



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTE : TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS**

## **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : BENMEBAREK Atallah**

**BENAROUS HadjAissa**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE : Hygiène et Sécurité Industriel**

**OPTION : Hygiène et Sécurité Industriel**

### **Thème**

**Contribution aux méthodes dynamiques par la simulation  
des risques industriels – GR4/HRM/TRC**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Zerrouki Hamza	MCA	Président
Hassani Mouad	MCB	Examineur
Hellas Mohamed Sedik	MCA	Rapporteur

**Promotion : Juin 2025**

## **Remerciements**

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, Monsieur **HELLAS Mohamed Essedik**, pour sa patience, sa disponibilité constante et la pertinence de ses conseils, qui ont grandement enrichi notre réflexion. Nous le remercions sincèrement pour son accompagnement, son orientation précieuse et son soutien tout au long de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, que nous remercions pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de notre mémoire.

Nous souhaitons aussi remercier l'ensemble des enseignants de l'Université **Amar Telidji**, qui nous ont transmis les connaissances et les compétences nécessaires à la réussite de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réussite de notre stage et à la rédaction de ce mémoire.

À tous, nous exprimons notre respect, notre reconnaissance et notre sincère gratitude.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail à ma famille, pour son amour, son soutien et sa présence indéfectible.

À toutes les personnes qui me sont chères, ainsi qu'à mes amis, pour leur encouragement tout au long de ce parcours.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont toujours été présents dans ma vie.

Avec toute ma gratitude.

**BENMEBAREK Atallah**

## Dédicaces

Je dédie ce mémoire à **ma famille**, source inépuisable de force, d'amour et de soutien.

À **mon père Mohamed**, exemple de sagesse, de persévérance et de dévouement, dont les valeurs m'accompagnent chaque jour.

À **ma chère mère**, pour son amour inconditionnel, ses prières silencieuses et son soutien indéfectible dans les moments les plus difficiles.

À **ma femme bien-aimée**, pour sa patience, sa compréhension, son amour et sa présence constante à mes côtés tout au long de ce parcours.

À **mes enfants**, qui sont ma plus grande source de motivation, et dont le sourire illumine mes journées.

À **mes frères Youcef et Abderrahmane**, pour leur fraternité sincère, leurs encouragements et leur précieux appui.

À **mes amis fidèles**, pour leur réconfort, leur écoute et les moments de partage qui ont allégé le chemin.

À **toutes les personnes qui m'ont inspiré, soutenu ou guidé**, de près ou de loin, je vous exprime ma profonde gratitude.

**Ce mémoire est autant le fruit de mon travail que de votre présence bienveillante. Merci.**

**BENAROUS HadjAissa**

# Table des matières

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE I : METHODES D'ANALYSES DES RISQUES</b>	
I.1.INTRODUCTION .....	3
I.2. CONCEPTS ET DEFINITIONS.....	3
I.3. LA METHODE HAZID (HAZARD IDENTIFICATION) [14] .....	4
I.3.1. OBJECTIFS PRINCIPAUX.....	4
I.3.2. ÉTAPES DU PROCESSUS .....	4
I.3.3. AVANTAGES.....	4
I.3.4. DEFIS COURANTS .....	5
I.3.5. OUTIL DE TRAVAIL .....	5
I.3.6. TABLEAU D'ANALYSE DE LA REVUE HAZID.....	5
I.3.7. CONCLUSION .....	6
I.4. LA METHODE D'ANALYSE DES RISQUES HAZOP [15].....	6
I.4.1 HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION.....	6
I.4.2 – PRINCIPE DE LA METHODE .....	6
I.4.3 – DEROULEMENT DE LA METHODE.....	7
I.4.4. LIMITES ET AVANTAGES DE LA METHODE D'ANALYSE DES RISQUES HAZOP .....	9
I.4.5. CONCLUSION .....	9
I.5. LA METHODE D'ANALYSE QRA (QUANTITATIVE RISK ASSESSMENT) .....	9
I.5.1. SELECTION DES INSTALLATIONS POUR LE QRA .....	10
I.5.2. DEFINITION DES EVENEMENTS REDOUTES CENTRAUX (PERTES DE CONFINEMENT) ET DES FREQUENCES ASSOCIEES .....	10
I.5.3. MODELISATION DE L'INTENSITE DU PHENOMENE .....	11
I.5.4. MODELISATION DE L'EXPOSITION ET DES DOMMAGES.....	11
I.5.7. CONCLUSION .....	15
I.6. LA METHODE D'ANALYSE LAYER OF PROTECTIONS ANALYSIS (LOPA).....	15
I.6.1. OBJECTIF DE LA METHODE .....	15
I.6.2. PRINCIPE DE LA METHODE LOPA .....	15
I.6.3. CONCLUSION .....	16

<b>I.7. LA METHODE D'ANALYSE DE RISQUE APR :</b>	<b>17</b>
<b>I.7.1. INTRODUCTION :</b>	<b>17</b>
<b>I.7.2. PREMIERE ETAPE : ANALYSE QUALITATIVE – IDENTIFICATION DES DANGERS</b>	<b>17</b>
<b>I.7.2.1. DECOUPAGE DE L'INSTALLATION :</b>	<b>17</b>
<b>I.7.2.2 IDENTIFICATION DES DANGERS :</b>	<b>17</b>
<b>I.7.3. DEUXIEME ETAPE : ANALYSE QUANTITATIVE - EVALUATION PRELIMINAIRE DES RISQUES</b>	<b>17</b>
<b>I.7.4. TROISIEME ETAPE : SELECTION DES SCENARIOS CRITIQUES ET L'ANALYSE DES IMPACTS POTENTIELS EN CAS D'ACCIDENTS</b>	<b>18</b>
<b>I.7.6. TROISIEME ETAPE : SELECTION DES SCENARIOS CRITIQUES ET L'ANALYSE DES IMPACTS POTENTIELS EN CAS D'ACCIDENTS</b>	<b>20</b>
<b>I.7.8. CONCLUSION :</b>	<b>20</b>
<b>I.8. CONCLUSION :</b>	<b>21</b>
<b>CHAPITRE II : METHODES DYNAMIQUE D'ANALYSE DES RISQUES</b>	
<b>II.1. INTRODUCTION</b>	<b>22</b>
<b>II.2. LES METHODES A FREQUENCES DES CONSEQUENCES</b>	<b>22</b>
<b>II.2.1. RESEAU DE PETRI</b>	<b>22</b>
<b>II.2.1.1. CONSTITUTION D'UN RESEAU DE PETRI</b>	<b>22</b>
<b>II.2.1.2. UN RESEAU DE PETRI EST COMPOSE DE</b>	<b>23</b>
<b>II.2.1.3 EXEMPLES DE RESEAU DE PETRI</b>	<b>24</b>
<b>II.2.2. RESEAU BAYESIEN</b>	<b>24</b>
<b>II.2.2.1. DOMAINES D'UTILISATION PRINCIPAUX</b>	<b>24</b>
<b>II.2.2.2. CONSTRUCTION D'UN GRAPHE</b>	<b>25</b>
<b>II.2.2.3 UTILISATION DU RESEAU BAYESIEN</b>	<b>25</b>
<b>II.2.3. DIAGRAMME D'ETATS</b>	<b>26</b>
<b>II.2.3.1. DEFINITION</b>	<b>26</b>
<b>II.2.3.2. CARACTERISTIQUES ESSENTIELLES</b>	<b>26</b>
<b>II.2.3.3. EXEMPLE : SYSTEME DE COMPRESSEUR DANS UNE STATION INDUSTRIELLE</b>	<b>26</b>
<b>II.2.3.4. LIEN AVEC LES RESEAUX BAYESIENS ET LA FIABILITE</b>	<b>27</b>
<b>II.3. LES METHODES DYNAMIQUES D'ANALYSE DES CONSEQUENCES</b>	<b>27</b>
<b>II.3.1. LOGICIEL PHAST</b>	<b>27</b>

II.3.1.1. DESCRIPTION DU LOGICIEL PHAST .....	27
II.3.1.2. FONCTIONNALITES PRINCIPALES.....	27
II.3.1.3. GUIDE VISUEL.....	30
II.3.2. FLACS (FLAME ACCELERATION SIMULATOR) – GEXCON .....	30
II.3.2.1. INTRODUCTION.....	30
II.3.2.2. FONCTIONNALITES ET CAPACITES DE FLACS .....	31
II.3.2.3. AVANTAGES ET POINTS FORTS DE FLACS.....	32
II.3.2.4. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE FLACS.....	32
II.4. LES SCENARIOS DANGEREUX .....	33
II.4.1.JET FIRE.....	33
II.4.1.1. DEFINITION ET CARACTERISTIQUES PRINCIPALES .....	33
II.4.1.2. TYPES DE JET FIRES .....	34
II.4.1.3. FACTEURS INFLUENÇANT LES JET FIRES.....	34
II.4.1.4. CONSEQUENCES ET RISQUES .....	34
II.4.1.5. EXEMPLES CONCRETS.....	35
II.4.1.6. TERMINOLOGIE TECHNIQUE.....	35
II.5. CONCLUSION .....	35
<b>CHAPITRE III : ANALYSE DYNAMIQUE DES CONSEQUENCES RUPTURE DE CONDUITE A L'ENTREE DU TURBOCOMPRESSEUR (GR4/HRM/TRC/SONATRACH)</b>	
III.1. INTRODUCTION .....	37
III.2. RENSEIGNEMENTS GENERAUX.....	37
III.2.1. L'ACTIVITE TRANSPORT PAR CANALISATION (TRC).....	38
III.2.1.1. GENERALITES .....	38
III.2.1.2. CARTE DU RESEAU TRC .....	39
III.2.1.3. IDENTIFICATION DE L'ETABLISSEMENT : DIRECTION REGIONALE HASSI R'MEL .	40
III.2.1.4. PRESENTATION DU SITE : STATION DE COMPRESSION DE GR4 .....	40
III.2.1.5. LOCALISATION ET SITUATION GEOGRAPHIQUE DU SITE D'ETUDE.....	41
III.2.1.6. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE .....	41
III.2.1.7. DESCRIPTION DE L'ENVIRONNEMENT IMMEDIAT DE LA STATION DE COMPRESSION GR4 .....	42
III.2.1.8. LES VENTS ET DEPLACEMENTS DE SABLE : .....	42

III.2.1.9. LES VENTS A LAGHOUAT : .....	43
III.2.1.10. DESCRIPTION DE LA STATION DE COMPRESSION GR04 ET SES DIFFERENTES INSTALLATIONS : .....	44
III.2.1.11. DONNEES DE PROCEDES : .....	46
III.3. LES CARACTERISTIQUES DES TURBOCOMPRESSEURS.....	48
III.3.1. COMPRESSEUR CENTRIFUGE .....	48
III.3.2. TURBINE A GAZ .....	48
III.4. EVALUATION DE L'ACCIDENTOLOGIE .....	49
III.5. DESCRIPTION DE LA DEMARCHE D'IDENTIFICATION, D'ANALYSE ET D'EVALUATION DES RISQUES UTILISE DANS LA STATION .....	51
III.6. IDENTIFICATION DES FACTEURS DE RISQUES GENERES PAR LA STATION GR4 .....	60
III.6.1. FACTEURS DE RISQUES INTRINSEQUES.....	60
III.6.1.2. DANGERS LIES AUX PRODUITS .....	60
III.6.1.3. EFFETS SUR LA SANTE HUMAINE.....	61
III.6.1.4. EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT .....	61
III.6.1.5. INFLAMMATION .....	61
III.6.1.6. EXPLOSION DU MELANGE AIR- GAZ .....	61
III.6.1.7. GAZ COMPRI ME .....	62
III.6.1.8. BRUIT .....	62
III.6.1.9. ANOXIE .....	62
III.6.1.10. FROID .....	62
III.7. DANGERS LIES AUX TURBOCOMPRESSEURS .....	62
III.8. FACTEURS DE RISQUES EXTRINSEQUES .....	62
III.9. RESULTAT DE L'ANALYSE PRELIMINAIRE DES RISQUES APR.....	63
III.9.1. PHENOMENES DANGEREUX RENCONTRES.....	64
III.10. ANALYSE DES SCENARIOS CRITIQUES.....	67
III.11. PRINCIPE DE LA METHODOLOGIE « NŒUD PAPILLON » .....	68
III.11.1. QUANTIFICATION DE LA FREQUENCE D'OCCURRENCE DE L'ERC .....	69
III.11.2. QUANTIFICATION DE LA FREQUENCE DES PHENOMENES DANGEREUX .....	69
III.11.3. ECHELLE DE FREQUENCE.....	71
III.12. QUANTIFICATION DES DISTANCES D'EFFET DES PHENOMENES DANGEREUX .....	72

<b>III.13. ANALYSE DES FREQUENCES .....</b>	<b>72</b>
<b>III.14. ANALYSE DES CONSEQUENCES .....</b>	<b>73</b>
<b>III.15. MODELISATION DYNAMIQUE.....</b>	<b>73</b>
<b>III.16. MODELISATION CLASSIQUE .....</b>	<b>78</b>
<b>III.17. POINTS FORTS ET LIMITES DE LA MODELISATION DYNAMIQUE .....</b>	<b>81</b>
<b>III.17.1. POINTS FORTS DE LA MODELISATION DYNAMIQUE : .....</b>	<b>81</b>
<b>III.17.2. LIMITES DE LA MODELISATION DYNAMIQUE : .....</b>	<b>81</b>
<b>III.18. CONCLUSION .....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>83</b>

## Listes Des Figures

FIGURE 1:DEROULEMENT DE LA METHODE HAZOP .....	8
FIGURE 2: QUESTIONS CLES DE LA METHODE QRA. [18].....	10
FIGURE 3: EXEMPLE DE COURBE ISO RISQUE OU CARTE DU RISQUE INDIVIDUEL (FICTIVE) .....	12
FIGURE 4: REPRESENTATION DU RISQUE SOCIETAL COURBE F/N TYPIQUE.....	12
FIGURE 5: SCHEMA GENERAL DE L'APPROCHE QRA. [18].....	14
FIGURE 6: EXEMPLE D'ARBRE D'EVENEMENTS AVEC TROIS COUCHES DE PROTECTION..	16
FIGURE 7 PROCESSUS A DEUX ETATS.....	23
FIGURE 8 PASSAGE D'UN ETAT A L'AUTRE .....	23
FIGURE 9 L'ASSEMBLAGE ET LE DES ASSEMBLAGE SUCCESSIFS DE DEUX ELEMENTS.....	23
FIGURE 10: EXEMPLE POUR SIMULER UN AUTOMATE A 3 ETATS .....	24
FIGURE 11: EXEMPLE DE GRAPHE CHAINE DE MARKOV .....	27
FIGURE 12: INTERFACE GENERALE .....	28
FIGURE 13: L'ARBORESCENCE DES MODELES .....	29
FIGURE 14:LA BARRE D'OUTILS SUPERIEURE.....	29
FIGURE 15:ORGANIGRAMME DE GROUPE SONATRACH.....	38
FIGURE 16:DESCRIPTION DU RESEAU DE TRC .....	39
FIGURE 17: PLAN DE SITUATION DE LA STATION DE COMPRESSION GR4 .....	42
FIGURE 18: LES FREQUENCES DES VENTS A LAGHOUAT .....	43
FIGURE 19: UNITES PRINCIPALES DE LA STATION DE COMPRESSION GR4 .....	46
FIGURE 20: REPARTITION PAR ORIGINE DES ACCIDENTS REPERTORIES DES COMPRESSEURS .....	49
FIGURE 21: LOGIGRAMME DE METHODE D'ANALYSE DES RISQUES .....	51
FIGURE 22: STRUCTURE D'UN NŒUD PAPILLON .....	68
FIGURE 23: ARBRE GENERIQUE DES EVENEMENTS (REJET GAZEUX).....	70
FIGURE 24: SIMULATION 3D FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE FACE .....	74
FIGURE 25: SIMULATION 3D FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE PROFILE .....	74
FIGURE 26: SIMULATION 3D FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE ARRIERE .....	75
FIGURE 27: RADIATION 3D DE FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE FACE.....	75
FIGURE 28: RADIATION 3D DE FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE PROFILE.....	75
FIGURE 29: RADIATION 3D DE FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE DESSUS .....	76
FIGURE 30: RADIATION 3D DE FEU DE TORCHE AU NIVEAU DE TC VUE DE L'INTERIEURE	77
FIGURE 31: RADIATION VS DISTANCE (DYNAMIQUE) .....	77
FIGURE 32: RADIATION VS DISTANCE (CLASSIQUE) .....	79
FIGURE 33: RADIATION VS DISTANCE (CLASSIQUE) VUE DE DESSUS.....	79
FIGURE 34: RADIATION VS DISTANCE (CLASSIQUE) VUE DE PROFILE.....	80
FIGURE 35: RADIATION VS DISTANCE (CLASSIQUE) VUE DE FACE.....	80

## Listes Des Tableaux

<b>TABLEAU 1:IDENTIFICATION DES DANGERS HAZID .....</b>	<b>5</b>
<b>TABLEAU 2:EXEMPLE DE TABLEAU POUR L'HAZOP.....</b>	<b>9</b>
<b>TABLEAU 3: METHODE D'ANALYSE DES RISQUES APR.....</b>	<b>19</b>
<b>TABLEAU 4: MATRICE D'ANALYSE DES RISQUES .....</b>	<b>20</b>
<b>TABLEAU 5: LES COMPOSANTS DE RESEAU DE PETRI. [24].....</b>	<b>23</b>
<b>TABLEAU 6: TYPES DE JET FIRE. [29] .....</b>	<b>34</b>
<b>TABLEAU 7: LES FREQUENCES EN CHIFFRE DES VENTS A LAGHOUAT .....</b>	<b>44</b>
<b>TABLEAU 8: COMPOSITION MOYENNE DU GAZ NATUREL TRANSPORTE .....</b>	<b>47</b>
<b>TABLEAU 9: PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU GAZ NATUREL .....</b>	<b>47</b>
<b>TABLEAU 10: RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ACCIDENTS REPERTORIES SUR LES COMPRESSEURS .....</b>	<b>50</b>
<b>TABLEAU 11: METHODE D'ANALYSE DES RISQUES APR.....</b>	<b>52</b>
<b>TABLEAU 12: MATRICE D'ANALYSE DES RISQUES.....</b>	<b>59</b>
<b>TABLEAU 13: PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU GAZ NATUREL .....</b>	<b>60</b>
<b>TABLEAU 14: DANGERS LIES AUX EQUIPEMENTS.....</b>	<b>62</b>
<b>TABLEAU 15: LISTE DES SCENARIOS D'ACCIDENTS MAJEURS.....</b>	<b>64</b>
<b>TABLEAU 16: SECTION ISOLABLE ET LEUR CONDITION D'OPERATION .....</b>	<b>65</b>
<b>TABLEAU 17: LES PARAMETRES DES TURBOS COMPRESSEURS .....</b>	<b>66</b>
<b>TABLEAU 18: ÉCHELLE D'APPRECIATION DE LA PROBABILITE DES PHENOMENES DANGEREUX (ADR).....</b>	<b>71</b>
<b>TABLEAU 19: FREQUENCE DE FUITE .....</b>	<b>72</b>
<b>TABLEAU 20: DISTANCE D'EFFETS MAXIMALES (MODELISATION DYNAMIQUE) .....</b>	<b>73</b>
<b>TABLEAU 21: DISTANCE D'EFFETS MAXIMALES (MODELISATION CLASSIQUE).....</b>	<b>78</b>
<b>TABLEAU 22SEUIL .....</b>	<b>78</b>

## Liste des abréviations

**AdE** : Arbre des évènements

**AMDEC** : L'Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité.

**APR** : Analyse préliminaire de risque

**ATEX** : Atmosphère explosive

**BLEVE**: Boiling liquid expanding vapor explosion

**CFD**: Computational Fluid Dynamics

**DNV-GL**: Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd

**EDD** : Etude de danger

**ERC** : Evènement redouté central

**FLACS**: Flame Acceleration Simulator

**GNL**: Gaz Naturel liquéfié

**HAZID**: Hazard Identification

**HAZOP**: Hazard and Operability Study

**HRM**: Hassi R'mel

**IPL**: Independent protection layers

**JSA**: Job Safety Analysis

**LIE**: Limite inférieure explosive

**LSE** : Limite supérieure explosive

**LOPA**: Layer of Protection Analysis

**MMR** : Mesures de Maîtrise de Risque

**PFD** : probabilité de défaillance sur demande

**PHAST**: Process Hazard Analysis Software Tool

**P&ID**: Piping and Instrumentation diagram

**POI** : Plan d'Opération Interne

**PPI** : Plan Particulier d'Intervention

**QRA** : Quantitative Risk Assessment

**RdP** : Réseau de Petri

**SIG** : Système d'information géographique

**SWOT**: strengths, weaknesses, opportunities et threats

**TC**: Turbocompresseur

**TRC** : Transport par canalisation

**UIC** : Union des Industries Chimiques

# Introduction Générale

Dans un contexte industriel en constante évolution, la maîtrise des risques liés aux installations à haut potentiel de danger est devenue une priorité absolue pour garantir la sécurité des personnes, la protection de l'environnement, ainsi que la continuité des opérations. Les industries pétrolières et gazières, en particulier, sont confrontées à des risques majeurs dus à la nature des substances manipulées et aux procédés sous haute pression et température.

Les accidents industriels graves tels que les explosions, incendies et rejets toxiques ont marqué l'histoire de l'industrie à travers le monde parmi eux, on peut citer l'explosion d'un terminal de gaz de pétrole liquéfié à San Juan Ixhuatepec, au Mexique, le 19 novembre 1984, l'explosion généralisée de la raffinerie de pétrole Total à La Mède, en France, le 9 novembre 1992, ainsi que la violente explosion survenue le 20 janvier 2004 dans un complexe de gaz naturel liquéfié (GNL) à Skikda, en Algérie, causant au moins 23 morts et 74 blessés[1], mettant en évidence la nécessité de développer des barrières de sécurité fiable et efficace.

Parmi les barrières de sécurité exigées à la fois par le système de management et par l'État, l'élaboration des Études de Danger (EDD) (Décret exécutif n° 21-319 du 5 Muharram 1443 correspondant au 14 août 2021) pour les sites industriels constitue un élément essentiel pour la sécurité des installations. Ces études visent à analyser de manière approfondie l'ensemble des scénarios accidentels susceptibles qui se produisent sur le site et à définir des mesures de maîtrise des risques afin de prévenir leur survenue. [2].

Pour mener une analyse approfondie des scénarios accidentels susceptibles qui se produisent sur un site industriel et définir des mesures de maîtrise des risques afin de prévenir leur survenue, les spécialistes s'appuient sur diverses méthodes d'analyse des risques et sur approches méthodologiques éprouvées. Parmi celles-ci, on retrouve l'Analyse de Sécurité au Travail (Job Safety Analysis – JSA) [4], l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) [5], la méthode des 5M [6], l'Arbre des Causes [31] et l'Arbre de Conséquences, l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) [7], l'HAZOP (Hazard and Operability Study) [8], l'HAZID (Hazard Identification) [9], la méthode de Kinney, l'Analyse des Risques basée sur le Cycle de Vie, ainsi que des outils de retour d'expérience et la matrice SWOT [10]. [3].

Dans ce cadre, la modélisation des effets physiques liés à un Jet Fire s'avère essentielle pour évaluer les conséquences d'un tel événement et proposer des mesures préventives et correctives adaptées. Le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) [11], développé par DNV, constitue un outil de référence permettant de simuler divers scénarios accidentels et d'estimer l'étendue des effets thermiques, toxiques ou de surpression.

Ce travail s'inscrit dans une démarche d'analyse des risques industriels au sein de la station de compression GR4, relevant de la filiale SONATRACH TRC dans la région de Hassi R'mel (HRM). L'étude porte spécifiquement sur une fuite de gaz sous haute pression localisée au niveau du turbocompresseur. L'objectif principal est de modéliser dynamiquement en 3D, à l'aide du logiciel PHAST 9.0, un scénario de Jet Fire pouvant résulter de cette fuite. Cette modélisation permet de visualiser l'évolution du phénomène dans l'espace, d'évaluer les conséquences potentielles sur les installations et le personnel, et de formuler des recommandations techniques pour la réduction des risques et l'amélioration de la sécurité.

Ainsi, cette étude conjugue à la fois l'analyse théorique du phénomène, la simulation numérique à l'aide de PHAST 9.0, et l'interprétation des résultats obtenus dans le but de renforcer la culture de prévention des risques dans le secteur énergétique national

# **CHAPITRE I : Méthodes d'analyses des risques**

## **I.1.Introduction**

La gestion efficace des risques industriels commence par une identification rigoureuse des dangers et une évaluation structurée des scénarios potentiels d'accidents. Pour ce faire, plusieurs méthodes qualitatives et quantitatives sont utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière. Ce chapitre présente les principales méthodes d'analyse de risques telles que le HAZID (Hazard Identification), le HAZOP (Hazard and Operability Study), l'analyse quantitative des risques (QRA) [12], ainsi que l'approche LOPA (Layer of Protection Analysis).

Ces méthodes permettent d'évaluer la probabilité, la gravité et les barrières de sécurité existantes pour chaque scénario identifié. L'objectif de ce chapitre est de fournir un socle méthodologique clair et appliqué pour comprendre la suite de l'étude de cas.

## **I.2. Concepts et Définitions**

**Accident** : Événement brusque et imprévu, mais peut-être prévisible, causant des dommages aux personnes, aux biens, à l'environnement.

**Arbre des causes** : L'arbre des causes est la représentation graphique de l'enchaînement logique des faits qui ont provoqué un accident. [31]

**Barrière de sécurité** : fonction ou l'objet capable d'éliminer ou de diminuer l'évolution d'un scénario d'accident non souhaitable.

**Danger** : source potentielle de dommage.

**Dispersion** : Répartition ou distribution.

**Explosion** : une augmentation rapide de volume et une libération d'énergie, généralement avec génération de hautes températures et de gaz et de lumière.

**Incident** : Le terme incident peut être défini comme une occurrence, une condition ou une situation survenant au cours d'une activité professionnelle qui a entraîné ou qui aurait pu entraîner des blessures, des maladies, des problèmes de santé ou des décès.

**Installation industrielle** : Ensemble des équipements, machines et structures mis en place pour produire des biens à grande échelle dans une industrie.

**Méthode 5M** : Outil de gestion de la qualité qui permet d'identifier, de catégoriser, et de visualiser les causes potentielles d'un problème donné [6].

**Modélisation :** La modélisation est un processus qui consiste à créer une représentation simplifiée et abstraite d'un système, d'un phénomène ou d'une situation réelle. [32]

**Prévention :** Ensemble des dispositions prises pour prévenir un danger, un risque, un mal.

**Risque :** La probabilité que survienne un élément dangereux et la sévérité de ses conséquences.

**Scénario accidentel :** Enchaînement d'événements conduisant un événement initiateur à un accident (majeur).

### **I.3. La méthode HAZID (Hazard Identification) [14]**

La méthode **HAZID** est un outil d'identification précoce des dangers dans les projets industriels, utilisé dès les premières phases du cycle de vie pour prévenir les risques. Elle repose sur un processus **structuré et guidé par des mots-clés**, mené par une **équipe pluridisciplinaire**.

#### **I.3.1. Objectifs principaux**

- Identifier les dangers potentiels ;
- Évaluer les risques associés ;
- Proposer des mesures de prévention ;
- Garantir la conformité réglementaire.

#### **I.3.2. Étapes du processus**

- **Préparation** : définition du périmètre, constitution de l'équipe, collecte de données techniques.
- **Analyse en atelier** : application des mots-clés, identification des causes, conséquences, barrières de sécurité, évaluation des risques et recommandations.
- **Documentation** : enregistrement détaillé des résultats pour le suivi et la mise en œuvre des actions correctives.

#### **I.3.3. Avantages**

- Amélioration de la sécurité ;
- Réduction des coûts d'accident et de modifications tardives ;
- Renforcement de la performance opérationnelle ;
- Sensibilisation du personnel à la culture sécurité.

### I.3.4. Défis courants

- Données incomplètes ;
- Manque d'expertise ;
- Faible documentation ou suivi ;
- Résistance au changement.

### I.3.5. Outil de travail

L'analyse est généralement consignée dans un **tableau HAZID** avec 8 colonnes (n° ligne, unité, mot guide, causes, scénario, conséquences, actions, commentaires).

### I.3.6. Tableau d'analyse de la revue HAZID

Le support utilisé par le groupe de travail pluridisciplinaire pour la mise en œuvre de la méthode est un tableau comme celui qui figure ci-après : [34]

**Tableau 1:identification des dangers HAZID**

N°	Systèmes/ Unités	Mot Guide	Causes	Scenari potentiel Conséquences	Action/contrôles	Commentaires	N° Action
01							

À partir du tableau, pour un mode de fonctionnement donné, le groupe de travail adopte une démarche systématique permettant, pour chaque mot guide, d'identifier les dangers et les réponses apportées. Le tableau se compose de 8 colonnes décrites ci-dessous :

1. N : numéro de la ligne d'identification du scénario ;
2. Causes : causes possibles pouvant potentiellement entraîner le danger identifié ;
3. Système/Unité : système ou unité de l'usine concerné par le scénario ;
4. Mot guide : mot guide utilisé pour la formulation du danger ;
5. Scénario potentiel/Conséquence : description du phénomène dangereux et des impacts matérielles et/ou humaines et/ou environnementaux ;
6. Actions et mesures : de sécurité à mettre en place selon le danger identifié ;

7. Commentaires : commentaire de l'équipe HAZID sur l'action menées ou à mener lors des études de conception ;

8. N° Action : numéro de l'action menée par le Groupement dès la phase d'offre selon le danger identifié.

### **I.3.7. Conclusion**

Le HAZID est un processus **proactif, évolutif et indispensable** dans la gestion des risques industriels. Il doit être **mis à jour régulièrement** en cas de changement ou d'incident.

## **I.4. La méthode d'analyse des risques HAZOP [15]**

### **I.4.1 Historique et domaine d'application**

La méthode **HAZOP** a été développée dans les années 1970 par la société **ICI (Imperial Chemical Industries)**, puis adaptée à différents secteurs industriels, notamment la chimie et la pétrochimie. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes **thermo-hydrauliques**, où des paramètres comme le **débit, la pression, la température ou le niveau** doivent être rigoureusement maîtrisés.

La méthode s'appuie notamment sur l'analyse des **P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)**.

### **I.4.2 – Principe de la méthode**

HAZOP est une méthode **qualitative et systématique** qui repose sur l'étude des **dérives potentielles** des paramètres de fonctionnement (et non des modes de défaillance). Elle combine :

Des **mots-clés** (ex. : "Pas de", "Moins de", "Inverse", "Trop de")

Avec des **paramètres critiques** (pression, température, débit, niveau, etc.)

**Exemples de dérives :**

**"Moins de" + "Débit" = débit insuffisant**

**"Pas de" + "Niveau" = réservoir vide**

**Une équipe pluridisciplinaire analyse pour chaque dérive :**

- Les causes

- Les conséquences
- Les dispositifs de détection et de sécurité
- Les mesures correctives proposées

#### **I.4.3 – Déroulement de la méthode**

Le déroulement d'une étude HAZOP suivre les étapes suivantes :

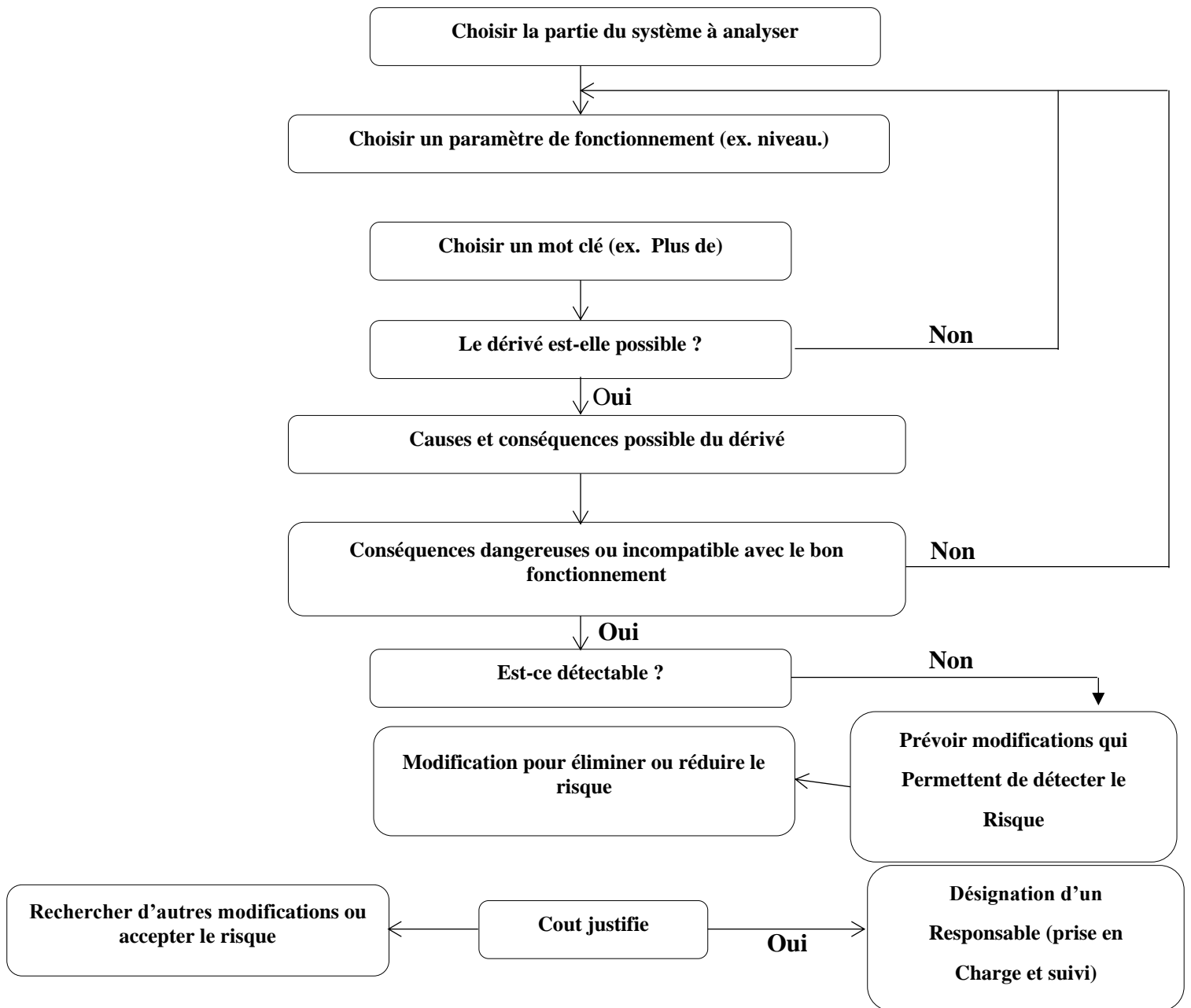


Figure 1: Déroulement de la méthode HAZOP

L'étude HAZOP se déroule généralement selon les recommandations de la norme CEI 61882.

Elle utilise un **tableau structuré** comportant les éléments suivants : [16]

**Tableau 2:Exemple de tableau pour l'HAZOP**

<b>Date :</b>								
<b>Ligne ou équipement :</b>								
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>N°</b>	<b>Mot clé</b>	<b>Paramètre</b>	<b>Causes</b>	<b>Conséquences</b>	<b>Détection</b>	<b>Sécurité existantes</b>	<b>Proposition d'amélioration</b>	<b>Observations</b>
01								

#### **I.4.4. Limites et avantages de la méthode d'analyse des risques HAZOP**

##### **Avantages :**

1. Méthode structurée, exhaustive et logique ;
2. Très adaptée aux systèmes à paramètres critiques (pression, température, etc.) ;
3. Évite d'avoir à analyser chaque mode de défaillance comme dans l'AMDE ;
4. Encourage la réflexion collective et la prévention.

##### **Limites :**

- Ne prend pas en compte les défaillances multiples combinées ;
- Difficulté à délimiter précisément certaines parties du système à étudier ;
- Complexité croissante dans les systèmes fortement interconnectés ;
- Peut produire un volume d'information très important, parfois peu utile pour la gestion des risques majeurs ;
- Études longues et exigeantes en ressources humaines. [17]

#### **I.4.5. Conclusion**

La méthode HAZOP est un outil puissant pour identifier les dérives dangereuses dans les systèmes industriels. Toutefois, elle nécessite une application rigoureuse et une expertise certaine pour être efficace, surtout dans les systèmes complexes.

### **I.5. La Méthode d'analyse QRA (Quantitative Risk Assessment)**

La **Quantitative Risk Assessment (QRA)** est une méthode visant à évaluer de manière chiffrée les risques liés à des accidents industriels, en combinant probabilité d'occurrence et gravité des conséquences. Elle a été développée dans les domaines du nucléaire et des transports, puis adaptée à l'industrie des procédés, notamment en Europe du Nord.[17]

#### **Objectif**

Estimer :

- Le **risque individuel** : probabilité de mort pour une personne située à un point donné ;
- Le **risque sociétal** : nombre de morts potentiels dans une population exposée, et fréquence associée.
- Comparer les résultats avec des **critères de risque** (législatifs ou internes à l'entreprise) pour **décider de l'acceptabilité** du risque ou de la nécessité d'améliorations

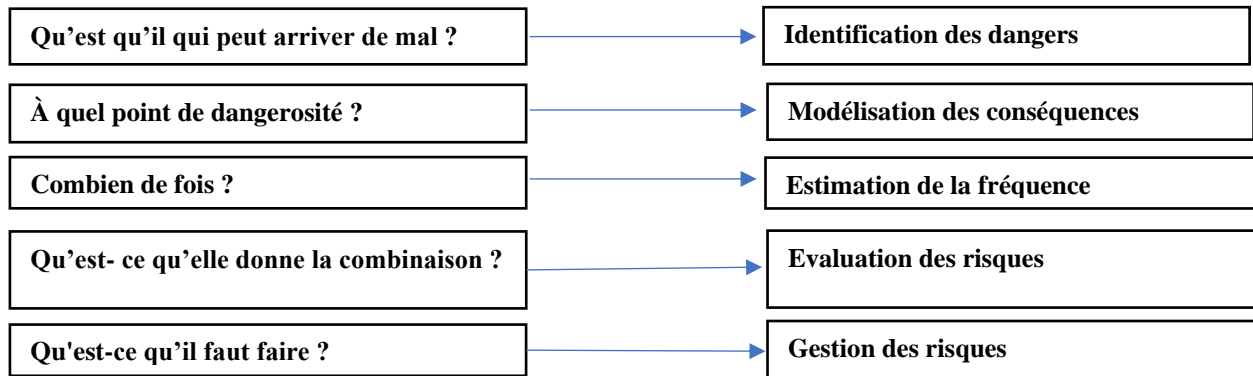


Figure 2: Questions clés de la méthode QRA. [18]

Les principales étapes du QRA définies par le Purple book [19] sont les suivantes :

### I.5.1. Sélection des installations pour le QRA

La sélection des installations repose sur le calcul pour chaque installation d'un indicateur A qui prend en compte la qualité de substance dangereuse stockée ou mise en œuvre, le type d'équipement (stockage ou Process), l'exposition de l'installation à des conditions particulières, l'état physique de la substance et la nature de la substance. En fonction de la valeur que prend cet indicateur, l'installation est retenue ou non pour le QRA.

### I.5.2. Définition des évènements redoutés centraux (pertes de confinement) et des fréquences associées

Dans une étude QRA, on identifie les évènements potentiels de perte de confinement pour chaque installation retenue, en fonction du type d'équipement concerné. Le **Purple Book** [19] attribue à chaque type d'évènement une fréquence de survenue utilisée dans les calculs de risque.

Cette fréquence peut être majorée (multipliée par 3 à 10) si l'installation est exposée à des conditions défavorables (vibrations, corrosion, cycles thermiques).

Les barrières de sécurité qui réduisent les conséquences peuvent être prises en compte via un arbre d'événements, mais les barrières de prévention (qui réduisent la probabilité d'occurrence) ne sont pas intégrées dans l'analyse QRA classique.

### **I.5.3. Modélisation de l'intensité du phénomène**

Cette étape consiste à **modéliser l'intensité** des phénomènes dangereux (fuite toxique, feu, explosion) associés aux pertes de confinement identifiées.

Les intensités sont exprimées par :

- Des **concentrations** (toxiques),
- Des **flux thermiques** (feu),
- Des **niveaux de surpression** (explosion).

La modélisation tient compte de différentes conditions météorologiques, chacune associée à une probabilité d'occurrence.

Les résultats produits (intensité + probabilité) servent ensuite au calcul du risque individuel et sociétal dans l'étape finale du QRA. [20]

### **I.5.4. Modélisation de l'exposition et des dommages**

Cette étape consiste à convertir des intensités de phénomènes dangereux (concentration de gaz toxique, flux thermique, onde de pression) en probabilité de mort d'un individu exposé et en fraction de population tuée.

### **I.5.5. Calcule et présentation des résultats**

La dernière étape du calcul permet en premier lieu d'estimer le risque individuel, qui est calculé :

- En effectuant la somme des probabilités de mort associés à chaque résultat de l'étape 3 ;
- En divisant l'espace autour de l'installation en cellules d'égale superficie
- En évaluant la population potentiellement exposée dans chaque cellule et le nombre de morts de chaque cellule enivrante l'installation pour un scénario donné et un ensemble de conditions données ;
- On obtient la contribution en nombre de morts de ce scénario et de cet ensemble de conditions ;

Pour établir le risque sociétal :

- On établit des classes de mortalité (1, 10, 100, 1000 morts) et, pour chacune de ces classes :
- On calcule la somme des fréquences (FN) des scénarios qui peuvent produire un nombre supérieur ou égal au nombre de mort (N) de la classe.
- Représentation graphique des fréquences associées à chaque classe produit une courbe F/N.

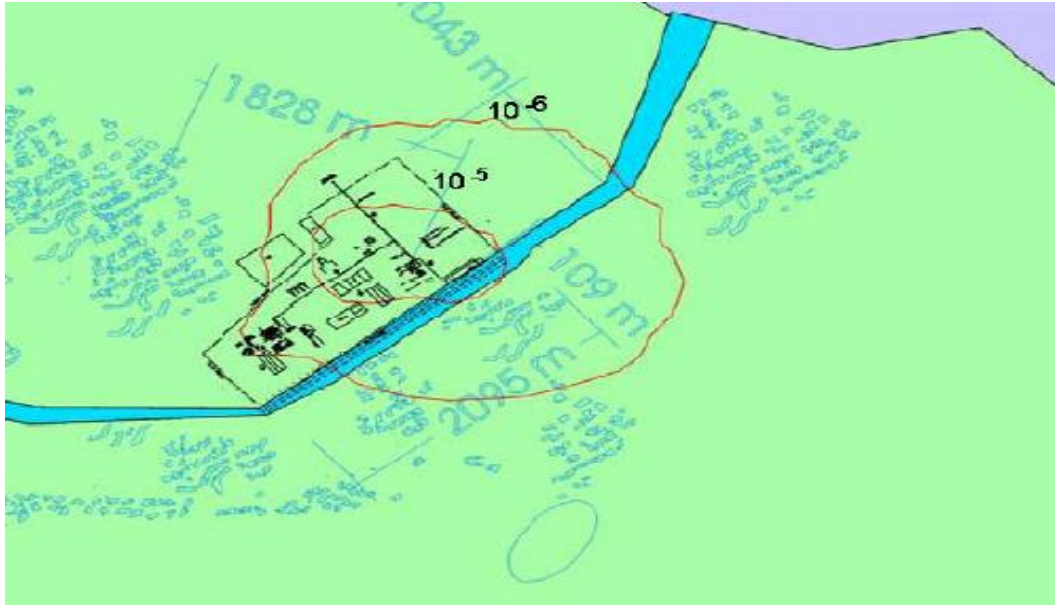


Figure 3: Exemple de courbe iso risque ou carte du risque individuel (fictive)

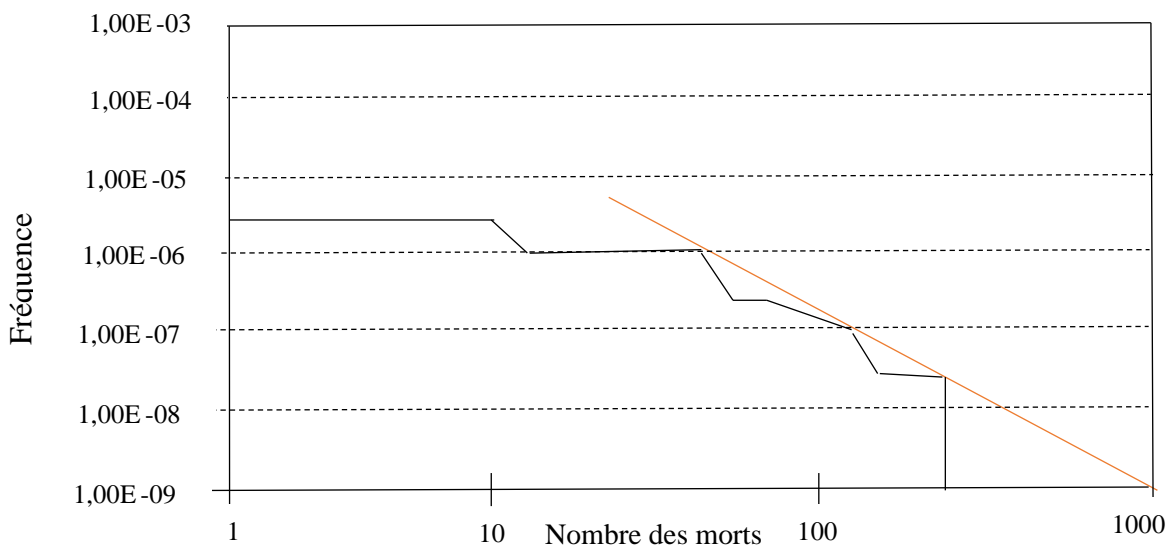


Figure 4: Représentation du risque sociétal courbe F/N typique

Les résultats du QRA peuvent donc être représentés de deux manières :

- Soit sous la forme d'une carte du risque individuel (Figure 3),
- Soit sous la forme d'une courbe F/N (Figure 4).

Dans les deux cas, l'exploitation de ces résultats pour la prise de décision implique la définition d'un niveau de risque acceptable en termes de probabilité de mortalité. [21]

#### I.5.6 Présentation de la méthode QRA (Quantitative Risk Assessment)

Un schéma général de l'approche est repris ci-dessous. La méthodologie suit l'approche classique d'un QRA :

- Identification des dangers et développement des scénarios.
- Calcul des conséquences et des impacts potentiels.
- Analyse des fréquences.
- Combinaison des conséquences et fréquences afin de prédire le risque.
- Évaluation du risque et proposition de mesures complémentaires afin de réduire/contrôler le risque.

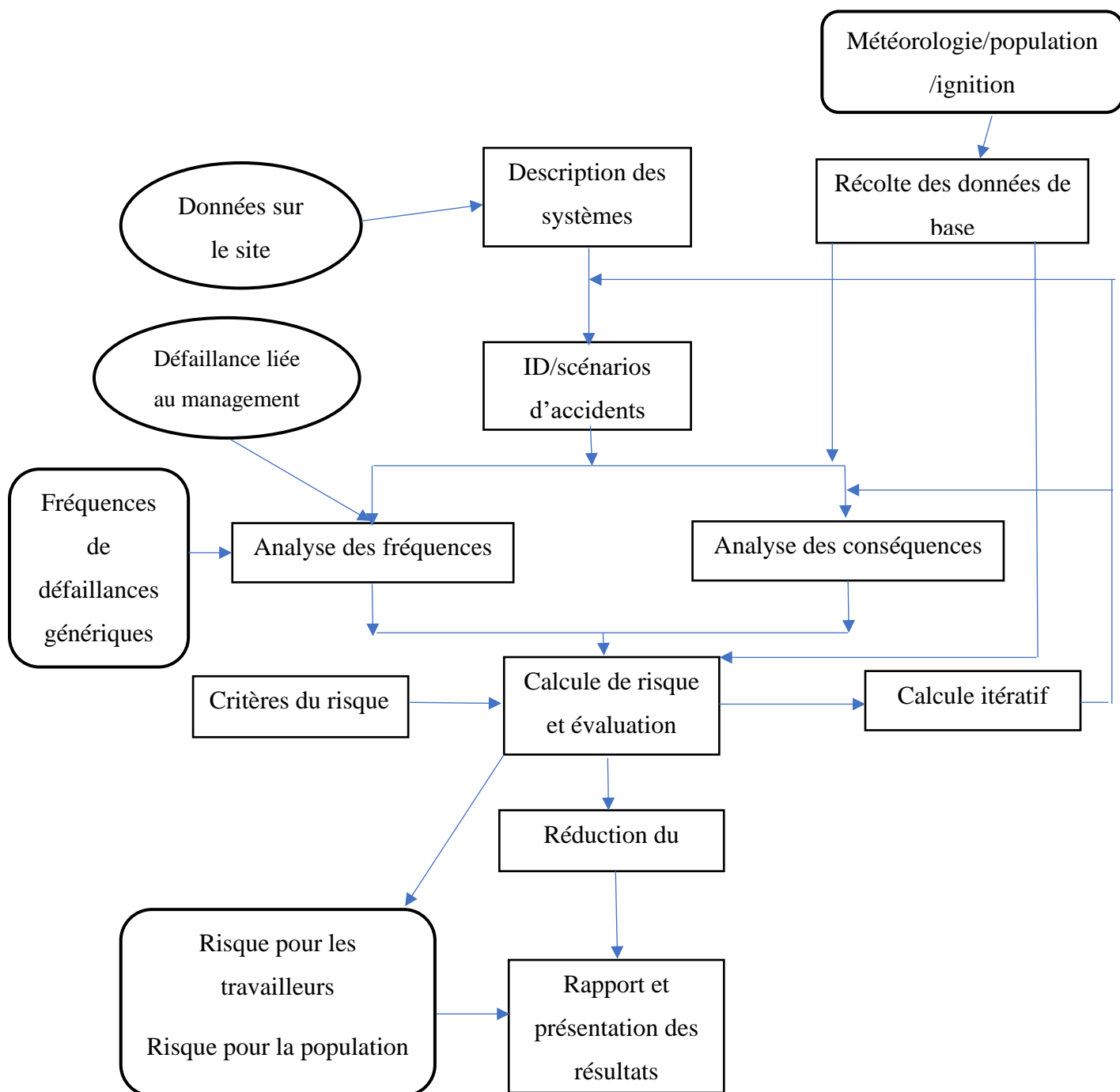


Figure 5: Schéma général de l'approche QRA. [18]

### **I.5.7. Conclusion**

La méthode QRA fournit une estimation objective des risques majeurs d'une installation. Elle permet de **justifier des décisions** en matière de sécurité (acceptabilité, modifications, arrêt d'une installation), à condition de définir des **critères de risque acceptables**.

## **I.6. La méthode d'analyse Layer Of Protections Analysis (LOPA)**

La méthode LOPA (Layer of Protection Analysis) est une méthode semi-quantitative d'évaluation des risques, développée à la fin des années 1990 par le CCPS et décrite dans la norme IEC 61511 (partie 3).

Elle permet d'analyser si les barrières de sécurité sont suffisantes pour ramener un scénario dangereux à un niveau de risque acceptable.

### **La méthode LOPA répond aux questions clés suivantes**

- Dans quelle mesure les barrières de sécurité sont suffisantes ?
- Combien de barrières indépendantes sont nécessaires pour réduire le risque à un niveau acceptable ?
- Quelle proportion de réduction des risques chaque barrière apporte ou devrait apporter ?

#### **I.6.1. Objectif de la méthode**

La méthode LOPA est une méthode semi-quantitative développée dans l'optique :

- De juger de l'adéquation entre les barrières mises en œuvre et le niveau de risque visé ;
- De statuer sur le besoin de mise en œuvre de nouvelles barrières ;
- De définir les « exigences » minimales sur la probabilité de défaillance des barrières à mettre en place dans le cas où les barrières existantes ne permettraient pas de justifier d'un risque acceptable ;
- D'évaluer la fréquence d'occurrence résiduelle d'un scénario d'accident. [22]

#### **I.6.2. Principe de la méthode LOPA**

Une autre façon de comprendre LOPA est de la considérer comme un cas particulier de la méthode de l'Arbre des Evénements qui est une méthode quantitative d'évaluation de risque. Un arbre d'événements analyse toutes les conséquences possibles d'un événement initiateur, alors que LOPA n'étudie qu'un seul scénario à la fois (couple cause- conséquence), ce qui représente un seul chemin sur l'arbre d'événements. Ce dernier peut servir de support pour LOPA puisqu'il facilite la

représentation de l'ordre des IPL. LOPA utilise un événement initiateur de la même façon que l'AdE, mais elle exige qu'il soit exprimé en termes de fréquence. Les couches de protection dans LOPA correspondent aux branches d'un AdE (Fig. 6). Dans LOPA, chaque branche est souvent un ensemble d'événements complémentaires dans lequel la couche de protection accomplit sa fonction de sécurité avec succès ou se trouve défaillante. LOPA estime la fréquence de la conséquence indésirable, de la même façon que fait l'AdE, en multipliant la fréquence de l'événement initiateur par le produit des PFD des IPL (Independent Protection Layers). [23]

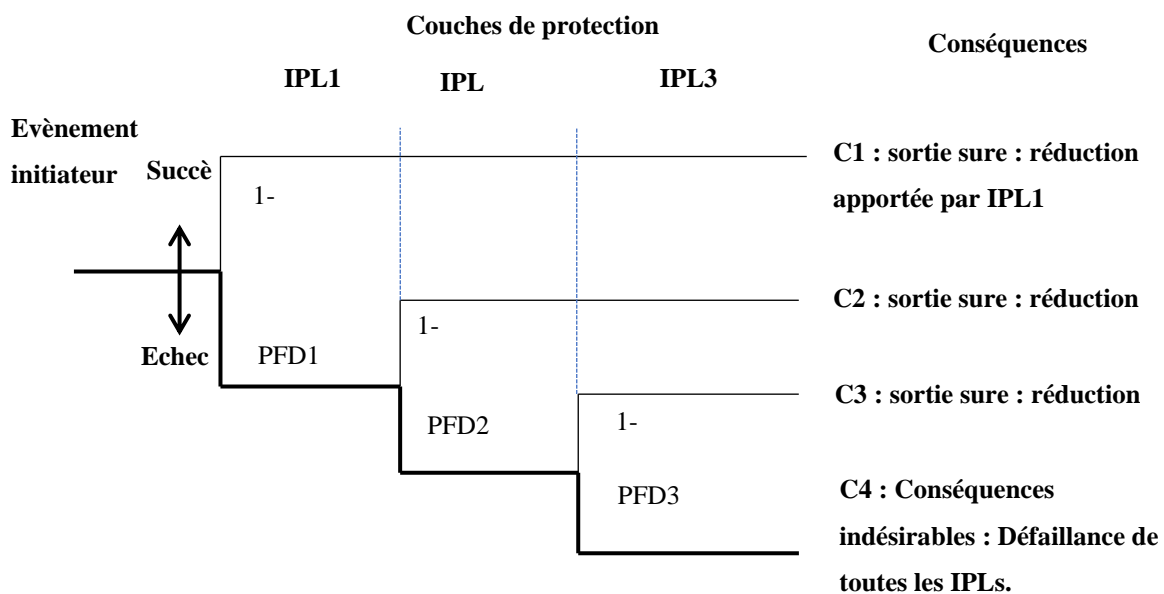


Figure 6: Exemple d'Arbre d'Evénements avec trois couches de protection

### I.6.3. Conclusion

LOPA est une méthode intermédiaire entre les approches qualitatives (comme HAZOP) et les approches entièrement quantitatives (comme le QRA).

Elle est utilisée en complément d'analyses comme l'HAZOP, pour quantifier le besoin en sécurité instrumentée et garantir la maîtrise des risques industriels.

## **I.7. La méthode d'analyse de risque APR :**

### **I.7.1. Introduction :**

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode systématique et qualitative utilisée dans les premières phases d'une étude de sécurité pour **identifier les dangers** inhérents à une installation industrielle et évaluer les risques potentiels associés à son fonctionnement.

L'APR repose sur les étapes suivantes :

### **I.7.2. Première étape : analyse qualitative – identification des dangers**

Analyse préliminaire des risques (APR) est une méthode d'analyse de risques pour identifier les dangers inhérents à une installation industrielle dans son fonctionnement.

#### **I.7.2.1. Découpage de l'installation :**

Sur la base du document descriptif général de la station de compression GR4 qui présente les principaux systèmes procédés, utilités et infrastructures.

#### **I.7.2.2 Identification des dangers :**

L'analyse des dangers est basée sur le retour d'expérience pour identifier les dangers inhérents à une installation industrielle dans son fonctionnement.

L'APR est synthétisée dans des tableaux.

A l'issue de cette étape, les systèmes les plus dangereux sont sélectionnés pour être étudiés dans l'étape suivante – Evaluation Préliminaire des Risques (EPR).

### **I.7.3. Deuxième étape : Analyse quantitative - Evaluation Préliminaire des Risques**

Pour chacune des sections retenues lors de l'APR, les éléments suivants sont identifiés dans les tableaux APR.

- Evènement redouté : recherche des évènements pouvant conduire à la libération des potentiels de danger,
- Conséquences : identification de la nature des conséquences potentielles (incendie, explosion,),
- Evaluation de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté, de la probabilité d'ignition et de la probabilité d'occurrence du phénomène dangereux

- Evaluation de la gravité des conséquences du phénomène dangereux considéré
- Attribution d'un niveau de gravité et d'un niveau de probabilité au scénario étudié
- Sélection ou non du scénario en fonction de son positionnement dans la matrice (Tableau. 9) de sélection (hiérarchisation des risques).

#### **I.7.4. Troisième étape : Sélection des scénarios critiques et l'analyse des impacts potentiels en cas d'accidents**

- L'évaluation des conséquences des accidents majeurs comprend ceux qui sont inhérents aux activités du site ainsi que les événements indésirables qui pourraient potentiellement se produire des impacts sur le personnel, l'environnement et les installations.
- La quantification des phénomènes dangereux à partir de modèles permettant de simuler les phénomènes physiques associés au rejet de produit enflammé.

- Analyse Préliminaire des risques (APR)

**Tableau 3: Méthode d'analyse des risques APR**

Unités/ Equipements			Conséquences	F	G	N R	Mesure de sécurité existantes sur site	F	G	N R	Commentaires

**I.7.6. Troisième étape : Sélection des scénarios critiques et l'analyse des impacts potentiels en cas d'accidents**

- L'évaluation des conséquences des accidents majeurs comprend ceux qui sont inhérents aux activités du site ainsi que les événements indésirables qui pourraient potentiellement se produire des impacts sur le personnel, l'environnement et les installations.

- La quantification des phénomènes dangereux à partir de modèles permettant de simuler les phénomènes physiques associés au rejet de produit enflammé.

La matrice de risques utilisée, les classes de gravité et de probabilité sont décrites en détails ci-après :

**Tableau 4: Matrice d'analyse des risques**

		Probabilité				
		Rare	Improbable	Modéré	Probable	Presque certain
Gravité	5-Catastrophique	Orange	Rouge	Rouge	Rouge	Rouge
	4-Sévère	Orange	Orange	Rouge	Rouge	Rouge
	3-Critique	Orange	Orange	ALARP	Orange	Rouge
	2-Marginal	Vert	Orange	Orange	Orange	Orange
	1-Négligeable	LOW	Vert	Vert	Orange	Orange

**I.7.8. Conclusion :**

L'Analyse Préliminaire des Risques constitue une étape essentielle dans la démarche globale de maîtrise des risques. Elle permet, grâce à une approche qualitative, de dresser un inventaire structuré des dangers présents au sein de l'installation et d'en évaluer les conséquences potentielles, en tenant compte des mesures de sécurité existantes.

### **I.8. Conclusion :**

Les méthodes d'analyse des risques prennent toutes leurs valeurs dans le processus de gestion des risques du moment qu'elle conditionne en grande partie la pertinence des autres étapes de ce processus décisionnel ; Ces méthodes sont classées selon leurs : approches, typologies, démarches et formalisme ; Certes, chaque méthode d'analyse des risques a des avantages et limites ; Mais, il faut retenir qu'il n'y pas de bonne ou de mauvaise méthode d'analyse des risques mais elles sont complémentaires ; Le choix de la méthode ou des méthodes nécessaires pour réaliser l'analyse des risques est primordial. Cependant, il n'existe pas une méthode unique ou universelle qui permettrait d'effectuer cette analyse. Tout dépend, en particulier, des objectifs de l'étude et de la disponibilité de l'outil informatique qui supporte la méthode à choisir.

# **CHAPITRE II : Méthodes dynamique d'analyse des risque**

## **II.1. Introduction**

Dans le but de réaliser une modélisation des risques à la fois fiable et pertinente, et d'assurer l'efficacité des barrières de sécurité mises en place, les scientifiques et les experts ont développé diverses méthodes de modélisation, à la fois graphiques, mathématiques et informatiques.

Ces méthodes permettent d'analyser de manière systématique les scénarios d'accidents potentiels, d'évaluer leur probabilité d'occurrence ainsi que leurs conséquences, et de renforcer ainsi la gestion des risques.

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques-uns de ces méthodes largement utilisés dans différents secteurs, notamment dans l'industrie, où la maîtrise des risques constitue une priorité majeure.

## **II.2. Les méthodes à fréquences des conséquences**

### **II.2.1. Réseau de Pétri**

Un réseau de Petri est un outil de modélisation graphique et mathématique utilisé pour représenter les systèmes discrets, dynamiques et concurrents.

Il est largement utilisé dans l'automatisme, la gestion de production, la modélisation des processus industriels, et l'analyse de la fiabilité des systèmes.

#### **II.2.1.1. Constitution d'un réseau de Petri**

Un Réseau de Petri (RdP) est une structure graphique comportant un ensemble de places et de transitions, reliées par des arcs orientés, éventuellement porteurs de poids. Ces arcs sont des liens entre place et transition ou entre transition et place exclusivement.

Dans cette structure se déplacent des jetons (ou marques) qui apparaissent dans les places et sont susceptibles de franchir les transitions selon certains critères de franchissable et de franchissement.

Les figures 7, 8 et 9 représentent de tels réseaux. Le premier représente un processus à deux états (Arrêt-Marche, par exemple). Dans le deuxième réseau, le passage d'un état à l'autre mobilise une ressource, symbolisée par le jeton contenu dans la place qui a été rajoutée à partir de la figure 7. Le troisième modèle peut représenter l'assemblage et le désassemblage successifs de deux éléments.

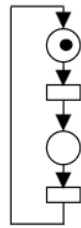


Figure 8

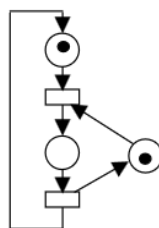


Figure 9

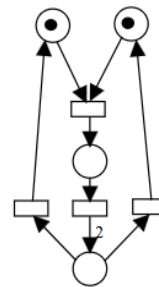


Figure 7

En général, les places sont repérées de **P1** à **Pn** et les transitions de **T1** à **Tm**. Les poids des arcs sont indiqués sur le modèle en regard des arcs. L'absence de notation signifie que l'Arc en question est implicitement pondéré à 1. [24]

### II.2.1.2. Un réseau de Petri est composé de

Tableau 5: Les composants de Réseau de pétri. [24]

Élément	Symbole	Rôle
Place	Cercle	Représente un état ou une condition
Transition	Barre (ou rectangle)	Représente un événement ou une action
Jeton	Point dans une place	Représente l'occurrence d'un état
Arc	Flèche	Relie une place à une transition (ou inversement)

### II.2.1.3 exemples de réseau de Petri

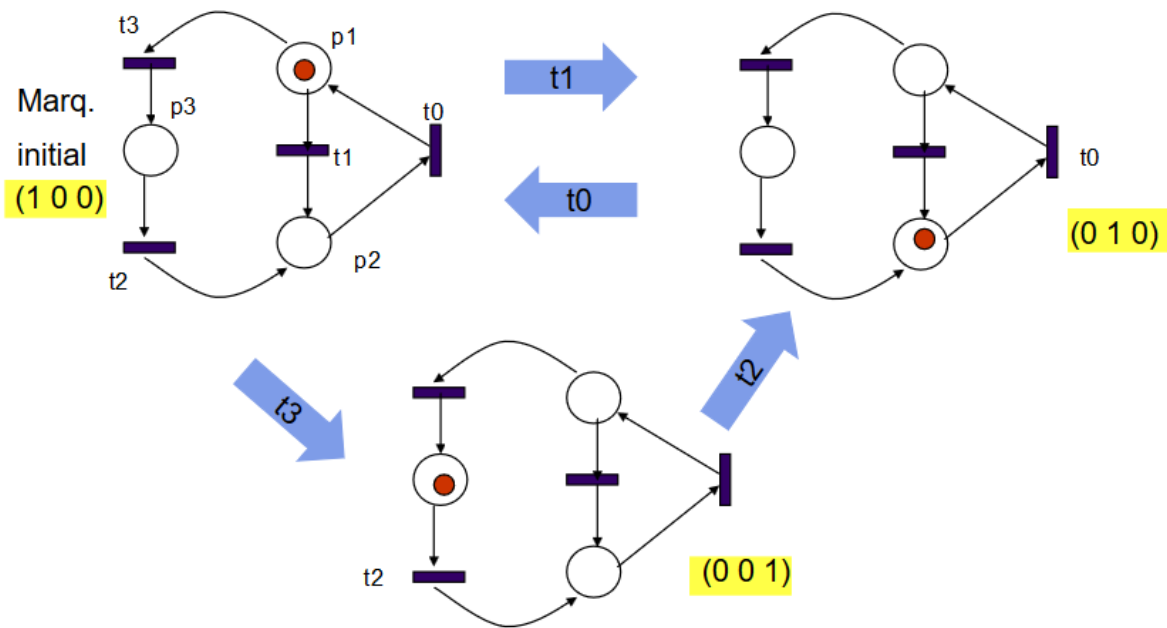


Figure 10: exemple pour simuler un automate à 3 états

## II.2.2. RESEAU BAYESIEN

Un réseau bayésien est un système représentant la connaissance et permettant de calculer des probabilités conditionnelles apportant des solutions à différentes sortes de problématiques.

La structure de ce type de réseau est simple : un graphe dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires, et les arcs (le graphe est donc orienté) reliant ces dernières sont rattachées à des probabilités conditionnelles. Notons que le graphe est acyclique : il ne contient pas de boucle. Les arcs représentent des relations entre variables qui sont soit déterministes, soit probabilistes. Ainsi, l'observation d'une ou plusieurs causes n'entraîne pas systématiquement l'effet ou les effets qui en dépendent, mais modifie seulement la probabilité de les observer.

L'intérêt particulier des réseaux bayésiens est de tenir compte simultanément de connaissances a priori d'experts (dans le graphe) et de l'expérience contenue dans les données.

### II.2.2.1. Domaines d'utilisation principaux

Diagnostic (médical et industriel), analyse de risques, détection de spams, datamining, détection de fraudes, exploitation du retour d'expérience, modélisation et simulation de

système complexes, détection d'intrusions, TextMning, analyse de BioPuces, analyse de trajectoires de santé.

Pour résumer, un réseau bayésien est un modèle probabiliste graphique permettant d'acquérir, de capitaliser et d'exploiter des connaissances, né du besoin de créer des systèmes experts à base de probabilités

#### II.2.2.2. Construction d'un graphe

Construire un réseau bayésien c'est donc :

-Définir le graphe du modèle

-Définir les tables de probabilités de chaque variable, conditionnellement à ses causes.

Le graphe est aussi appelé la "structure" du modèle, et les tables de probabilités ses "paramètres". Généralement, la structure est définie par des experts et les tables de probabilités calculées à partir de données expérimentales. Il est possible d'utiliser des algorithmes tels que K2, le recuit simulé ou encore certains algorithmes génétiques pour construire le réseau. [25]

**Exemple :** Risque d'explosion dans une unité de traitement de gaz

**Objectif :** Évaluer la probabilité d'une **explosion** dans une unité de traitement en fonction de plusieurs facteurs de risque.

Variables du réseau bayésien :

- **Fuite de gaz** (Oui / Non)
- **Détection de gaz** (Détectée / Non détectée)
- Présence d'une source d'inflammation (Oui / Non)
- Fonctionnement du système de ventilation (Normal / Défaillant)
- **Explosion** (Oui / Non)

#### II.2.2.3 Utilisation du réseau bayésien

- **Calculer la probabilité d'une explosion**, sachant certains éléments (par exemple : "Une fuite a été détectée mais la ventilation fonctionne").
- **Faire du diagnostic** : "Une explosion s'est produite → quelles sont les causes les plus probables ?
- **Tester différents scénarios** pour la prévention des risques. [25]

## II.2.3. DIAGRAMME D'ETATS

### II.2.3.1. Définition

Un **diagramme d'états** (ou *State Machine Diagram* en Unified Modeling Language - UML) est une modélisation comportementale formelle utilisée pour représenter les états discrets d'un système, ainsi que les transitions entre ces états en réponse à des événements, conditions ou actions. [33]

### II.2.3.2. Caractéristiques essentielles

Éléments du graphe d'états

- **États (nœuds)** : Représentent les différentes situations du système (ex. : *Normal, Dégradé, En panne*).
- **Transitions (arcs)** : Représentent les passages d'un état à un autre, souvent déclenchés par des événements ou des conditions (p. ex. : *défaillance, réparation*).
- **Étiquettes** : Indiquent les causes des transitions ou les probabilités (si c'est un graphe de Markov).

### II.2.3.3. Exemple : Système de compresseur dans une station industrielle

Imaginons un compresseur pouvant être :

**État 1** : En fonctionnement

**État 2** : En panne mineure

**État 3** : En panne critique

Transitions possibles :

**Fonctionnement** → Panne mineure (si défaut détecté)

**Panne mineure** → Fonctionnement (après réparation rapide)

**Fonctionnement** → Panne critique (si choc ou surpression)

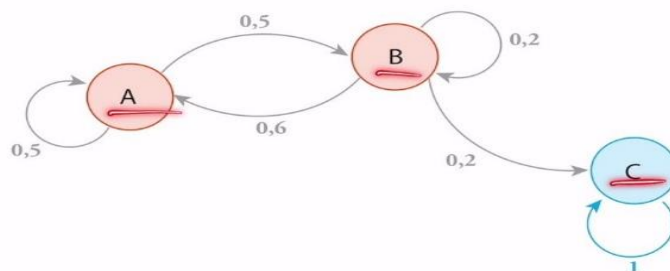


Figure 11: exemple de graphe chaîne de Markov

**Panne critique** → Fonctionnement (après intervention lourde)

#### II.2.3.4. Lien avec les réseaux bayésiens et la fiabilité

En analyse de fiabilité, les graphes d'états peuvent être stochastiques (chaînes de Markov), avec des probabilités de transition entre les états.

### II.3. Les méthodes dynamiques d'analyse des conséquences

#### II.3.1. Logiciel PHAST

##### II.3.1.1. Description du logiciel PHAST

**PHAST** (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel développé par **DNV GL**, spécialement conçu pour l'analyse des risques industriels et l'évaluation des scénarios d'accidents majeurs dans les industries de transformation, telles que la pétrochimie, la chimie, et le secteur pétrolier et gazier. Il permet de modéliser les conséquences d'accidents industriels, notamment les fuites de gaz, les explosions, les incendies et les dispersions de substances toxiques. Grâce à ses fonctionnalités avancées, PHAST facilite l'évaluation des dangers et aide à la prise de décision en matière de sécurité.

##### II.3.1.2. Fonctionnalités principales

###### a. Modélisation des fuites et rejets

- Simulation des rejets de gaz et de liquides sous pression.
- Prise en compte des phénomènes de vaporisation instantanée (flash evaporation).

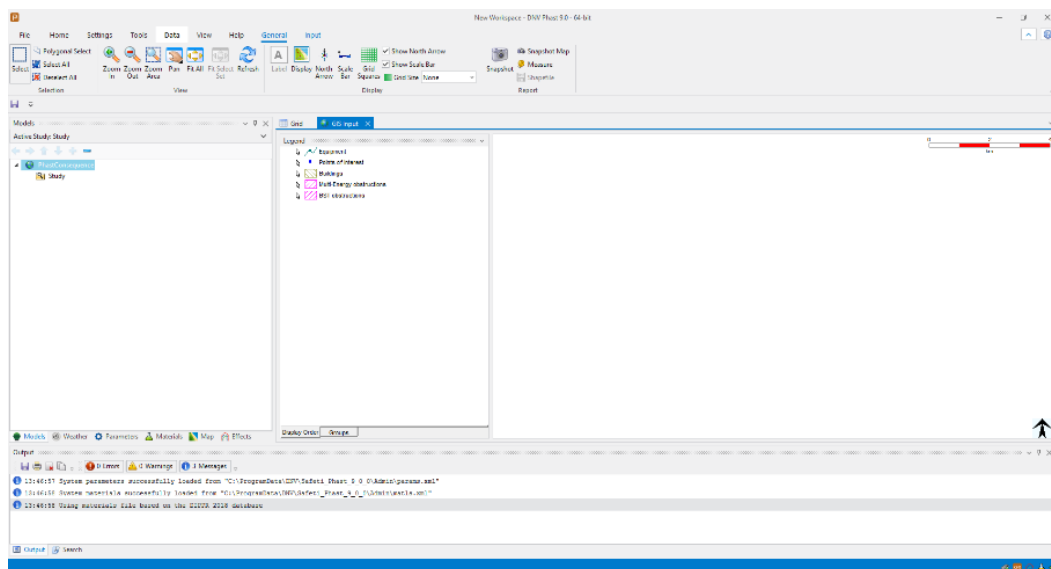
###### b. Analyse des scénarios d'explosion

- Utilisation de méthodes reconnues telles que TNT, TNO Multi-Energy et Baker-Strehlow-Tang.

- Évaluation des suppressions générées et de leurs impacts sur les structures environnantes.
- c. Simulation des incendies**
- Modélisation des feux de nappe (pool fire), des feux de torchère (jet fire) et des feux de jet.
  - Calcul des flux thermiques et des distances de danger associées.
- d. Dispersion atmosphérique des substances toxiques**
- Modélisation de la dispersion des gaz en fonction des conditions météorologiques (vent, stabilité atmosphérique, etc.).
  - Évaluation des concentrations dangereuses pour la santé humaine et l'environnement.
- e. Intégration des données météorologiques et topographiques**
- Prise en compte des paramètres environnementaux (topographie, conditions météo) pour des simulations réalistes.
- f. Utilisation dans l'évaluation des risques**

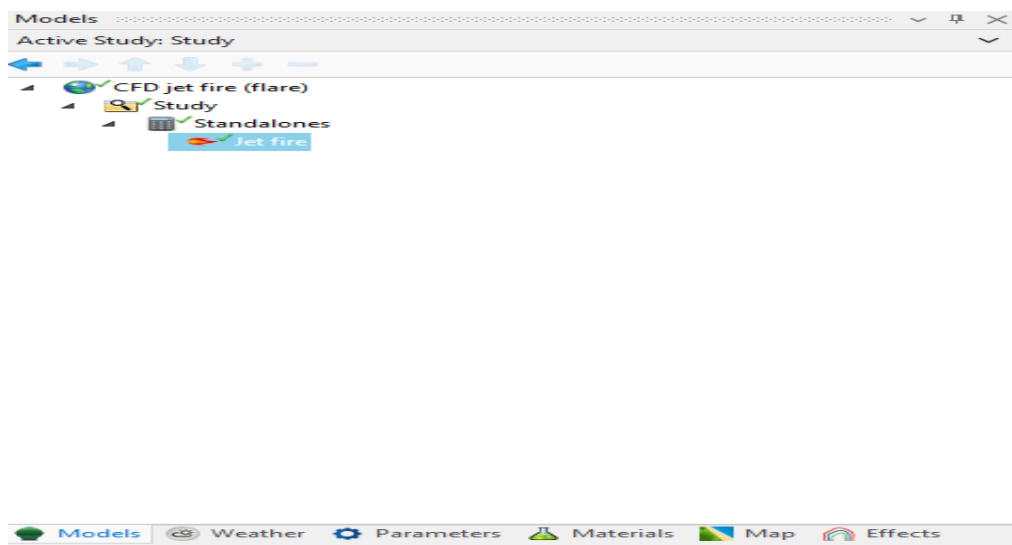
**PHAST est largement utilisé par les industries et les bureaux d'études pour**

- Réaliser des études HAZOP (Hazard and Operability Study) et QRA (Quantitative Risk Assessment).
- Déterminer les distances de sécurité et identifier les zones à risque.
- Assister les autorités dans la mise en œuvre de la réglementation SEVESO, en fournissant des analyses détaillées et conformes aux exigences légales. [26]



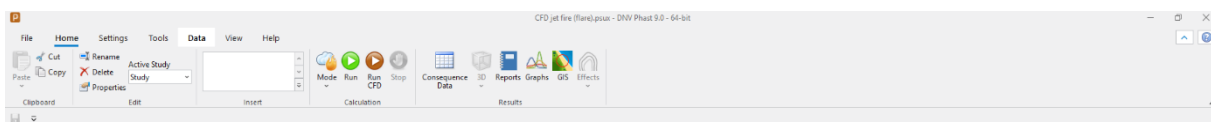
**Figure 12: interface générale**

L'interface **générale** du logiciel PHAST 9.0 avec l'onglet **GIS Input** activé. On y voit la structure du projet actif ("Study") à gauche, les éléments de cartographie (équipements, bâtiments, obstacles, points d'intérêt) au centre, et la zone d'affichage géographique à droite. Cela permet de superposer les résultats d'analyse sur une carte réelle.



**Figure 13: l'arborescence des modèles**

Cette Figure affiche **l'arborescence des modèles** définis dans le projet. On observe ici un scénario CFD intitulé "**Jet Fire**" dans la section "**Standalones**". Cette configuration permet de simuler une fuite de gaz entraînant un feu de jet (Jet Fire) dans un espace ouvert, avec des calculs basés sur la modélisation CFD.



**Figure 14: la barre d'outils supérieure**

Cette Figure montre la barre d'outils supérieure de PHAST lorsqu'un scénario CFD est ouvert.

Elle contient les boutons Run CFD, Stop, 3D, Graphs, GIS et Effects, qui permettent de :

- Lancer la simulation,
- Visualiser les résultats en 3D,
- Générer des rapports et cartes thermiques,
- Explorer les effets thermiques et les conséquences physiques.

### II.3.1.3. Guide visuel

#### 1). Interface principale

- Fenêtre d'accueil avec arborescence des Study Folders, menus de scénarios (Dispersion, Fire, Explosion...).
- Utilisateurs choisissent le scénario à modéliser.

#### 2). Définition des scénarios

- Saisie des conditions de fuite : type de fluide, pression, débit, géométrie du point de rejet.
- Ajout ou sélection d'un scénario Jet Fire par défaut. scribd.com

#### 3). Paramétrage CFD (avec extension)

- Choix de la dispersion via la méthode CFD – KFX pour tenir compte des obstacles et des flux 3D.
- Possibilité de lancer plusieurs scénarios simultanément (batch) pour efficacité. scribd.com+2dnv.com+2dnv.com+2

#### 4). Visualisation des résultats

- Affichage des contours thermiques, zones affectées par la flamme, lignes de surpression, toxicité.
- Export possible des résultats en 3D, sur carte ou via rapports Word/Exce

## II.3.2. FLACS (Flame Acceleration Simulator) – Gexcon

### II.3.2.1. Introduction

**FLACS** est un logiciel de simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) développé par **Gexcon**, spécialement conçu pour l'étude des risques industriels liés aux explosions, aux dispersions de gaz et aux incendies. Il permet d'évaluer avec précision les effets des explosions de gaz ou de poussières dans des environnements complexes, en tenant

compte des interactions avec la géométrie des structures et des conditions atmosphériques. [28]

### II.3.2.2. Fonctionnalités et capacités de FLACS

#### a- Simulation des explosions de gaz et de poussières

FLACS est particulièrement reconnu pour sa capacité à modéliser les explosions dans des environnements industriels complexes. Ses principales applications incluent :

- **Modélisation de la propagation des flammes** : Analyse de l'accélération de la combustion en fonction de la turbulence et de la configuration spatiale (présence d'obstacles, confinement partiel ou total, etc.).
- **Effets de surpression** : Évaluation des impacts des explosions dans des environnements confinés (bâtiments, tunnels, plateformes offshore).
- **Prédiction des dommages** : Étude des effets des explosions sur les infrastructures, les équipements et le personnel.
- **Scénarios complexes** : Analyse des ruptures de confinement, des détonations et des déflagrations en milieux industriels.

#### b- Dispersion de gaz et modélisation des fuites

FLACS permet d'évaluer la dispersion de gaz toxiques ou inflammables après une fuite accidentelle, en prenant en compte :

- **Types de rejets** : Simulation des émissions instantanées ou continues.
- **Conditions météorologiques** : Influence du vent, de la température et de l'humidité.
- **Environnement physique** : Prise en compte de la topographie et de la géométrie des structures.
- **Risques d'explosivité** : Prédiction des concentrations de gaz et évaluation des limites d'explosivité (LEL, UEL).

#### c- Étude des incendies et des effets thermiques

FLACS offre des outils avancés pour simuler les incendies et leurs impacts :

- **Types d'incendies** : Modélisation des feux de nappe (pool fire), de torchère (jet fire) et de jet.
- **Effets thermiques** : Calcul des flux de chaleur et du rayonnement thermique.
- **Gestion des risques** : Analyse de l'effet des barrières de protection et des systèmes de ventilation sur l'évolution des incendies.

#### II.3.2.3. Avantages et points forts de FLACS

- **Précision élevée** : Grâce à ses modèles CFD avancés, FLACS permet de prédire les effets des explosions avec une grande fiabilité.
- **Modélisation réaliste** : Le logiciel intègre les caractéristiques détaillées des structures et des équipements pour des simulations réalistes.
- **Validation expérimentale** : Les modèles de FLACS sont validés par des expériences en laboratoire et des incidents industriels réels.
- **Outil de décision** : FLACS est utilisé par les industries, les régulateurs et les bureaux d'études pour améliorer la sécurité et assurer la conformité aux réglementations SEVESO et ATEX.

#### II.3.2.4. Applications industrielles de FLACS

FLACS est largement utilisé dans plusieurs secteurs industriels pour améliorer la sécurité et optimiser les installations :

- **Industrie pétrolière et gazière** : Simulation des explosions sur les plateformes offshore, les raffineries et les unités de stockage de gaz naturel liquéfié (GNL).
- **Industrie chimique** : Évaluation des risques liés aux fuites de substances toxiques et inflammables.
- **Infrastructures et transport** : Études de sécurité dans les tunnels, les stations de métro et les installations de gaz.
- **Sécurité des bâtiments industriels** : Conception de structures résistantes aux explosions et optimisation des systèmes de ventilation.

FLACS est un outil puissant et polyvalent pour l'analyse des risques industriels, offrant une modélisation précise et réaliste des explosions, des dispersions de gaz et des incendies. Grâce à ses fonctionnalités avancées et à sa validation expérimentale, il est devenu un outil incontournable pour les industries cherchant à améliorer leur sécurité et à se conformer aux réglementations en vigueur.

## II.4. Les scénarios Dangereux

Il existe plusieurs scénarios dangereux potentiels pouvant survenir dans les installations industrielles et susceptibles de provoquer des accidents graves, tels que les feux de nappe (pool fire), les explosions, les feux de jet (jet fire), etc.

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons particulièrement sur le phénomène de Jet Fire.

### II.4.1.JET FIRE

#### II.4.1.1. Définition et caractéristiques principales

Un jet fire est une flamme de diffusion turbulente résultant de la combustion d'un carburant libéré en continu avec une quantité de mouvement significative. Contrairement aux feux de nappe (*pool fires*), il n'y a pas de rétroaction du feu vers la source.

#### Propriétés clés :

- **Réponse rapide** : Atteint son intensité maximale presque instantanément et peut s'éteindre rapidement.
- **Trajectoire orientée**: La trajectoire est influencée par la quantité de mouvement initiale, puis par les forces externes (vent, flottabilité).
- **Stabilité** : Dépend des conditions de fuite, de la géométrie de la source et des obstacles environnants.

### II.4.1.2. Types de jet fires

Tableau 6: Types de Jet fire. [29]

Type	Exemples	Vitesse	Caractéristiques
Subsonique	Torches de raffinerie, propane liquide	$\leq 50$ m/s	Longues flammes, peu efficaces en entrainement d'air, très sensibles au vent.
Sonique (haute pression)	Fuites de gaz naturel à 200 bars	Jusqu'à 300 m/s	Flammes courtes et chaudes, moins de suie, rayonnement dominé par les émissions moléculaires (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O).
Liquides à faible pression de vapeur	Butane, diesel	Variable	Jet liquide persistant, comportement similaire aux pool fires après évaporation.

### II.4.1.3. Facteurs influençant les jet fires

#### ➤ Paramètres physiques

- **Pression et débit** : Déterminent l'intensité et la stabilité de la flamme.
- **Composition du carburant** : Les hydrocarbures lourds (ex. : condensats) produisent plus de suie et de rayonnement.

#### ➤ Environnement

- **Vent** : Modifie la trajectoire et la longueur de la flamme.
- **Obstacles** : Peuvent stabiliser ou dévier la flamme (ex. : structures offshore).

### II.4.1.4. Conséquences et risques

#### ➤ Dangers principaux :

- **Rayonnement thermique** : Peut endommager les structures ou blesser le personnel.
- **Instabilité directionnelle** : Risque d'impact sur des équipements critiques.
- **Forces aérodynamiques** : Menacent les protections passives contre l'incendie.

#### ➤ Gestion des risques

- **Modélisation** : Complexe en milieu offshore en raison des perturbations aérodynamiques locales.

- **Mesures d'urgence** : Blowdown pour réduire la durée du feu, isolement rapide des fuites.

### II.4.1.5. Exemples concrets

- **Fuite de gaz naturel** : Un orifice de 10 mm à 200 bars génère une flamme de 15–20 m avec un débit de 3 kg/s.
- **Blowout de puits** : Un puits de 7 pouces à 300 bars peut libérer jusqu'à 700 kg/s en cas de rupture complète.

### II.4.1.6. Terminologie technique

- **Lift-off** : Distance entre la source et le début de la flamme (plusieurs mètres pour les fuites soniques).
- **SEP (Pouvoir émissif surfacique)** : Utilisé pour quantifier le rayonnement de la flamme.

Les feux de torche (*jet fires*) présentent des risques majeurs dans l'industrie pétrolière, nécessitant une analyse fine des conditions de fuite et des mesures de mitigation adaptées. Leur comportement, très variable, exige des modèles prédictifs intégrant à la fois la dynamique des fluides et les effets environnementaux.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principales approches utilisées pour la modélisation des conséquences d'accidents industriels. Deux grandes familles de méthodes ont été présentées : **les méthodes à fréquences des conséquences**, qui permettent une évaluation probabiliste des scénarios en se basant sur des données historiques et des taux de défaillance ; et **les méthodes dynamiques**, qui intègrent l'évolution temporelle des phénomènes dangereux pour fournir des simulations plus réalistes et détaillées.

Les méthodes comme les **réseaux de Petri**, les **réseaux bayésiens** et les **diagrammes d'états** offrent une structure logique permettant de représenter les enchaînements d'événements et d'estimer les probabilités associées à chaque situation. D'un autre côté, des logiciels de simulation tels que **PHAST** et **FLACS** permettent de modéliser de manière dynamique les effets physiques d'un accident (jet fire, explosion etc.), en tenant compte des conditions environnementales et des caractéristiques des installations.

Cette complémentarité entre méthodes statistiques et outils dynamiques constitue une base solide pour une **analyse de risques complète et fiable**, capable d'orienter efficacement les décisions en matière de sécurité industrielle. Le prochain chapitre portera sur la méthodologie et l'application de ces outils dans le cadre du cas d'étude choisi.

**CHAPITRE III : Analyse dynamique des  
conséquences rupture de conduite à l'entrée du  
turbocompresseur  
(GR4/HRM/TRC/SONATRACH)**

### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude de cas réalisée au sein de la Direction Régionale HRM/ TRC-SONATRACH à Hassi R'mel, en Algérie. Cette étude comprend une introduction à l'établissement ainsi qu'une analyse des risques liés à l'activité de l'entreprise.

Notre travail portera principalement sur l'évaluation des risques associés aux turbocompresseurs. Pour ce fait, nous procéderons à une modélisation dynamique en 3D d'un scénario de feu de torche (Jet Fire), à l'aide du logiciel PHAST DNV version (9.0).

La modélisation portera spécifiquement sur un scénario de feu de torche consécutif à la rupture d'une conduite à l'entrée du turbocompresseur, dans le cas de la station de compression GR4.

### **III.2. Renseignements généraux**

L'Algérie étant l'un des pays leader mondial de la production pétrolière, il concentre essentiellement son économie sur l'exportation des hydrocarbures. C'est la société nationale SONATRACH, créée en décembre 1963, qui gère exclusivement les différentes étapes de production et d'exploitation des hydrocarbures.

La SONATRACH regroupe plusieurs filiales et chaque filiale, jouissant d'une logistique et d'un savoir-faire spécifique, assure un rôle essentiel dans l'exploitation pétrolière, leurs tâches s'étendent de l'extraction des hydrocarbures à l'état brute, jusqu'à l'acheminement du produit vers des sites stratégiques, pour être exporté, ou pour la production de produits dérivés.



ORGANIGRAMME DE LA MACROSTRUCTURE DE SONATRACH

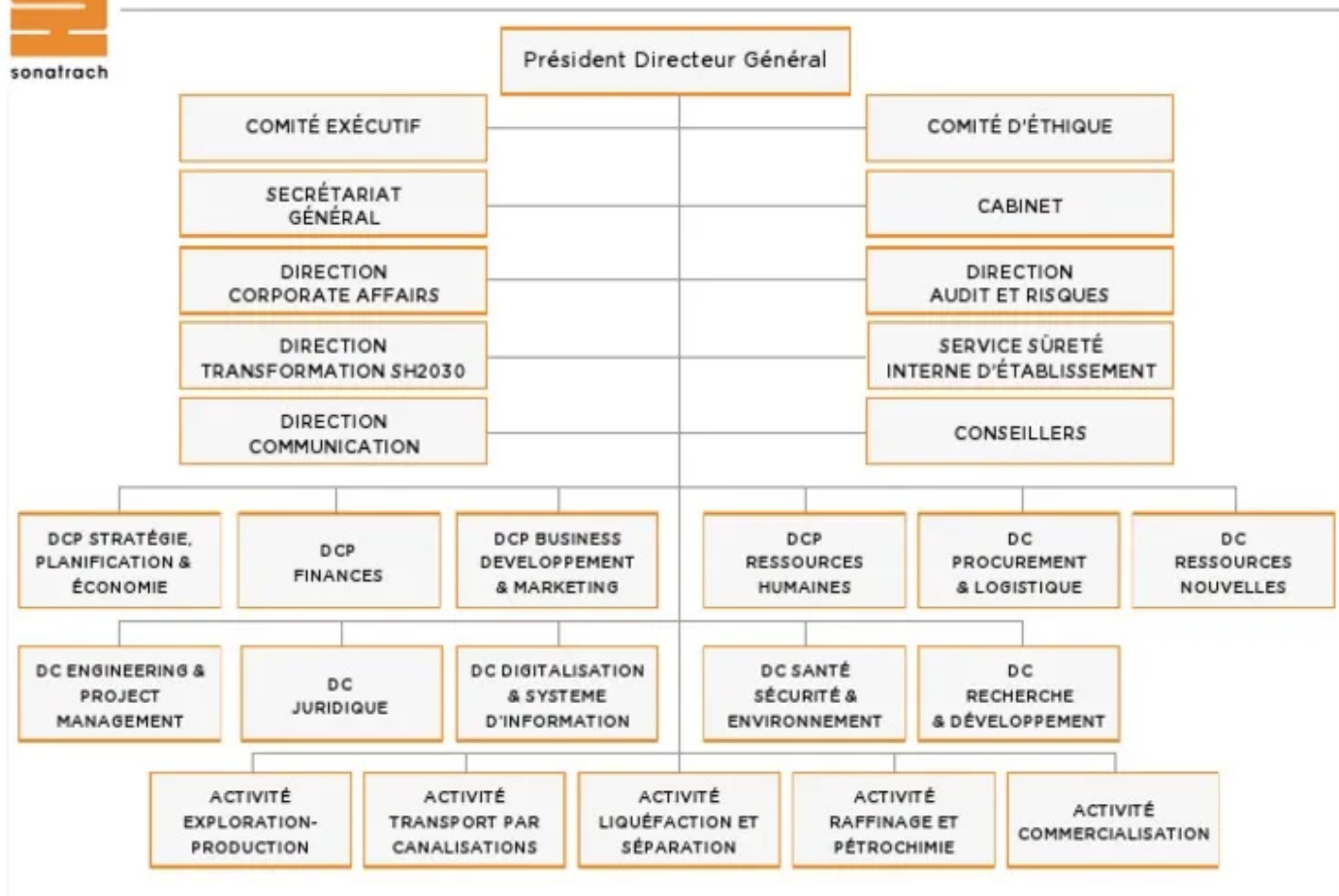


Figure 15: Organigramme de groupe SONATRACH

### III.2.1. L'activité transport par canalisation (TRC)

#### III.2.1.1. Généralités

Dans le cadre de notre stage pratique, nous avons été affectés à la filiale **TRC** (Transport par Canalisation) de **SONATRACH**, chargée du transport des hydrocarbures à travers des pipelines. Ce stage s'est déroulé au niveau de la **région HRM (Hassi R'mel)**, considérée comme un point stratégique dans le réseau de transport des hydrocarbures à l'échelle nationale.



### **III.2.1.3. Identification de l'établissement : Direction Régionale Hassi R'mel**

La Direction Régionale Hassi R'mel a été créée suite à la réorganisation de l'Activité TRC par décision N°407/DG « Réf A-589 (R7) » du 11/04/2019, suivie par son amendement (Cf. Décision N° 85/DG du 08/02/2021, Référencée A-589 « R8 »).

La Direction Régionale HRM, est chargée d'acheminer la quasi-totalité de la production nationale du gaz algérien issue des zones de production. Ses principales missions sont les suivantes :

- La collecte et le transport des quantités de gaz naturel issues des champs du Sud-Est et du Sud-Ouest vers le CNDG ;
- La gestion qualitative et quantitative des flux de gaz issus des champs du Sud-Est et du Sud-Ouest ainsi que du champ HRM, transitant par le CNDG ;
- Le dispatching et expédition des quantités de gaz destinées aux clients nationaux et internationaux, via les Systèmes de Transport par Canalisation (STC) Nord, en respectant la qualité contractuelle spécifique de chaque client ;
- La maintenance des installations industrielles ;
- La sécurité et la protection de l'environnement.

Elle gère les ouvrages suivants :

- Un Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) ;
- Une partie du système STC GR1 / GR2 d'une longueur de 338 Km, à partir du PC 08 HMD vers Hassi R'mel, dont deux (02) Stations de Compression SC4 à HRM et SC3 à Ouargla ;
- Une partie du STC GR4 / GR6 d'une longueur de 293 km, à partir de PS 10 HMD vers le CNDG, dont une Station SCGR4 à HRM ;
- STC GR5 d'une longueur de 766 Km de REGGAN à HRM, avec son looping GR7 d'une longueur de 341 Km d'El Menia à HRM, dont une seule station de compression SCGR5 située à Hassi R'mel.

### **III.2.1.4. Présentation du Site : station de compression de GR4**

La station de compression de Hassi R'mel GR4, est composée essentiellement de 04 turbocompresseurs et de l'ensemble des équipements auxiliaires nécessaires à leur fonctionnement. Le gaz naturel transitant par les gazoducs GR4 et GR6 arrivera à l'entrée de

la station de compression HRM GR4 à une pression d'environ 46 bar. La station a pour mission la recompressions du gaz naturel jusqu'à une pression de refoulement de 71 bars en vue d'assurer son acheminement vers le Centre national de Dispatching Gaz (CNDG) de Hassi R'mel, sans aucune transformation ni modification.

La station fonctionnera en configuration dite (3+1), autrement dit avec un turbocompresseur de réserve qui sera sollicité en cas d'indisponibilité d'un des trois turbocompresseurs par suite d'une défaillance ou pour des besoins de maintenance. Cette configuration permet d'améliorer la disponibilité de la station et par-delà les quantités annuelles de gaz transporté par le STC.

#### **III.2.1.5. Localisation et situation géographique du Site d'étude**

L'assiette accueillant la station de compression GR4 se situe sur un terrain rocheux plat et dénudé de végétation. Elle est limitée :

- A l'Est par la nappe de pipelines du Sud-Est ;
- Au Nord Est par la nappe de pipelines du Sud-Est ;
- A l'Ouest par des terrains dénudés ;
- Au Sud par des terrains dénudés ;
- Au Nord-Ouest à environ 600 m par la station de compression GR1/GR2.

#### **III.2.1.6. Situation géographique de la région d'étude**

La Wilaya de LAGHOUAT est Située au centre du pays à 400 km au sud de la capitale d'Alger, la wilaya s'étend sur une superficie de 25 000 km<sup>2</sup>, située à plus de 750 mètres d'altitude sur les hauts plateaux, la wilaya de Laghouat est traversée par la chaîne de l'Atlas Saharien avec des sommets qui dépassent les 2 000 mètres ("Djebel Amour" 2 200 mètres).

La position géographique de la wilaya de LAGHOUAT est située entre :

- 32° 48' 50'' et 34° 41' 57'' Latitude Nord ;
- 1° 20' 12'' et 4° 28' 45'' Longitude Est.

La Wilaya de Laghouat est limitée Géographiquement :

- Au nord par la wilaya de Djelfa.

- A l'Est par la wilaya de Djelfa.
- A l'Ouest par les wilayas de Tiaret et EL Bayadh.
- Au Sud par la wilaya de Ghardaïa



**Figure 17: Plan de situation de la station de compression GR4**

### **III.2.1.7. Description de l'environnement immédiat de la Station de Compression GR4**

La Station de Compression GR4 est située dans la commune de Hassi R'mel, Daïra de Hassi R'mel, Wilaya de Laghouat. Elle est située hors de la zone urbaine, à environ 5 kilomètres au Sud Est de l'actuel CNDG, à 600 m au Sud Est de la station de compression GR1/GR2 dans la commune de Hassi R'mel, wilaya de Laghouat, cette commune constitue la porte du désert, elle se trouve à 550 Km au Sud d'Alger, dans cette région relativement plate du Sahara septentrional, l'Altitude moyenne est d'environ 747 m.

### **III.2.1.8. Les vents et déplacements de sable :**

Il n'y a pas de désert sans vents. En effet, le vent est le facteur principal de la topographie désertique. Pendant certaines périodes de l'année, en général en Mars et Avril, on assiste au Sahara à de véritables tempêtes de sable.

Des trompes de sable se déplacent avec violence atteignant plusieurs centaines de mètres de haut. L'obscurité règne et toute activité cesse. Ces phénomènes peuvent durer d'un

à trois jours et plus, avec cependant une accalmie durant la nuit. Des masses de sable peuvent être transportées à des distances considérables.

Les vents qui ne trouvent plus d'obstacles à leur progression sur les régions dénudées apportant la sécheresse. L'érosion éolienne prend la relève de l'érosion hydrique. Les vents dominants d'été sont forts et chauds tandis que ceux d'hiver sont froids et humides. La dynamique éolienne présente un facteur potentiel de perte de productivité lors de l'ensablement des zones de culture ou de déflation des sols notamment.

### III.2.1.9. Les vents à LAGHOUAT :

La région de Laghouat est relativement sujette au risque de tempêtes de sable, particulièrement, durant le mois d'Avril avec 04 jours au maximum. Les Vents dominants, en moyenne, dans la région considérée dans cette étude est de type Nord - Nord /Ouest avec des vitesses maximales moyennes de 180m/s.

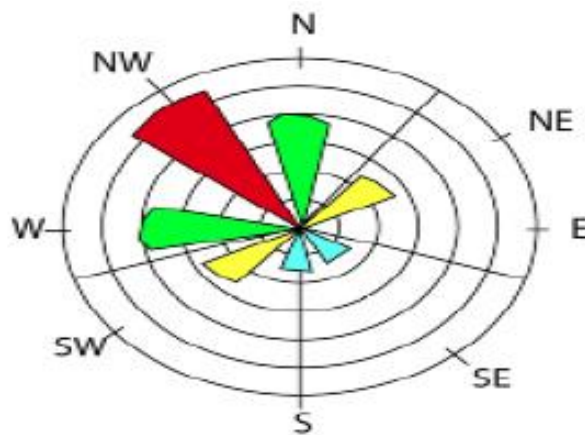


Figure 18: Les fréquences des vents à LAGHOUAT

Les vents les plus fréquents au sol, d'après la station de Laghouat, soufflent essentiellement du Nord-Ouest, globalement pour les 7h, 13h et 18h (représentant 30% de fréquence). Les autres directions des vents représentent respectivement : Nord (15%), Ouest (1%), Sud-Ouest (10%), Nord-Est (10%), Sud (3-8%), Sud-Est (5%) ; les fréquences inférieures à 3% ne sont pas prises en compte.

**Tableau 7: Les fréquences en chiffre des vents à LAGHOUAT**

<b>Directions</b>	<b>Fréquences</b>
<b>NW</b>	30 %
<b>W</b>	15%
<b>N</b>	15%
<b>SW</b>	10%
<b>NE</b>	10%
<b>SE</b>	5%
<b>S</b>	3 – 8%

En analysant les fréquences annuelles des vents, nous remarquons que la période allant de Novembre à Mars se caractérise par les vents dominants Nord-Ouest. De Juin à Septembre, la direction Sud-Ouest apparaît nettement au dépend de la direction Nord-Ouest qui s'estampe à son tour. La direction Sud-Est joue probablement un rôle déterminant dans la mise en place des placages de bas de versants Est et Sud-Est des crêtes et de la grande dune. Il s'agit d'une direction préférentielle des vents de sable d'été plus violents en général qu'en hiver.

La période estivale favorise également la déflation des sédiments dans les oueds à sec.

### **III.2.1.10. Description de la station de compression GR04 et ses différentes installations :**

La station est située à Hassi R'mel. En amont de la station de compression se trouve un poste de coupure GR4.

**Les unités composant la station de compression sont les suivantes :**

- Unité 1 – Filtration ;
- Unité 2 – Compression ;
- Unité 3 – Aéroréfrigérant ;
- Unité 4 – Drainage ;
- Unité 5 – Torche,
- Unité 6 – Eau incendie ;

- Unité 7 – Gaz combustible ;
- Unité 8 – Utilités : Air instrument et service, Azote, Eau service et potable, Huile de Lubrification, Gazole, essence, etc.

**La station de compression se compose essentiellement des installations et équipements suivants:**

- Quatre filtres séparateurs à multi cyclones ;
- Quatre turbocompresseurs sous bâtiments individuels ;
- Un turbogénérateur sous bâtiment ;
- Une batterie d'aéroréfrigérant du gaz procédé ;
- Un système de comptage ;
- Un Skid de conditionnement des gaz combustibles ;
- Un système de drainage ;
- Un système de torche ;
- Un système de génération d'air comprimé ;
- Un système de production d'azote gazeux ;
- Un puits d'eau ;
- Une unité de filtration de l'eau avec réservoir ;
- Une unité de traitement de l'eau brute (potabilisation) ;
- Un système de stockage d'huiles neuves et usagées ;
- Un système de stockage du gazole pour générateur de secours et pompe incendie diesel ;
- Un système eau anti-incendie avec réservoir ;
- Un groupe électrogène de secours ;
- Un système de mise à la terre ;
- Un système de protection cathodique ;
- Un bassin d'évaporation

- Un bâtiment de contrôle (salle de contrôle, local télécom, local technique, bureaux) ;
- Un bâtiment électrique, salle de batteries, local grillagé pour transformateur ;
- Un bâtiment maintenance et atelier
- Un bâtiment de sécurité ;
- Un poste de garde
- Un système de télésurveillance ;
- Un système de protection contre la foudre ;
  - Un bâtiment laboratoire ;
  - Une station de distribution de carburant (essence et gasoil) aux véhicules

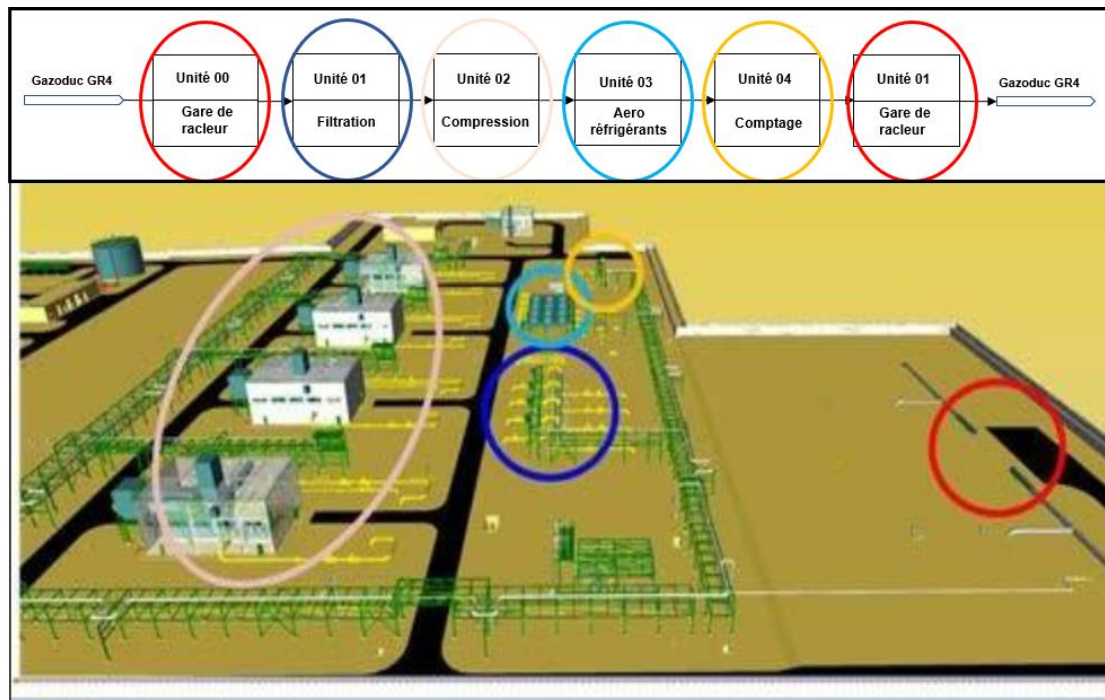


Figure 19: Unités principales de la station de compression GR4

#### III.2.1.11. Données de procédés :

Le Fluide Procédé, Gaz Naturel, provient de l'ensemble des collectes de gaz des puits du Sud Est, de la région de Adrar, ainsi que de toutes les injections le long de la ligne GR4 jusqu'à Hassi R'mel.

Les Gaz associés auront été préalablement traités sur les Champs de Production : séparation triphasique, Flashs, Déshydratation, etc., pour atteindre une Masse Molaire proche de 19 kg/môle.

La composition moyenne et les propriétés physicochimiques du gaz sont données par les tableaux suivants :

**Tableau 8: Composition moyenne du gaz naturel transporté**

<b>Composant</b>	<b>% molaire</b>
<b>Hélium He</b>	0,03
<b>Azote N2</b>	0,57
<b>Gaz carbonique CO2</b>	3,04
<b>Méthane C1</b>	83,79
<b>Ethane C2</b>	10,4
<b>Propane C3</b>	1,86
<b>i-Butane i-C4</b>	0,12
<b>n-Butane n-C4</b>	0,15
<b>i-Butane i-C5</b>	0,02
<b>i-Pentane i-C5</b>	0,02
<b>n-Pentane n-C5</b>	0,00
<b>i-Hexane i-C6</b>	0,00
<b>n-Hexane n-C6</b>	0,00
<b>Heptane+C7</b>	0,00
<b>L'eau H2O</b>	0,00
<b>Total</b>	100%

**Tableau 9: Propriétés physico-chimiques du gaz naturel**

Masse Volumique	0.808	Kg/Sm3
Masse Volumique	0.854	Kg/Sm3

Densité	0.658	
Viscosité dynamique (Cond.N.)	0.0128	cP 3
PCS	40.71	MJ/Sm
PCI Massique	45.49	MJ/Kg3
PCI	36.8	MJ/Sm3
Indice de wobbe	50.11	MJ/Sm
Masse Molaire	19.07	Kgh/Kmol

Notre étude sera concentrée sur le turbo compresseur N1 de la station de compression GR04 HRM, et pour faciliter la modélisation on va utiliser logiciel PHAST DNV 9.0.

### III.3. Les caractéristiques des turbocompresseurs

#### III.3.1. Compresseur centrifuge

Le gaz de procédé est comprimé par un compresseur centrifuge entraîné à l'aide d'une turbine à gaz via un accouplement.

#### III.3.2. Turbine à gaz

La turbine à gaz est une turbine du type aéroderivative à deux arbres. Elle est composée d'une turbine liée au compresseur et l'ensemble est appelée générateur de gaz et d'une turbine libre appelée turbine de puissance utilisée comme turbine d'entraînement. La turbine de puissance est du type à double expansion. Elle est alimentée par des gaz chauds provenant du générateur de gaz.

Les consommations et les émissions de la turbine sont les suivantes :

- Consommation de gaz : 3 635 kg/h ;
- Émissions :
  - **NO<sub>x</sub>** : inférieure à 200 mg/Nm<sup>3</sup> à 15 % O<sub>2</sub> ;
  - **CO** : inférieure à 150 mg/Nm<sup>3</sup> à 15 % O<sub>2</sub>.

**La turbine de puissance est équipée des systèmes auxiliaires suivant :**

A. Huile synthétique pour générateur de gaz :

**B.** Huile minérale pour le compresseur centrifuge et la turbine HP :

**C.** Système de ventilation du package turbine

**D.** Système d'insonorisation du package turbine

**E.** Système d'échappement des gaz brulés et silencieux

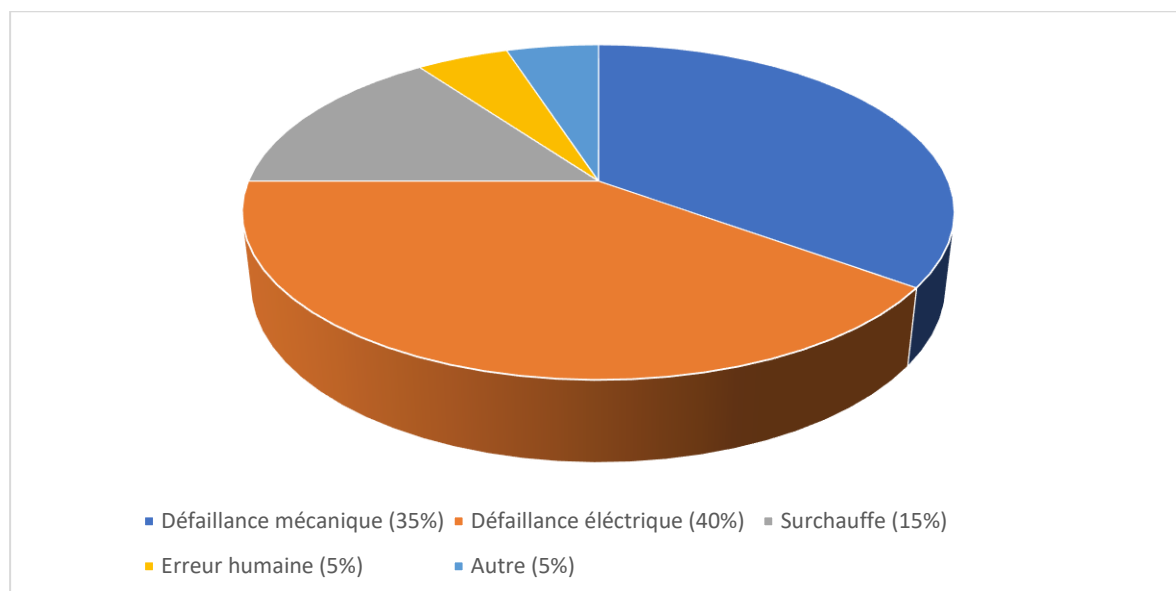
### III.4. Evaluation de l'accidentologie

L'étude de l'historique des accidents survenus dans le domaine de transport par canalisation permet de déceler les différents aspects relatifs à l'apparition de ces accidents en termes de cause et effets afin de pouvoir déterminer le savoir-faire pour les réduire et rendre leur criticité acceptable.

L'analyse du retour d'expérience permet de dégager des fréquences d'incident représentatives et d'identifier les principales sources de dangers. Elle est fondée sur les données disponibles au niveau mondial, via la base de données internationale.

#### III.4.1. Incidents sur les compresseurs de gaz

Concernant les compresseurs, la consultation de la base de données ARIA recense 20 accidents représentant un intérêt dans l'analyse de l'accidentologie. La répartition par origine des 20 évènements répertoriés est la suivante :



**Figure 20: Répartition par origine des accidents répertoriés des compresseurs**

Les causes d'accident les plus fréquentes pour les compresseurs sont un défaut électrique, court-circuit de l'équipement ou un défaut mécanique entraînant la rupture d'un piquage ou une brèche sur une ligne (gaz ou huile de lubrification). La rupture de l'arbre de compression est également possible. Les erreurs humaines viennent en quatrième position avec 5 % des cas.

Le tableau ci-après montre les mesures à mettre en place sur les installations projetées à la suite de l'étude des causes d'accidents intervenant sur ce type d'équipement.

**Tableau 10: Retour d'expérience sur les accidents répertoriés sur les compresseurs**

Défaillance ayant conduit aux accidents	Mesure de prévention mises en place
Défaillance électrique : Court-circuit, étincelles, rupture de fusible	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Procédure de maintenance</li> <li>– Inspection visuelle</li> <li>– Inspections générales planifiées des équipements</li> <li>– Protection F&amp;G</li> </ul>
Défaillance mécanique : Rupture piquage, brèche sur une ligne ou rupture de l'arbre	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Procédure de maintenance</li> <li>– Inspection visuelle</li> <li>– Inspections générales planifiées des équipements</li> <li>– Protection F&amp;G</li> </ul>
Facteur humain : dispositif non désactivé, non-respect des procédures	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Formation du personnel</li> <li>– Procédure de démarrage des équipements</li> <li>– SGS et audits HSE réguliers</li> </ul>
Surchauffe : défaillance du compresseur, défaut de fabrication	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Alarme de température haute</li> </ul>

La principale conséquence des accidents sur les compresseurs est l'incendie, l'explosion ou le jet enflammé.

Pour réduire ce risque les procédures de maintenance et d'arrêt des installations devront être détaillées et une inspection visuelle régulière des installations devra être réalisée.

Un dispositif de protection incendie au CO<sub>2</sub> sera également installé sur la turbine.

### III.5. Description de la démarche d'identification, d'analyse et d'évaluation des risques utilisé dans la station

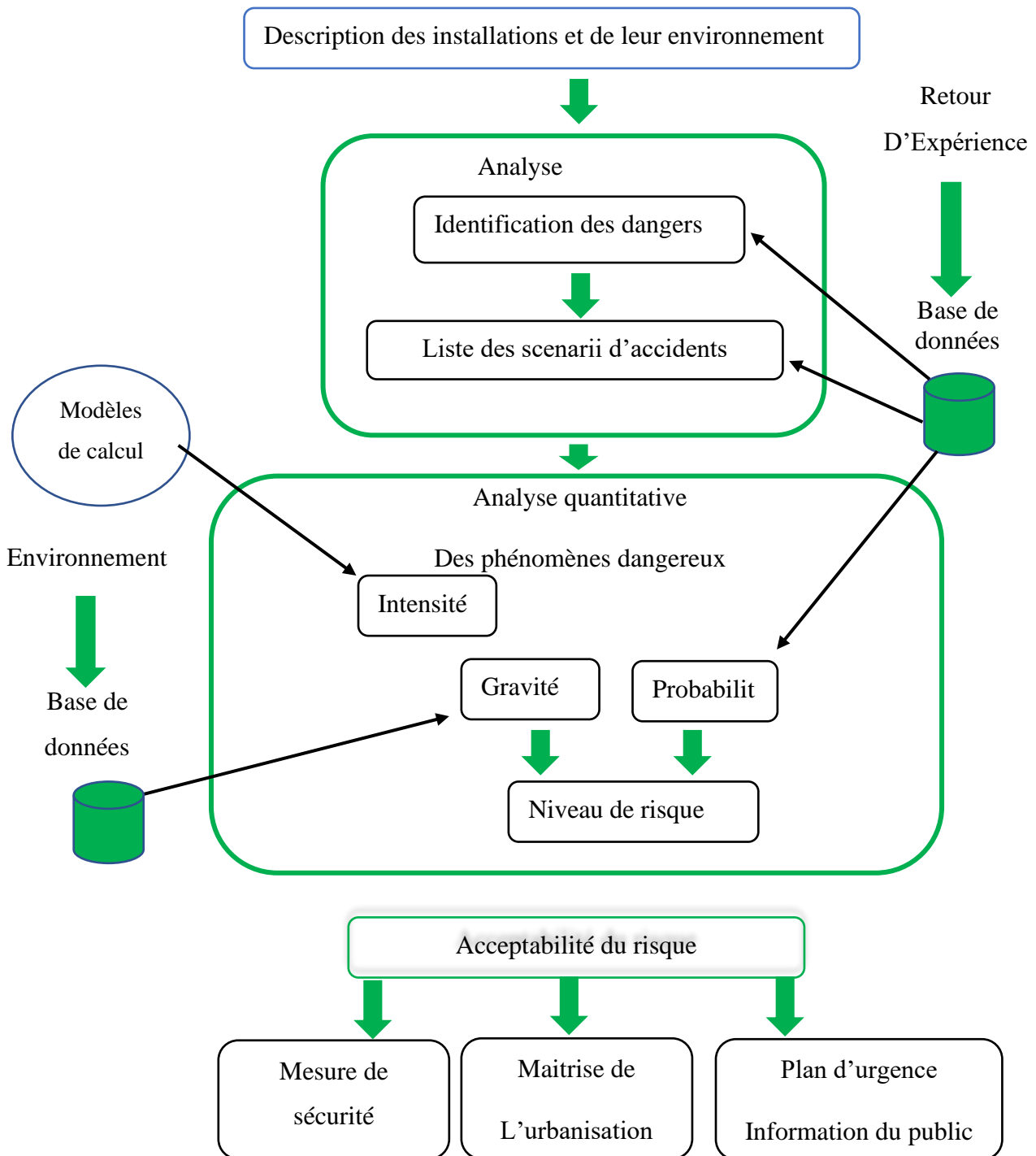


Figure 21: Logigramme de méthode d'analyse des risques

-Une Analyse Préliminaire des Risques (APR) a été effectuée dans le cadre de cette étude par la société **EURL International HSE Services and Consulting**

**Tableau 11: Méthode d'analyse des risques APR**

Unités/ Equipements			Conséquences	F	G	N	Mesure de sécurité existantes sur site	F	G	N	Commentaires
Lignes « collectrices » d'aspiration Et de refoulement de chaque TC - Compresseur 001-K-01	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuite de gaz :</li> <li>-Fuite</li> <li>-Rupture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perte de qualité et/ou vieillissement des joints</li> <li>- Résistance au choc /flexion - usure ;</li> <li>- Corrosion chimique et électrolytique (rare)</li> <li>- Changement du régime de pression.</li> <li>- choc externes (travaux de tiers,)</li> <li>- Mauvaise qualité d'exécution des assemblages (brasures, filetage.)</li> <li>- Des ruptures dues à la mauvaise exécution des assemblages</li> </ul>	-Dispersion et formation de nuage du gaz inflammable / explosive	1	3	Tolérable	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Formations et sensibilisation</li> <li>-DéTECTEURS et transmetteurs de paramètres physiques (P, T, F) reliés à la salle de contrôle ;</li> <li>-Déclenchement automatique des alarmes visuelles et audibles sur site</li> <li>- Système HIPPS pour chaque TC ;</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes d'aspiration/refoulement et une 002-BDV-X03 vers torche);</li> <li>- 01PSV 002-PSV-X01 pour chaque TC (ligne de refoulement)</li> <li>- Protection cathodique</li> <li>- Parafoudre de toute la station</li> <li>- Inspection et Tests périodique</li> <li>- Vérification et rondes périodique</li> </ul>	1	1	Acceptable	Au regard des dégâts illimités sur parties adjacentes, le risque est jugé acceptable.

<p>(Suite)</p> <p><b>Lignes « collectrices » d'aspiration Et de refoulement de chaque TC - Compresseur 001- K-01</b></p>	<p><b>• Incendie Type feu éclair / feu torche</b></p> <p>Dû aux petites et moyennes et brèches</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fuite de petite, de moyenne brèche (voir les causes précitées)</li> <li>-Source d'ignition immédiate/différée :</li> <li>- spontanément si :</li> <li>- sa température est suffisamment élevée (TAI);</li> <li>- par effet électrostatique ;</li> <li>- par frottement au niveau du point de fuite (EMI=0,29 mJ) ;</li> <li>- présence de points chauds ;</li> <li>- présence d'une étincelle située à proximité</li> <li>- par action de foudre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Effet thermiques</li> <li>- Atteinte au filtre</li> <li>-Atteintes et blessures humaines (selon la présence)</li> <li>- Pollution</li> <li>- Possible Effets dominos des unités adjacentes</li> </ul>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>Tolérable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alarme manuelle sur site</li> <li>- Rondes périodiques ;</li> <li>- Système HIPPS pour chaque TC ;</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes d'aspiration/refoulement et une 002-BDV-X03 vers torche);</li> <li>- Réseau anti-incendie</li> <li>- Plan d'intervention périodique</li> <li>- Vérification et rondes périodique</li> <li>- Inspection et Tests périodique</li> <li>- Parafoudre de toute la station</li> <li>- Maintenance préventive</li> <li>- Procédure et Permis de travail</li> <li>- Formations et sensibilisation</li> <li>- Conformité des équipements ATEX</li> <li>- Mise à la terre et liaison équipotentielle</li> </ul>	<p>1</p>	<p>1</p>	<p>Acceptable</p>	
--	--	--	---	----------	----------	------------------	--	----------	----------	-------------------	--

CHAPITRE III : Analyse dynamique des conséquences

<p><b>Unité de compression du gaz</b>  <b>Partie Building</b>  <b>- Compresseur001-K-01</b></p>	<p>- Fuite de gaz de petite, de moyenne et de majeure brèche</p>	<p>Raccords desserrés sous l'effet de la vibration          - Vannes et Pompes fuyardes ;          - Perte d'étanchéité au niveau des raccords, et des vannes, des piquages des instruments de mesure ;          - corrosion interne des conduites ;          - Joints défectueux au niveau des brides          - Choc externe (travaux de maintenance)          - Défauts de maintenance</p>	<p>Formation de nuage de gaz inflammable l'intérieur de building.</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>Tolérable</p>	<p><b>Mesures à l'intérieur de TC (building):</b>          - Personnel formé et sensibilisé.          - Système De Détection D'incendie Ou De Gaz relié à la salle de contrôle.          - Détecteurs thermo-vélocimétriques installés au plafond ;          - Détecteur s catalytique du gaz locaux          - Détecteur du gaz (skid) reliés à salle de contrôle          - Événements passifs d'aération du building          - Rondes périodiques ;          - Alarme manuelle lumineuse et sonore          - Déclencheurs manuels près des portes de sortie.          - Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes d'aspiration/ refoulement et une 002-BDV-X03 vers torche);          - Rondes du personnel (Exploitation et HSE) ;</p>	<p>1</p>	<p>1</p>	<p>Acceptable</p>	<p>Au regard des dégâts illimités sur parties adjacentes, le risque est jugé acceptable.</p>
---	--	---	---	----------	----------	------------------	--	----------	----------	-------------------	--

<p>(Suite)  <b>Unité de compression du gaz</b>  <b>Partie Building</b>  <b>- Compresseur001-K-01</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incendie Flash fire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation du nuage inflammable</li> <li>- Évacuation insuffisante par les événements de TC;</li> <li>- Non détection de fuite ;</li> <li>- Source d'ignition immédiate/différée :             <ul style="list-style-type: none"> <li>- spontanément si :                 <ul style="list-style-type: none"> <li>- sa température est suffisamment élevée (TAI);</li> <li>- par effet électrostatique</li> <li>- par frottement au niveau du point de fuite (EMI=0,29 mJ) ;</li> <li>- présence de points chauds/présence d'une étincelle située à proximité</li> <li>- par action de foudre</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<p>Endommagement et arrêt de TC voire de l'unité de compression</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possible arrêt de la station</li> <li>- Risque de pollution</li> <li>- Atteintes humaines</li> <li>- Atteintes et blessures humaines</li> <li>- pollution</li> <li>- Effets dominos des unités adjacentes</li> </ul>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>Tolérable</p>	<p><b>Mesures à l'intérieur de TC (building):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Système De Détection D'incendie Ou De Gaz relié à la salle de contrôle.</li> <li>- Détecteurs de chaleur / flamme locaux</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-101et 002-ESDV-102 des lignes de refoulement/aspiration et une 002-BDV-103 vers torche);</li> <li>- Système de déluge (H2O) manuel (BP) composé de (08) détecteurs de flamme, de plusieurs points pulvérisateurs (buses);</li> <li>- Extinction manuelle</li> <li>- ESD de TC est doté manuelle (BP)</li> <li>- Alarme manuelle lumineuse et sonore</li> <li>- Événements passifs d'aération du building</li> <li>- Rondes périodiques</li> <li>- Mise à la terre et liaison équipotentielle</li> </ul>	<p>1</p>	<p>1</p>	<p>Acceptable</p>	<p>Au regard des dégâts pouvant atteindre les autres parties adjacentes importantes, le risque est jugé au moins tolérable.</p>
--	---	---	---	----------	----------	------------------	--	----------	----------	-------------------	---

<p><b>Turbine à gaz Enceinte de TC (002-M-01) - Compresseur 001- K-01</b></p>	<p><b>• Fuite au niveau de l'enceinte</b>  (GG) * Fuite gaz * Fuite huile hydraulique</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flexibles déchirés ou arrachés</li> <li>- Raccords desserrés sous l'effet de la vibration</li> <li>- Perte d'étanchéité au niveau des raccordements, et des vannes, des piquages des instruments de mesure ;</li> <li>- corrosion interne des conduites ;</li> <li>- Garnitures, brides et Joints défectueux</li> <li>- Choc externe (travaux de maintenance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation de nuage du gaz inflammable / explosive à l'intérieur de l'enceinte</li> </ul>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>Tolérable</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Détecteurs et transmetteurs de pression reliés à la salle de contrôle (P, T,... etc.);</li> <li>- Système de détection de gaz</li> <li>- Système de détection d'Incendie : détecteurs de flammes UV/IR et des détecteurs de chaleur Thermo-vélocimétriques à l'intérieur de turbine ;</li> <li>- Déclenchement automatique des alarmes visuelles et audibles dans la SALLE DE CONTRÔLE,</li> <li>- Arrêt d'urgence ESD de la turbine (doté d'un Bouton poussoir DME-034 manuel) ;</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes de refoulement/aspiration et une 002-BDV-X03 vers torche);</li> </ul>	<p>1</p>	<p>1</p>	<p>Acceptable</p> <p>Au regard des dégâts illimités sur parties adjacentes, le risque est jugé acceptable.</p>
---	---	---	---	----------	----------	--	----------	----------	--

<p>(Suite)  <b>Turbine à gaz</b>  <b>Enceinte de TC</b>  <b>(002-M-01)</b>  <b>- Compresseur 001-K-01</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incendie À l'intérieur de GG Enceinte Génératrice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation du nuage inflammable</li> <li>- Non détection de la fuite ;</li> <li>- Source d'ignition immédiate générée par les parties chaudes de la turbine)</li> </ul>	<p>Endommagement et arrêt de TC voire de l'unité de compression</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possible arrêt de la station</li> <li>- Atteintes humaines</li> <li>- Atteintes matérielles</li> </ul> <p>Pollution (fumées...etc.)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Effets dominos des unités adjacentes ;</li> </ul>	<p>2</p>	<p>5</p>	<p>Inacceptable</p>	<p><b>Système de détection et d'extinction (F&amp;G), doté de:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Six (06) détecteurs ultraviolets de gaz installés comme suit: deux (02) détecteurs de gaz inflammable montés à l'entrée du système d'aération de l'enceinte, deux (02) détecteurs de gaz montés à la sortie du système d'aération, deux (02) détecteurs de gaz montés à l'aspiration de l'air de combustion de la turbine.</li> <li>- 05 Actionneurs (buses) : 05 au niveau de la turbine, 01 au niveau de compresseur,</li> <li>- Système de détection d'Incendie : détecteurs de flammes UV/IR et des détecteurs de chaleur Thermo-vélocimétriques à l'intérieur de turbine ;</li> <li>- Arrêt d'urgence ESD de la turbine (doté d'un Bouton poussoir DME-034 manuel) ;</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes de refoulement /aspiration et une 002-BDV-X03 vers torche);</li> <li>- Réseau anti-incendie ;</li> <li>- ESD globale de la station</li> </ul>	<p>1</p>	<p>2</p>	<p>Acceptable</p>	<p>Au regard des dégâts pouvant atteindre les autres parties adjacentes importantes, le risque est jugé au moins tolérable.</p>
---	---	---	---	----------	----------	---------------------	--	----------	----------	-------------------	---

<p>(Suite)  <b>Turbine à gaz</b>  <b>Enceinte de TC</b>  <b>(002-M-01)</b>  <b>- Compresseur 001-</b>  <b>K-01</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explosion Interne de la turbine (Surpression)</li> </ul>	<p>Surpression interne (défaillance de régulation)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fragilisation de garniture mécanique et Perte d'épaisseur</li> <li>- source d'ignition immédiate lors de rupture</li> <li>- corrosion le bouchage du compresseur</li> <li>- entrée d'objets étrangers dans le compresseur</li> <li>- phénomène de pompage du compresseur ;</li> </ul>	<p>Endommagement et arrêt de TC voire de l'unité de compression</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possible arrêt de la station</li> <li>- Effets dominos des unités adjacentes</li> <li>- Pollution (fumée...etc.)</li> <li>- Atteintes humaines</li> </ul>	<p>2</p>	<p>5</p>	<p>Inacceptable</p>	<p>1</p>	<p>2</p>	<p>Acceptable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système de prise d'air</li> <li>- Une seule « PSV 002-PSV-101 » au niveau de la ligne de refoulement ;</li> </ul> <p><b>Système de détection et d'extinction (F&amp;G), doté de:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Six (06) détecteurs ultraviolets de gaz installés comme suit: deux (02) détecteurs de gaz inflammable montés à l'entrée du système d'aération de l'enceinte, deux (02) détecteurs de gaz inflammable montés à la sortie du système d'aération, deux (02) détecteurs de gaz montés à l'aspiration de l'air de combustion de la turbine.</li> <li>- 05 Actionneurs (buses) : 05 au niveau de la turbine, 01 au niveau de compresseur axial,</li> <li>- Arrêt d'urgence ESD de la turbine (doté d'un Bouton poussoir DME-034 manuel) ;</li> <li>- Système d'arrêt d'urgence : ESD de chaque TC, composé de (06) détecteurs de gaz, deux (02) ESDV (002-ESDV-X01et 002-ESDV-X02 des lignes de refoulement/aspiration et une 002-BDV-X03 vers torche);</li> <li>- Réseau anti-incendie ;</li> <li>- ESD globale de la station</li> </ul>
--	---	---	--	----------	----------	---------------------	----------	----------	-------------------	--

CHAPITRE III : Analyse dynamique des conséquences

La matrice de risques utilisée, les classes de gravité et de probabilité sont décrites en détails ci-après :

**Tableau 12: Matrice d'analyse des risques**

					Probabilité				
					Improbable	Eloigne	Occasionnelle	Probable	Fréquent
Gravité	Population	Assets	Environnement	Réputation	Survenu dans l'industrie mondiale mais pas à l'entreprise	Survenu dans un notre site de l'entreprise	Survenu dans le même site	Survenu plusieurs fois dans l'année dans le même site	Survenu plusieurs fois dans l'année dans le même endroit ou durant la même opération
5-Catastrophique	Plusieurs fatalités	Domage très important	Effet massif	International impact					
4-Sévère	Une fatalité ou une invalidité permanente	Domage important	Effet majeur	National impact					
3-Critique	Blessure grave ou des effets sur la santé	Domage limité	Effet limité	Impact considérable					
2-Marginal	Blessure mineure ou des effets sur la santé	Domage mineur	Effet mineur	Impact mineur					
1-Négligeable	Blessure légère ou des effets sur la santé	Domage léger	Effet léger	Impact léger					

### III.6. Identification des facteurs de risques générés par la station GR4

L'objectif de cette partie est d'identifier, de façon la plus exhaustive possible les dangers (intrinsèques et extrinsèques) liés aux produits, à l'environnement, à l'erreur humaine et au procédé mis en œuvre qui pourraient entraîner un accident, qu'elles aient déjà conduit à un accident ou non.

Seuls sont retenus les évènements physiquement probables à l'exclusion de ceux résultant des actes de malveillance.

#### III.6.1. Facteurs de risques intrinsèques

Les facteurs de risques ont été analysés de façon détaillée dans la partie d'évaluation préliminaire des risques. Ils sont liés aux :

- Effets dominos depuis une installation voisine : explosion, feu, projectiles.
- Conditions météorologiques (tempête de sable, vents violents, orage, foudre, températures ambiantes extrêmes) ;
- Impact dû à la circulation extérieur (véhicules, engins) et aux accidents d'aéronefs ;
- Aux actes malveillants.

#### III.6.1.2. Dangers liés aux produits

Le gaz naturel est un gaz non toxique. Il peut causer l'asphyxie à concentration élevée.

Le gaz naturel est toutefois odorisé sur les réseaux de distribution pour que les personnes détectent sa présence pour des taux inférieurs à 1% de gaz dans l'air.

Tableau 13: Propriétés physiques et chimiques du gaz naturel

Propriétés physiques et chimiques	
Point de fusion/congélation	-183°C à 1013 hPa (valeur du méthane)
Point d'ébullition	-161°C à 1013 hPa (valeur du méthane)
Point de rosée eau	<-5°C à la pression d'exploitation (valeur du méthane)
Température d'auto-inflammation	600°C à pression atmosphérique (valeur du méthane selon norme CEI 60079-20)
Point éclair	-188°C (valeur du méthane)
Domaine d'inflammabilité	Proportion de gaz naturel de 5% (LII) à 15 % (LSI) dans l'air
Densité relative, gaz (air = 1)	0,54 à 0,66 à 0°C (gaz plus léger que l'air)
Masse volumique	0,7 à 0,85 kg/m <sup>3</sup> (n)
Pouvoir calorifique supérieur	Entre 9,5 et 12,8 kWh/m <sup>3</sup> (n)
Tension de vapeur	147 kPa (méthane)
Solubilité dans l'eau à 20°C	Solubilité faible à nulle (0,03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> à 0,08 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> à 20°C)

### **III.6.1.3. Effets sur la santé humaine**

Au vu des dernières données scientifiques, la commission européenne a décidé que les gaz naturels contenant du benzène peuvent être mis sur le marché en vue de leur utilisation par les consommateurs) condition que la concentration en benzène soit inférieure à 0,1 %. [30]

Le gaz naturel n'a pas d'effets toxicologiques par inhalation connus à ce jour et les expositions éventuelles sont rares compte tenu de la très forte volatilité du gaz dans l'air.

L'inhalation de ce gaz peut entraîner l'asphyxie par la diminution de la teneur en oxygène de l'air dans des pièces fermées (atmosphère confinée). Symptômes possibles lors d'une exposition trop importante, réversibles en réduisant l'exposition : difficulté respiratoire, somnolence, maux de tête, confusion, perte de la coordination, troubles visuels ou vomissements.

### **III.6.1.4. Effets sur l'environnement**

Le gaz naturel n'est pas dangereux pour les différents compartiments environnementaux (air, eau, sol). Le gaz naturel est constitué en grande partie de méthane qui est un gaz à effet de serre. Ses émissions contribuent au réchauffement climatique.

Le gaz naturel n'est pas toxique pour les poissons, les organismes aquatiques vertébrés, les plantes aquatiques, les organismes pédologiques, les plantes terrestres et autres organismes terrestres non mammifères, y compris les oiseaux.

### **III.6.1.5. Inflammation**

Le gaz naturel est combustible ; il peut s'enflammer dans certaines conditions en présence d'air et d'une source de chaleur. Sa limite inférieure d'inflammabilité est de 5 % de gaz dans l'air et sa limite supérieure d'inflammabilité est de 15 %.

### **III.6.1.6. Explosion du mélange air- gaz**

En milieu libre (non confiné) : le gaz naturel ne détone pas et son inflammation conduit à de faibles surpressions. En milieu confiné : il peut y avoir explosion (déflagration) en cas d'inflammation d'un volume de gaz suffisant.

### III.6.1.7. Gaz comprimé

Le gaz naturel est transporté en phase gazeuse par canalisations sous une pression pouvant aller jusqu'à 70 bars. La libération du gaz comprimé à forte pression peut s'accompagner de projections d'objets (éclats métalliques, terre, pierres).

### III.6.1.8. Bruit

Le niveau sonore émis durant la mise à l'évent dépend de la pression et peut entraîner des lésions sur le système auditif humain.

### III.6.1.9. Anoxie

En milieu confiné, de par sa composition, le gaz naturel peut agir à forte concentration, par inhalation, comme gaz asphyxiant par privation d'oxygène.

### III.6.1.10. Froid

La détente provoque un refroidissement du gaz de l'ordre de 0,5 °C par bar de détente. La température résultante peut atteindre les -20 °C.

## III.7. Dangers liés aux Turbocompresseurs

Le tableau ci-dessous résume les dangers potentiels présentés par les turbocompresseurs au niveau de la station de compression GR4 qui provoque des dégâts énormes pour le personnel, installations et environnement.

Tableau 14: Dangers liés aux équipements

Equipements	Conditions opératoires	Potentiel de danger
Turbocompresseurs	Phase de transfert	-Perte de confinement  -Rupture  -Fuite  -Incendie

## III.8. Facteurs de risques extrinsèques

Par facteur extérieur pouvant initier un accident à l'intérieur des installations, on entend notamment :

- Glissement de terrains
- Inondations
- Effondrements
- Foudre
- Activité industrielle autour du site
- Activité humaine autour du site
- Pipelines
- Aéroport
- Lignes hautes tensions

Ces facteurs peuvent être classés selon leur origine, ainsi on distingue : les facteurs d'origine naturelle et les facteurs d'origine humaine.

### **III.9. Résultat de l'analyse préliminaire des risques APR**

L'événement redouté est la première étape de l'accident majeur car il fait intervenir une substance dangereuse et s'il engendre des conséquences graves. Soit :

- Du point de vue de la sécurité, potentiellement causer au moins une fatalité ;
- Du point de vue environnemental, créer une pollution sur site de longue durée ou une pollution hors site remédiée immédiatement.

Lors des sessions d'analyse préliminaire des risques APR, nous positionnons chaque événement étudié sur la grille en cotant le niveau de gravité et le niveau de probabilité d'occurrence de l'évènement. De cette manière, il est possible d'évaluer le risque de manière qualitative et de le classer selon les critères propres à SONATRACH.

Les événements redoutables sont donc déduits du classement dans la grille de criticité du SONATRACH.

Un (01) scénario d'accident majeur a été retenu pour les Turbocompresseurs de la station de compression GR4 (Installations et canalisations de transports) :

Tableau 15: liste des scénarios d'accidents majeurs

Scénario	Systèmes impliqués	Evènement redoutés	Phénomènes de dangereux
Défaillance de Turbine à gaz	- Compresseur 002-K-01	Fuite de gaz	-Perte de confinement et dispersion d'un gaz.  -UVCE
		Surpression interne (défaillance de régulation)	-Explosion interne de la turbine

### III.9.1. Phénomènes dangereux rencontrés

Le principal danger est le rejet de produit inflammable suite à une perte de confinement tel qu'une fuite ou rupture des équipements. Ces pertes de confinement peuvent conduire aux phénomènes dangereux suivants :

#### a. Flash Fire (feu de nuage)

Un flash fire correspond à la combustion d'un nuage de gaz dans une zone non encombrée. Il est considéré comme un évènement retardé sans possibilité d'évacuation. Il génère des effets thermiques mais pas d'effets de surpression. Des effets létaux sont considérés à l'intérieur du nuage enflammé.

#### b. Explosion d'un nuage à l'air libre

L'explosion d'un nuage à l'air libre correspond à l'ignition retardée d'un nuage de gaz dans une zone encombrée et entraînant des effets de surpression.

#### c. Jet enflammé

Un jet enflammé correspond à une ignition instantanée d'une fuite d'hydrocarbures (gouttelettes liquide ou gaz) entraînant des radiations thermiques. Le jet enflammé est considéré comme un évènement sans possibilité d'évacuation.

#### d. Boule de feu

Une boule de feu correspond à la combustion d'un nuage inflammable non dilué pour des rejets de courte durée, c'est-à-dire inférieur à 20 secondes.

Section isolable et leur condition d’opération :

**Tableau 16: Section isolable et leur condition d’opération**

<b>Identifiant</b>	<b>Description</b>	<b>Diamètre Nominal Maximum  mm</b>	<b>Produit</b>	<b>Pression de service  bar</b>	<b>Température de service  °C</b>	<b>Débit maximal de service Kg/s</b>
SI_01_G	Turbocompresseur (TC) TC-01	762	Gaz naturel	58,0	67,0	115,0

Tableau 17: Les paramètres des turbos compresseurs

Identifiant	Description	Diamètre Nominale Maximum mm	Produit	Pression de service barg	Température De service °C	Débit Maximal De service Kg/s	Tailles de fuite (mm)				Orientation Du rejet	Hauteur De rejet m	Indice Sévérité ME
							Petite	Moyenne	Large	Rupture			
SI_01_G	Turbocompresseur (TC)TC-01	762	Gaz  naturel	58,0	67,0	115,0	5	20	65	762	Horizontal	1	6

### III.10. Analyse des scénarios critiques

La finalité de l'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est de sélectionner les scénarios critiques qui feront l'objet d'une Analyse Détaillée des Risques (ADR). Ainsi, les scénarios majeurs identifiés seront réexaminés de façon beaucoup plus précise lors de l'étape ADR.

L'Analyse Détaillée des Risques (ADR) a pour finalité d'étudier de manière détaillée les phénomènes dangereux susceptibles de conduire à un accident majeur, c'est-à-dire ceux dont les effets sont susceptibles de sortir des limites de l'établissement et pour lesquels le niveau de risque du couple Probabilité/Gravité justifie la réalisation d'une analyse complémentaire.

L'objectif est de caractériser plus finement la probabilité d'occurrence, la gravité et la cinétique d'apparition des phénomènes dangereux susceptibles de conduire à un accident majeur.

Les principaux objectifs de la présente partie sont :

- De quantifier la fréquence d'occurrence et l'étendue des distances d'effets des phénomènes dangereux suite à une potentielle perte de confinement sur les installations étudiées ;
- D'évaluer le niveau de risque associé à chacun des phénomènes dangereux identifiés et de s'assurer qu'il est conforme aux critères d'acceptabilité des risques qui sont définis dans la présente étude ;
- Si applicable, identifier les principaux contributeurs au risque global et proposer des solutions pour la réduction du niveau de risque tout en s'assurant de la faisabilité technique et économique.

#### La méthodologie est basée sur les points suivants

- **Récupération des données** : récupérer l'ensemble des données nécessaires à la réalisation de l'étude ;
- **Développement des hypothèses** : définir les hypothèses considérées dans l'étude ;
- **Développement des scénarios** : définir les scénarios à analyser ;
- **Analyse de la fréquence des scénarios** : estimer la fréquence des scénarios analysés ;
- **Analyse des conséquences des scénarios** : estimer les conséquences des scénarios analysés

- **Estimation du risque** : combiner la fréquence et les conséquences des scénarios analysés pour obtenir les niveaux de risque associés et déterminer leur acceptabilité face aux critères d'acceptabilité définis pour l'étude.

### III.11. Principe de la méthodologie « nœud papillon »

La méthode du nœud papillon constitue une approche d'analyse des risques combinant les logiques inductive (identification des causes) et déductive (analyse des conséquences). Elle offre une représentation visuelle claire de la manière dont les mesures de sécurité préviennent la survenue d'un événement redouté et en atténuent les conséquences. La figure ci-après illustre cette démarche, élaborée à l'aide du logiciel **BowTieXP**.

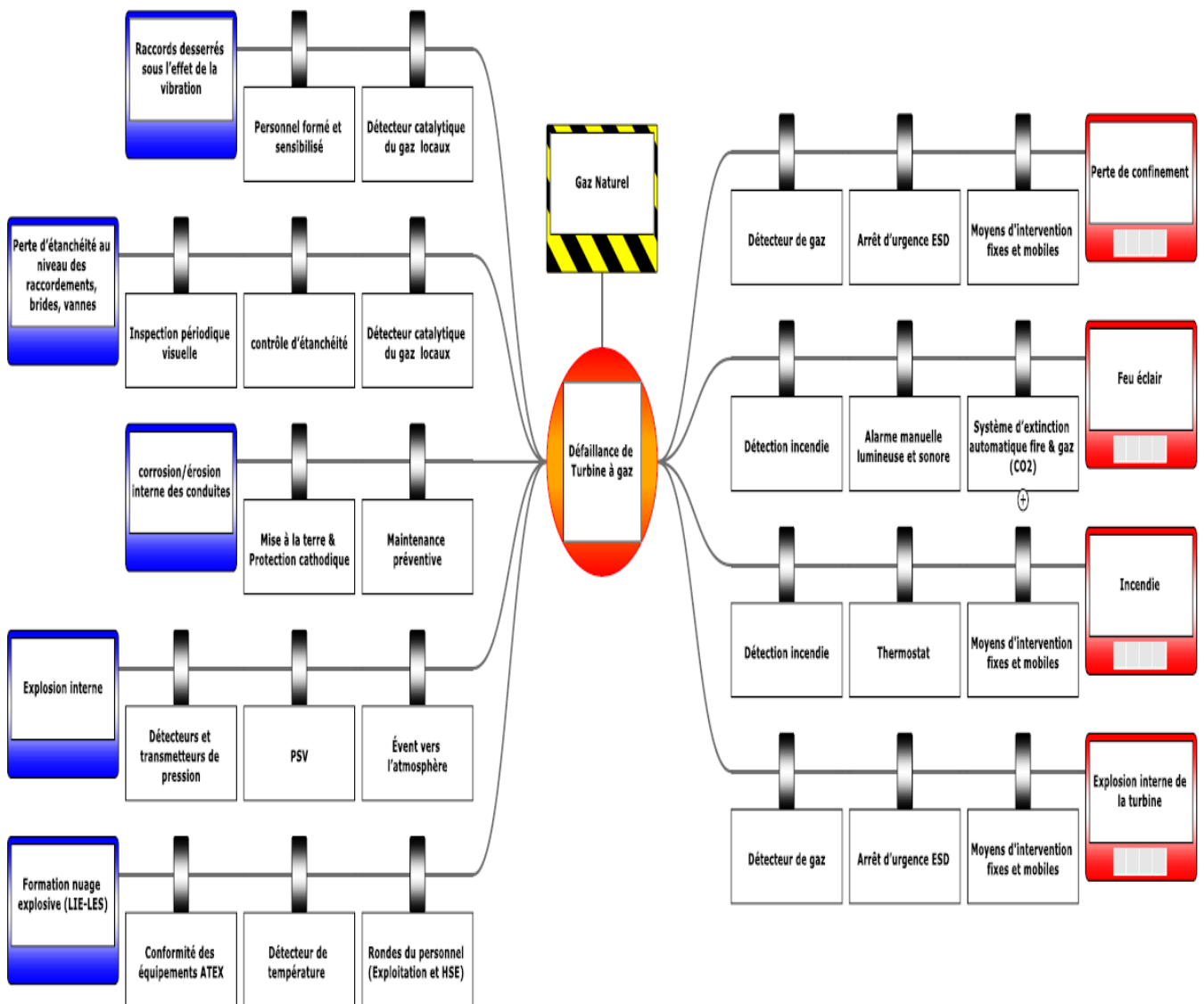


Figure 22: Structure d'un nœud papillon

Le nœud papillon consiste, dans un premier temps, à rechercher, par une construction graphique, toutes les combinaisons d'évènements qui peuvent conduire à l'apparition d'un évènement redouté (i.e. perte de confinement). Puis, dans un second temps, il sert à envisager la mise en place de Mesures de Maitrise de Risque (MMR) s'opposant à la succession des évènements dangereux.

Cette construction graphique est représentée sous la forme d'une double arborescence combinant un arbre de défaillances et un arbre d'évènements (figure 12).

Le premier, correspondant à la partie gauche du nœud papillon, permet d'identifier les causes de l'évènement redouté (dit évènement redouté central (ERC)). L'identification des causes sera essentiellement basée sur les conclusions de l'APR.

Le second, correspondant à la partie droite du nœud papillon (arbre des évènements), permet de déterminer les conséquences de l'ERC.

Dans cette représentation graphique, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine jusqu'à l'apparition d'effets majeurs désigne un scénario d'accident particulier pour un même évènement redouté central.

### **II.11.1. Quantification de la fréquence d'occurrence de l'ERC**

Un comptage des équipements (« parts count ») détaillé est réalisé pour chaque zone à étudier dans le cadre de la présente étude de cas afin de déterminer la fréquence de fuite associée à chacune des zones étudiées.

Le « parts count » détaillé s'appuie sur les informations contenues dans les P&IDs. Chaque équipement (compresseur, canalisation, vanne, bride, piquage...) est comptabilisé.

Les fréquences génériques de fuite associées aux équipements sont estimées à l'aide des données génériques issues des bases de données internationales (IOGP, INERIS).

### **II.11.2. Quantification de la fréquence des phénomènes dangereux**

L'arbre générique ci-dessous est utilisé pour l'analyse des fréquences des phénomènes dangereux pouvant avoir lieu suite à une fuite procédée. Il s'appuie sur les évènements suivants:

- Perte de confinement ;
- Inflammation immédiate ;
- Détection / Isolation
- Inflammation retardée.

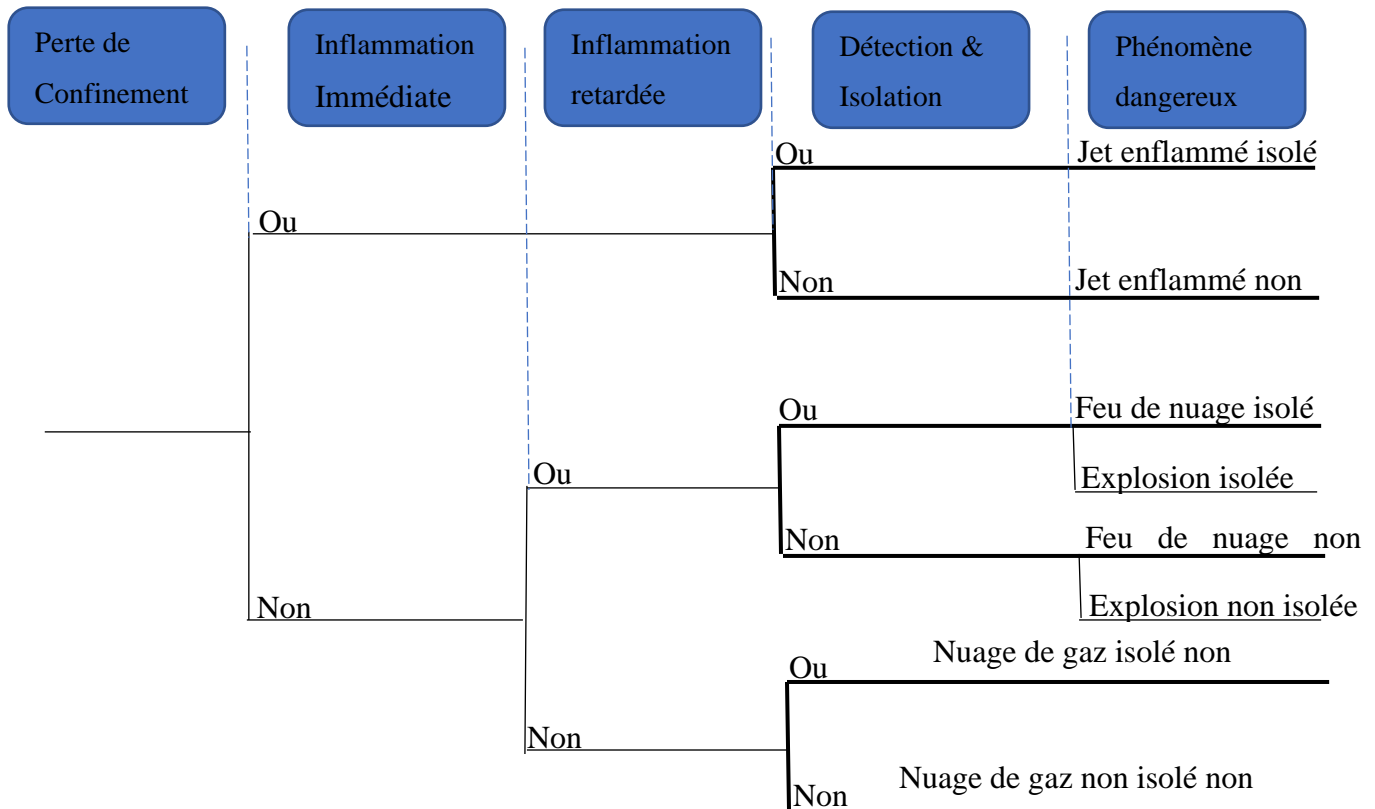


Figure 23: Arbre générique des événements (rejet gazeux)

### II.11.2.1. Probabilité de détection et d'isolation

#### a. Détection :

Compte tenu des différentes tailles de fuite ainsi que des distances d'effets potentielles des différents phénomènes dangereux, les probabilités de détection suivantes sont considérées:

- 50% pour les petites fuites ;
- 80% pour les fuites moyennes ;
- 100% pour les fuites larges et les ruptures.

#### b. Isolation après détection :

L'isolation (i.e. fermeture des vannes ESDV) n'est censée être activée que si le système de détection s'est activé avec succès.

La probabilité globale de défaillance à la demande du système d'isolation est calculée en tenant compte du nombre de vannes ESDV requis pour isoler l'inventaire de la section étudiée. La probabilité globale d'une isolation réussie est donnée par :

$$P \text{ Isolation} = (1 - PFD_{SDV})^{N_{SD}}$$

Avec :

- **P** isolation = probabilité totale d'isolation ;
- **P** FDSDV = probabilité de défaillance à la demande d'une seule ESDV ;
- **N** SDV = Nombre de vannes ESDVs nécessaires pour isoler la section étudiée.

La probabilité de défaillance à la demande d'une vanne (E) SDV PFDSDV est calculée comme suit :

$$PFD_{SDV} \approx \frac{\lambda \cdot \tau}{2}$$

Avec :

- **PFD<sub>SDV</sub>** : probabilité de défaillance à la demande d'une ESDV ;
- **λ**: taux moyen de défaillance d'une ESDV (/heure);
- **τ** : intervalle d'inspection (heures).

### II.11.3. Echelle de fréquence

L'échelle de probabilité qui est utilisée pour la hiérarchisation des phénomènes dangereux est la suivante :

Tableau 18: Échelle d'appréciation de la probabilité des phénomènes dangereux (ADR)

Niveau	Définition	Occurrence
<b>Occasionnel</b>	Qui peut se produire plusieurs fois dans la vie d'une installation.	$> 10^{-2}$
<b>Peu fréquent</b>	Qui peut se produire une fois pour 10 à 20 installations similaires sur 20 à 30 ans de durée de vie.	$10^{-2} - 10^{-3}$
<b>Rare</b>	Une fois par an pour au moins 1000 unités. Une fois sur 20 à 30 ans de durée de vie pour 100 à 200 installations existant dans le monde. Qui s'est déjà produit dans la compagnie mais a fait l'objet de mesures correctives.	$10^{-3} - 10^{-4}$
<b>Extrêmement rare</b>	Qui s'est déjà produit dans l'industrie mais a fait l'objet de mesures correctives.	$10^{-4} - 10^{-5}$

<b>Rarissime</b>	Événement physiquement vraisemblable mais qui ne s'est jamais produit ou seulement quelques fois sur 20 à 30 ans sur un très grand nombre d'installations (>quelques milliers ex : wagons, ballons procédés,).	$< 10^{-5}$

### III.12. Quantification des distances d'effet des phénomènes dangereux

Lorsque le mélange combustible/air qui se disperse rencontre une source d'ignition, plusieurs phénomènes de combustion peuvent se produire, à savoir :

- Le Flash fire ;
- La déflagration ;
- La détonation ;
- Explosion de nuage confinée ou non confinée (UVCE) ;

### III.13. Analyse des fréquences

#### A. Fréquence des fuites

Les fréquences de fuite par section et par taille de fuite sont fournies dans le tableau suivant :

**Tableau 19: Fréquence de fuite**

Zone Fonctionnelle	Fréquence de fuite (par an)				
	Petite	Moyenne	Large	Rupture	Totale
SI_01_G_TC-01	1,67E-04	7,89E-04	1,43E-04	2,88E-05	1,13E-03

#### B. Fréquence des phénomènes dangereux

La fréquence des phénomènes dangereux est établie à l'aide des arbres des événements et selon la méthodologie d'analyse détaillée des risques. Les résultats de ces analyses sont représentés dans le tableau suivant :

### III.14. Analyse des conséquences

Le logiciel de modélisation des conséquences PHAST v9.0.73.0 a été utilisé pour évaluer les conséquences des rejets dans la zone procédée. Ce logiciel est utilisé pour calculer les débits de rejets représentatifs et les conséquences associées.

Les distances d'effets ont été calculées sur la base des débits de rejet moyennés sur les 60 premières secondes et ce, afin d'éviter une surestimation des distances d'effets en utilisant l'approche dite « débit initial ».

Les conséquences immédiates sont fortement dépendantes des débits de fuite calculés. Par conséquent, les scénarios de ruptures guillotines donnent les distances d'effets les plus élevées. Cependant, il convient de rappeler que les fréquences des ruptures guillotines sont très faibles (i.e. 3 % de la fréquence totale de fuite).

Le tableau suivant récapitule les distances d'effets maximales (i.e. quelle que soit la condition de vent étudiée) pour une rupture totale de pipe au niveau de l'entrée de turbocompresseur et pour le scénario jet-fire :

### III.15. Modélisation dynamique

Tableau 20: Distance d'effets maximales (modélisation dynamique)

Seuil	8KW/m <sup>2</sup>	5KW/m <sup>2</sup>	3KW/m <sup>2</sup>	Modélisation en plan CFD
SI_01_G (Rupture total de pipe d'entrée TC)	56m	70m	90m	

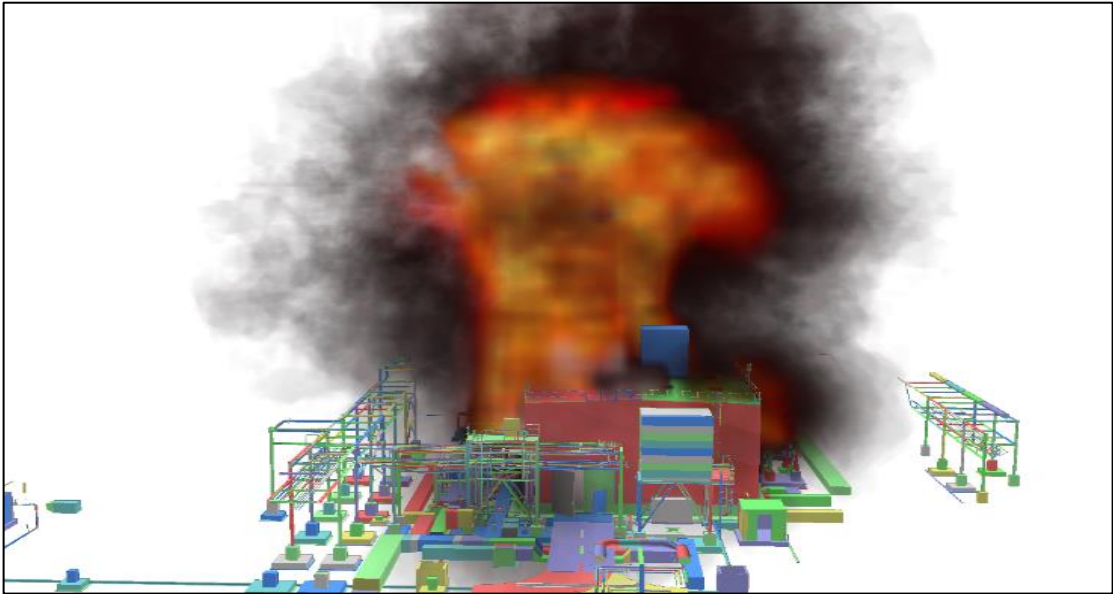


Figure 24: Simulation 3D Feu de torche au niveau de TC Vue de face

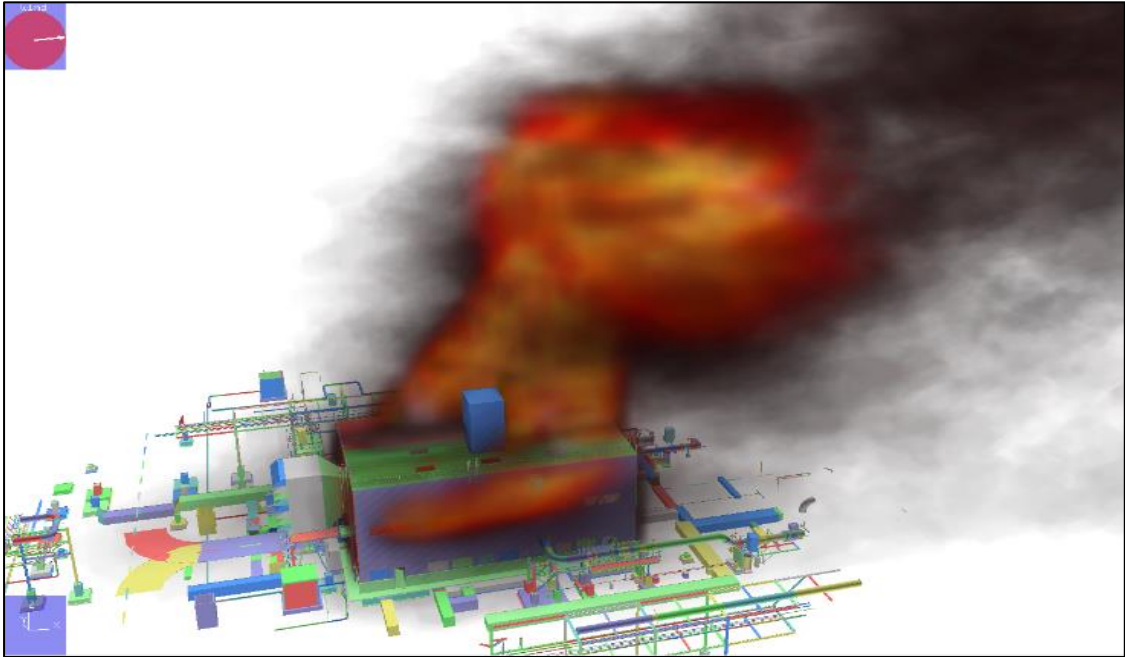


Figure 25: Simulation 3D Feu de torche au niveau de TC Vue de profil

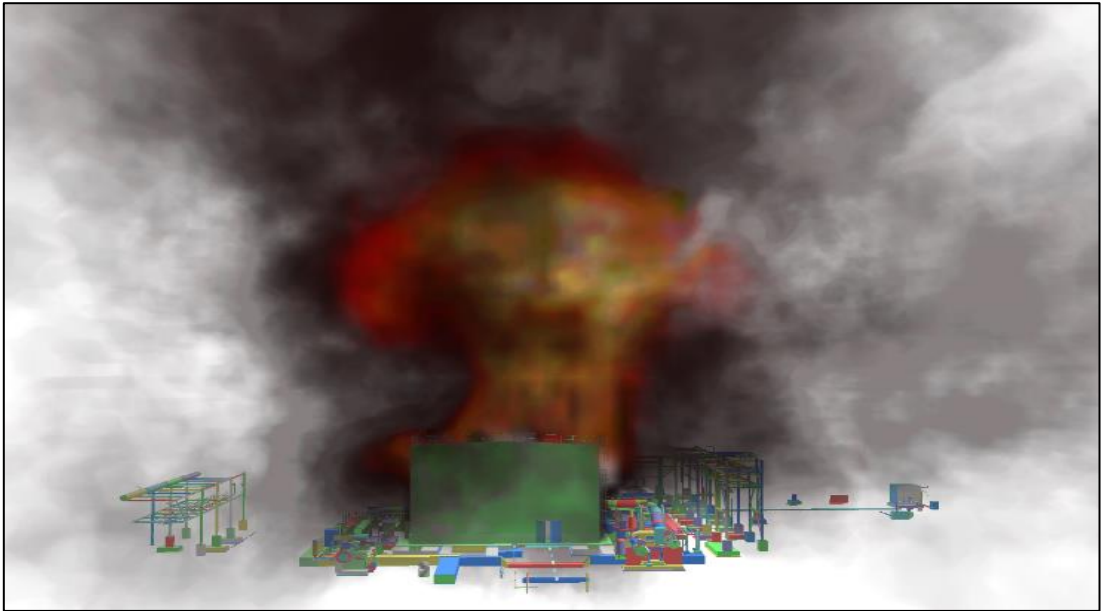


Figure 26: Simulation 3D Feu de torche au niveau de TC Vue arrière

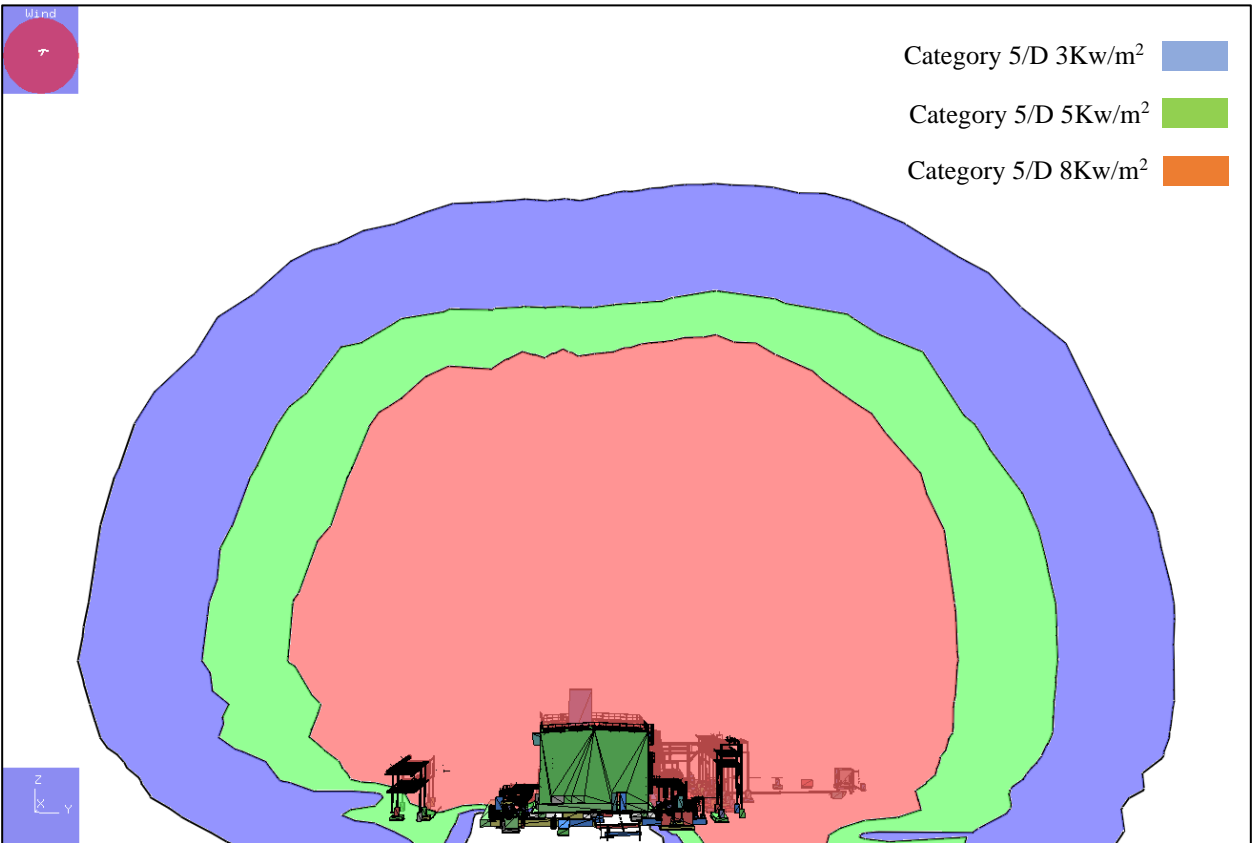


Figure 27: Radiation 3D de Feu de torche au niveau de TC Vue de face

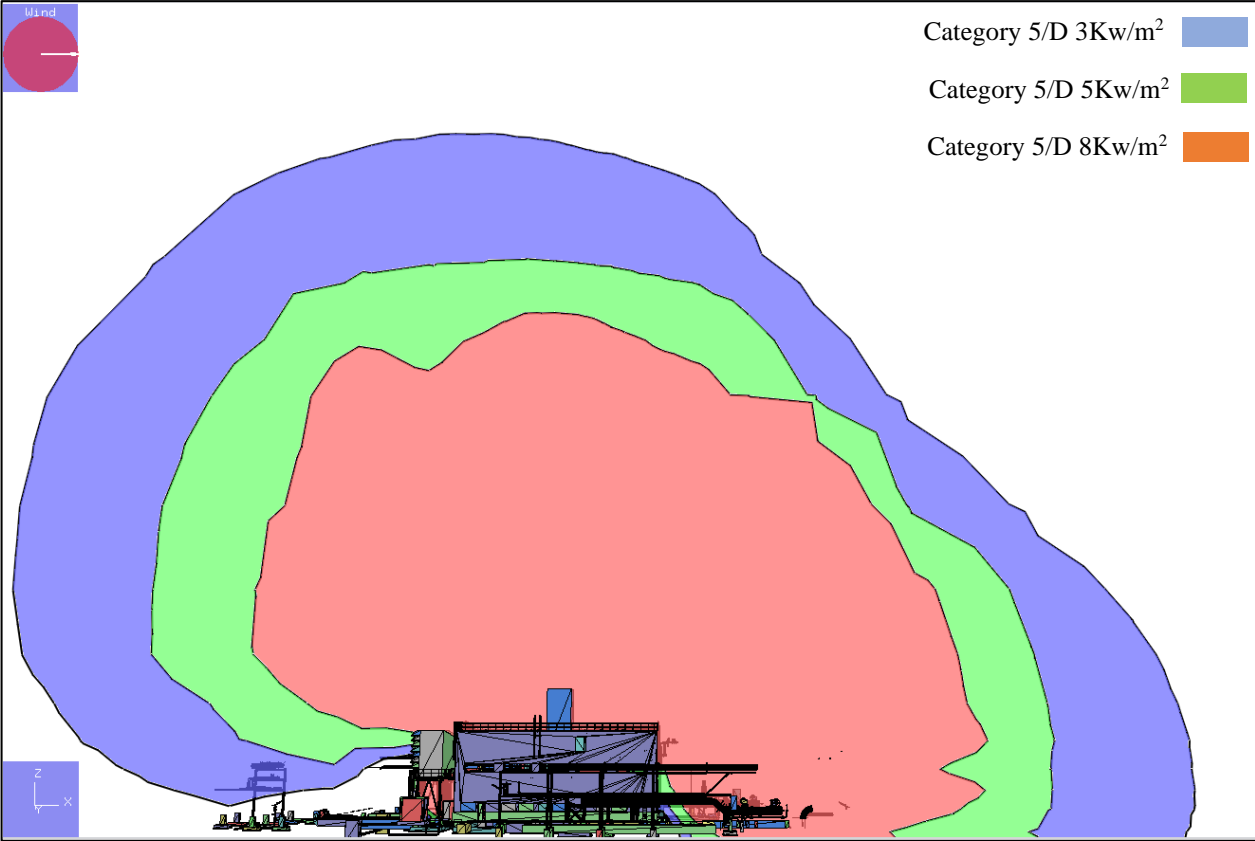


Figure 28 : Radiation 3D de Feu de torche au niveau de TC Vue de profile

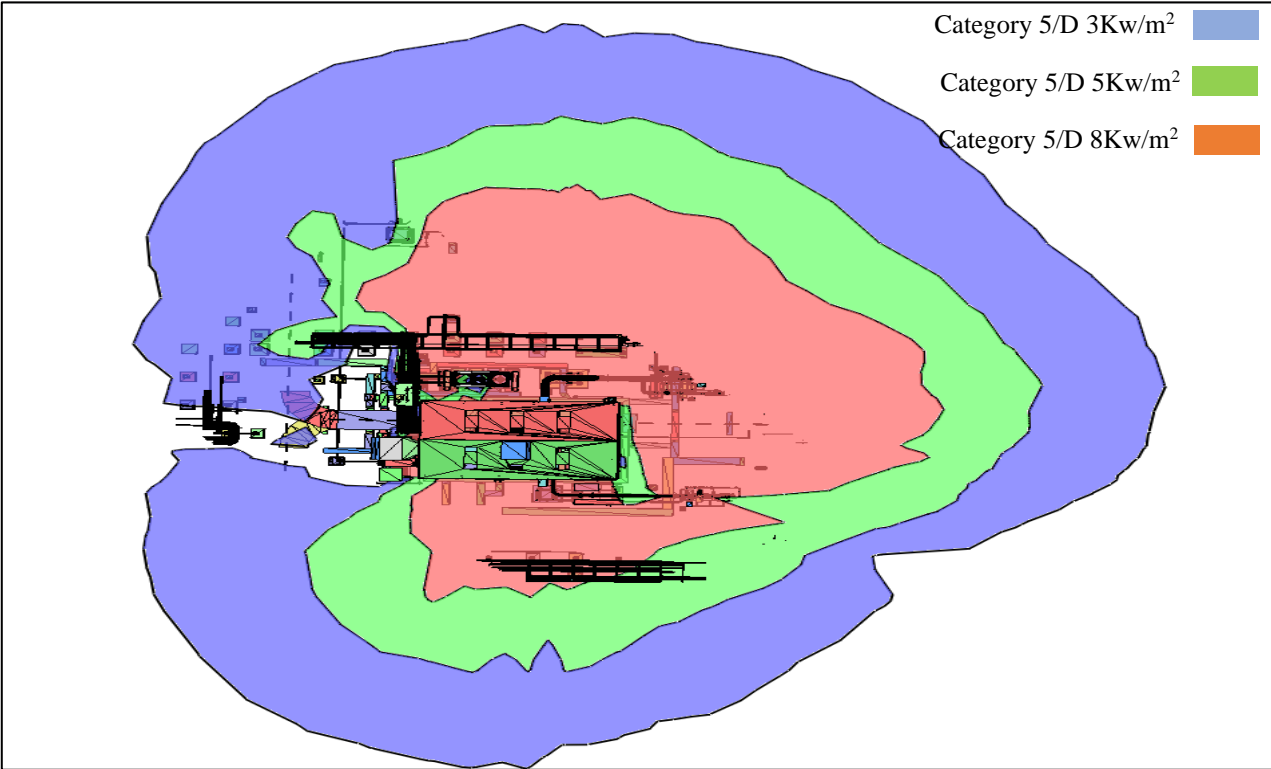


Figure 29: Radiation 3D de Feu de torche au niveau de TC vue de dessus

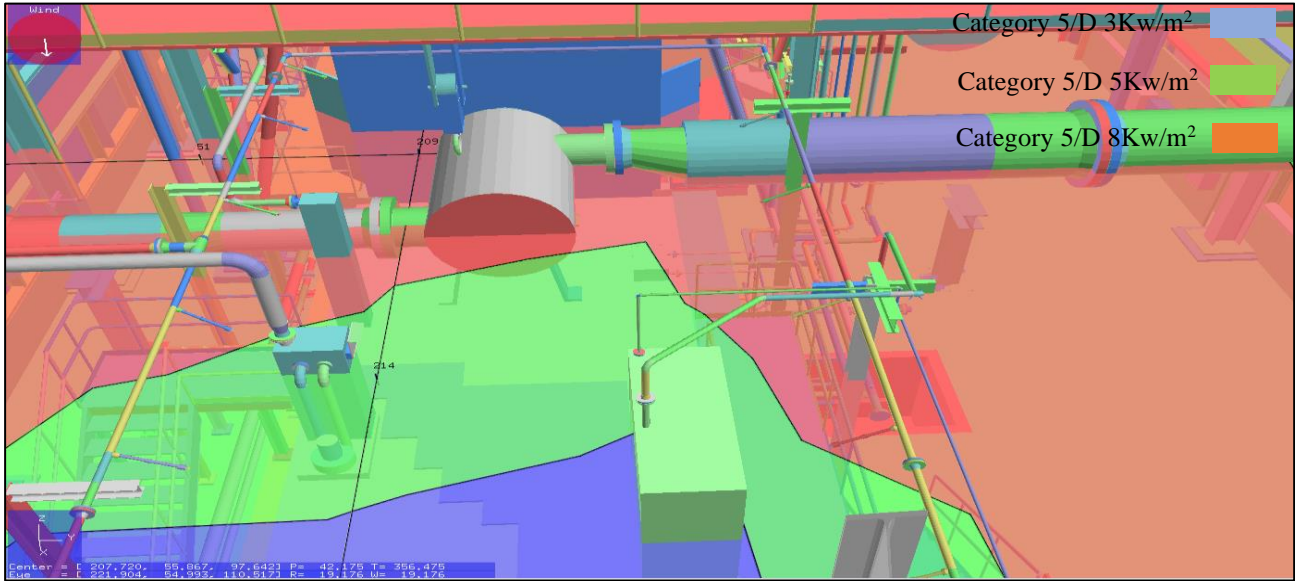


Figure 30: Radiation 3D de Feu de torche au niveau de TC vue de l'intérieure

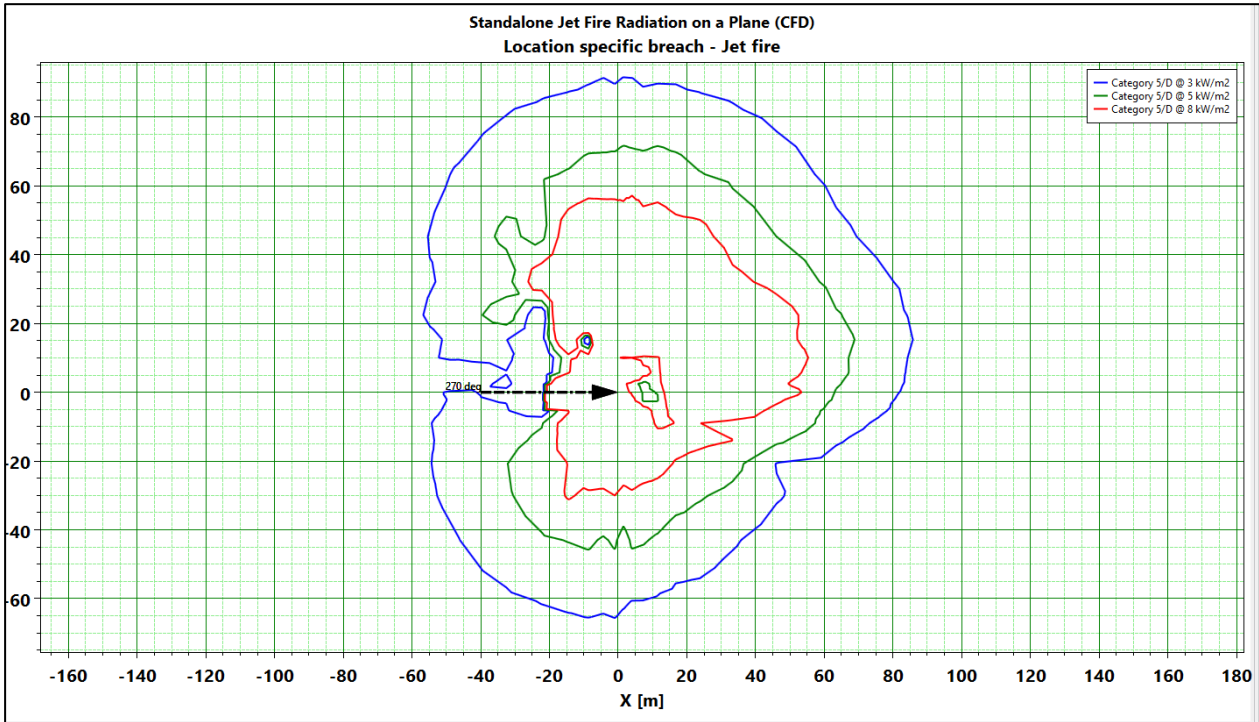


Figure 31: Radiation Vs Distance (Dynamique)

### III.16. Modélisation Classique

Tableau 21: Distance d'effets maximales (Modélisation classique)

Tableau 22Seuil	8KW/m <sup>2</sup>	5KW/m <sup>2</sup>	3KW/m <sup>2</sup>	Modélisation en plan
SI_01_G (Rupture total de pipe d'entrée TC)	185m	225m	280m	

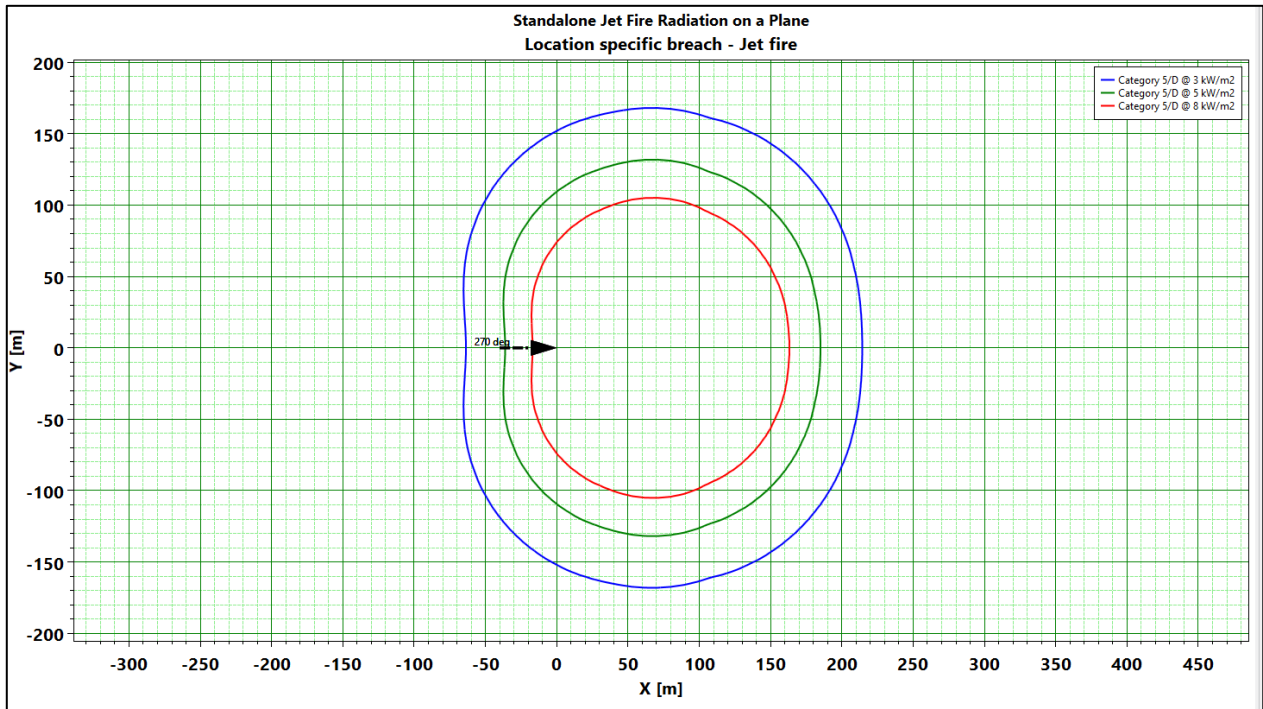


Figure 32: Radiation Vs Distance (Classique)

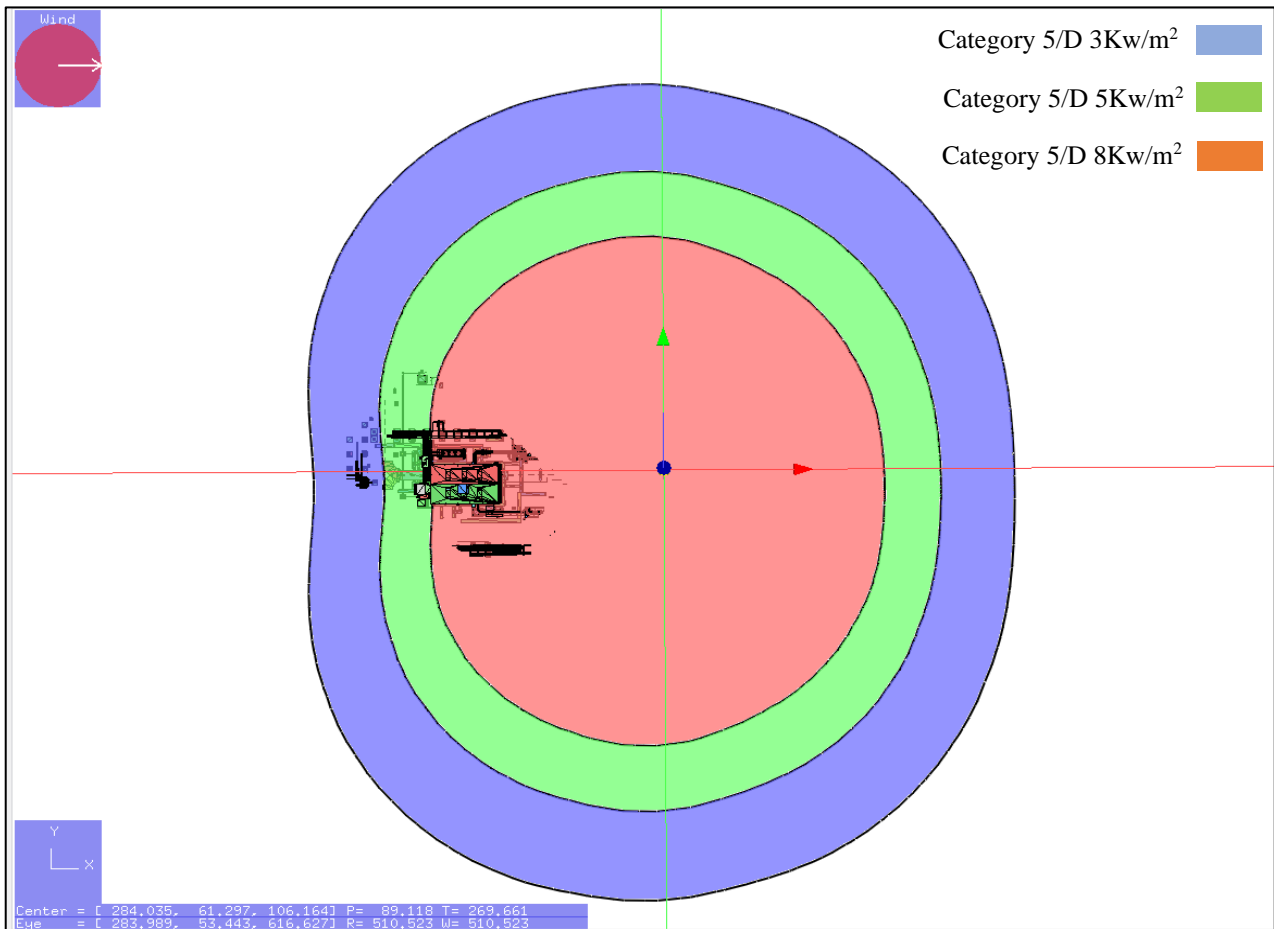


Figure 33: Radiation Vs Distance (Classique) vue de dessus

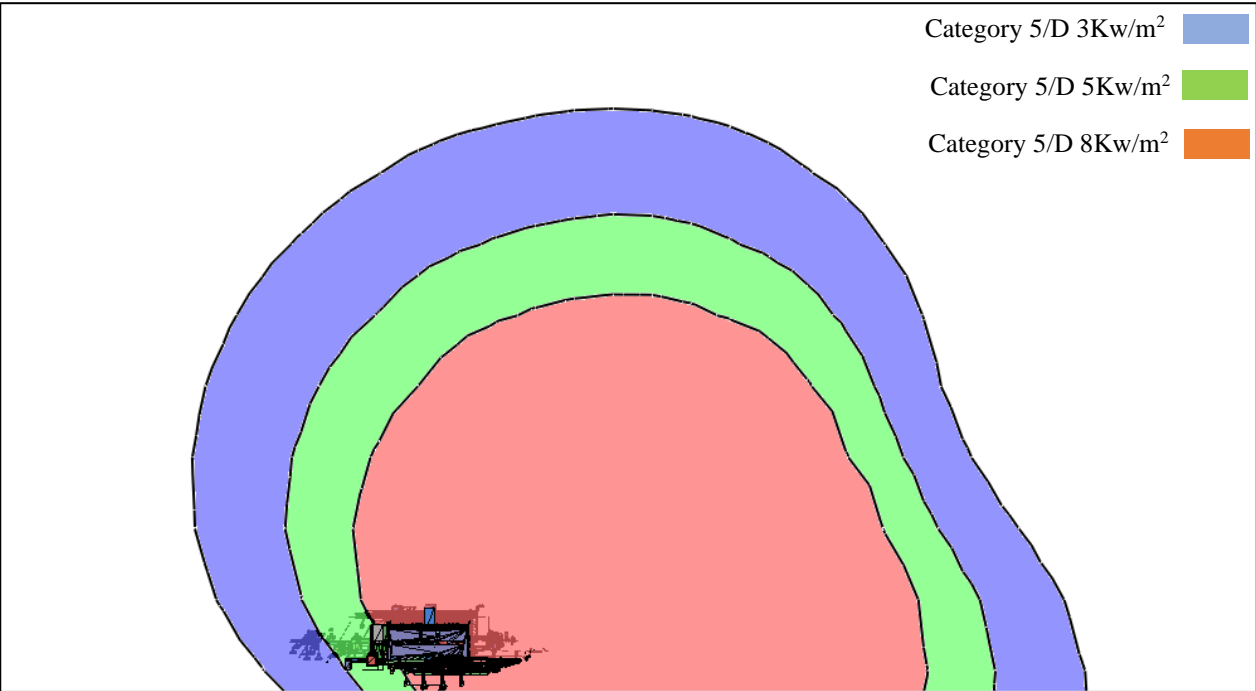


Figure 34: Radiation Vs Distance (Classique) vue de profile

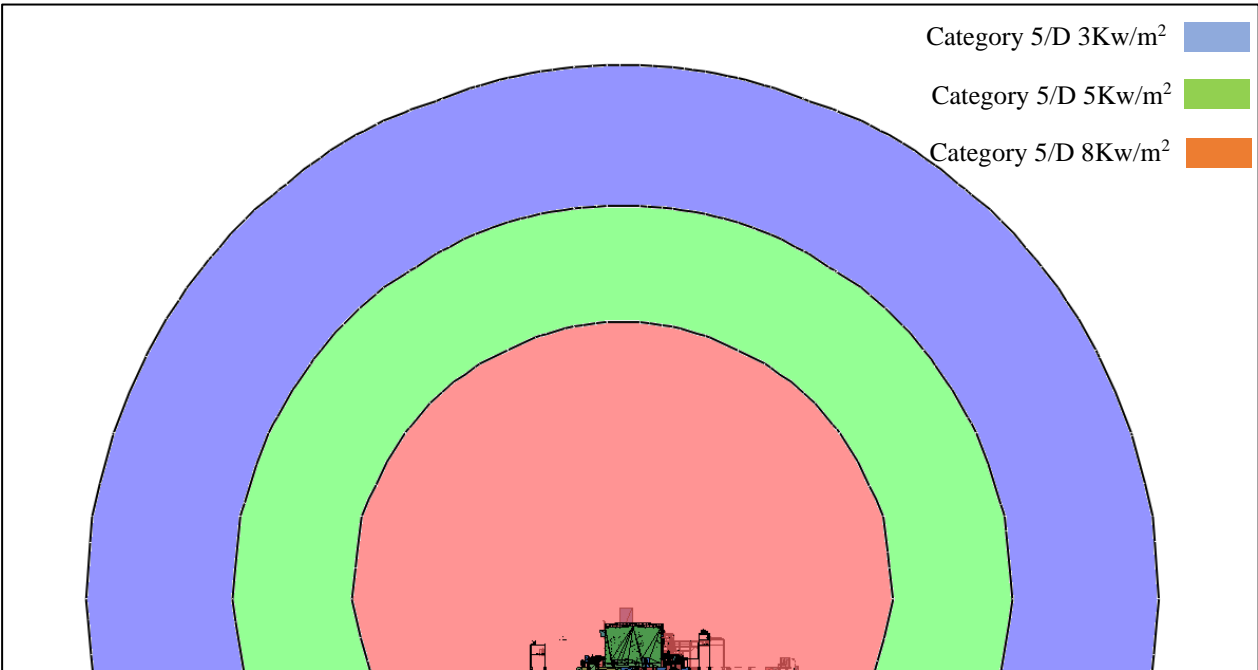


Figure 35: Radiation Vs Distance (Classique) vue de face

Lors de la comparaison entre les résultats de la modélisation dynamique et ceux de la modélisation classique, il a été constaté que la modélisation dynamique offre des résultats plus précis et plus proches de la réalité. Elle permet en outre une visualisation en 3D et en format dynamique, ce qui facilite la communication et la compréhension des risques potentiels, ainsi que le choix de barrières de sécurité fiables pour prévenir les accidents.

### **III.17. Points forts et limites de la modélisation dynamique**

#### **III.17.1. Points forts de la modélisation dynamique :**

La modélisation Dynamique permet de prendre en compte la présence d'obstacles ou de reliefs susceptibles d'avoir une influence sur le comportement de la flamme.

#### **III.17.2. Limites de la modélisation dynamique :**

L'utilisation de la CFD peut toutefois s'avérer coûteuse en temps et en moyens matériel si bien que son usage ne s'applique par toujours au domaine des risques industriels et est souvent réservé à des études particulières.

Par ailleurs, la prise en main de ce type d'outils nécessite du personnel spécialisé et des données complètes et précises sont nécessaires pour la modélisation de la flamme. En outre, la précision des calculs dépend de la méthode de résolution numérique, du type de maillage et de la manière de mise en œuvre des modèles physiques pour la caractérisation de la flamme.

La diversité des outils et des hypothèses à retenir ainsi que l'expertise nécessaire pour la mise en œuvre de ce type d'approche fait que son emploi en est limité réglementairement.

### **III.18. Conclusion**

L'étude menée dans ce chapitre au sein de la Direction Régionale Sonatrach/TRC Hassi R'mel s'est révélée particulièrement enrichissante. Elle nous a permis d'approfondir notre réflexion sur la modélisation des scénarios dangereux ainsi que sur l'élaboration des Études de Danger (EDD).

À travers l'analyse de ce cas concret, nous avons pu constater que la modélisation dynamique offre une approche plus précise, réaliste et efficace que les méthodes classiques. Ces constats ont été formalisés et présentés aux responsables de l'entreprise, dans une démarche visant à proposer des améliorations concrètes aux pratiques actuelles en matière de gestion des risques.

## **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

À travers ce mémoire, nous avons exploré les différentes dimensions de l'analyse et de la modélisation des risques industriels, en mettant l'accent sur les méthodes, les outils et leur application concrète dans un environnement à haut risque, tel que celui de la Direction Régionale HRM/TRC/SONATRACH.

Dans un premier temps, nous avons montré que les méthodes d'analyse des risques, bien qu'elles diffèrent par leurs approches, typologies et formalismes, sont fondamentalement complémentaires. Leur pertinence dépend des objectifs de l'étude, du contexte opérationnel et des outils disponibles pour leur mise en œuvre. Il n'existe pas de méthode universelle, mais plutôt un ensemble de techniques qu'il convient d'adapter intelligemment au cas étudié.

Nous avons ensuite mis en évidence la richesse des outils de modélisation – qu'ils soient graphiques, mathématiques ou logiciels – permettant une représentation rigoureuse et réaliste des scénarios dangereux. L'intégration d'outils comme les réseaux de Petri, les réseaux bayésiens, ou encore les logiciels spécialisés tels que PHAST, ALOHA et FLACS, renforce considérablement la capacité à anticiper les accidents majeurs et à optimiser les réponses de prévention.

Enfin, l'étude de cas menée sur le site de Sonatrach/TRC Hassi R'mel a permis d'illustrer concrètement les bénéfices de la modélisation dynamique dans l'élaboration des Études de Danger (EDD). Cette approche s'est révélée plus précise, plus intelligible et plus efficace que les méthodes classiques, facilitant ainsi la mise en place de barrières de sécurité fiables et adaptées.

En conclusion, la maîtrise des risques industriels repose sur une combinaison judicieuse entre méthodes d'analyse, outils de modélisation et retour d'expérience. La dynamique actuelle vers des approches de plus en plus numériques, intégrant des simulations avancées, constitue une opportunité majeure pour améliorer la sécurité des installations industrielles. Il est donc recommandé que les entreprises, notamment dans les secteurs sensibles comme l'énergie, s'engagent dans cette voie en adoptant des outils modernes et en renforçant la culture de la prévention.

## Bibliographie

[1] INERIS, Quelques grands accidents depuis XXe siècle.

[Online]. <https://www.ineris.fr/fr/risques/est-risque/quelques-grands-accidents-depuis-xxe-siecle>

[2] INERIS, L'étude de danger.

[Online]. <https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/risques-industriels-lies-icpe-prevenir-maitriser-accidents-majeurs-1>

[3] QHSE : Top 10 des méthodes d'analyse des risques.

[Online]. <https://www.causeway.com/fr/insights/qhse-top-10-des-m%C3%A9thodes-danalyse-des-risques>

[4] Analyse de la sécurité de l'emploi.

[Online]. <https://safetyculture.com/fr/listes-de-verification/analyse-de-la-securite-de-lemploi/>

[5] Mohamed-Habib Mazouni, Pour une meilleure approche du management des risques: de la modélisation ontologique du processus accidentel au Système Interactif d'Aide à la Décision, CRAN-INPL-Nancy / ESTAS-INRETS-Arcueil, coll. « Mémoire de Thèse de doctorat », 13 novembre 2008, 217 p.

[Online]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_pr%C3%A9liminaire\\_des\\_risques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_pr%C3%A9liminaire_des_risques)

[6] La méthode 5M.

[Online] <https://www.blog-qhse.com/methode-des-5m-diagramme-dishikawa#:~:text=II%20s'agit%20d'un,%2C%20M%C3%A9thode%2C%20Mati%C3%A8re%2C%20Mat%C3%A9riel.>

[7] Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité.

[Online]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse\\_des\\_modes\\_de\\_d%C3%A9faillance,\\_de\\_leurs\\_effets\\_et\\_de\\_leur\\_criticit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_des_modes_de_d%C3%A9faillance,_de_leurs_effets_et_de_leur_criticit%C3%A9)

[8] HAZOP : Hazard and Operability (analyse de risques et de sécurité de fonctionnement).

[Online]. <https://safetyculture.com/fr/themes/hazop/>

[9] Analyse préliminaire du risque HAZID - DEKRA Process Safety.

[Online]. <https://www.dekra-process-safety.fr/conseil-et-expertise-dekra-process-safety/analyse-preliminaire-du-risque-dekra-process-safety/analyse-preliminaire-du-risque-hazid-dekra-process-safety.html>

[10] SWOT (méthode d'analyse).

[Online]. [https://fr.wikipedia.org/wiki/SWOT\\_\(m%C3%A9thode\\_d%27analyse\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/SWOT_(m%C3%A9thode_d%27analyse))

[11] Définition de logiciel PHAST.

[Online]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Phast>

[12] A. MESSADH « Evaluation Quantitative Des Risques Industriels QRA : Application dans une unité de traitement de gaz naturel » mémoire Master. Ecole National Polytechnique 2016.P12.

[13] Support de cours de l'unité U.F. 2.1 (Master 1 – MHSST/MRI, IHS-Université Batna 2, Généralités sur les méthodes d'analyse des risques.2021

[Online]. [https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/djebabra\\_mebarek/files/generalites\\_sur\\_les\\_methodes\\_dar.pdf](https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/djebabra_mebarek/files/generalites_sur_les_methodes_dar.pdf)

[14] The HAZID process for effective hazard identification.2024

[Online]. <https://www.gexcon.com/blog/the-hazid-process-for-effective-hazard-identification/>

[15] B. DOUMA et al. M. KEBKOUB « L'application de la méthode HAZOP pour L'analyse des risques liés au stockage des hydrocarbures » mémoire de master. Université de MEDEA 2020.

[16] INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569 :  $\Omega 7$  : Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle

[17] Limites et avantages de la méthode d'analyse des risques HAZOP. INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569 :  $\Omega 7$  : Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle

[Online]. [https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport\\_omega\\_7-2.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/rapport_omega_7-2.pdf)

[18] B. DEBRAY, S.C., S. DESCOURIERE, V. TROMMETER, Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle. 2006. 119.

[19] Dr. P.A.M Ujit de Haag et al. dr.B.J.M Ale «Guideline for quantitative risk assessment» Purple book. CPR 18E.2005.

[20] T. MOUSSAOUI « Evaluation Quantitative Des Risques Industriels QRA: Application dans une unité de traitement de gaz naturel » mémoire d'ingénieur d'état. Ecole National Polytechnique 2015.

[21] Réf. : INERIS-DRA-2006-P46055-CL47569 :  $\Omega$  7 : Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle.

[Online]. [Omega 7 - Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle Ineris](#)

[22] Méthode LOPA : principe et exemple d'application : Présentation de la méthode LOPA | Techniques de l'Ingénieur.

[Online]. [Méthode LOPA : principe et exemple d'application : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur](#)

[23] Support de cours de l'unité Barrières de Sécurité (MH2ST96), Mme N. Ouazraoui- 2020, Univ-Batna 2, Institut d'H&S  
[https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/ouazraoui\\_nouara/files/cours\\_lopa-2020.pdf](https://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/ouazraoui_nouara/files/cours_lopa-2020.pdf)

[24] M. BOURCERIE « La modélisation des systèmes de production » Master recherche, Systèmes Dynamiques et Signaux 2011.

[Online]. [https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/master\\_cours\\_petri.pdf](https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/master_cours_petri.pdf)

[25] RESEAU BAYESIEN en modélisation d'utilisateur ' Christophe Gonzales-Pierre-Henri wuillemin'

[Article]. [https://www.persee.fr/doc/stice\\_1265-1338\\_1998\\_num\\_5\\_2\\_1384](https://www.persee.fr/doc/stice_1265-1338_1998_num_5_2_1384)

[26] PHAST Tutorial Manual is published By det norske veritas.

[Online]. <https://fr.scribd.com/doc/97083747/Manual-de-Phast>

[27] A. MESSADH « Modélisation de la dispersion atmosphérique dans le cas de la défaillance d'un ballon de séparation haute pression Cas de SONATRACH DP » mémoire Master. Ecole National Polytechnique 2016.

[Online]. <https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/10399/1/MESSADH.Abdallah.pdf>

[28] Gexcon. (2021). FLACS User Manual. –

[Online] <https://fr.slideshare.net/slideshow/manual-flacs/244911908>

[29] Type de jet fires.

[Online]. <https://www.hse.gov.uk/offshore/strategy/jet.htm> (OTI 92 596)

[30] Journal officiel de l'Union européenne. RÈGLEMENT (CE) No 552/2009 DE LA COMMISSION du 22 juin 2009 modifiant le règlement (CE) no 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), en ce qui concerne l'annexe XVII, 2009.

[Online]. <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:164:0007:0031:fr:PDF>

[31] Arbre de causes.

[Online]. <https://www.editions-tissot.fr/guide/definition/arbre-des-causes>

[32] Définition de la modélisation.

[Online]. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/sciences-modelisation-11321/>

[33] Harel, D. *Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems*, 1987

[Online]. <https://www.state-machine.com/doc/Harel87.pdf>

[34] Etude HAZID Par Otv Veolia

[Online]. <https://www.eib.org/attachments/registers/130369418.pdf>

## عنوان المذكرة: الإسهام في الأساليب الديناميكية لإدارة المخاطر الصناعية: دراسة حالة

المؤطر: حلاس محمد الصديق

الاسم: عطاء الله-حاج عيسى

اللقب: بن مبارك-بن عروس

ملخص:

يركز هذا البحث على تحليل و تقييم المخاطر الصناعية، مع اهتمام خاص بالسيناريوهات الخطرة و الأدوات المستخدمة لمحاكاتها، بعد تقديم مختلف طرق تحليل المخاطر، فمننا بالدراسة الرياضية و البرمجية الرئيسية التي تستخدم لمحاكات الحوادث المحتمل حدوثها، و قد مكنتنا دراسة الحالة التي أجريت على مستوى المديرية الجهوية لنقل الغاز عبر الانابيب/ سوناطراك حاسي الرمل من خلال اظهار نتائج المحاكاة الديناميكية و مقارنتها بنتائج المحاكاة الكلاسيكية أن نستنتج أن المحاكاة الديناميكية أكثر فعالية و أقرب للواقع مما يجعل اعتمادها في دراسات المخاطر أمرا أساسيا للوقاية من الحوادث الكبرى و تحسين فعالية الحواجز و إجراءات السلامة على مستوى المنشآت.

الكلمات المفتاحية: المخاطر الصناعية، النمذجة الديناميكية، السيناريوهات الخطرة، برنامج PHAST

**Titre du mémoire : Contribuent aux méthodes dynamiques pour gérer les risques industriels, étude de cas.**

**Nom : BENMEBAREK-BENAROUS      Prénom : Atallah-HadjAissa      Encadreur : Hellas Mohamed Sedik**

### Résumé :

Ce mémoire porte sur l'analyse et la modélisation des risques industriels, avec un accent particulier sur les scénarios dangereux et les outils utilisés pour leur modélisation. Après avoir présenté les différentes méthodes d'analyse des risques, nous avons étudié les principaux outils graphiques, mathématiques et informatiques permettant de représenter et simuler les accidents potentiels. L'étude de cas réalisée au sein de la Direction Régionale Sonatrach/TRC Hassi R'mel a permis d'illustrer l'efficacité de la modélisation dynamique dans l'élaboration des Études de Danger (EDD). Les résultats obtenus montrent que cette approche est plus réaliste, précise et facile à interpréter que les méthodes classiques, ce qui en fait un outil essentiel pour la prévention des accidents majeurs et l'optimisation des barrières de sécurité.

**Mots clés :** Risques industriels, Modélisation dynamique, Scénarios dangereux, Logiciel PHAST

**Thesis title: Contribution to Dynamic Methods for Managing Industrial Risks: A Case Study**

**Name: BENMEBAREK-BENAROUS      First name: Atallah-HadjAissa      Directed By: Hellas Mohamed Sedik**

### Abstract:

This thesis focuses on the analysis and modeling of industrial risks, with particular emphasis on hazardous scenarios and the tools used to model them. After presenting various risk analysis methods, we explored the main graphical, mathematical, and software-based tools used to represent and simulate potential accidents. A case study conducted within the Regional Directorate of Sonatrach/TRC Hassi R'mel demonstrated the effectiveness of dynamic modeling in developing Hazard Studies (EDD). The results show that this approach is more realistic, accurate, and easier to interpret than traditional methods, making it a valuable tool for preventing major accidents and optimizing safety barriers

**Keywords:** Industrial risks, Dynamic modeling, Hazardous scenarios, PHAST software