques significatifs, justifiant la mise en place de recommandations techniques pour limiter les impacts potentiels.

Ce travail souligne l'intérêt d'une approche progressive et ciblée dans la prévention des accidents majeurs.

CONCLUSION GENERALE

L'étude FERA menée au sein du complexe industriel SORFERT a permis de mettre en évidence la nature et l'ampleur des risques d'incendie et d'explosion associés aux équipements critiques tels que le pipeline d'alimentation de gaz naturel de PRS et la chambre de combustion de la chaudière. Les scénarios simulés ont démontré que les phénomènes dangereux comme les jet fires, flash fires ou explosions peuvent engendrer des effets destructeurs tant sur les installations environnantes que sur les personnes .

Grâce à la démarche FERA, combinant identification des dangers, modélisation physique et quantification des conséquences, il a été possible d'obtenir une vision claire et structurée du niveau de criticité des risques. Les résultats ont mis en lumière les zones les plus vulnérables et ont permis de hiérarchiser les scénarios selon leur gravité et leur probabilité d'occurrence. Cette approche a également contribué à la formulation de recommandations efficaces visant à atténuer les effets potentiels et à renforcer la sécurité globale du site.

Cependant, cette étude a également mis en évidence plusieurs défis, notamment ceux liés à la complexité de la modélisation des scénarios, à l'incertitude sur certaines données opérationnelles et aux difficultés d'intégration des facteurs humains dans l'évaluation du risque. Ces éléments soulignent la nécessité d'une approche multidisciplinaire, continue et rigoureuse pour la gestion efficace des risques industriels.

En conclusion, cette étude a permis de développer une compréhension approfondie des risques majeurs présents dans un site industriel à haut potentiel de danger. Elle confirme la pertinence de la méthode FERA comme outil d'aide à la décision pour les acteurs HSE, et son intégration dans une stratégie globale de prévention permettrait non seulement de préserver la durabilité des installations industrielles mai aussi de renforcer la sécurité des travailleurs

BIBLIOGRAPHIE

[1] « INRS ». [En ligne]. Disponible sur: https://spi-formation-securite.fr/blog/risque-danger-comprendre/

[2] A. AZIZI et M. TAIBI, « « Management des risques selon la norme ISO 31000 : 2018 Cas : Société Algérienne des Assurances (SAA)»,MÉMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master, en sciences de gestion Spécialité : Contrôle de gestion ,ÉCOLE SUPERIEURE DE COMMERCE ». 2023 2022.

[3] « CCHST ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.cchst.ca/oshanswers/hsprograms/hazard/hazard_risk.html

[4] « ISO 12100, 2010 (Sécurité des machines – Principes généraux de conception) ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/fr/standard/51528.html

[5] « Directive Seveso III (2012/18/UE) ». [En ligne]. Disponible sur: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj/eng#:~:text=This%20Directive%20lays%20down%20rules%20for%20the%20prevention,the%20Union%20in%20a%20consistent%20and%20effective%20manner.

[6] « ISO 31000, 2018 (Management du risque) ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.iso.org/fr/standard/65694.html#:~:text=ISO%2031000%20est%20une%20Norme%20internationale%20qui%20fournit,sein%20d%E2%80%99un%20organisme%20et%20communiquer%20sur%20ces%20derniers.

[7] « ISO 14971, 2019 (Dispositifs médicaux) ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.microkn.com/static/upload/file/20210118/1610948170416422.pdf

[8] « Villemeur, 1988 ». [En ligne]. Disponible sur: http://ressources.unit.eu/cours/cyberrisques/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_11.html

[9] « Cour simulation feu incendie sie M2 Mr.tires ».

[10] « Technique de l'ingénieur ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/icpe-reglementation-integree-42439210/quantification-du-risque-dans-le-cadre-des-etudes-de-dangers-g4218/analyse-des-effets-dominos-g4218niv10007.html

[11] « Journal officiel ».

[12] « étude de danger Decret-executif-n°-21-319-Algerie.pdf ». 2021.

[13] « Directive ATEX 2014/34/UE (équipements pour atmosphères explosives) ».

[14] « Directive ATEX 1999/92/CE (protection des travailleurs) ». [En ligne]. Disponible sur: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:31999L0092

[15] « EN 1127-1, 2019 (Atmosphères explosives – Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion , Partie 1 : Concepts fondamentaux et méthodologie.) ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.afnor.org/

[16] « IANOR ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.ianor.dz/

[17] « ISO 14001, 2015 (Systèmes de management environnemental) ».

[18] « ISO 7240-1,1988 (Systèmes de détection et d'alarme d'incendie) ».

[19] « NFPA 704, 2022 (Identification des risques chimiques) ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-704-standard-development/704

[20] « Organisation Internationale du Travail (OIT), conventions 155 et 187 ».

[21] « document Process safety management SORFERT PSM ».

[22] « Méthode APR ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.dekra-process-safety.fr/conseil-et-expertise-dekra-process-safety/analyse-preliminaire-du-risque-dekra-process-safety.htmll

[23] « B.DEBRAY, S.CHAUMETTE, S. DESCOURIERE, V. TROMMETER, Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD). in INERIS. INERIS. » [En ligne]. Disponible sur: https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport_omega_7-2.pdf

[24] « NADJOUI Akram Abdelhadi ➢ GUENAOUI Wafaa Alaa, « Mise en œuvre d'une Étude QRA au niveau d'une installation industrielle»,MÉMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed. Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, 2023/2024 ». »

[25] « Décret exécutif n° 24-278 ». 13 août 2024.

[26] « documents SORFERT SPA ».

Annexes

1) Annex A : Seuil de référence pour les effets

A. Seuils de référence pour les effets thermiques

Nous utiliserons les seuils thermiques suivants pour quantifier et mesurer les effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les structures.

Tableau 27: Seuil thermique effets dominos (sur les équipements ou structures)

Seuil (kW/m²)	Effet sur les installations
8	Dégradation des installations **non protégées**
32	Dégâts aux installations **protégées** opérant à **pression atmosphérique**
44	Dégâts aux installations **protégées** opérant **sous pression**

Tableau 28: Seuil thermique des effets sur l'homme

Seuil (kW/m²)	Effet sur l'homme
2,5	Inconfort ou atteinte à des personnes sensibles ou non averties
6,4	Effets graves (brûlures, blessures graves ou invalidantes), immédiats ou différés
10	1 % de mortalité après 20 s d'exposition pour une personne non protégée
12,5	Effets létaux même à courte durée d'exposition

B. Seuils de référence pour les effets de surpression

Nous utiliserons les seuils thermiques suivants pour quantifier et discuter des effets d'un accident majeur sur l'homme et les effets dominos possibles sur les bâtiments :

Tableau 29:Seuil de surpression des effets sur les structures

Seuil (mbar)	Effet sur les structures
160	**Dommages importants**, initiation d'un effet domino
300	**Destruction sévère** des bâtiments et équipements

Tableau 30:Seuil de surpression des effets sur l'homme

Seuil (mbar)	Effet sur l'homme
25	**Blessures graves**, dégâts auditifs ou contusions sévères
50	**Dommages létaux ou irréversibles**

2) Annex B : Matrice de gravité et probabilité SORFERT

Tableau 31:Gravité (Severity) – Définition par domaine :

Niveau	Personnes (P)	Environnement (E)	Actifs (A)	Réputation (R)
5 – Catastrophique	Plusieurs décès ou plus de 6 blessures graves nécessitant une hospitalisation ≥ 24h	Effets permanents graves à long terme	≥ 2 millions d'euros	Impact grave et généralisé
4 – Sévère	1 décès ou < 6 blessures graves nécessitant ≥ 24h d'hospitalisation	Effets graves à moyen/long terme	1 à 2 millions d'euros	Impact modéré généralisé
3 – Critique	Une blessure grave nécessitant une hospitalisation ≥ 24h	Effets modérés à court/moyen terme	500 000 à 1 million d'euros	Impact modéré localisé
2 – Marginale	Blessure nécessitant < 24h d'hospitalisation	Effets mineurs à court terme	50 000 à 500 000 €	Impact mineur localisé
1 – Négligeable	Premiers soins / Blessures légères	Effets négligeables à court terme	≤ 50 000 €	Aucun impact

Tableau 32:Probabilité (Likelihood)

Code	Description	Exemple
A – Très Improbable	1 sur 100 000 ans ou jamais observé dans l'industrie	Aucune occurrence connue
B – Rare	1 sur 10 000 ans ou observé dans l'industrie	Cas rares
C – Occasionnelle	1 sur 1 000 ans ou arrivé dans l'organisation ou plusieurs fois dans l'industrie	Événements occasionnels
D – Probable	1 sur 100 ans ou arrivé dans l'installation ou plus d'une fois dans l'organisation	Assez probable
E – Fréquente	1 sur 10 ans ou arrivé plusieurs fois dans l'installation	Très probable